

Original article

Lu-177 Dotatate SPECT/CT 검사에서 재구성 조건 변화에 따른 영상 질 평가에 관한 연구

박철홍, 김태현, 고현수
서울아산병원 핵의학과

A Study on the Evaluation of Image Quality According to Changes in Reconstruction Parameters in Lu-177 Dotatate SPECT/CT Imaging

Cheolhong Park, Taeheon Kim, and Hyunsoo Ko
Department of Nuclear Medicine, Asan Medical Center, Seoul, Korea

Corresponding author: Cheolhong Park. Department of Nuclear Medicine, Asan Medical Center, Olympic-ro 43-gil, Songpa-gu, Seoul, 05505, Republic of Korea. Tel: +82-2-3010-4604, E-mail: cheolhong94@naver.com

ABSTRACT

Purpose: Lu-177 Dotatate SPECT/CT imaging is important for diagnosing and monitoring neuroendocrine tumors. While reconstruction protocols are well-established for scans like Tc-99m and I-131 SPECT/CT, standardized reconstruction conditions for Lu-177 Dotatate remain limited. This study aimed to determine optimal reconstruction tendencies by analyzing phantom and clinical data using different combinations of Iteration (I), Subset (S), and Gaussian Filter (GF). Image quality was assessed using standardized uptake value (SUV), contrast, and qualitative visual evaluation. **Materials and Methods:** Phantom and clinical images were acquired using a Symbia Intevo 16 system with MELP collimator. ACR PET phantom was prepared at a 200 mCi Dose A level. Clinical data were collected from 10 patients who underwent Lu-177 Dotatate therapy under identical acquisition conditions. SUV and contrast were measured using VOIs; phantom analysis used a 25 mm cylinder, and clinical analysis used identifiable tumors. Twenty-seven reconstruction settings were evaluated ($3\text{ I} \times 3\text{ S} \times 3\text{ GF}$ combinations), and images were ranked based on SUVmax and contrast. Pearson correlation and Friedman tests with post hoc analysis were used to analyze data. **Results:** Increasing GF while keeping I and S constant led to decreased SUVmax. Increasing S with fixed I and GF resulted in higher SUVmax, although this effect diminished at GF=16. Similarly, increasing I with constant S and GF led to higher SUVmax, but gains were minimal at higher GF. The results for contrast indicated a decreasing trend as a higher GF was applied. Rankings of phantom and patient images based on SUVmax and contrast showed consistent top-performing conditions across both datasets. The rankings of the phantom data images and the clinical patient data based on SUVmax and contrast conditions showed that the top 40% of ranked conditions were consistent between the two datasets. Pearson correlation revealed a strong correlation in SUVmax ($r=0.937$) and a strong correlation in contrast ($r=0.692$) between phantom and patient data. Friedman analysis showed that two conditions (I16/S1/GF16 and I16/S2/GF16) had significantly lower SUVmax values compared to others ($p<0.05$), while the remaining 25 conditions did not differ significantly ($p>0.05$). **Conclusion:** In this study, quantitative and qualitative evaluations of Lu-177 Dotatate SPECT/CT images were performed using various reconstruction conditions based on both phantom and clinical patient data. The analysis of SUV_{max} and contrast revealed numerical trends depending on the variation of Iteration, Subset, and Gaussian Filter, and a strong correlation was observed between the phantom and clinical data. Statistically significant differences were confirmed for certain conditions based on SUV_{max},

and appropriate reconstruction settings were selected through qualitative assessment by nuclear medicine physicians. Currently, our institution has adopted two reconstruction conditions, I16/S4/GF0 and I24/S2/GF8, based on the results of this study for clinical image provision, and these settings have demonstrated stable performance in terms of image quality and interpretability.

Key words: Lu-177 Dotatate SPECT/CT, Reconstruction Parameter, Iteration, Subset, Gaussian Filter, SUV

서론

최근 핵의학 분야에서 테라노스틱스(Theranostics)에 관한 관심이 높아지고 있다. 테라노스틱스는 치료(Therapy)와 진단(Diagnosis, Diagnostics)의 합성어로 동일한 표적 분자를 사용해 치료 및 진단적 방사성동위원소 요법을 시행하는 것을 의미한다[1]. 테라노스틱스에 사용되는 방사성의약품의 일종인 Lu-177은 γ 선, β 선을 모두 방출할 수 있고 높은 안정성으로 큰 주목을 받고 있으며, 신경내분비종양(NeuroEndocrine Tumor, NET)의 진단 및 치료에 이용되는 핵종이다[2,3]. 신경내분비종양은 최근 초기 진단이 가능해지면서 발병률과 유병률이 증가하고 있는 희귀 악성 종양이며 다양한 기관에서 발생하고 성장 패턴이 다양하다. 일부 종양은 성장이 느리고 증상이 거의 없는 반면, 다른 종양은 빠르게 성장하며 심각한 증상을 유발할 수 있다. 신경내분비종양의 치료제인 Lu-177 Dotatate는 신경내분비종양이 분비하는 소마토스타틴 수용체에 단단히 결합하는 성질을 가진 Dotatate를 Lu-177 핵종에 표지하여 암세포의 사멸과 동시에 영상화가 가능한 치료제이다[4]. Lu-177 Dotatate SPECT/CT(Single Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography) 영상은 신경내분비 종양의 진단 및 치료 모니터링에 있어 중요한 역할을 한다. 따라서 질적으로 우수한 영상 제공은 환자의 진단 및 치료 계획을 결정하는데 필수적이다. 일반적으로 핵의학과에서 많은 비중을 차지하고 있는 Tc-99m Bone SPECT/CT, I-131 SPECT/CT 등의 검사 방법은 장비 사에서 권고하는 재구성 조건의 기준이 있고 이미 다른 선행 연구에서도 많이 제시되었지만[5], Lu-177 Dotatate SPECT/CT는 현재까지 뚜렷한 기준이 없다. 현재 핵의학 분야에서는 OSEM(Ordered Subset Expectation Maximization)과 같은 고속 영상 재구성 알고리즘이 널리 이용되고 있으며[6,7], 재구성 조건(Iteration, Subset, Gaussian Filter)[8,9]이 영상의 정량적 평가(Quantitative analysis) 및 정성적 평가(Qualitative analysis)에 상당한 영향을 미친다. 이 연구에서는 Lu-177 Dotatate SPECT/CT의 팬텀 데이터와 임상환자 데이터를 사용하여 반복 횟수(Iteration), 부분집합(Subset), 가우시안 필터(Gaussian Filter)등의 다양한 재구성 조건 변화를 통해 다양한 영상을 획득하고, 영상 평가의 지표가 될 수 있는 표준섭취계수(Standardized Uptake Value; SUV)와 대조도(Contrast) 분석을 통해 최적의 재구성 조건을 찾아보고자 하였다.

실험 대상 및 방법

1. 실험 장비 및 영상 획득 조건

Symbia Intevo 16(Siemens Healthineers, Erlangen, Germany), 중에너지 저투과 콜리메이터(Medium Energy Low-Penetration, MELP)를 이용하였다. SPECT/CT 영상 획득 조건은 다음과 같다(Table 1).

Table 1. SPECT/CT Acquisition Parameter

Energy peak & window	20 % window centered at 208 keV/Lower & Upper Scatter : 10 %
Mode	Step & Shoot
Zoom factor	1
Time per view	11 sec
Number of views	64
Degrees of rotation	180
Matrix	128 x 128

2. 팬텀 영상 획득

미국 의료 품질 인정기관(American College of Radiology, ACR)양전자 방출 단층 촬영(Positron Emission Tomography, PET)Hot Cylinder Phantom을 제작하여 데이터 획득에 사용하였다. ACR에서 권고하는 비율의 A dose(Hot cylinder), B dose(Background)를 준수하였고, 실제 환자 치료에 사용하는 200mCi의 기준에서 제작을 진행하였다. 본원에서는 임상에 용의한 적용을 위해 SUV 목표치를 5.0으로 설정하였다. ACR 기준에 따라 제작된 팬텀의 SUV는 약 2.5로 나타날 수 있으며, 이를 두배인 5.0으로 증가시키기 위해 A dose를 두 배로 설정하였다(Table 2). 1000ml의 Normal saline에 A dose(14mCi)를 섞어 부피가 각각 다른 4개의 Cylinder(직경 25mm, 16mm, 12mm, 8mm)에 주입하였다(Fig.1). 팬텀은 200 mCi 기준으로 제작되었으며, 이는 ACR에서 권장하는 20 mCi의 A dose와 B dose 기준표를 10배로 증대시킨 값에 해당한다. A dose(Hot cylinder) : 14 mCi/B dose(Background) : 16.5 mCi

Table 2. PET Phantom Instructions(ACR)[10]

