

## GE Advance™ 양전자방출단층촬영기의 표준 성능평가

연세대학교 BK21-의과학사업단<sup>1</sup>, 연세의료원 진단방사선과학교실<sup>2</sup>, 핵의학과<sup>3</sup>, 방사선의과학연구소<sup>4</sup>

정하규<sup>1,4</sup> · 김희중<sup>1-4</sup> · 손혜경<sup>1,4</sup> · 봉정균<sup>4</sup> · 정해조<sup>2,4</sup> · 전태주<sup>2-4</sup> · 김재삼<sup>3</sup> · 이종두<sup>1-4</sup> · 유형식<sup>2-4</sup>

### Standard Performance Measurements of GE Advance™ Positron Emission Tomography

Ha-Kyu Jeong, B.S.,<sup>1,4</sup> Hee-Joung Kim, Ph.D.,<sup>1,4</sup> Hye-Kyung Son, M.S.,<sup>1,4</sup>

Jung-Kyun Bong, M.S.,<sup>4</sup> Hai-Jo Jung, Ph.D.,<sup>2,4</sup> Tae-Joo Jeon, M.D.,<sup>2,4</sup>

Jae-Sam Kim, B.S.,<sup>3</sup> Jong Doo Lee, M.D.,<sup>1,4</sup> Hyung Sik Yoo, M.D.<sup>2,4</sup>

*BK21 Project for Medical Sciences<sup>1</sup>, Department of Diagnostic Radiology<sup>2</sup>, Department of Nuclear Medicine<sup>3</sup>,  
Research Institute of Radiological Science<sup>4</sup>, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea*

#### Abstract

**Purpose:** The purpose of this study was to establish optimal imaging acquisition conditions for the GE Advance™ PET imaging system by performing the acceptance tests designed by National Electrical Manufacturers Association (NEMA) protocol and General Electric Medical Systems (GEMS) test procedures. **Materials and Methods:** Performance tests were carried out with <sup>18</sup>F<sup>18</sup>FDG radioactivity source and phantoms by using a standard acquisition mode. Transaxial resolution and scatter fraction tests were performed with a line source and axial resolution with a point source, respectively. A cylindrical phantom made of polymethylmethacrylate (PMMA) was used to measure sensitivity, count rate losses and randoms, uniformity correction, and attenuation inserts were added to measure remaining tests. The test results were acquired in a diagnostic acquisition mode and analyzed mainly on high sensitivity mode. **Results:** Transaxial resolution and axial resolution were measured as average of 4.65 mm and 3.98 mm at 0 cm, and 6.02 mm and 6.71 mm at 20 cm on high sensitivity mode, respectively. Average scatter fraction was 9.87%, and sensitivity was 225.8 kcps/μCi/cc of trues. Activity at 50% deadtime was 4.6 μCi/cc, and the error of count rate correction at that activity was from 1.49% to 3.83%. Average nonuniformity for total slice was 8.37%. The accuracy of scatter correction was -0.95%. The accuracies of attenuation correction were 5.68% for air, 0.04% for water and -6.51% for polytetrafluoroethylene (PTFE). **Conclusion:** The results satisfied most acceptance criteria, indicating that the GE Advance™ PET system can be optimally used for clinical applications. (Korean J Nucl Med 2001;35:100-112)

**Key words:** <sup>18</sup>F<sup>18</sup>FDG, positron emission tomography (PET), performance test, resolution, scatter, sensitivity, count rate, uniformity, attenuation

Received Dec. 28, 2000; accepted Apr. 13, 2001

Corresponding Author: Hee-Joung Kim, Ph.D., Department of Diagnostic Radiology, Yonsei University College of Medicine, 134 ShinchonDong, SeodaemoonKu, SEOUL 120-752, KOREA

Tel: 822-361-5753, Fax: 822-313-1039, E-mail: hjkim@yumc.yonsei.ac.kr

## 서 론

양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography: PET)은 양전자를 방출하는 방사성동위원소로 표시된 화합물들을 생체 내에 주입하여 생리학, 생화학적인 반응을 영상화하고 이를 정량화할 수 있다. 이러한 PET을 통하여 얻은 자료를 연구 및 임상에 이용하기 위해서는 먼저 기기의 성능과 오차 그리고 한계를 명확히 규명하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 National Electrical Manufacturers Association (NEMA)와 Society of Nuclear Medicine (SNM)에서 제시한 표준 PET 성능평가 프로토콜을 GE Advance™ PET (General Electric Medical Systems, Milwaukee, WI, USA)시스템에 적용하여 성능테스트를 실시하였다. 성능평가 항목으로는 기본적인 내인성 측정들로서 횡축방향 공간분해능(transaxial resolution), 축방향 공간분해능(axial resolution), 산란분획(scatter fraction), 민감도(sensitivity), 계수율손실(count rate losses and randoms) 그리고 보정의 정확도 측정들로서 계수율보정(count rate linearity correction), 산란보정(scatter correction), 균일도보정(uniformity correction) 그리고 감쇠보정(attenuation correction)을 대상으로 하였다. 각각의 성능평가는 고민감도(high sensitivity: HS) 모드와 고분해능(high resolution: HR) 모드로 이루어졌으며, 표준영상획득 모드(standard acquisition mode)는 고민감도 모드와 2차원 모드에서 실행되었다. 공간분해능(spatial resolution)은 재구성된 영상면에 나타나는 인접한 두 점을 구별하여 검출해 낼 수 있는 시스템의 능력을 의미하며 전체반값두께(full width at half maximum: FWHM)로 나타내는데 이것은 선원을 선확산함수(line spread function: LSF) 또는 점확산함수(point spread function: PSF)로 나타냈을 때 검출된 최대계수의 절반인 값에서 확산함수의 폭을 나타낸다. 공간분해능은 횡축방향과 축방향으로 나타낼 수 있으며 횡축방향은 선원의 측정방향을 고려하여 동경방향(radial) 및 접선방향(tangential)으로 나타낼 수 있다. 선원이 스캐너의 유효시야에 위치하여

