

Astonish TF 재구성 기법의 적용을 통한 체적 크기의 변화에 따른 표준섭취계수(SUV)에 관한 고찰

연세대학교 보건대학원¹, 건국대학교병원 핵의학과², 서울의료원 핵의학과³, 신구대학교 방사선과⁴
이주영¹ · 남궁식² · 김지현³ · 박훈희⁴

Consideration of Standardized Uptake Value (SUV) According to the Change of Volume Size through the Application of Astonish TF Reconstruction Method

Juyoung Lee¹, Sik Nam-Kung², Ji-Hyeon Kim³ and Hoon-Hee Park⁴

¹Graduate School of Public Health, Yonsei University, Seoul, Korea

²Department of Nuclear Medicine, Konkuk University Medical Center, Seoul, Korea

³Department of Nuclear Medicine, Seoul Medical Center, Seoul, Korea

⁴Department of Radiological Technology, Shingu College, Seongnam, Korea

Purpose: In addition to improving the quality of the PET image, through much research, the development of various programs are performed. Astonish TF reconstruction techniques by Philips can confirm the improved contrast of the lesion. Also, It's image reconstruction of 2 mm is possible with rapid reconstruction rate than conventional. In this study, we compared and evaluated Standardized Uptake Value (SUV) in accordance with the 2 mm reconstruction techniques and traditional 4 mm from the ¹⁸F-FDG PET whole body image. **Materials and Methods:** In the phantom experiment, NEMA IEC body phantom (sphere: 10, 13, 17, 22, 28, 37 mm) was used to obtain images by using GEMINI TF 64 PET/CT (Philips, Cleveland, USA). Also, In the clinical images, we performed ¹⁸F-FDG PET/CT examination to 30 women (age: 55.1 ± 11.3, BMI: 24.1±2.9) with a diagnosis of breast cancer. After that, we reconstructed images in 2 mm and 4 mm respectively. The region of interest was drawn to acquired images. Since then, we measured SUV and statistically analyzed with SPSS ver.18 by using EBW (Extended Brilliance Workstation) NM ver.1.0. **Results:** After analyzing the result of the phantom study, there was a tendency that the bigger hot sphere size, the higher SUV. If you compared the 2 mm reconstruction techniques to 4 mm, it increased 95.78% in 10 mm, 50.60% in 13 mm, 25.00% in 17 mm, 30.04% in 22 mm, 31.81% in 28 mm, and 27.84% in 37 mm. Through the result of the analysis of the 2 mm reconstruction techniques and 4 mm in clinical images, it appeared that SUV of 2 mm was higher than that of 4 mm. Also the smaller the volume was, the more the change rate increased. **Conclusion:** After analyzing the result of the clinical picture and phantom experiments applied by Astonish TF reconstruction techniques, as the size of the volume was small, the change rate of the SUV increased. Therefore, it was necessary to further research about the SUV correction for accurate and active utilization of 2 mm reconstruction techniques which had excellent lesion discrimination ability and contrast in clinic. (*Korean J Nucl Med Technol* 2014;18(1):115-121)

Key Words : Astonish TF, Reconstruction method, Volume size, SUV

서 론

- Received: March 28, 2014. Accepted: April 21, 2014.
- Corresponding author : **Hoon-Hee Park**
Department of Radiological Technology, Shingu College, 377
Gwangmyeong-ro, Jungwon-gu, Seongnam 462-743, Korea
Tel: +82-31-740-1638, Fax: +82-31-740-1589
E-mail: hzpark@shingu.ac.kr

양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography, PET)은 양전자를 방출하는 방사성동위원소를 표지한 대사물 혹은 약제를 투여하여 그 체내 분포를 영상화하는 기능적

또는 생리적인 영상기법이다. 현재까지 PET은 종양의 포도당 대사능을 영상화하여 암환자의 진단, 병기결정, 치료 반응 평가, 예후예측 등에 가장 많이 활용되고 있다.¹⁾