Patient Dose	Phantom Dose Chart	
	Dose A(mCi)	Dose B(mCi)
4 mCi	0.14	0.33
6 mCi	0.21	0.50
8 mCi	0.28	0.66
10 mCi	0.35	0.83
12 mCi	0.42	0.99
14 mCi	0.49	1.15
16 mCi	0.56	1.32
18 mCi	0.63	1.48
20 mCi	0.70	1.65

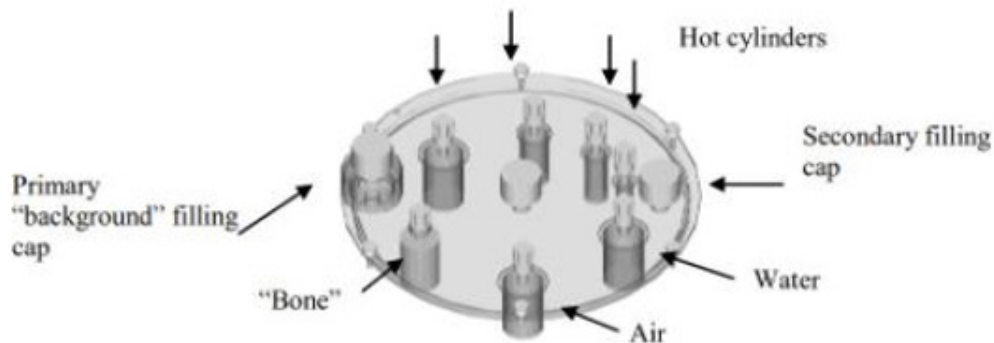


Fig. 1. It is a schematic diagram of PET Phantom viewed from above.

3. 임상 환자 영상 획득

실제 10명의 Lu-177 Dotatate 치료를 진행한 임상 환자를 대상으로 앞서 기술된 ACR Phantom 영상 획득 조건과 동일하게 획득하였다.

4. 재구성 조건

재구성에 적용시킬 수 있는 조건에는 크게 반복횟수(Iteration), 부분집합(Subset) Gaussian Filter 3가지가 있다. 실험에 설정한 수치는 다음과 같다(Table 3). 총 27 가지 조건을 비교하였다.

Table 3. Setting Reconstruction Parameter

반복횟수(Iteration)	16, 24, 48
부분집합(Subset)	1, 2, 4
Gaussian Filter	0, 8, 16

5. 영상 분석

동일한 조건에서 획득된 데이터를 각각 다른 조건으로 재구성된 데이터에서 SUV와 대조도를 측정한다. 이를 통해 재구성 조건에 따른 SUV와 대조도의 추이를 분석한다.

5.1 SUV 측정

SUV는 Syngo.via Client 8.11(Siemens)를 이용하여 반경(radius) 10mm의 VOI(Volume Of Interest)를 설정하여 SUV_{max}, SUV_{peak}, SUV_{mean}, SUV_{SD}를 측정하였다(Fig.2).

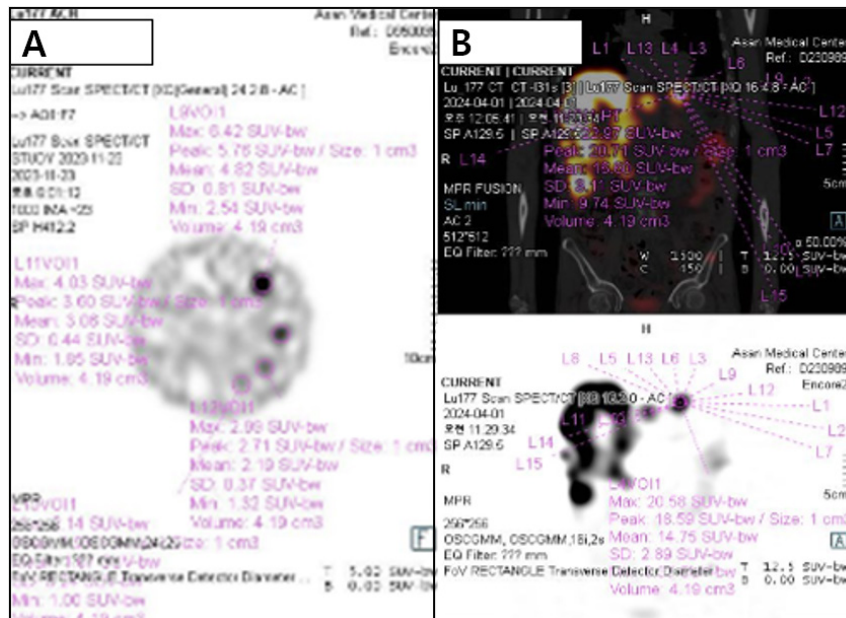


Fig. 2. SUV_{max}, SUV_{peak}, SUV_{mean} and SUV_{SD} of Phantom(A) and Clinical Patient(B) were measured using Syngo.via.

5.2 대조도 측정

Siemens MI application VB20B을 이용하여 팬텀과 임상 환자의 AVG Bq/ml를 관상면에서 측정한다. 팬텀은 25mm Cylinder와 BKG, 임상환자는 종양이 육안으로 가장 식별이 잘되는 곳과 종양 주변의 BKG의 AVG Bq/ml를 측정하였다(Fig.3). 대조도는 아래의 식을 이용하여 값을 도출하였다(Eq.1).

$$\text{Contrast} = \frac{\text{Lesion(Bq/ml)} - \text{BKG(Bq/ml)}}{\text{Lesion(Bq/ml)}} \quad \text{Eq. 1}$$

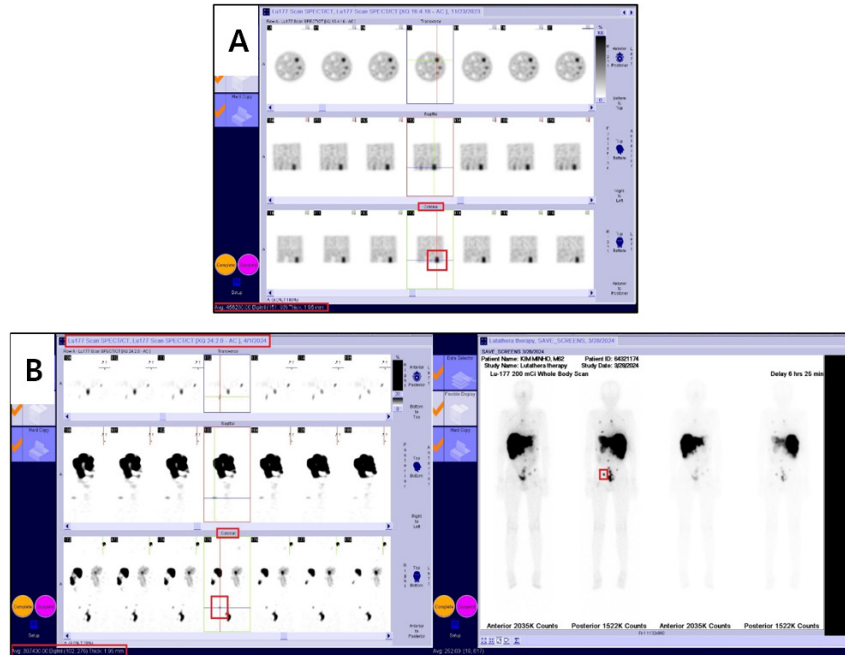


Fig. 3. Bq/mL of Phantom(A) and Clinical Patient(B) were measured using Siemens MI application.

5.3 재구성 조건 별 영상 질 비교

반복 횟수, 부분집합, Gaussian Filter의 세 가지 재구성 요소 중 하나를 고정한 상태에서 나머지 두 조건을 변화시켜, 각 조건별로 환자 데이터와 팬텀 데이터를 비교 분석하였다. 이때, 고정된 조건별로 9개의 영상이 생성되었으며, 총 3개의 그룹으로 나누어 총 27개의 영상 데이터를 비교 분석하였다.

5.4 SUV_{max}, 대조도 비교 분석

각 재구성 조건 별 영상의 질적 비교를 위하여 팬텀 영상과 임상 환자의 영상에서 SUV_{max}와 대조도를 각각 내림차순으로 순위를 부여하였다. 팬텀 데이터는 임상 환자의 데이터와 비교하여 실제 분석의 대상이 되는 병변의 크기와 유사한 25mm Cylinder의 SUV_{max}와 대조도를 비교대상으로 설정하였다. SUV_{max}와 대조도가 높은 조건을 비교할 수 있도록 조건 별 SUV_{max}의 순위와 대조도 순위의 평균 값(Eq.2)을 구하여 오름차순으로 정리하였다.

$$Ranks_{SUVmaxContrast} = (Ranks_{SUVmax} + Rank_{Contrast})/2 \quad \text{Eq. 2}$$

6. 통계분석

팬텀 데이터와 임상 환자 데이터 간의 상관관계를 분석하기 위해 각각의 데이터의 정규성 검증을 진행하였고, SPSS ver. 21(IBM company, USA)을 이용하여 피어슨 상관분석을 사용하여 팬텀 데이터와 임상 환자 데이터 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 10명의 임상 환자 데이터에서 각 재구성 조건별 차이를 비교하기 위해 Friedman Test 및 사후 검증을 시행하였다.