축방향의 위치변화 없이 측정되었을 때의 FWHM이 횡축방향 공간분해능이며 만약 선원이 축방향으로 위치의 변화를 가진다면 이때의 FWHM을 축방향 공간분해능 또는 영상면 두께(slice thickness)라고 하며 이것은 각각의 영상면에 대한 스캐너 민감도의 폭을 나타낸다. 산란분획은 동시회로에 의해 검출된 전체 감마선 중 산란현상을 일으켜서 동시계수로서 오인된 감마선의 비율을 의미한다. 민감도는 계수율손실을 최소화 하기 위하여 우연계수 및 불응시간이 1%이하로 낮은 방사선원을 이용하여 시스템의 계수능력을 측정하도록 고안된 검사이며 산란분획값을 고려하여 각각의 영상면 및 시스템 전체에 대한 동시계수를 방사선원의 농도가 포함된 계수율로서 얻는다. 계수율손실 측정은 불응시간과 우연계수로 인한 시스템의 계수율손실을 방사능 농도의 함수로서 나타내어 다양한 조건에서의 시스템의 계수능을 측정하기 위한 것이다. 시스템의 불응시간 백분율(percent dead time: PDT)은 낮은 방사능 농도에서 외삽하여 선형으로 나타낸 계수율과 실제로 측정된 계수율과의 비로서 나타내며 이러한 시스템의 계수능은 1) 50%의 불응시간을 가질 때, 2) 참동시계수가 정점에 이르렀을 때, 3) 참동시계수가 우연동시계수와 같은 방사능 농도에서의 계수율로서 나타낸다. 계수율보정은 이러한 불응시간과 우연계수에 의한 계수율손실을 보정했을 때 각각의 프레임과 영상면에 대해서 방사능 농도의 변화에 따른 계수율보정의 오차를 계산하여 50% 불응시간에서의 방사능 농도에 대한 오차범위를 결과로서 나타낸다. 산란보정은 시스템의 산란 계수보정의 정확도를 평가하는 것으로서 방사능이 존재하지 않는 부분에 남아있는 잔류 산란분획값을 측정하여 그에 따른 보정의 오차로서 결과를 나타낸다. 균일도보정은 재구성된 영상이 균일한 반응으로부터 얼마의 변이가 있는지를 살펴봄에 이는 계수율의 통계적인 변동량을 최소화하였을 때 재구성 알고리즘이나 소프트웨어로부터 기인하는 시스템의 불완전성에 의한 변이를 측정하고자 함에 있다. 감쇠보정은 투과스캔(transmission scan)의 정확도를 측정하기 위한 검사이며 공백스캔(blank scan)과 방출스캔(emission scan)을 함께 실시한다. 공

백스캔과 투과스캔으로부터 얻은 감쇠상수값을 방출스캔에 적용하여 잔류오차를 나타내며 투과하게 되는 매질로서는 인체의 조직 및 장기를 모사한 공기, 물, 그리고 테플론(polytetrafluoroethylene: PTFE)을 이용하고 각각의 영상면에 대한 결과를 나타낸다. 본 논문에서는 위의 다양한 항목의 성능 평가에 대한 정량적인 결과를 발표하고자 한다.

## 대상 및 방법

### 1. PET 스캐너

GE Advance™ PET 스캐너는 횡축방향 4.0 mm, 축방향 8.0 mm, 동경방향 30 mm의 차원을 가진 36개의 BGO (bismuth germanate oxide) 결정들과 두 개의 광전자 증배관(photo multiplier tube: PMT)으로 이루어진 검출기 블록(detector block)들과 6개의 검출기 블록이 모여서 된 검출기 모듈(detector module), 그리고 56개의 검출기 모듈이 실린더의 형태로 하나의 시스템을 이루며 여기에는 총 12,096개의 BGO 결정과 각각 672개의 결정을 가진 18개의 검출기 링(detector ring)들로서 기본적으로 35개의 영상면을 이루고 있다. 검출기 링의 앞면과 뒷면은 후방 산란된 감마선을 차단하기 위한 납 재질의 두꺼운 격막으로 보호되고 있으며 검출기 링들 사이에는 두께 1 mm, 길이 11.7 cm의 텅스텐 격막이 위치하여 2차원 및 3차원 스캔을 실시할 수 있다. 스캐너의 횡축시야(transaxial field of view)는 55 cm, 종축시야(axial field of view)는 15.2 cm이다. <sup>2),4)</sup>

### 2. 선원 및 팬텀

선상선원은 액상의 [<sup>18</sup>F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose (<sup>18</sup>FDG)를 길이 185 mm 내경 1.7 mm인 스테인레스 재질의 모세관에 채워서 준비하였고 점선원은 두개의 알루미늄 원판사이에 <sup>18</sup>FDG를 적신 여과지를 끼워서 테이프로 고정하였다. 검사용 팬텀은 NEMA에서 규정한 polymethylmethacrylate (PMMA)로 만들어진 속이 빈 실린더 모양의 직경 20 cm, 길이 18.5 cm로서 한쪽 말단은 다른 검사

를 위한 삽입물들을 설치할 수 있도록 개봉이 가능하다. 실험에 사용된 3개의 삽입물들은 직경이 약 5 cm이며 그 중 2개는 원통형의 동일한 PMMA재질로 이루어져 있어서 공기 및 물을 채울 수 있도록 속이 비어있고 나머지 한 개는 테플론 구조물로 되어있다.

### 3. 실험과정

모든 실험은 NEMA Standards Publication NU 2-1994와 기기제조사의 시험지침서<sup>2)</sup>에 의해서 실행하였다. 하지만 어떤 실험에서는 선원의 위치에 대한 지침이 NEMA protocol과는 다소 다른 부분이 있으며 본 실험에서는 여타 기기와의 비교분석 및 성능검사의 일관성을 유지하기 위해서 제조사 시험지침서의 절차에 따라 실험을 실시하였다. 대부분의 실험은 표준영상획득 모드에서 행하였으며 성능검사를 위한 실제적인 분석은 진단획득 모드(diagnostic acquisition mode)에서 이루어졌다. 실험에서는 검출기의 에너지 임계값을 저준위 300 keV, 고준위 650 keV로 설정된 값을 사용하였고 동시계수 시간윈도우는  $12.5 \times 10^9$  초로 하였다. 그리고 선원의 방사능을 측정하기 위한 계수기로는 우물형 계수기(well counter), CRC-15βETA (CA-PINTEC Inc, Ramsey, NJ, USA) 제품을 이용하였다.