PET은 조직 내 방사성추적자의 농도를 정량적으로 측정하여 생체 기능을 평가하는데 가장 적합한 방법으로 통상적으로, 표준섭취계수(standardized Uptake Value, SUV)를 활용하고 있다. 표준섭취계수는 방사능 농도를 주입한 추적자가 체내에 고루 분포했을 때의 농도로 나누어 그 상대적 섭취율을 정량적으로 표현한 것으로 임상에서 널리 사용되고 있는 방법이다.^{2,4)}

반면 PET 영상은 공간해상도(Spatial Resolution)가 상대적으로 낮고 해부학적 위치와 주변 조직과의 관계를 명확하게 평가하기 어려운 단점이 있다. 이런 단점을 보완하기 위하여 전산화단층촬영술(Computerized Tomography, CT)과 PET 영상을 정합하는 PET/CT를 최근에는 보편적인 PET 장비로 활용하고 있다. 현재까지 주로 사용하는 PET은 해상도가 4-7 mm 수준이며, 소동물용 PET은 1.3-2.4 mm 정도 수준이다. 최근 개발된 뇌전용 고해상도 PET인 HRRT (High Resolution Research Tomograph)은 2.4-2.8 mm의 해상도를 가지고 있다고 보고되었다.⁵⁾

TOF (Time of Flight) 영상획득방법은 감마선이 발생했을 가능성이 높은 영역에는 향상된 계수율을 나타내며, 그렇지 않은 부분에는 계수율을 낮춰주는 역투사 방법(Filtered Back Projection)을 적용할 수 있다. 그러므로 실제 감마선이 발생하지 않은 영역에 계수를 역투사하여 생기는 배경잡음(Background Noise)을 줄일 수 있다.⁶⁾

TOF를 통해 얻어진 영상 정보에 의해서 배경잡음이 줄어들면 병변 검출능(Lesion Detectability)이 향상되는데, 이에 따라 적은 양의 계수만을 얻더라도 동일한 영상의 질 및 병변 검출능을 기대할 수 있다. 따라서 TOF로 획득된 영상

을 이용하는 경우에는 동일 시간의 검사를 통해 영상 질을 향상시키거나, 전체 스캔 시간을 줄여도 동일한 질의 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다.⁷⁾

또한 모든 리스트 모드 영상의 재구성은 1 bed당 30초의 빠른 재구성 속도와 함께 non-TOF 영상보다 5배 높은 민감도(Sensitivity)를 보유하고 있다고 보고되었다.⁸⁾

현재는 영상의 해상도를 높이기 위한 다양한 프로그램이 개발되고 임상에 적용되고 있다. 그 중 Philips사의 Astonish TF는 TOF를 통한 영상획득방법과 함께 기존 영상의 4 mm 공간분해능에서 2 mm 공간분해능을 갖는 영상의 구성이 가능해졌으며, 이를 통해 영상의 대조도는 약 30%까지 증가되었다고 보고되었다.⁹⁾

하지만, 기존의 4 mm 재구성 영상을 기반으로 2 mm 재구성을 시행한 경우, 표준섭취계수에 대한 상관관계가 명확하지 않으며, 그 차이에 대한 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 4 mm 재구성기법을 통한 영상과 Astonish TF 기술을 이용한 2 mm 재구성기법을 통한 영상에서 표준섭취계수를 분석하여 그 차이에 대해 평가하고자 한다.

실험재료 및 방법

1. 장비 및 대상

사용된 장비는 GEMINI TF 64 PET/CT (Philips, Cleveland, USA)이며(Fig. 1), 방사성 동위원소는 ¹⁸F-FDG를 사용하였다.

팬텀 실험은 National Electrical Manufacturers Association (NEMA) IEC Body phantom을 사용하였으며, NEMA Standards NU2-2001을 적용하였다(Fig. 2). 지름이 10, 13, 17, 22, 28, 37 mm인 구(Sphere)는 열소(Hot Lesion)로 설정하였으며, ¹⁸F-FDG 방사성의약품을 이용하여, 배후방사능(Background)과 구의 농도비율을 8배로 형성하였다.



Fig. 1. GEMINI TF 64 PET/CT (Philips, Cleveland, USA) was used for phantom and clinical experiment.