결과

1. 팬텀 분석

1.1 SUV

ACR Phantom 실험 결과 SUV_{max} , SUV_{peak} , SUV_{mean} , SUV_{SD} 결과는 아래의 표(Table 4) 및 그림(Fig. 4, 5, 6)과 같다.

Table 4. The value of Phantom SUV_{max} , SUV_{peak} , SUV_{mean} , SUV_{SD}

I/S/F	25mm_Cylinder			16mm_Cylinder			12mm_Cylinder			8mm_Cylinder			BKG
	SUV_{max}	SUV_{peak}	SD	SUV_{max}	SUV_{peak}	SD	SUV_{max}	SUV_{peak}	SD	SUV_{max}	SUV_{peak}	SD	SUV_{mean}
16.1.0	5.70	5.25	0.87	3.10	2.87	0.38	2.16	2.03	0.19	1.51	1.43	0.09	0.91
16.1.8	5.08	4.79	0.54	2.79	2.65	0.25	1.99	1.91	0.15	1.41	1.36	0.07	0.88
16.1.16	4.00	3.80	0.36	2.31	2.23	0.21	1.71	1.66	0.1	1.30	1.28	0.04	0.95
16.2.0	7.13	6.37	0.83	4.35	3.86	0.54	3.10	2.74	0.39	2.17	1.96	0.23	0.94
16.2.8	6.08	5.51	0.71	3.68	3.33	0.44	2.63	2.43	0.29	1.89	1.75	0.17	0.93
16.2.16	4.39	4.14	0.41	2.64	2.51	0.27	2.02	1.93	0.16	1.49	1.44	0.09	0.93
16.4.0	7.77	6.93	1.06	4.99	4.36	0.72	4.11	3.45	0.69	2.73	2.39	0.38	1.05
16.4.8	6.58	5.90	0.80	4.12	3.65	0.57	3.38	3.05	0.4	2.29	2.08	0.3	1.06
16.4.16	4.52	4.24	0.37	2.76	2.60	0.27	2.31	2.17	0.18	1.67	1.59	0.13	1.01
24.1.0	6.05	5.54	0.66	3.39	3.10	0.35	2.41	2.21	0.25	1.65	1.54	0.12	0.97
24.1.8	5.33	4.96	0.57	3.00	2.79	0.26	2.16	2.05	0.21	1.50	1.43	0.09	0.99
24.1.16	4.11	3.90	0.39	2.40	2.30	0.18	1.79	1.73	0.12	1.32	1.30	0.05	0.99
24.2.0	7.62	6.75	1.07	4.86	4.25	0.61	3.63	3.14	0.52	2.52	2.23	0.31	1.08
24.2.8	6.42	5.76	0.83	4.03	3.60	0.44	2.99	2.70	0.37	2.13	1.96	0.26	1.09
24.2.16	4.47	4.20	0.44	2.74	2.58	0.22	2.17	2.06	1.75	1.60	1.53	0.11	1.06
24.4.0	8.16	7.27	1.14	5.59	4.75	0.78	4.62	3.76	0.84	2.98	2.55	0.76	1.16
24.4.8	6.88	6.14	0.85	4.47	3.92	0.54	3.52	3.08	0.55	2.42	2.17	0.35	1.11
24.4.16	4.62	4.32	0.47	2.87	2.67	0.24	2.32	2.15	0.23	1.67	1.58	0.15	1.05
48.1.0	6.68	6.05	0.78	3.92	3.53	0.42	2.92	2.60	0.36	1.95	1.77	0.17	0.95
48.1.8	5.80	5.30	0.80	3.38	3.10	0.34	2.50	2.32	0.27	1.72	1.61	0.15	0.97
48.1.16	4.29	4.05	0.41	2.55	2.43	0.2	1.95	1.87	0.15	1.39	1.35	0.07	0.97
48.2.0	8.34	7.33	1.22	5.68	4.85	0.84	4.44	3.68	0.77	3.08	2.65	0.49	1.04
48.2.8	6.92	6.14	0.84	4.55	3.98	0.62	3.46	3.05	0.48	2.52	2.27	0.29	1.02
48.2.16	4.60	4.30	0.49	2.88	2.68	0.26	2.31	2.17	0.22	1.76	1.66	0.15	1.03
48.4.0	8.81	7.67	1.37	6.81	5.45	1.16	5.58	4.29	1.25	3.60	2.97	0.62	1.08
48.4.8	7.23	6.40	0.97	5.04	4.27	0.76	3.96	3.33	0.78	2.78	2.41	0.39	1.07
48.4.16	4.70	4.38	0.51	2.97	2.75	0.29	2.38	2.21	0.25	1.77	1.66	0.15	1.02

*Iteration(I)/Subset(S)/Gaussian Filter(GF)

BKG SUV_{mean} 은 Target이 $1.0 \pm 10\%$ 으로 설정되어 있어 27가지의 조건 중 I16/S1/GF8, I24/S4/GF0, I24/S4/GF8을 제외한 24개의 조건에서 적합한 것으로 나타났다.

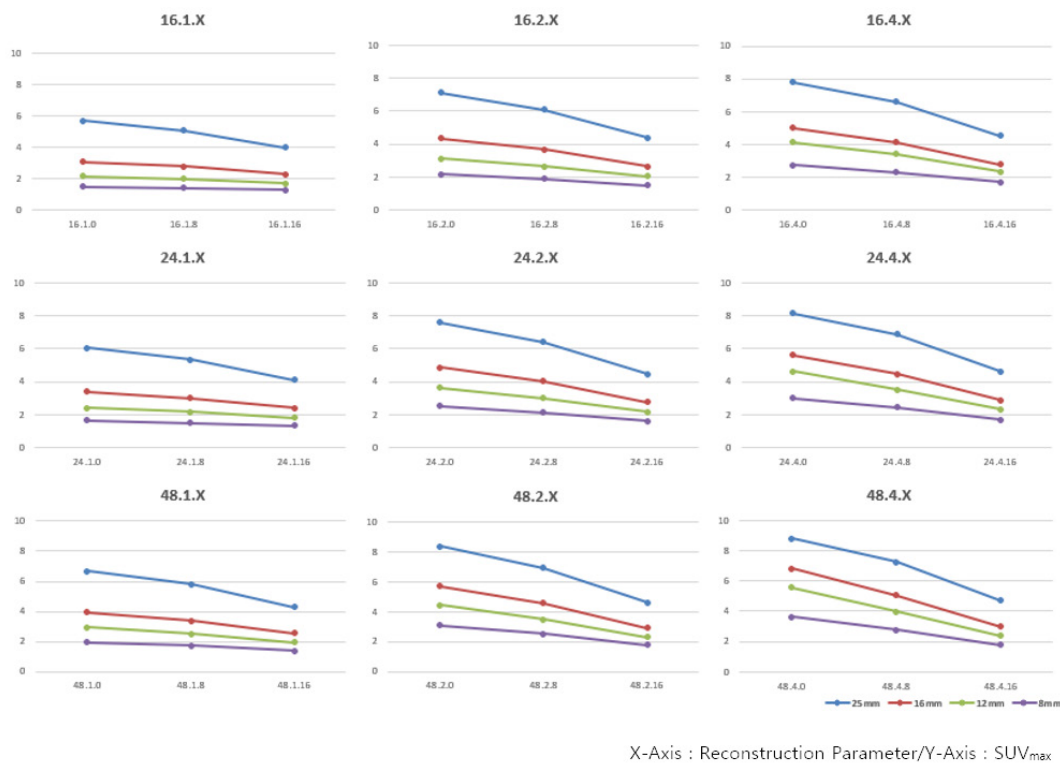


Fig. 4. These graphs demonstrates that when I and S are fixed and only the GF is increased, SUV_{max} decreases.