#### 1) 공간분해능

횡축방향 공간분해능은 0.5 mCi의 <sup>18</sup>FDG를 채운 선상선원을 시스템에 설치된 받침대(mounting bracket)의 정중앙(X=0, Y=0 cm)에 설치한 후 60 초 동안의 방출스캔을 통하여 구성된 영상에서 선원의 위치를 확인하였고 그 후 Y축 위치 10, 20 cm에서 각각 60초씩 측정하였다(Fig. 1). 영상재구성에는 행렬크기 256×256, ramp필터 및 차단주파수(cutoff frequency) 4.0 mm<sup>-1</sup>와 FOV (field of view) 6.4 cm의 설정들을 통하여 실시하였다. 축방향 공간분해능 측정에서는 약 0.328 mCi의 <sup>18</sup>FDG 점선원을 사용했고 선원의 위치를 X축은 0 cm로 고정하고 Y축 방향은 스캐너의 시야중심인 0 cm와 10 cm, 20 cm에서 각각 30분씩 측정하였다

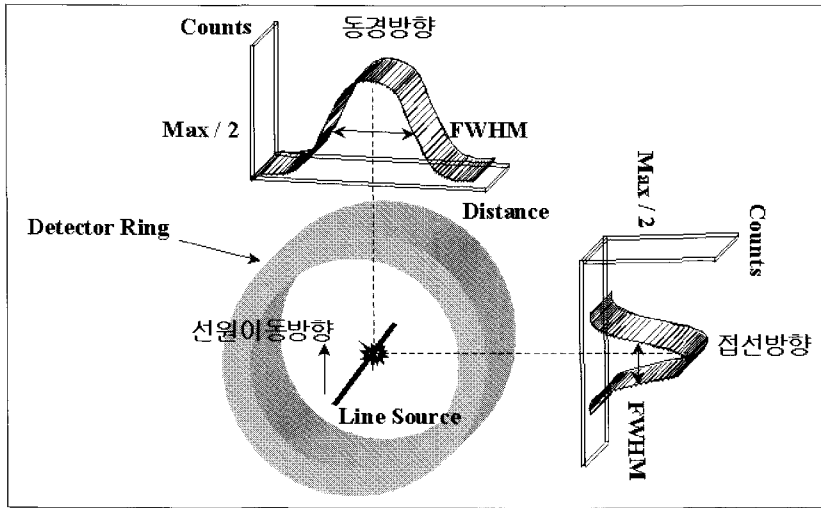


Fig. 1. Transaxial spatial resolution measurement for a two dimensional multi-ring detector with a line source parallel to axial direction was performed for radial and tangential directions.

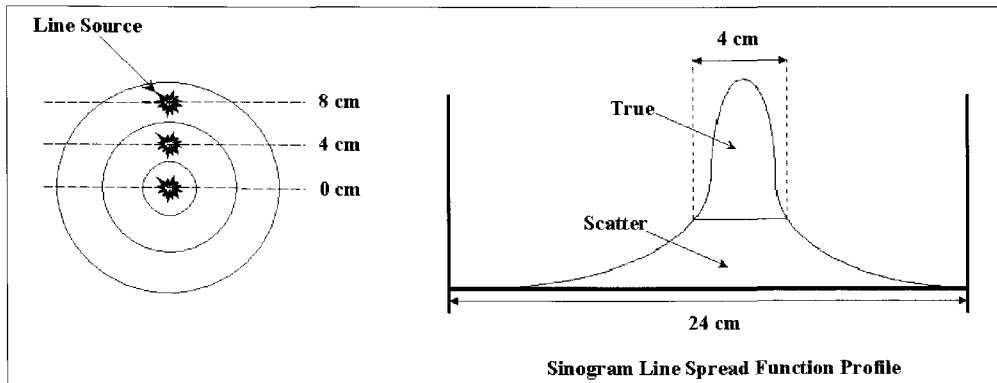


Fig. 2. Scatter fraction measurement was performed with a line source on three different positions. The scattered events were calculated under the peak from sinogram line spread function profile using linear interpolation between  $\pm 2$  cm from the source center.

했다. 각각의 Y축 위치에 대해서 점선원은 스캐너의 축방향인 Z방향으로 2초에 0.5 mm씩 총 800초에 걸쳐서 400step을 이동하면서 측정하였고 선원의 안정된 움직임을 위해서 약 5 kg의 무게를 선원에 가까운 위치의 테이블에 올려놓았다. 결과로서는 선원의 위치에 따라 고민감도 모드 및 고분해능 모드 각각에 대하여 직접영상면과 교차영상면에 대한 FWHM값으로 나타내었다.

## 2) 산란분획

산란분획은 약 0.3 mCi의  $^{18}\text{F}$ FDG를 채운 선상선원을 방사능이 없고 오염되지 않은 물을 채운 실린더 모양의 팬텀 중앙에 장치한 후 15분 동안 방출스캔을 실시하였고 선원의 위치를 스캐너의 중심축에서부터 4 cm, 8 cm에 대해서도 동일한 실험을 하였다. 그 후 sinogram 선확산함수 프로필을 얻으면 이 프로필에는 참동시계수와 산란동시계수가 존재하게 되며(Fig. 2) 참동시계수는 선확산함수 프

로필의 중심에서 좌우 약 20 mm의 폭 내에 주로 존재한다고 가정한다. 이 폭은 임의로 설정된 것으로 대부분의 PET시스템이 이 구간 내에서의 산란 계수가 상대적으로 구간외부에 비해 많이 분포하기 때문이다.<sup>1)</sup> 이 지점에서 선확산함수와 만나는 지점을 선형보간법을 취해서 생기는 40 mm구간 아래 부분에 나타나는 계수의 합이 산란계수이다. 팬텀의 전체면적에 대한 산란분획은 각 선원의 위치에 따른 가중치를 부여해서 선원의 위치 k 에 따른 산란계수  $C_{s,k}$  및 전체계수  $C_{tot,k}$  그리고 각 위치에서의 스캔시간  $T_{acq,k}$  동안의 평균 방사능인  $A_{avg,k}$  를 이용하여 다음과 같이 구하였다.<sup>1),3)</sup>

$$SF = \frac{\left(\frac{C_{s,0}}{A_{avg,0}}\right) + 8\left(\frac{C_{s,4}}{A_{avg,4}}\right) + 16\left(\frac{C_{s,8}}{A_{avg,8}}\right)}{\left(\frac{C_{tot,0}}{A_{avg,0}}\right) + 8\left(\frac{C_{tot,4}}{A_{avg,4}}\right) + 16\left(\frac{C_{tot,8}}{A_{avg,8}}\right)}$$

선원의 위치는 NEMA Standards Publication NU 2-1994에서 0 cm, 4.5 cm, 9.0 cm로 명기되어 있지만 다른 시스템과의 비교분석을 위해서 이전 버전의 표준을 사용하였다.