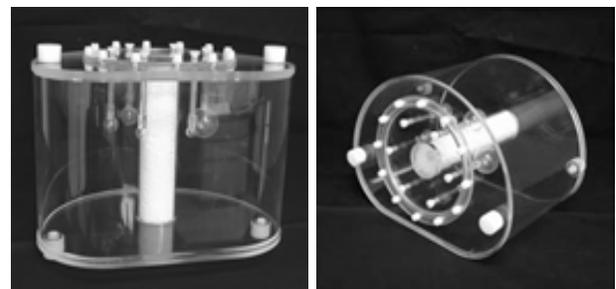


Fig. 2. NEMA IEC Body phantom was used to compare hot sphere with background activity.

임상 영상은 2013년 2월부터 5월까지 ^{18}F -FDG PET/CT 검사를 시행한 환자들 중 원발성 병변이 유방암(Breast Cancer) 인 환자 여성 30명(연령: 55.1 ± 11.3 세, BMI 24.1 ± 2.9)을 대상으로 실시하였다.

2. 연구 방법

1) 팬텀 실험

NEMA IEC Body Phantom을 사용하였으며, CT 프로토콜(Protocol)은 관전압 120 kVp, 관전류 30 mAs, 슬라이스 두께(Slice Thickness) 4 mm, 회전시간(Rotation Time)은 0.5 sec로 설정하였다. PET 방출영상의 획득 시간은 1 bed당 90 sec와 150 sec로 각각 영상을 획득하였다. 또한 획득한 영상은 각각 4 mm와 2 mm 재구성 방법으로 영상을 재구성하였다.

2) 임상 영상

모든 환자는 검사 전 최소한 6시간 이상의 금식을 시행하였으며 금식기간동안 500-1,000 mL 이상의 충분한 수분을 섭취하였다. ^{18}F -FDG 방사성의약품은 1 kg당 0.1 mCi (37 MBq)를 정맥주사하고, 평균 60분 동안 격리된 공간에서 안정을 취하였다. 또한, 과거력에 있어 당뇨병 경험자는 대상에서 제외하였다.

CT 프로토콜은 관전압 120 kVp, 관전류 30 mAs, 슬라이스 두께 4 mm, 회전시간은 0.5 sec로 설정하였다. PET 방출 영상은 1 bed당 90 sec로 획득하였으며, 획득한 영상은 각각 4 mm와 2 mm 재구성 방법으로 영상을 재구성하였다.

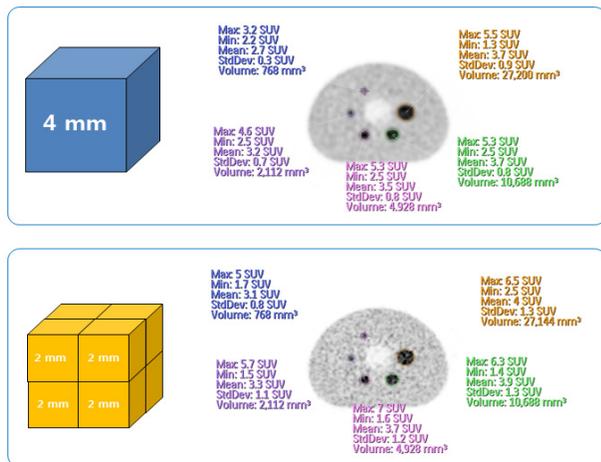


Fig. 3. 4 mm and 2 mm reconstruction image used Workstation EBW NM (Extended Brilliance Workstation NM, ver. 1.0) for NEMA IEC Body phantom.

3. 영상 분석

1) 팬텀 실험

4 mm와 2 mm로 재구성한 NEMA IEC Body Phantom 영상 분석을 위하여 Workstation EBW NM (Extended Brilliance Workstation NM, ver.1.0)을 사용하였다. NEMA 표준을 참고하여 각 열소의 크기가 가장 크게 보이는 중심 슬라이스(Slice)를 찾아 각 열소마다 체적관심영역(Volume of Interest, VOI)을 설정하였다.^{10,11)} 각각의 설정된 영역의 표준섭취계수를 체적(Volume), 최대(Maximum), 평균(Mean), 최소(Minimum)를 비교하였다(Fig. 3). 각각의 상관관계를 확인하기 위하여 SPSS Ver. 17.을 사용했다.