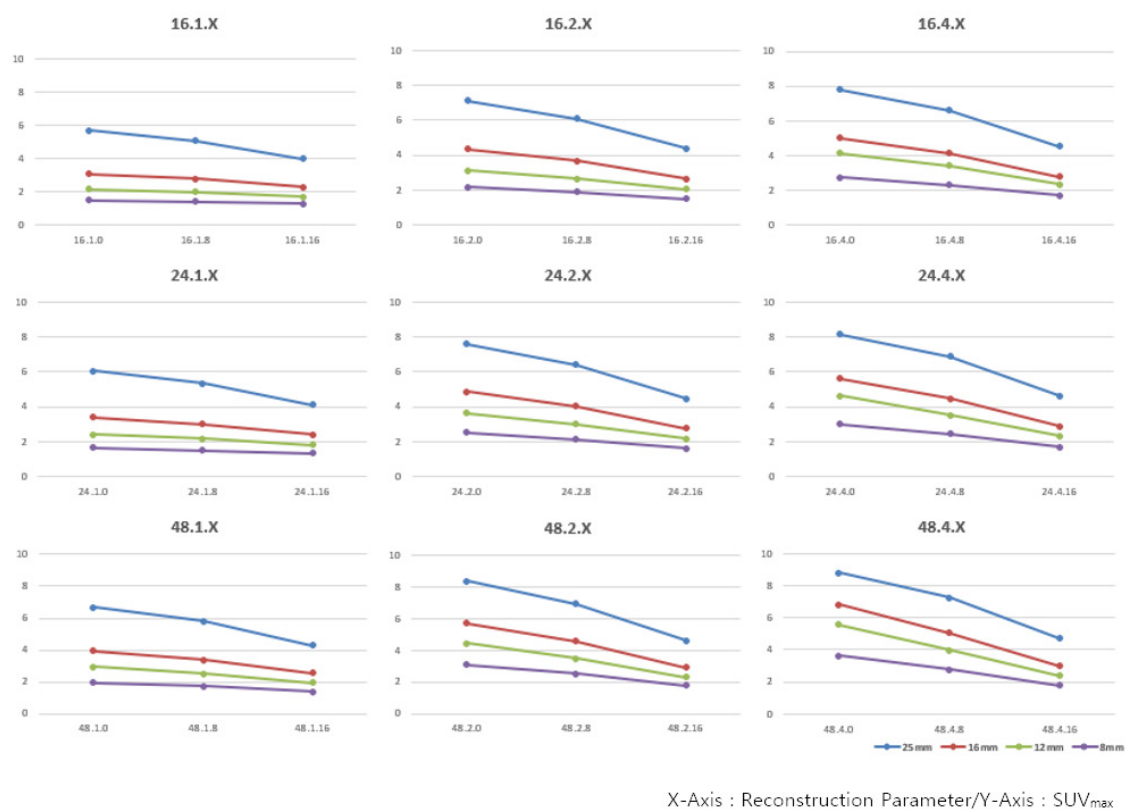


Fig. 5. These graphs demonstrates that when I and GF are fixed and only the S is increased, SUV_{max} increases. However, when GF reaches 16, the rate of SUV_{max} increase gradually diminishes.

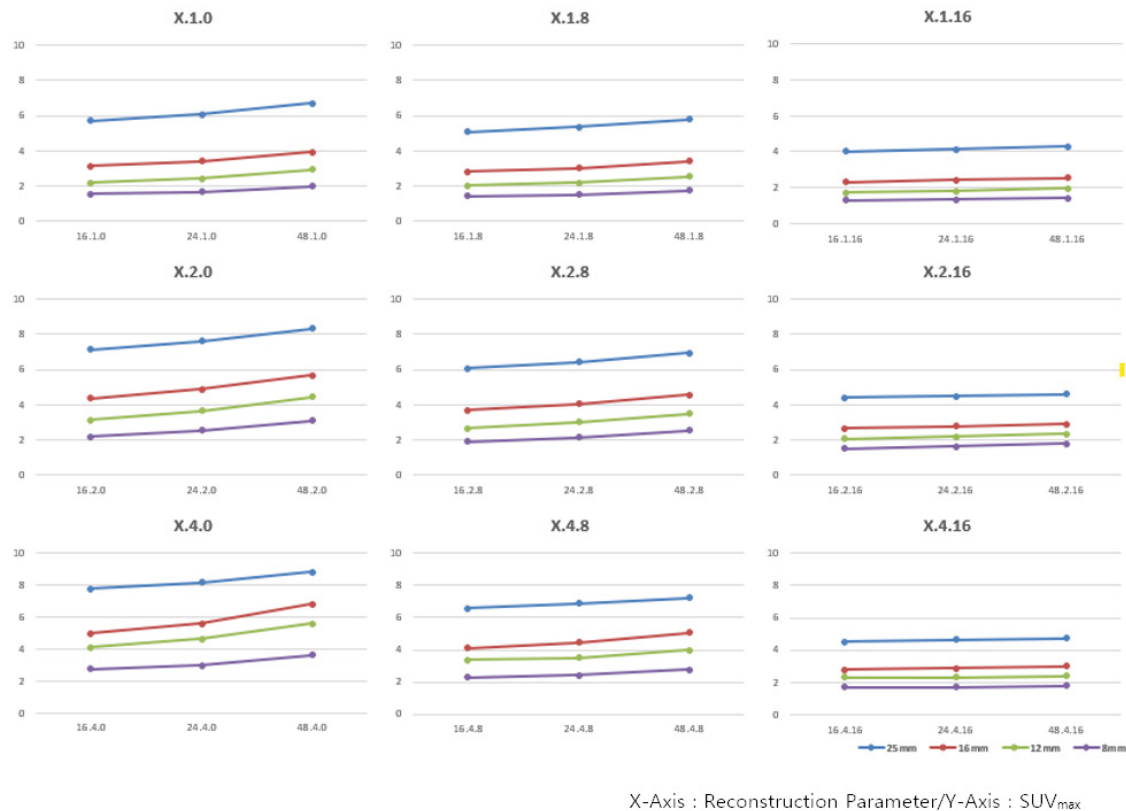


Fig. 6. These graphs demonstrates that when S and GF are fixed and only I is increased, SUV_{max} increases. However, when GF reaches 16, the rate of SUV_{max} increase gradually diminishes.

1.2 대조도

25mm Cylinder의 대조도 도출 결과는 아래 표(Table 5)와 같다. Gaussian Filter가 높게 적용됨에 따라 대조도는 감소하였다.

Table 5. The value of Phantom Contrast(continued)

I/S/GF	Count(Bq/ml) _ Coronal view		
	25mm_Cylinder(Bq/ml)	BKG(Bq/ml)	Contrast
16.1.0	593460	100000	0.831
16.1.8	536800	103390	0.807
16.1.16	419740	107730	0.743
16.2.0	718500	97500	0.864
16.2.8	624960	101180	0.838
16.2.16	461010	106980	0.768
16.4.0	795500	125000	0.843
16.4.8	670500	123400	0.816
16.4.16	476890	122390	0.743
24.1.0	625400	100300	0.840
24.1.8	560380	103710	0.815
24.1.16	431490	108360	0.749
24.2.0	764600	108000	0.859
24.2.8	653500	110700	0.831
24.2.16	470670	115620	0.754
24.4.0	842900	125200	0.851

Table 5. The value of Phantom Contrast

I/S/GF	Count(Bq/ml) _ Coronal view		
	25mm _ Cylinder(Bq/ml)	BKG(Bq/ml)	Contrast
24.4.8	698200	121100	0.827
24.4.16	487430	118740	0.756
48.1.0	682900	101500	0.851
48.1.8	601370	104620	0.826
48.1.16	450880	109600	0.757
48.2.0	838300	116100	0.862
48.2.8	696600	116100	0.833
48.2.16	485230	119230	0.754
48.4.0	915400	139100	0.848
48.4.8	732100	127700	0.826
48.4.16	495320	121580	0.755

*Iteration(I)/Subset(S)/Gaussian Filter(GF)

1.3 SUV_{max}, 대조도 비교 분석

조건 별 SUV_{max}의 순위와 대조도 순위의 평균 순위는 아래의 표(Table 6)와 같다.