### 3) 민감도

민감도는 0.5 mCi (본 실험에서는 0.543 mCi 선

원 사용)의 <sup>18</sup>FDG를 고루 섞은 물을 실린더 모양의 팬텀에 채운 후 스캐너의 정중앙에 장치하고 15분 동안의 방출스캔을 통하여 sinogram을 얻은 후 직 접영상면과 교차영상면, 시스템 전체에 대하여 참 동시계수 및 전체계수율을 측정하였다(Fig. 3). 전체계수  $C_{tot}$ 에 대한 참계수의 민감도 S는 다음과 같이 스캔시간  $T_{acq}$ , 평균 방사능 농도  $a_{avg}$  및 산란 분획 보정인자 1-SF 를 사용하여 다음과 같이 계산 하였다.<sup>1)</sup>

$$S = \frac{C_{tot}}{T_{acq}} \left( \frac{1 - SF}{a_{avg}} \right)$$

### 4) 계수율손실

PET 스캐너의 불응시간 백분율이 50%를 훨씬 초과하는 방사능 농도인 약 55 mCi (본 실험에서는 57.96 mCi 방사선 선원 사용)의 <sup>18</sup>FDG를 팬텀에 고루 섞은 후 스캐너의 시야중심에 설치하고 참 계수율의 손실 및 우연계수율의 손실이 1% 미만일 될 때까지 방출스캔을 실시하였다. 이러한 낮은 농도에서의 계수율은 다시 외삽하여 높은 방사능농도에서 계수율손실이 없을 때를 가정한 계수율을 측정하는 자료로 이용된다. 시스템에서의 불응시간 백분율은 시스템에서 측정된 전체계수율인 참계수율, 산란계수율, 우연계수율에서 delayed coinci-

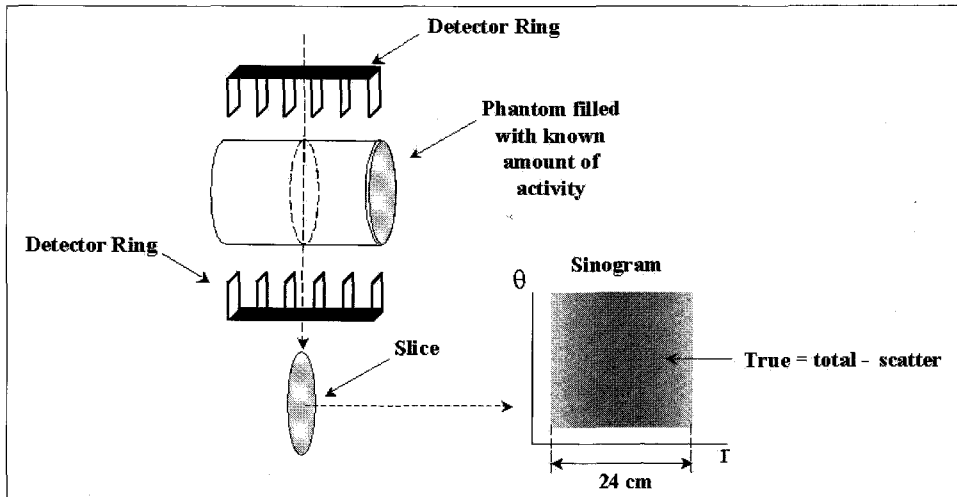


Fig. 3. Sensitivity measurement required true count rate recorded from the sinogram data of the phantom within 24cm transverse FOV.

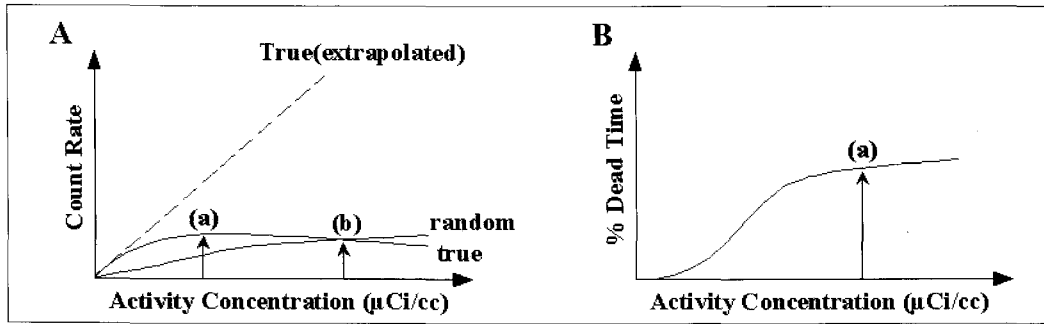


Fig. 4. Examples of count rate losses measurement. (A) True, random, and true count rates extrapolated at low activity as a function of activity concentration. Indicated two arrows represented when (a) true count rate reached its peak, (b) random count rate equaled true count rate, (B) % deadtime curve as a function of activity concentration. Indicated an arrow represented when (a) activity concentration of 50% deadtime was reached.

dence subtraction을 이용하여 측정되는 우연계수율을 뺀 나머지 계수율  $R_{t+s}$ 과 낮은 방사능 농도에서 외삽하여 얻은 계수율인  $R_{extr}$ 을 이용하여 다음과 같이 측정되었다(Fig. 4).<sup>1)</sup>

$$PDT_{sys}(\%) = \left(1 - \frac{R_{t+s}}{R_{extr}}\right) \times 100$$

스캔과정은 총 18프레임에 걸쳐서 진행되며 처음 4프레임은 15분씩 획득하며 그 뒤 14프레임은 25분씩 25분의 간격을 두고 진행하여 총 스캔시간은 12시간 40분이 소요되었다.

### 5) 계수율보정

계수율보정에서는 두 번의 영상재구성을 실시하였으며 그 중 첫번째 영상재구성은 두 번째 영상재구성에서 계산감쇠보정(calculated attenuation correction: CAC)을 실시할 수 있도록 한다. 두 번째 영상재구성에서는 행렬크기 128128, FOV 25.5 cm, ramp필터, 차단주파수는  $4.0 \text{ mm}^{-1}$ 를 사용했으며 감쇠보정에는 계산감쇠보정을 사용하였다. 재구성된 영상에서는 직경 18 cm의 FOV를 설정하고 18프레임 각각에 대한 모든 영상면에 대해 참계수율을 계산하여 계수율보정을 실시한다. 실제로 측정하여 계수율보정을 거친 참계수율  $R_t$ 와 외삽하여 계산한 이론값  $R_{extr}$ 을 이용하여 다음과 같이 정확도  $\Delta r$ 을 계산하였다.<sup>1)</sup>

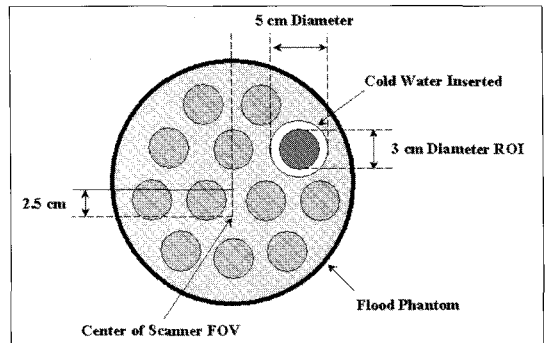


Fig. 5. Scatter correction measurement was performed with drawing 3 cm ROI on the cold-water insert and background which was filled with uniform distribution of low activity.