2) 임상 영상

4 mm와 2 mm로 재구성한 임상 영상 분석을 위하여 팬텀실험과 동일한 Workstation EBW NM을 사용하였으며, 유방암의 원발성병변 부위와 간(Liver)영역에 체적관심영역을 설정하였다(Fig. 4). 각각의 설정된 영역의 표준섭취계수를 체적, 최대, 평균, 최소를 비교하였다. 각각의 상관관계를 확인하기 위하여 SPSS Ver. 17을 사용했다.

결 과

1. 팬텀실험

NEMA IEC Body Phantom을 이용하여 획득된 4 mm와 2 mm 재구성 영상에서 각각의 열소마다 동일한 체적관심영역을 설정하였다. 4 mm 재구성 영상에서 90 sec로 획득한 결과, 열소의 크기가 커질수록 SUV_{Max}, SUV_{Mean}, SUV_{Min}은 차이가 커졌으며, 150 sec로 영상을 획득한 경우도 동일

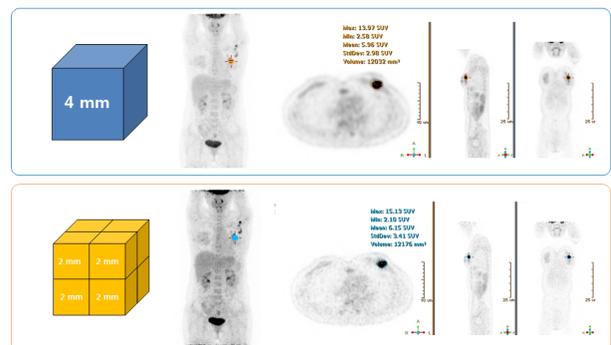


Fig. 4. 4 mm and 2 mm reconstruction image used Workstation EBW NM (Extended Brilliance Workstation NM, ver. 1.0) for clinical images.

한 결과를 나타냈다. 또한 SUV_{Max}에서 불규칙한 수치의 변화 없이 의미 있는 값을 나타냈다. 90 sec 획득한 영상에 대한 150 sec 획득한 영상의 SUV_{Max}는 열소의 크기가 10 mm

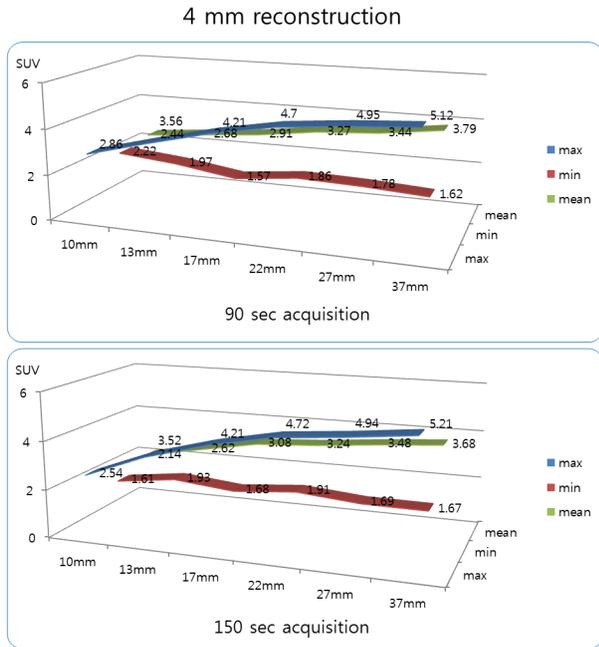


Fig. 5. Result of acquiring 90 sec in 4 mm reconstruction image, there was a tendency that the smaller hot sphere size, the SD of SUV_{max} is significant.