Table 6. Average rank of SUVmax rank and Contrast rank

Rank	I/S/GF	25mm _ SUV _{max}	Rank	I/S/GF	25mm _ Contrast	AVG Rank	I/S/GF
1	48.4.0	8.81	1	16.2.0	0.864	1	48.2.0
2	48.2.0	8.34	2	48.2.0	0.862	2	24.4.0
3	24.4.0	8.16	3	24.2.0	0.859	3	48.4.0
4	16.4.0	7.77	4	24.4.0	0.851	4	16.2.0
5	24.2.0	7.62	5	48.1.0	0.851	5	24.2.0
6	48.4.8	7.23	6	48.4.0	0.848	6	16.4.0
7	16.2.0	7.13	7	16.4.0	0.843	7	48.1.0
8	48.2.8	6.92	8	24.1.0	0.840	8	48.2.8
9	24.4.8	6.88	9	16.2.8	0.838	9	48.4.8
10	48.1.0	6.68	10	48.2.8	0.833	10	16.2.8
11	16.4.8	6.58	11	16.1.0	0.831	11	24.1.0
12	24.2.8	6.42	12	24.2.8	0.831	12	24.4.8
13	16.2.8	6.08	13	24.4.8	0.827	13	24.2.8
14	24.1.0	6.05	14	48.1.8	0.826	14	16.1.0
15	48.1.8	5.8	15	48.4.8	0.826	15	16.4.8
16	16.1.0	5.7	16	16.4.8	0.816	16	48.1.8
17	24.1.8	5.33	17	24.1.8	0.815	17	24.1.8
18	16.1.8	5.08	18	16.1.8	0.807	18	16.1.8
19	48.4.16	4.7	19	16.2.16	0.768	19	24.4.16
20	24.4.16	4.62	20	48.1.16	0.757	20	48.4.16
21	48.2.16	4.6	21	24.4.16	0.756	21	16.2.16
22	16.4.16	4.52	22	48.4.16	0.755	22	48.1.16
23	24.2.16	4.47	23	24.2.16	0.754	23	48.2.16
24	16.2.16	4.39	24	48.2.16	0.754	24	24.2.16
25	48.1.16	4.29	25	24.1.16	0.749	25	16.4.16
26	24.1.16	4.11	26	16.4.16	0.743	26	24.1.16
27	16.1.16	4	27	16.1.16	0.743	27	16.1.16

*Iteration(I)/Subset(S)/Gaussian Filter(GF)

2. 임상 환자 분석

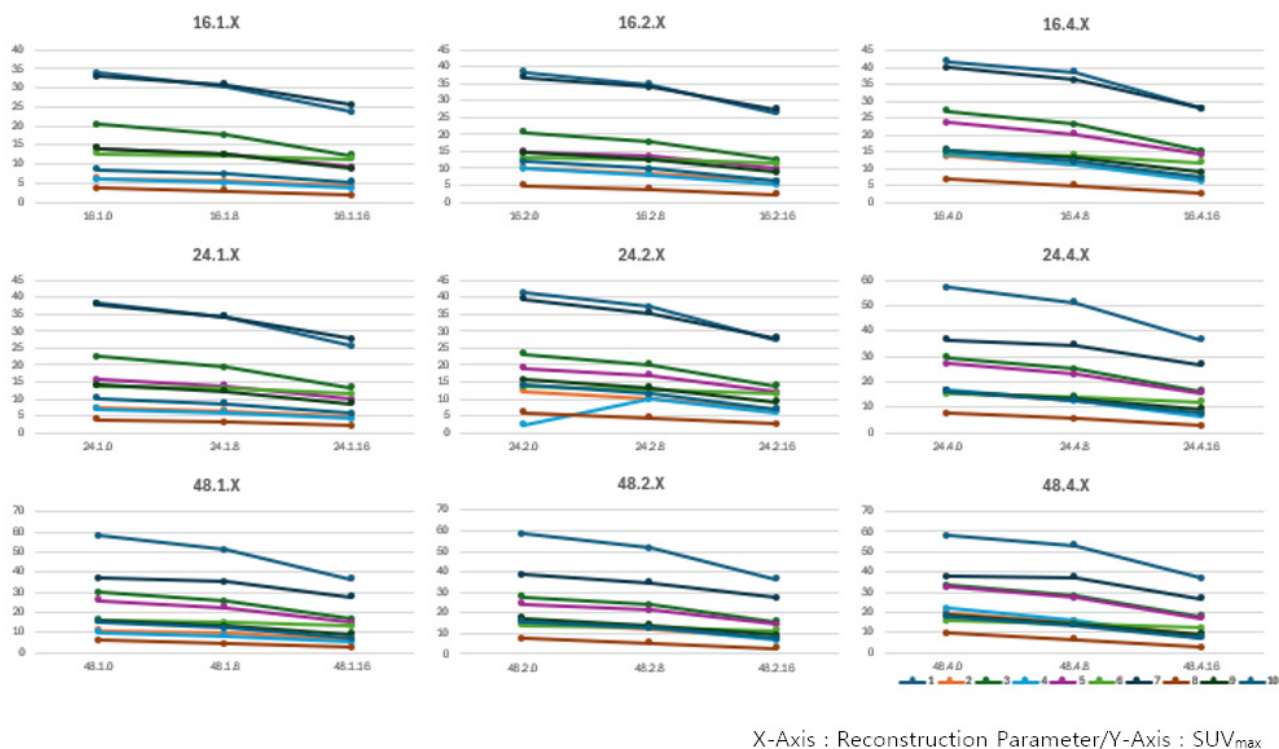
2.1 SUV

임상 환자 10명의 SUV_{max} 결과는 아래의 표(Table 7) 및 그림(Fig. 7, 8, 9)과 같다. 팬텀 데이터 분석과 동일한 양상을 보인다.

Table 7. The value of Clinical Patient SUVmax

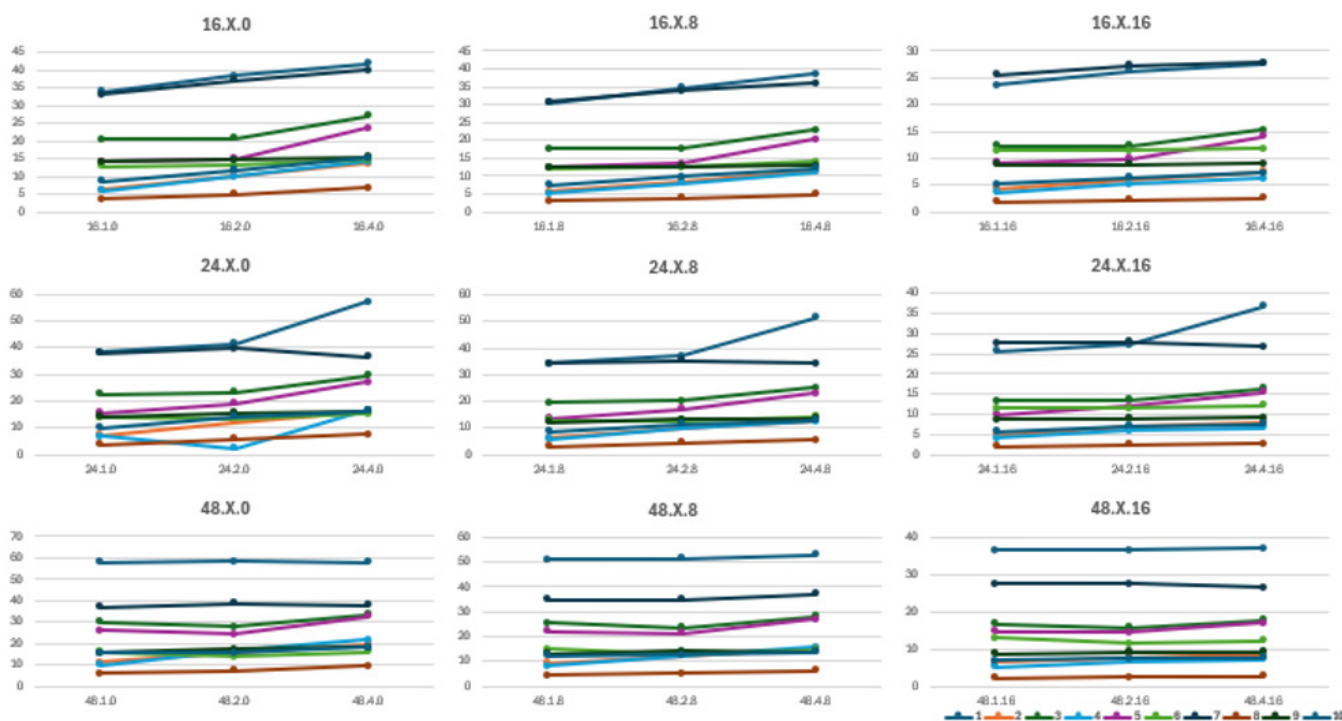
I/S/GF	SUV _{max}									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
16.1.0	33.82	6.14	6.14	5.9	20.33	12.73	5.9	3.56	14.05	8.51
16.1.8	30.48	5.53	5.53	5.1	17.64	12.26	5.1	2.93	12.49	7.37
16.1.16	23.62	4.34	4.34	3.58	12.36	11.39	3.58	1.86	9.16	5.2
16.2.0	38.37	10.03	10.03	9.8	20.58	12.96	9.8	4.96	14.95	11.86
16.2.8	34.66	8.62	8.62	8.13	17.8	12.37	8.13	3.85	13.47	9.82
16.2.16	26.27	6.09	6.09	5.16	12.38	11.42	5.16	2.18	9.89	6.3
16.4.0	41.76	13.65	13.65	14.19	26.92	14.64	14.19	6.75	23.53	15.07
16.4.8	38.52	11.29	11.29	11.15	22.97	13.92	11.15	4.95	20.18	12.1
16.4.16	27.68	7.34	7.34	6.26	15.26	11.83	6.26	2.53	14.02	7.17
24.1.0	38.15	7.14	7.14	6.93	22.51	13.82	6.93	3.78	15.53	10.04
24.1.8	34.32	6.35	6.35	5.92	19.41	13.04	5.92	3.07	13.72	8.55
24.1.16	25.6	4.84	4.84	4.02	13.32	11.45	4.02	1.9	9.87	5.8
24.2.0	41.48	12.21	12.21	2.36	23.37	13.42	2.36	5.91	18.99	14.1
24.2.8	37.26	10.17	10.17	9.9	20.08	12.75	9.9	4.46	16.92	11.49
24.2.16	27.34	6.77	6.77	5.84	13.7	11.46	5.84	2.41	11.96	7.08
24.4.0	57.1	15.81	15.81	16.55	29.63	15.29	16.55	7.68	27.09	16.17
24.4.8	51.38	12.79	12.79	12.6	25.13	14.23	12.6	5.46	22.97	12.86
24.4.16	36.76	7.96	7.96	6.59	16.39	12.18	6.59	2.62	15.44	7.46
48.1.0	58.19	11.15	11.15	10.12	29.95	16.28	10.12	5.9	26.08	15.54
48.1.8	50.91	9.47	9.47	8.34	25.37	15.03	8.34	4.44	22.27	12.28
48.1.16	36.4	6.59	6.59	5.22	16.66	12.98	5.22	2.42	14.72	7.11
48.2.0	58.32	15.67	15.67	16.42	27.91	14.1	16.42	7.28	24.48	15.7
48.2.8	51.5	12.46	12.46	12.52	23.74	13.11	12.52	5.2	21.44	12.79
48.2.16	36.6	7.73	7.73	6.69	15.69	11.57	6.69	2.59	14.43	7.47
48.4.0	58.04	19.75	19.75	21.75	33.51	15.89	21.75	9.47	32.51	18.18
48.4.8	52.98	15.28	15.28	15.76	28.14	14.43	15.76	6.41	27.11	13.74
48.4.16	37.05	8.76	8.76	7.36	17.84	12.32	7.36	2.82	16.93	7.68