$$\Delta r(\%) = \left(1 - \frac{R_t}{R_{extr}}\right) \times 100$$

### 6) 산란보정

산란보정은 배후에 약 2 mCi의  $^{18}\text{F}$ FDG와 물을 고루 채운 실린더 모양의 팬텀에 직경 5 cm의 방사능이 없는 물을 채운 삽입물을 장착하고 스캐너의 X=0, Y=2.5 cm 위치에 설치하여 약 30분간의 방출스캔을 통하여 측정하였다. 영상의 재구성에서는 행렬크기  $256 \times 256$ , ramp필터 및 차단주파수는  $4.0 \text{ mm}^{-1}$ 를 사용하였고 25.5 cm의 FOV를 설정한 후 계산감쇠보정을 이용하였으며 재구성된 영상에서 방사능이 없는 삽입물 영역에 한 개의

관심영역(region of interest, ROI)을, 그리고 배후 지역에 11개의 ROI를 설정하여(Fig. 5) 산란보정 후에 삽입물 지역에서 나타나는 계수  $C_{cyl}$ 와 배후의 평균계수  $C_{avg}$ 와의 비로서 다음과 같이 산란보정의 오차  $\Delta SF_{corr}$ 를 측정하였다.<sup>1)</sup>

$$\Delta SF_{corr} (\%) = \frac{C_{cyl}}{C_{avg}} \times 100$$

7) 균일도보정

균일도보정 측정에서는 약 8 mCi의 <sup>18</sup>FDG를 고루 채운 물과 팬텀을 이용하여 X=0, Y=2.5 cm 위치에 장착한 후 약 1시간 26분 동안 스캔을 실시하였다. 제조사의 지침에 따르면 스캔에 소요되는 예정시간은 약 4시간으로 되어있지만, 최소 2000만 계수 이상을 얻도록 설계된 시스템의 설정에 의해 성능평가에 필요한 계수를 모두 얻었으므로 예정시간을 단축할 수 있었다. 영상의 재구성에서는 영상의 행렬크기 256×256, ramp필터와 25.5 cm의 FOV를 설정하고 차단주파수는 4.0 mm<sup>-1</sup>, 영상의 감쇠보정에서는 계산감쇠보정을 이용하였다. 재구성된 영상에서 직경 17.5 cm의 ROI를 설정하고 그 안에 1 cm 크기의 격자들을 구성하여 각각의 격자 내의 계수값들을 분석하여 영상의 비균일도(non-uniformity, NU)를 측정하였다. 각각의 영상면에서 최대계수  $C_{max}$ 와, 최소계수  $C_{min}$  및 평균계수  $C_{avg}$ 를 측정하여 다음과 같이 최대 비균일도( $NU_{max}$ ) 및 최소 비균일도( $NU_{min}$ )의 백분율을 구하였다.<sup>1),3)</sup>

$$NU_{max} (\%) = \frac{+(C_{max} - C_{avg})}{C_{avg}} \times 100$$

$$NU_{min} (\%) = \frac{-(C_{avg} - C_{min})}{C_{avg}} \times 100$$

또한 영상면의 평균계수  $C_{avg}$ 와 영상면내 임의의 계수  $C_k$  그리고 표준편차(standard deviation, SD)를 이용하여 변이계수(coefficient of variation, CV)를 다음과 같이 구하였다.<sup>1)</sup>

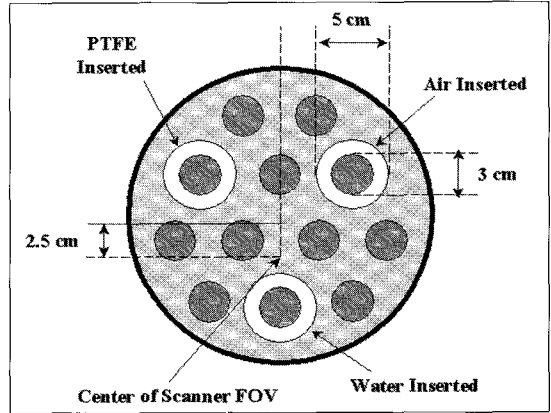


Fig. 6. Attenuation correction measurement was performed by drawing 3 cm diameter ROIs for all the inserts and background, and the correction error was determined from the ratio of the counts in the inserts and to the background.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(K-1)} \sum_{k=1}^K (C_k - C_{avg})^2}$$

$$CV(\%) = \frac{SD}{C_{avg}} \times 100$$

여기서 K는 영상면내에 구성된 완전한 모양을 지니고 있는 모든 격자의 개수를 의미한다.

8) 감쇠보정

감쇠보정은 먼저 30분 동안의 공백스캔을 실시한 후 직경 5 cm의 공기, 물, 테플론이 채워진 삽입물들을 실린더 모양의 팬텀에 각각 장착하고 나머지 공간에 방사능이 없는 물을 채운 후 2.0 mCi의 <sup>18</sup>FDG를 배후에 주입한 후에 고루 섞고 팬텀을 X=0, Y=2.5 cm에 위치시켜서 45분간의 방출스캔을 실시하였다. 방사능이 모두 소멸된 후에 PET 기기에 장착된 <sup>68</sup>Ge (10 mCi) 회전핀선원을 사용하여 60분 동안의 투과스캔을 실시하였다. 영상의 재구성과정에서는 측정감쇠보정(measured attenuation correction: MAC)을 사용하였고, 행렬크기는 256×256, ramp필터, 차단주파수는 4.0 mm<sup>-1</sup>, 그리고 FOV는 25.5 cm로 설정하였다. 그 후 구성된 영상

에서 각각의 삽입물 위치에 직경 30 mm의 ROI를 설정하고 그 외의 영역에는 같은 직경의 9개의 ROI를 생성하여(Fig. 6) 각각의 영상면에 대하여 배후영역의 평균계수  $C_N$ 과 삽입물 영역의 계수  $C_{insert}$ 의 비로부터 감쇠보정의 오차  $\Delta C_{insert}$ 를 계산하였다.<sup>1)</sup>

$$\Delta C_{insert} (\%) = \frac{C_{insert}}{C_N} \times 100$$

## 결 과

### 1. 횡축방향 공간분해능

시스템의 횡축방향 공간분해능에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 고민감도 모드에서 동경방향의 횡축방향 공간분해능은 스캐너의 시야중심에서 4.8 mm, 20 cm지점에서 7.03 mm로 감소하였고 접선방향에서는 스캐너의 시야중심에서 4.5 mm, 20 cm지점에서 5.0 mm로 감소하였다.

### 2. 축방향 공간분해능

축방향 공간분해능에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 고민감도 모드에서 선원의 위치에 따른 축방향 공간분해능을 직접영상면과 교차영상면에 대한 평균값으로 나타내었을 때 스캐너의 중심에서 3.98 mm, 20 cm지점에서는 6.71 mm로 감소하였다.