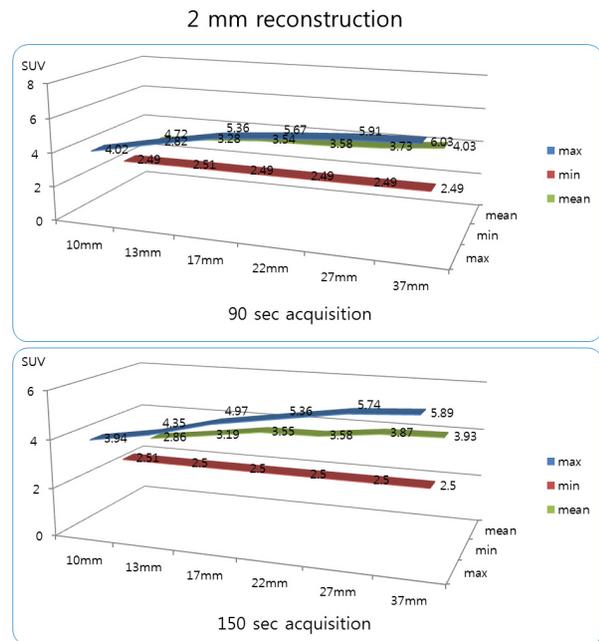


Fig. 6. Result of acquiring 90 sec in 2 mm reconstruction image, there was a tendency that the smaller hot sphere size, the SD of SUV_{max} is significant.

에서 12.59% 감소, 13 mm에서 1.14% 감소, 17 mm에서는 동일하였으며, 22 mm에서 0.01% 증가, 28 mm에서 0.20% 감소, 37 mm에서 1.72% 증가하였다($P < 0.005$). 열소의 크기가 작을수록 SUV_{Max}는 편차가 크게 나타났고, 크기가 클수록 편차가 작은 성향을 나타냈다(Fig. 5).

2 mm 재구성 영상에서 90 sec로 획득한 결과, 열소의 크기가 커질수록 SUV_{Max}, SUV_{Mean}, SUV_{Min}은 차이가 커졌으며, 150 sec로 영상을 획득한 경우도 동일한 결과를 나타냈다. 4 mm 재구성 영상과 동일하게 SUV_{Max}에서 불규칙한 수치의 변화 없이 의미 있는 값을 나타냈다. 90 sec 획득한 영상에 대한 150 sec 획득한 영상의 SUV_{Max}는 열소의 크기가 10 mm에서 2.03% 감소, 13 mm에서 8.50% 감소, 17 mm에서 7.85% 감소, 22 mm에서 5.78% 감소, 28 mm에서 2.96% 증가, 37 mm에서 2.38% 감소하였다($P < 0.005$). 열소의 크기가 작을수록 SUV_{Max}는 편차가 크게 나타났고, 크기가 클수록 편차가 작은 성향을 나타냈다(Fig. 6).

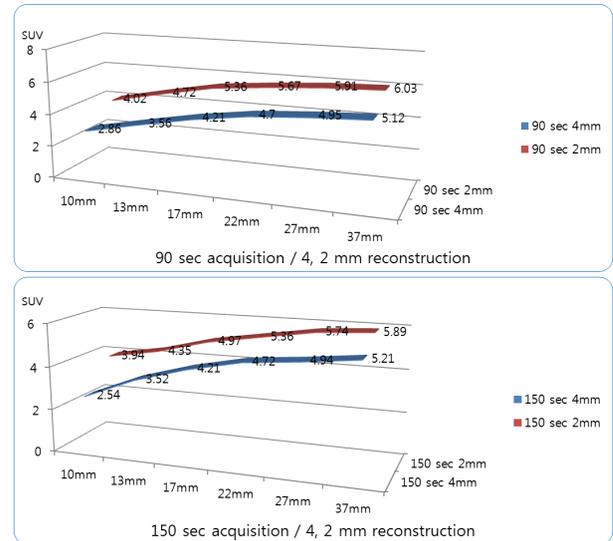


Fig. 7. The smaller hot sphere size, the SD of SUV_{max} is significant in 150 sec acquisition image.