X-Axis : Reconstruction Parameter/Y-Axis : SUV_{max}



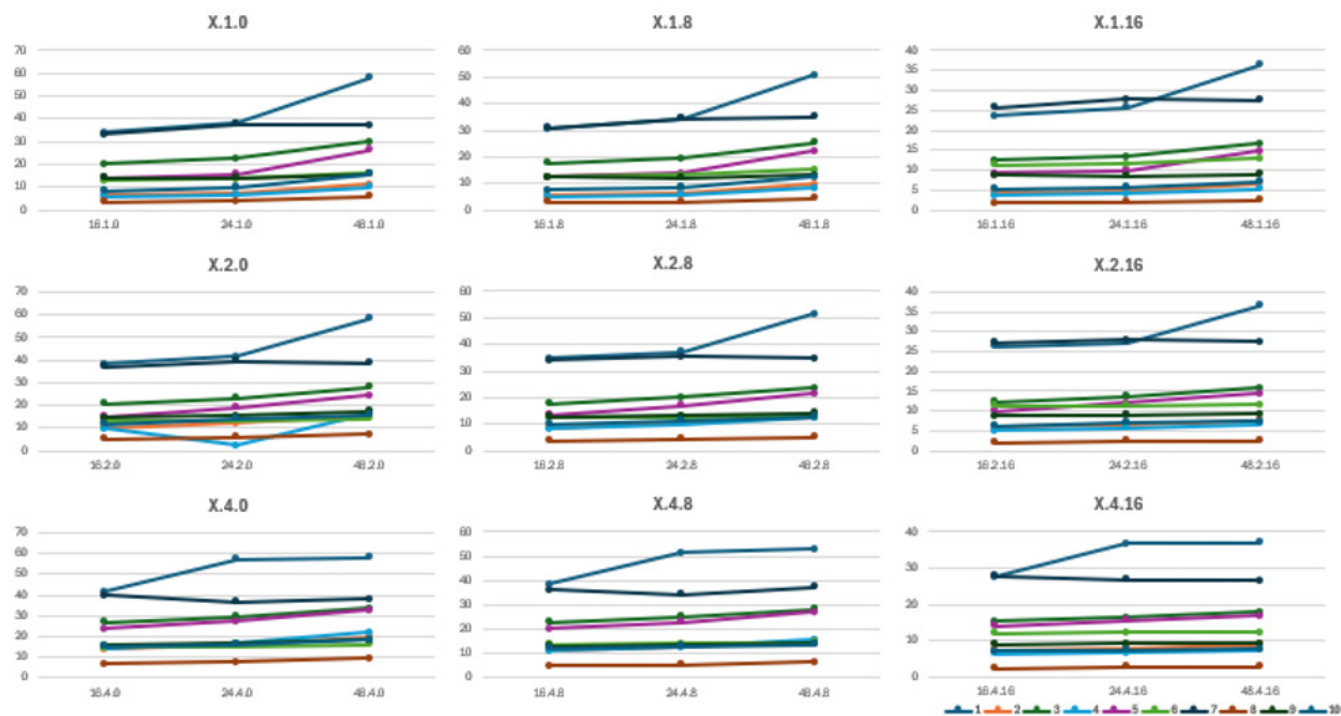
X-Axis : Reconstruction Parameter/Y-Axis : SUV_{max}

Fig. 7. These graphs demonstrates that when I and S are fixed and only GF is increased, SUV_{max} decreases.



X-Axis : Reconstruction Parameter/Y-Axis : SUV_{max}

Fig. 8. These graphs demonstrate that when I and GF are fixed and only S is increased, SUV_{max} increases. However, when GF reaches 16, the rate of SUV_{max} increase gradually diminishes.



X-Axis : Reconstruction Parameter/Y-Axis : SUV_{max}

Fig. 9. These graphs demonstrate that when S and GF are fixed and only I is increased, SUV_{max} increases. However, when GF reaches 16, the rate of SUV_{max} increase gradually diminishes.

2.2 대조도

25mm Cylinder의 대조도 도출 결과는 아래 표(Table 8)와 같다.

Table 8. The value of Clinical Patient Contrast(continued)

I/S/GF	Count(Bq/ml) _ Coronal view											
	A			B			C			D		
	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast
16.1.0	1740000	0	1.00	535500	0	1.00	249500	0	1.00	1319800	0	1.00
16.1.8	1535300	0	1.00	487000	2200	0.99	193600	100	0.99	1114900	200	0.99
16.1.16	1120300	200	0.99	387500	3500	0.99	107800	5000	0.95	736100	1700	0.99
16.2.0	2508000	0	1.00	830500	0	1.00	258100	0	1.00	1919700	0	1.00
16.2.8	2160000	0	1.00	726500	1700	0.99	197900	100	0.99	1540400	200	0.99
16.2.16	1483100	100	0.99	526100	3800	0.99	107500	4500	0.95	918100	1700	0.99
16.4.0	3240000	0	1.00	1042900	1600	0.99	399400	0	1.00	2368800	900	0.99
16.4.8	2724000	0	1.00	893000	2500	0.99	282300	0	1.00	1804300	1000	0.99
16.4.16	1758100	300	0.99	610300	4900	0.99	134400	3900	0.97	1019000	1800	0.99
24.1.0	2261000	0	1.00	613900	0	1.00	286100	0	1.00	1491700	0	1.00
24.1.8	1964000	0	1.00	552500	2100	0.99	216200	100	0.99	1243800	200	0.99
24.1.16	1351300	100	0.99	428400	3600	0.99	114400	4400	0.96	797200	1600	0.99
24.2.0	2925000	0	1.00	974200	0	1.00	307400	0	1.00	2237500	0	1.00
24.2.8	2484000	0	1.00	832700	1300	0.99	229700	0	1.00	1739400	200	0.99

Table 8. The value of Clinical Patient Contrast(continued)