### 3. 산란분획

산란분획은 스캐너의 시야중심과 4 cm, 8 cm지

Table 1. Scatter Fraction (SF) Measurement for Image Planes at HS and HR Mode

Scan mode	Plane	SF(%)
High sensitivity	Direct	9.57
	Cross	10.17
	Average	9.87
High resolution	Direct	8.93
	Cross	9.39
	Average	9.16

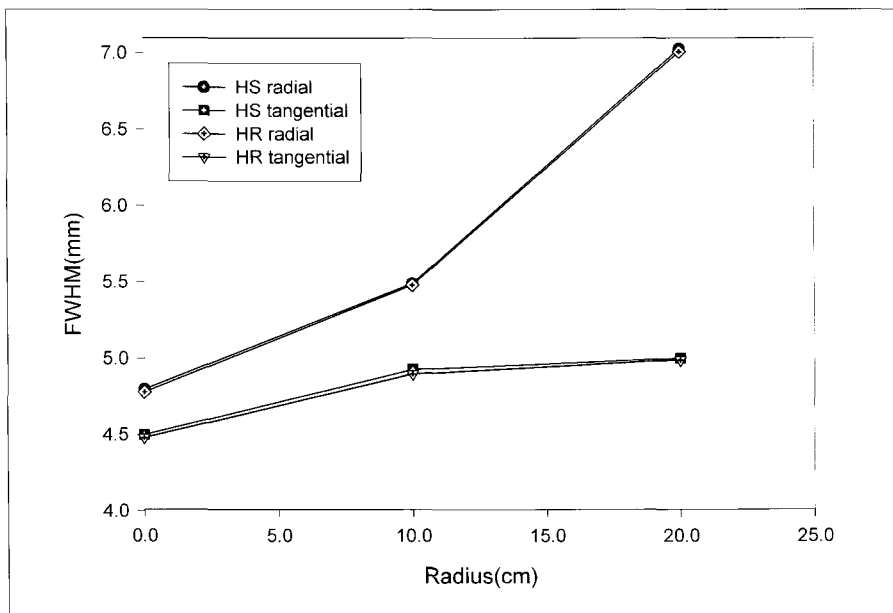


Fig. 7. Transaxial resolutions measured on radial and tangential directions at high sensitivity and high resolution mode show decreasing resolutions along each position of line source.



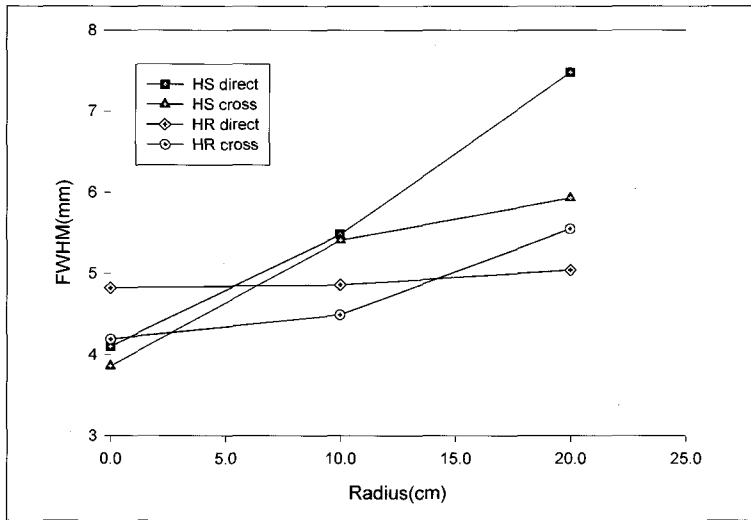


Fig. 8. Axial resolutions measured on direct and cross planes at high sensitivity and high resolution mode showed decreasing resolutions along each position of point source.

Table 2. Sensitivity Measurement Presented as True and the Sum of True and Scatter Count Rate for Image Planes at HS and HR Mode

Scan mode	Plane	Count rate (kcps/ $\mu$ Ci/cc)	
High sensitivity	Direct	True+Scatter	7.03
		Trues	6.40
	Cross	True+Scatter	7.99
		Trues	7.27
	System	True+Scatter	248.1
		Trues	225.8
High resolution	Direct	True+Scatter	3.18
		Trues	2.93
	Cross	True+Scatter	5.52
		Trues	5.08
	System	True+Scatter	149.5
		Trues	137.6

Table 3. Count Rate Losses and Randoms Measurement for Activity Concentrations at 50% Deadtime, Peak of True Count Rate and True Count Rate Equaled to Random Count Rate and Count Rates at the Activity Level.

Scan mode	Activity	Activity conc. (count rate)
High sensitivity	At 50%deadtime	4.60 $\mu$ Ci/cc (427 kcps)
	At true=peak	7.45 $\mu$ Ci/cc (466 kcps)
	At true=random	10.08 $\mu$ Ci/cc (437 kcps)
High resolution	At 50%deadtime	4.59 $\mu$ Ci/cc (259 kcps)
	At true=peak	7.45 $\mu$ Ci/cc (283 kcps)
	At true=random	12.37 $\mu$ Ci/cc (215 kcps)

점에서 각각 고민감도 모드 및 고분해능 모드에 대하여 얻은 평균값을 Table 1에 나타내었다. 고민감도 모드에서 시스템의 평균 산란분획은 9.87%였다.

#### 4. 민감도

시스템의 민감도는 고민감도 모드 및 고분해능 모드에서 직접영상면 및 교차영상면과 시스템에 대한 계수율로서 Table 2에 나타내었다. 고민감도 모드에서 직접영상면의 참계수율은 6.40 kcps/ $\mu$ Ci/cc, 교차영상면은 7.27 kcps/ $\mu$ Ci/cc였으며 시스템전체의 참계수율과 산란계수율의 합에 대한 민감도는 248.1 kcps/ $\mu$ Ci/cc,였으며 참계수율에 대한 민감도는 225.8 kcps/ $\mu$ Ci/cc였다.

#### 5. 계수율손실

시스템의 계수율특성에 관한 결과를 Table 3에 나타내었다. 고민감도 모드의 경우 불응시간이 50%일 때의 방사능 농도는 4.6  $\mu$ Ci/cc이며 이때의 계수율은 427 kcps이고 참계수율이 정점에 도달했을 때의 방사능 농도는 7.45  $\mu$ Ci/cc, 계수율은 466 kcps이었고 참계수율과 우연계수율이 동일할 때의 방사능 농도는 10.08  $\mu$ Ci/cc이며 이때의 계수율은 437 kcps였다. 제조사의 시험지침서에 따르면 고민감도 모드에서 50%의 불응시간을 가지는 방사능 농도는 4.5  $\mu$ Ci/cc이고 이것은 50%의 불응시간을 가질 수 있는 시스템의 최소 방사능 농도를 의미하므로 본 성능평가에서는 허용할만한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

#### 6. 계수율보정

계수율보정은 스캔모드에 따라서 불응시간이 50%인 방사능 농도에서의 계수율손실에 대한 보정의 정확도를 나타내며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 고민감도 모드에서 측정된 계수율보정의 오차는 최소 1.49%, 최대 3.83%였다.