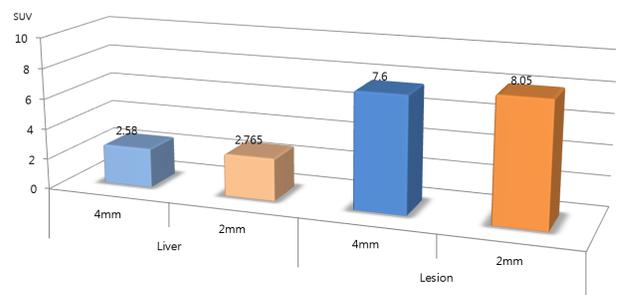


Fig. 8. Liver ROI is significant different in variatio rate of SUV_{max}.

Table 1. The correlation of SUV_{max} and volume

VOI	Reconstruction methods	Coefficient of correlation
Liver	4 mm	0.571
	2 mm	0.557
Lesion	4 mm	0.695
	2 mm	0.528

90 sec로 획득한 영상의 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}를 비교한 결과, 10 mm 열소에서는 40.5%, 13 mm에서는 32.6%, 17 mm에서는 27.3%, 22 mm에서는 20.6%, 28 mm에서는 19.4%, 37 mm에서는 17.8% 증가하였다. 또한 150 sec로 획득한 영상의 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}를 비교한 결과, 10 mm 열소에서는 55.1%, 13 mm에서는 23.6%, 17 mm에서는 18.1%, 22 mm에서는 13.6%, 28 mm에서는 16.2%, 37 mm에서는 13.1% 증가하였다. 즉, 열소의 크기가 작을수록 SUV_{Max}의 편차가 크게 나타났고, 150 sec로 획득한 영상의 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}를 비교한 결과에서도 같은 성향을 나타냈다($P < 0.005$). 90 sec와 150 sec로 획득한 영상의 SUV_{Max}의 편차 정도는 90 sec로 영상을 획득하였을 경우보다 150 sec로 획득한 영상에서 열소의 크기가 작을수록 큰 차이를 나타냈고, 열소의 크기가 클수록 작은 차이를 나타냈다(Fig. 7).

2. 임상영상

임상영상의 간영역에서 4 mm에 대하여 2 mm 재구성 기법을 SUV_{Max}를 비교한 결과는 7.17% 증가하였으며, 병변(Lesion)영역에서 4 mm에 대하여 2 mm 재구성 기법을 SUV_{Max}를 비교한 결과는 5.92% 증가하였다. SUV_{Max}의 변화율에서는 간영역에서의 차이가 병변영역보다 크게 나타났다(Fig. 8).

임상영상에서 간, 병변영역에서의 각각의 체적에 따른 SUV_{Max}를 상관분석한 결과, 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 간영역과 2 mm 재구성 영상의 병변영역에서 피어슨(Pearson) 상관계수가 0.400 이상으로 "fair"하였으며, 4 mm 재구성 영상의 병변영역에서는 피어슨 상관계수가 0.600 이상으로 "good" 정도의 양의 상관성이 있어 체적이 증가할수록 SUV_{Max}가 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Table 1).

고찰

PET 영상의 획득과정에서 동시에 발생한 두 511 KeV 감마선은 빛의 속도로 비행하여 PET 시스템에 의해 검출된

다. 이때 두 감마선이 발생하여 검출될 때까지 비행한 시간을 TOF라 하는데, 두 검출기에서 측정된 TOF시간 차이와 빛의 속도를 곱하면 LOR (Line of Response)상에서 감마선 쌍의 발생위치를 추정할 수 있다. 그러나 PET 검출기는 제한된 시간분해능을 가지므로 정확한 위치는 알 수 없지만, 대략적인 발생 위치를 추정하여 PET 영상의 특성을 향상 시키는데 활용할 수 있다.¹²⁾

신호대 잡음비에 있어서는 시간분해능과 감마선 발생 위치계측의 정확도에 대한 상관관계는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{TOF 위치정확도}(\delta d) = C \times \text{timing resolution} / 2$$