I/S/GF	Count(Bq/ml) _ Coronal view											
	A			B			C			D		
	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast
24.2.16	1648700	100	0.99	574200	3500	0.99	42900	44800	-0.044	999500	1900	0.99
24.4.0	3566000	0	1.00	1163300	3100	0.99	472300	0	1.00	2539500	700	0.99
24.4.8	2965000	0	1.00	984700	3300	0.99	320900	0	1.00	1879700	600	0.99
24.4.16	1861800	300	0.99	653800	4400	0.99	145100	3800	0.97	1019000	1800	0.99
48.1.0	3318000	0	1.00	902000	0	1.00	454800	0	1.00	1950900	0	1.00
48.1.8	2783000	0	1.00	784100	1600	0.99	313500	0	1.00	1561700	100	0.99
48.1.16	1780400	100	0.99	562700	3900	0.99	145900	3900	0.97	930500	1600	0.99
48.2.0	3524000	0	1.00	1176300	0	1.00	406500	0	1.00	2557600	0	1.00
48.2.8	2929000	0	1.00	979900	1300	0.99	287600	0	1.00	1893900	100	0.99
48.2.16	1850400	100	0.99	638800	4100	0.99	137100	4000	0.97	1052000	2000	0.99
48.4.0	4007000	0	1.00	1328500	2500	0.99	628300	0	1.00	2759100	700	0.99
48.4.8	3284000	0	1.00	1098800	2800	0.99	392900	0	1.00	1962900	700	0.99
48.4.16	1982600	300	0.99	693200	4400	0.99	162200	3500	0.97	1086700	1500	0.99
I/S/GF	E			F			G			H		
	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast
16.1.0	3422300	0	1.00	272100	13100	0.95	2865700	0	1.00	333300	200	0.99
16.1.8	3224500	100	0.99	217100	18100	0.91	2816800	2500	0.99	288400	6700	0.97
16.1.16	2408900	156800	0.93	121100	22200	0.81	2501000	50700	0.97	205300	20300	0.90
16.2.0	3052400	0	1.00	307600	8600	0.97	2564000	11100	0.99	359300	700	0.99
16.2.8	3019500	10900	0.99	241600	17100	0.92	2680900	30500	0.98	324300	800	0.99
16.2.16	2615100	145100	0.94	130000	22100	0.83	2561400	34800	0.98	205300	9600	0.95
16.4.0	3141800	0	1.00	526400	800	0.99	1604300	29800	0.98	361700	100	0.99
16.4.8	2544300	17900	0.99	376200	15700	0.95	2056300	19400	0.99	328100	4200	0.98
16.4.16	2415100	121100	0.94	171300	21300	0.87	2296500	40100	0.98	213500	11700	0.94
24.1.0	3343900	0	1.00	443600	0	1.00	2628800	0	1.00	321000	0	1.00
24.1.8	3232300	11800	0.99	333200	12000	0.96	2743000	10800	0.99	304000	5200	0.98
24.1.16	2423100	144900	0.94	164500	21400	0.86	2612300	27400	0.98	197600	12600	0.93
24.2.0	3080400	0	1.00	377200	0	1.00	2244500	17600	0.99	376200	0	1.00
24.2.8	3059400	6500	0.99	288900	14300	0.95	2497800	24700	0.99	267900	300	0.99
24.2.16	2585000	128200	0.95	147500	21600	0.85	2556600	37900	0.98	185700	10500	0.94
24.4.0	3544000	0	1.00	624300	0	1.00	1373400	0	1.00	371700	1600	0.99
24.4.8	2935500	2500	0.99	431900	13700	0.96	1913800	17700	0.99	268600	3000	0.98
24.4.16	2403600	114600	0.95	188100	21400	0.88	2358700	41000	0.98	186900	9300	0.95
48.1.0	2956200	0	1.00	825700	0	1.00	1970300	0	1.00	295400	0	1.00
48.1.8	2782800	3300	0.99	556100	7900	0.98	2307800	14400	0.99	314100	1300	0.99
48.1.16	2502200	116700	0.95	245100	22500	0.90	2480900	32000	0.98	208300	5900	0.97
48.2.0	3093700	0	1.00	514700	0	1.00	1601900	18400	0.98	256600	0	1.00
48.2.8	3092500	16600	0.99	374500	12300	0.96	2035400	24900	0.98	296200	1400	0.99
48.2.16	2630500	208600	0.92	174600	22400	0.87	2405700	43300	0.98	157300	9900	0.93
48.4.0	2378200	0	1.00	834600	0	1.00	970200	0	1.00	233600	6600	0.97
48.4.8	2554100	9800	0.99	536000	9800	0.98	1637700	16100	0.99	234300	4100	0.98
48.4.16	2385000	200500	0.91	214600	20300	0.90	2260400	42200	0.98	153600	9000	0.94

Table 8. The value of Clinical Patient Contrast

I/S/GF	Count(Bq/ml) _ Coronal view					
	I			J		
	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast	Lesion (Bq/ml)	BKG (Bq/ml)	Contrast
16.1.0	1371100	0	1.00	108530	0	1.00
16.1.8	1095500	500	0.99	940000	0	1.00
16.1.16	819200	22200	0.97	671700	2400	0.99
16.2.0	1602400	0	1.00	1641100	0	1.00
16.2.8	1498800	900	0.99	1220300	400	0.99
16.2.16	921800	28600	0.96	803100	1000	0.99
16.4.0	1735800	0	1.00	1607200	7300	0.99
16.4.8	1844300	1900	0.99	1440000	3700	0.99
16.4.16	1019600	20800	0.97	891900	2500	0.99
24.1.0	1265700	0	1.00	1271700	0	1.00
24.1.8	1644700	400	0.99	1033200	0	1.00
24.1.16	852600	28000	0.96	707600	800	0.99
24.2.0	1283800	0	1.00	1696600	0	1.00
24.2.8	1639100	400	0.99	1399200	0	1.00
24.2.16	1085600	28100	0.97	898000	400	0.99
24.4.0	2265200	0	1.00	1864500	0	1.00
24.4.8	1566400	800	0.99	1505600	300	0.99
24.4.16	1187800	19400	0.98	925300	1200	0.99
48.1.0	1930900	0	1.00	1781400	0	1.00
48.1.8	1814900	800	0.99	1432800	1400	0.99
48.1.16	1211500	27600	0.97	880300	1700	0.99
48.2.0	2167900	0	1.00	1816800	0	1.00
48.2.8	1958300	700	0.99	1503900	700	0.99
48.2.16	1220300	28600	0.97	931500	1000	0.99
48.4.0	2568100	0	1.00	1957700	0	1.00
48.4.8	2041300	500	0.99	1588100	200	0.99
48.4.16	1297800	30200	0.97	940900	1300	0.99

2.3 SUV_{max} 대조도 비교 분석

조건 별 SUV_{max}의 순위와 대조도 순위의 평균 순위는 아래의 표(Table 9)와 같다.

Table 9. Average rank of SUVmax rank and Contrast rank(continued)

	(RankSUV _{max} +RankContrast)/2										TotalRank
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
48.4.0	3	2	1	3	1	2	1	8	1	1	1
48.1.0	2	5	2	2	3	1	3	4	4	4	2
48.2.0	1	1	5	1	4	4	8	1	2	3	2
24.4.0	4	8	3	6	2	3	4	5	3	2	4
24.2.0	10	3	10	17	6	8	4	2	5	5	5
48.4.8	5	9	4	9	7	9	7	10	11	7	6
16.4.0	9	4	6	12	5	5	15	3	6	17	7
24.1.0	13	12	12	7	9	7	2	6	9	9	8
16.2.0	12	7	13	5	11	13	6	7	7	6	9

Table 9. Average rank of SUVmax rank and Contrast rank

	(RankSUV _{max} +RankContrast)/2										TotalRank
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
48.2.8	6	6	9	3	13	12	17	10	10	13	10
24.4.8	7	11	8	11	7	10	15	10	13	10	11
48.1.8	8	13	7	9	10	5	10	14	13	14	12
24.2.8	14	10	15	8	13	15	14	8	12	7	13
16.1.0	17	15	14	14	12	15	8	13	8	12	14
16.4.8	11	13	11	15	15	11	12	16	17	18	15
24.1.8	16	20	16	16	18	14	10	17	13	11	16
16.2.8	15	16	17	13	18	18	18	14	17	16	17
16.1.8	18	22	19	19	16	19	13	18	16	14	18
24.4.16	22	18	20	20	17	21	24	19	19	22	19
48.4.16	21	17	18	18	21	20	26	21	20	21	20
48.1.16	20	24	20	23	18	17	20	20	22	25	21
48.2.16	19	18	22	22	23	23	23	24	20	19	22
16.4.16	25	22	22	21	22	22	24	22	22	26	23
24.2.16	23	20	25	24	24	24	20	25	24	20	24
16.2.16	24	25	25	25	25	26	22	23	26	23	25
24.1.16	25	26	24	26	26	24	19	26	27	23	26
16.1.16	27	27	27	27	27	27	27	27	25	27	27

3. 통계 결과

팬텀 데이터와 임상 환자 데이터간의 상관관계를 분석하기 위해 피어슨 상관분석(Pearson Correlation analysis)을 시행한 결과, SUV_{max}에서 양의 상관관계가 있었고($r=0.937, p<0.01$), 대조도에서도 양의 상관관계가 있었다($r=0.692, p<0.05$). 10명의 임상 환자 데이터에서 각 재구성 조건 별 차이를 비교하기 위해 Friedman Test 및 사후 검증을 시행 한 결과, SUV_{max}가 상대적으로 낮게 측정되는 I16/S1/GF16 과 I16/S2/GF16 의 조건이 나머지 25개의 조건과 통계적으로 유의한 차이가 있었으나 ($p<0.05$) 나머지 조건들은 서로 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

고찰 및 결론

팬텀 데이터와 임상 환자 데이터를 활용하여 Lu-177 Dotatate SPECT/CT 영상을 다양한 재구성 조건으로 구분하고, 각 조건별로 영상을 정량적 및 정성적으로 평가하여 최적의 조건을 선택할 수 있었다. SUV_{max} 와 대조도 분석 결과의 순위와 정성적인 과정에서 선택된 재구성 조건 간 다소 상이한 부분이 있지만, SUV_{max} 와 대조도는 단순히 높은 수치를 나타내는 것이 중요한 것이 아니라 이들이 임상적으로 의미 있는 정보를 제공하고, 진단 및 치료 과정에서 유용하게 활용될 수 있는지를 종합적으로 고려해야 한다[11]. 영상 평가 지표로 SUV를 정량적인 지표로 사용할 수 없어 대조도와 함께 비교하였고, 판독의 정성적인 육안 평가도 함께 시행하여 다소 주관적인 결과를 보일 수 있다.