**Table 4.** Count Rate Linearity Correction Errors for the Activity Concentration of 50% Deadtime at HS and HR Mode

Scan mode	Activity conc.	Error(%)
High sensitivity	4.6 $\mu$ Ci/cc	1.49 ~ 3.83
High resolution	4.59 $\mu$ Ci/cc	0.93 ~ 4.74

**Table 5.** Scatter Correction Errors for Image Planes at HS and HR Mode

Scan mode	Plane	Error(%)
High sensitivity	Direct	-1.06
	Cross	-0.83
	Average	-0.95
High resolution	Direct	-1.20
	Cross	-0.56
	Average	-0.89

**Table 6.** Average Slice and Inter Slice (System) Non-uniformity (NU) Measurement and their Coefficient of Variation (CV) at HS and HR Mode

Scan mode	Measurement	NU(CV)%
High sensitivity	Average NU(CV)	8.37(2.73)
	System NU(CV)	-1.25~1.74(0.74)
High resolution	Average NU(CV)	9.52(3.17)
	System NU(CV)	-1.37~1.98(1.07)

**Table 7.** Attenuation Correction Errors for Three Inserts at HS and HR Mode

Scan mode	Inserts	Error(%)
High sensitivity	Air	5.68
	Water	0.04
	PTFE	-6.51
High resolution	Air	4.52
	Water	-0.47
	PTFE	-5.23

### 7. 산란보정

삽입물 영역들에 잔존하는 산란계수와 방사능이 있는 배후의 평균계수에 대해서 산란보정을 실시했을 때의 오차를 Table 5에 나타내었다. 고민감도 모드에서 산란보정의 오차는 평균 -0.95% 였다.

### 8. 균일도

고민감도 모드와 고분해능 모드에 대하여 전체 영상면에 대한 비균일도 및 변이계수와 시스템에 대한 비균일도, 변이계수의 백분율을 Table 6에 나타내었다. 고민감도 모드에서 전체 영상면의 평균 비균일도는 8.37%였으며 변이계수는 2.73%였고 영상면들 간의 비균일도는 최소 -1.25%, 최대 1.74%였으며 변이계수는 0.74%였다.

### 9. 감쇠보정

감쇠보정의 정확도에 대한 오차를 직접영상면 및 교차영상면에서 공기, 물, 테플론에 대하여 각각 측정 후 평균한 값을 고민감도 모드 및 고분해능 모드에 대한 값으로 Table 7에 나타내었다. 고민감도 모드에서 감쇠보정의 정확도에 대한 오차는 공기에서 5.68%, 물에서 0.04%, 테플론에서 -6.51% 였다.

## 고 찰

본 실험에서 횡축방향 공간분해능 검사의 결과들은 고민감도 모드에서 스캐너의 시야중심 일 때 동경방향 4.8 mm FWHM, 접선방향 4.5 mm FWHM 이었고, 20 cm위치에서는 동경방향 7.03 mm FWHM, 접선방향 5.0 mm FWHM으로 시야 중심 일 때보다 FWHM이 증가하였다. NEMA 프로토콜에 따르면 PET 시스템의 표준성능평가에서 공간분해능의 측정은 선원을 공기 중에 위치한 채로 행해지게 되어 있으며 이것은 모든 변수들이같은 경우에 공기 중에서 더 나은 공간분해능을 가지는 기기는 임상에서도 더 나은 해상도를 가진다는 개념에 기초한 것이다. 하지만 영상재구성에 있어서 사용한 설정들인 256×256행렬과 6.4 cm의 매우 작

은 FOV 및 ramp필터를 사용하여 재구성한 영상을 통하여 나온 결과값들은 그것이 실제 임상조건에서의 해상도를 의미하지는 않는다.<sup>1,3)</sup> 축방향 공간분해능 측정은 FWHM으로 표시하는 공간분해능 뿐 아니라 응답함수의 peak와 valley를 측정하여 peak-to-valley ratio로서 선원의 축방향 위치에 따른 영상면에서의 partial volume error를 나타낸다. 높은 peak-to-valley ratio는 선원의 축방향 이동에 의한 시스템의 partial volume error또한 크다는 것을 의미한다.<sup>3)</sup> 본 측정에서 고민감도 모드일 때의 평균 peak-to-valley ratio는 2.18이었다.

산란분획의 측정은 우연계수율을 무시해도 될 만큼 낮은 방사능농도에서 행해지며 그 결과는 시스템의 기하학적 구조, 차폐구조, 그리고 검출물질의 종류에 의해 결정되는 에너지 윈도우에 의해 크게 좌우된다.<sup>3)</sup> 결과로서 얻어진 산란분획값은 sino-gram을 통하여 분석되므로 재구성된 영상에서의 대조도나 노이즈를 직접적으로는 나타내지 못하기 때문에 실제 임상에서의 산란분획이 나타내는 비중을 이 값들로서 예측할 수는 없다. 실제로 재구성을 통하여 나타난 영상은 재구성 과정에서 이용되고 있는 필터의 영향에 의해 산란의 비중이 더 낮게 나타난다.

민감도 측정은 이미 알고있는 방사능의 농도와 분포에서 시스템의 계수능력을 측정하는 것으로서 참계수율이 선형으로 나타날 수 있을 정도로 낮은 불응시간을 가지는 방사능 농도에서 행해진다. 이 검사에서도 영상재구성 알고리즘에서 증폭되는 노이즈의 영향은 고려할 수가 없으므로 영상에서의 노이즈 수준은 나타낼 수가 없다.