여기서 c는 빛의 속도이며, 이 식에서 시간분해능 값이 작아지면 TOF에 의한 위치정확도가 향상된다는 것을 알 수 있다. 이런 TOF 정보를 영상재구성시에 참조하면 영상의 신호대 잡음비를 개선할 수 있다. 신호대 잡음비 증가는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{신호대 잡음비 증가율} = \sqrt{\frac{D}{\delta t}}$$

여기서 D는 방사능이 분포된 공간의 지름이며, 예를 들어 500 ps의 시간분해능을 가진 PET 시스템이라면 TOF 위치정확도는 7.5 cm가 된다. 만약 40 cm 공간에서 7.5 cm의 TOF 위치정확도를 갖는다면 신호대 잡음비는 2.3배 향상된다. 따라서 TOF 위치정확도 값이 커질수록 영상의 대조도가 향상하는 것을 알 수 있다.¹³⁾

이러한 TOF 정보를 영상재구성에 이용하기 위해서는 각각의 감마선 쌍이 갖는 검출위치와 TOF 정보를 기록해야 하므로 일반적인 동시발생선 측정방법보다 저장 공간과 재구성을 위한 계산량이 많이 필요하다. 현재 TOF-PET은 이러한 문제를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁾

하지만 현재까지 TOF 정보를 이용하는 경우에는 동일 시간의 검사를 통해 영상 질을 향상시키거나, 전체 스캔 시간을 줄여도 동일한 질의 영상을 얻을 수 있으며, Astonish TF는 TOF의 적용으로 기존 영상의 4 mm 공간분해능에서 2 mm 공간분해능을 갖는 영상의 구성이 가능해졌으며, 이를 통해 영상의 대조도는 증가되었다.

그러므로 본 연구에서는 기존의 4 mm 재구성기법을 통한 영상과 Astonish TF 기술을 이용한 2 mm 재구성기법을 통한 영상에서 표준섭취계수를 분석하여 평가하였다.

팬텀실험과 임상영상의 평가에서 획득시간에 따라 4 mm,

2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}가 의미있는 변화를 나타냈다. SUV가 임상 진단에서 활용되고 있기 때문에 변화요인을 분석하여 교정치를 적용할 수 있는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

결론

본 연구를 통해 Astonish TF 재구성 기법을 적용한 팬텀 실험과 임상영상의 분석 결과, 체적의 크기가 작을수록 표준섭취계수의 변화율이 증가하였다. 그러므로 임상에서 대조도 및 병변 감별력이 우수한 2 mm 재구성 기법의 정확하고 적극적인 활용을 위하여 표준섭취계수 보정에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

요약

PET 영상의 질 향상과 더불어 많은 연구를 통해 다양한 프로그램의 개발이 이루어지고 있다. 그 중 Philips사의 Astonish TF 재구성 기법은 기존보다 빠른 재구성 속도와 함께 2 mm의 영상 재구성이 가능하여 병변의 향상된 대조도를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 전신 ¹⁸F-FDG PET 영상에서 기존의 4 mm와 2 mm 재구성 기법에 따른 표준섭취계수(SUV)를 비교·평가하였다.

GEMINI TF 64 PET/CT (Philips, Cleveland, USA)를 사용하여 팬텀실험은 NEMA IEC Body Phantom (sphere: 10, 13, 17, 22, 28, 37 mm)으로 영상을 획득하였고, 임상영상은 유방암 진단을 받은 여자 30명(연령: 55.1±11.3세, BMI: 24.1±2.9)을 대상으로 ¹⁸F-FDG PET/CT 검사를 시행한 후, 각각 4 mm와 2 mm로 영상을 재구성하였다. 획득된 영상은 EBW (Extended Brilliance Workstation) NM ver.1.0을 통해 팬텀과 임상영상에 관심영역을 설정하고, 표준섭취계수를 측정하였으며, SPSS ver.17.0로 통계 분석하였다.