이번 연구에서 사용한 ACR 팬텀은 PET에서 사용하는 F-18을 기준으로 설계된 팬텀이므로 Lu-177과 F-18의 반감기 및 물리적 성질 등이 다르기 때문에 이를 반영하지 못한 점은 연구의 한계로 작용한다[10]. 향후 연구에서는 Lu-177에 맞는 팬텀을 사용하여 실험을 진행하는 것이 필요하다[12]. Target SUV를 5.0에 맞추어 실험하였고, 재구성 조건이 낮은 경우에는 비슷한 결과를 보였지만, 재구성 조건이 높아질수록 5.0보다 다소 높아지는 양상을 보였다. 원내 Lu-177 Dotatate 영상 획득 조건의 변경에 따라 임상 환자 데이터가 10명으로 분석 데이터의 양이 적은 것이 제한점이다. 추후 더 많은 임상 환자 데이터 분석이 필요할 것으로 사료된다.

임상 환자 데이터를 재구성 조건만 비교하여 영상을 평가하였다. 재구성 조건을 더 다양하게 구성하여 연구를 진행하고 싶었지

만, Iteration이 높은 영상 생성 시 재구성 시간이 크게 증가하여 데이터 재구성에 시간적인 어려움이 있었다. 또한 다양한 영상 획득 조건(Matrix, Time/View 등)을 임상 환자에게 적용하는 것에 현실적인 어려움이 있어 여러 영상 획득 조건을 비교하지 못한 것이 제한점이다. 추후 더 많은 데이터를 이용하여 연구가 필요할 것으로 생각된다.

현재 판독에서 있어 주로 SUV_{max} 를 사용하고 있으나 Noise로 인해 값이 너무 높게 측정될 수 있다. 이를 보완하기 위해 SUV_{peak} 가 제시되었으며, 데이터 분석 시 함께 측정하였다. SUV_{max} 는 해당 영역의 신호가 가장 높은 위치의 수치를 나타내지만, SUV_{peak} 의 경우 $1cm^3$ 의 3차원적인 영역 내 각각의 SUV_{max} 의 평균을 나타내는 수치이다. SUV_{max} 는 Noise를 max로 판단할 수 있는 맹점이 있지만, SUV_{peak} 는 SUV_{max} 의 오차를 보완해 줄 수 있는 지표로 평가된다[13]. 측정된 SUV_{peak} 는 SUV_{max} 와 비슷한 양상으로 측정되었고, 추후 지속적인 연구를 통해 임상 환자에게 적용할 수 있는 안정적인 지표로 사용될 것으로 기대된다.

현재 SPECT/CT에서 SUV를 많이 사용하고 있지 않지만, 본원에서는 Broad Quant QC[14]를 통해 SUV 측정이 가능하게 되어 있다. SPECT/CT 검사 후 SUV 판독도 함께 제공되고 있으며, 앞으로 SPECT/CT도 PET처럼 종양의 섭취 정도를 반영하는 SUV가 사용될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 팬텀과 임상 환자 데이터를 활용하여 다양한 재구성 조건에 따른 Lu-177 Dotatate SPECT/CT 영상의 정량적 및 정성적 평가를 수행하였다. Iteration, Subset, Gaussian Filter의 변화에 따라 SUV_{max} 및 대조도 분석 결과에서 수치적인 경향성이 나타났으며, 팬텀 데이터와 임상 데이터 간에는 높은 상관관계가 확인되었다. 일부 조건에서는 SUV_{max} 기준으로 통계적 유의성이 확인되었고, 영상 판독 의사의 정성적 평가를 통해 적절한 영상 조건이 선택되었다. 현재 본 기관에서는 본 연구 결과를 바탕으로 임상 영상 제공 시 I16/S4/GF0 및 I24/S2/GF8의 두 가지 재구성 조건을 채택하여 사용하고 있으며, 이 조건들은 영상 품질과 판독의 편의성 측면에서 안정적인 성능을 보이고 있다. 본 연구 결과는 향후 Lu-177 Dotatate SPECT/CT 영상의 재구성 조건 설정 시 참고자료로 활용될 수 있으며, 임상 영상의 표준화 및 정량적 비교의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Kwekkeboom DJ, Krenning EP, Bakker WH, Kam BL, Teunissen JJ, Kooij PP, et al. Radiolabeled somatostatin analogs for diagnosis and therapy. *J Nucl Med*. 2010;51(5):757-63. DOI : <https://doi.org/10.2967/jnumed.109.065706>
2. Sgouros G, Ballangrud ÅM, Jurcic JG, Pandit-Taskar N, Humm JL, Larson SM, et al. Theranostics: A new approach to treating cancer with radiopharmaceuticals. *Clin Cancer Res*. 2010;16(22):5401-7. DOI : <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-10-1535>
3. Niu T, Fan M, Lin B, Gao F, Tan B, Du X. Current clinical application of lutetium-177 in solid tumors (Review). *Exp Ther Med*. 2024;27(6):1-10. DOI : <https://doi.org/10.3892/etm.2024.12514>
4. Kwekkeboom DJ, Krenning EP, Lebtahi R, Komminoth P, Mäcke HR, de Herder WW, et al. Somatostatin receptor-based imaging and therapy: The role of (177)Lu-DOTATATE. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2015;42(1):1-9. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00259-014-2975-8>
5. Kupitz D, Wissel H, Wuestemann J, Bluemel S, Pech M, Amthauer H, et al. Optimization of SPECT/CT imaging protocols for quantitative and qualitative 99mTc SPECT. *EJNMMI Phys*. 2021;8(1):57. DOI : <https://doi.org/10.1186/s40658-021-00405-3>
6. Kim DS. The evaluation of reconstructed images in 3D OSEM, according to iteration and subset number. *Korean J Nucl Med Technol*. 2011;41(6):453-60.
7. De Jong M, Lagerburg V, Brans B, Hoekstra OS, Booij J, de Jong HWAM. Optimization of reconstruction parameters for SPECT. *Med Phys*. 2011;38(11):6342-51. DOI : <https://doi.org/10.1118/1.3659706>
8. Van Gils CAJ, Beijst C, van Rooij R, de Jong HWAM. Impact of reconstruction parameters on quantitative I-131 SPECT. *Phys Med Biol*. 2016;61(14):5166-82. DOI : <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/14/5166>
9. Fukami M, Matsutomo N, Yamamoto T. Optimization of number of iterations as a reconstruction parameter in bone SPECT imaging using a novel thoracic spine phantom. *J Nucl Med Technol*. 2021;49(2):143-9. DOI : <https://doi.org/10.2967/jnmt.120.253534>
10. American College of Radiology. PET hot cylinder phantom recommendations. Available at: <https://www.acr.org/>. Accessed January 12, 2024.

11. Klemer S, Smith J, Anderson SR, Kimura TK, Xiaorong P, Muhammad E, et al. The role of standardized uptake value in the assessment of tumor response to therapy: a review. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2017;44(4):674-84. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00259-016-3570-4>
12. Choi Y, Lee JH, Kim JH, Park SH, Kim YK, Lee DS, et al. Evaluation of a new ACR phantom for PET imaging. *Med Phys*. 2014;41(11):111901. DOI : <https://doi.org/10.1118/1.4895007>
13. Jentzen W, Freudenberg LS, Eising EG, Brandau W, Ruhlmann M, Bockisch A, et al. Comparison of SUVmax and SUVpeak in FDG PET/CT for lung cancer. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2015;42(10):1592-601. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00259-015-3098-2>
14. Ko HS. Study on broad quantification calibration to various isotopes for quantitative analysis and its SUV assessment in SPECT/CT. *Korean J Nucl Med Technol*. 2022;45(2):153-60.