시스템의 계수능 측정에 있어서의 고전적인 방법은 참계수율이 우연계수율과 같아지는 지점을 기준으로 삼았지만 갈수록 검출기 결정의 수가 많아지고 대부분 불응시간의 원인이 광자를 검출한 결정을 구분하는 회로에서 발생하는 점을 감안할 때 불응시간이 50%가 되는 지점에서의 방사능 농도와 그에 따른 계수율을 측정하는 것이 시스템의 계수능을 판별하는 기준으로 되어있다.<sup>3)</sup> 신호대잡음비 (signal to noise ratio, SNR)는 서로 다른 기기가 각기 다른 방사능에서 측정되어도 영상의 품질을

나타낼 수 있는 범용적인 지표로서 사용되고 있으며 prompt채널과 delayed채널의 계수치를 이용하여 측정된 우연계수와, 산란분획 측정에서 알 수 있는 산란계수 및 참계수를 이용하여 SNR을 직접 나타낼 수는 없지만 그에 비례하는 양을 noise equivalent count rate (NECR)로서 측정할 수가 있다.<sup>1),5),6)</sup> 불응시간과 우연계수에 의한 계수율손실에 대한 보정은 모든 영상면들에 대해서 행하여 졌으며 50%의 불응시간을 가지는 방사능 농도에서의 오차 값으로 나타내었다. 이러한 오차 값은 높은 방사능 농도를 사용하는 임상에서의 정량적 연구에 있어서 기기적인 오차의 허용치로서 이용될 수 있다.<sup>4)</sup>

산란보정 측정은 스캐너의 산란보정 기술의 정확도를 측정하는 것으로서 그것이 음의 값을 가지면 기기가 산란계수를 실제보다 높게 측정했다는 것이고 양의 값일 때는 낮게 측정했다는 것을 의미한다.<sup>3)</sup> 본 측정에서는 고민감도 모드에서 산란보정의 오차는 평균 -0.95%로서 산란분획값이 약간 높게 측정되었음을 나타내지만 이상적인 측정값인 0%에 매우 근접하였다고 할 수 있다. 그러나 이러한 오차 값은 산란분획값이 재구성된 영상에서 나타나는 노이즈에 영향을 미치는 정도를 직접적으로 나타내지는 않는다.

균일도보정은 계수율의 통계적인 변동을 배제하여 단지 소프트웨어 및 영상재구성 알고리즘에 있어서 시스템의 불완전성이 유발하는 기기적인 오차를 측정하기 위한 것이다. 성능검사시 팬텀은 스캔 위치에 있어서의 기하학적인 대칭성을 피하기 위해서 시야중심에서 Y축 방향으로 약 2.5 cm 벗어난 위치에서 측정되며 영상의 재구성에는 검출기 규격화(detector normalization), 계수율손실 및 우연계수율 보정, 산란보정, 감쇠보정 등의 값들과 함께 실시되고 이때의 감쇠보정은 계산감쇠보정으로서 물에 대해 이미 알고있는 감쇠상수값으로 시행되었다.

감쇠보정 측정은 계수율손실을 최소화 할 수 있도록 불응시간 및 우연계수율이 5% 이하의 방사능 농도를 사용하여 측정하였고 각각의 영상면에 대하여 최소 2백만 계수를 얻도록 하였다. 고민감도 모

드, 2차원 스캔에서 얻어진 본 결과값은 모두  $\pm 10\%$ 의 허용오차를 제시한 기기 제조사의 시험지에 적합하였다.

## 요 약

**목적:** 본 연구의 목적은 NEMA 프로토콜에 따라서 GE Advance™ PET 시스템의 성능을 평가하고 그러한 시스템이 나타낼 수 있는 능력과 한계점을 명확히 이해하는데 있다. **대상 및 방법:** 성능평가는 <sup>18</sup>F<sub>2</sub>FDG 선상선원 및 점선원 그리고 NEMA 팬텀을 사용하여 횡축방향 공간분해능, 축방향 공간분해능, 산란분획, 민감도, 계수율손실, 계수율보정, 산란보정, 균일도보정, 감쇠보정을 대상으로 하였다. 횡축방향 공간분해능과 축방향 공간분해능, 산란분획에서는 선상선원 및 점선원을 사용하여 각각 NEMA 프로토콜에 따라 정해진 위치로 이동시키면서 측정하였고, 산란분획 및 나머지 성능평가 검사에서는 직경 20 cm의 PMMA 재질의 팬텀을 이용하여 측정하였다. **결과:** 표준영상 획득 모드에서 시행한 본 성능평가의 결과를 고민감도 모드 및 고분해능 모드에 대하여 얻었다. 고민감도 모드에서 동경방향으로 측정된 횡축방향 공간분해능은 스캐너 시야중심에서 4.8 mm, 20 cm에서 7.03 mm로 감소했으며 축방향 공간분해능은 스캐너 시야중심에서 평균 3.98 mm, 20 cm에서 6.71 mm로 감소하였다. 산란분획은 고민감도 모드에서 평균 9.87%였고, 민감도 측정의 결과는 고민감도 모드, 시스템 전체에 대해서 참동시계수율 225.8 kcps/ $\mu$ Ci/cc를 얻었고 계수율손실 측정은 50%의 불응시간을 가지는 방사능 농도가 4.6  $\mu$ Ci/cc였으며 이때의 계수율은 427 kcps였다. 계수율 보정의 오차는 고민감도 모드, 4.60  $\mu$ Ci/cc에서 최소 1.49%, 최대 3.83%였고, 산란보정의 오차는 고민감도 모드에서 평균 -0.95%였으며 균일도보정 측정은 영상면들 간의 비균일도가 최소 -1.25%, 최대 1.74%였고 변이계수는 0.74%였다. 감쇠보정의 오차는 공기에서 5.68%, 물 0.04%, 테플론 -6.51%를 얻었다. **결론:** NEMA 프로토콜에 근거하여 본 연구에서 실시한 표준 성능 평가 검사는

모두 제조사의 시험지침서에 부합하였다. 결론적으로, 이는 본 GE Advance™ PET 시스템이 임상에서의 적용에 적합함을 보여주었다.

### 참 고 문 헌

- 1) National Electrical Manufacturers Association: NEMA Standards Publication NU 2-1994, Performance Measurements of Positron Emission Tomographs, Washington DC, *National Electrical Manufacturers Association*, 1994
  - 2) General Electric Medical Systems: Advance™ PET Imaging System Performance Test Procedure, Milwaukee, *GE Medical Systems*, 1994
  - 3) Karp JS, Daube-Witherspoon ME, Hoffman EJ, Lewellen TK, Links JM, Wong WH, et al. Performance Standards in Positron Emission Tomography. *J Nucl Med* 1991;32:2342-50
  - 4) Lee JR, Choi Y, Choe YS, Lee KH, Kim SE, Shin SA, et al. Performance Measurements of Positron Emission Tomography: An Investigation Using General Electric Advance™. *Kor J Nucl Med* 1996;30:548-59
  - 5) DeGrado TR, Turkington TG, Williams JJ, Stearns CW, Hoffman JM, Coleman RE. Performance Characteristics of a Whole - Body PET Scanner. *J Nucl Med* 1994;35:1398-406
  - 6) General Electric Medical Systems. Positron Emission Tomography Imaging with the Millennium VG, Milwaukee, *GE Medical Systems*, 1998
-