팬텀실험에서 90 sec로 획득한 영상의 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}를 비교한 결과, 열소의 크기가 작을수록 SUV_{Max}의 편차가 크게 나타났고, 150 sec로 획득한 영상의 4 mm와 2 mm 재구성 영상의 SUV_{Max}를 비교한 결과에서도 같은 성향을 나타냈다. 90 sec와 150 sec로 획득한 영상의 SUV_{Max}의 편차 정도는 90 sec로 영상을 획득하였을 경우 보다 150 sec로 획득한 영상에서 열소의 크기가 작을수록 큰 차이를 나타냈고, 열소의 크기가 클수록 작은 차이를 나타냈다. 임상영상에서는 4 mm와 2 mm 재구성 기법을 분석한 결과, 표준섭취계수는 4 mm보다 2 mm 재구성

기법에서 높게 나타났고, 또한 체적이 작을수록 변화율이 증가하였다.

Astonish TF 재구성 기법을 적용한 팬텀실험과 임상영상의 분석 결과, 체적의 크기가 작을수록 표준섭취계수의 변화율이 증가하였다. 그러므로 임상에서 대조도 및 병변 감별력이 우수한 2 mm 재구성 기법의 정확하고 적극적인 활용을 위하여 표준섭취계수 보정에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Weber WA, Ziegler SI, Thodtmann R, Hanauske AR, Schwaiger M. Reproducibility of metabolic measurements in malignant tumors using FDGPET. *J Nucl Med* 1999;40:1771-1777.
- Boellaard R, Krak NC, Hoekstra OS, Lammertsma AA. Effects of noise, imageresolution, and ROI definition on the accuracy of standard uptake values: a simulation study. *J Nucl Med* 2004;45:1519-1527.
- Jaskowiak CJ, Bianco JA, Perlman SB, Fine JP. Influence of reconstruction iterations on 18F-FDG PET/CT standardized uptake values. *J Nucl Med* 2005;46:424-428.
- Hickeson M, Yun M, Matthies A. Use of a corrected standardized uptakevalue based on the lesion size on CT permits accurate characterization of lung nodules on FDG-PET. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2002;29:1639-1647.
- Cremerius U, Fabry U, Neuerburg J, Zimny M, Osieka R, Buell U. Positron emission tomography with 18F-FDG to detect residual disease after therapy for malignant lymphoma. *Nucl Med Commun* 1998;19:1055-1063.
- Lhommel R, van Elmbt L, Goffette P, Van den Eynde M, Jamar F, Pauwels S, et al. Feasibility of 90Y TOF PET-based dosimetry in liver metastasis therapy using SIR-spheres. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2010;37:1654-1662.
- van Elmbt L, Vandenberghe S, Walrand S, Pauwels S, Jamar F: Comparison of yttrium-90 quantitative imaging by TOF and non-TOF PET in aphantom of liver selective internal radiotherapy. *Phys Med Biol* 2011;56:6759-6777.
- Jakoby BW, Bercier Y, Conti M, Casey ME, Bendriem B, Townsend DW. Physical and clinical performance of the mCT time-of-flight PET/CT scanner. *Phys Med Biol* 2011;56:2375-2389.
- Tong S, Alessio AM, Kinahan PE. Noise and signal properties in PSF-based fully 3D PET image reconstruction: an experimental evaluation. *Phys Med Biol* 2010;55:1453-1473.
- National Electrical Manufacturers Association (NEMA): Performance measurement of positron emission tomographs. In: NEMA standards Publication NU 2-2007. Edited by NEMA. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association; 2007. p. 11-18.
- Watson CC, Casey ME, Eriksson L, Mulnix T, Adams D, Bendriem B. NEMA NU 2 performance tests for scanners with intrinsic radioactivity. *J Nucl Med* 2004;45:822-826.

12. Watson CC. Extension of single scatter simulation to scatter correction of time-of-flight PET. *IEEE Trans Nucl Sci* 2007; 54:1679-1686.
13. Kim SK, Allen-Auerbach M, Goldin J. Accuracy of PET/CT in characterization of solitary pulmonary lesions. *J Nucl Med* 2007;48:214-220.
14. Krak N, Boellaard R, Hoekstra OS, Twisk JWR, Hoekstra CJ, Lammertsma AA. Effects of ROI definition and reconstruction method on quantitative outcome and applicability in a response monitoring trial. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005;32:294-301.