

## 소동물 영상을 위한 Siemens Inveon PET 스캐너의 성능평가

\*한국원자력의학원 방사선의학연구소 분자영상연구부, †연세대학교 보건과학대학 방사선학과

유아람\*<sup>†</sup> · 김진수\* · 김경민\* · 이영섭\*<sup>†</sup> · 김종국\* · 이상근\* · 박지애\* · 김희중<sup>†</sup> · 천기정\*

Inveon PET은 최근에 출시된 소동물 전용 PET 시스템이다. 이 연구에서는 Inveon PET 스캐너의 성능을 평가하기 위하여 공간 분해능, 민감도, 산란분획, 잡음등가계수(Noise equivalent count rate: NECR)를 측정하였다. 공간 분해능 측정은 에너지창 350~625 keV, 민감도, 산란분획, NECR 측정은 350~750 keV에서 수행하였고 동시계수차는 3.432 ns였다. 크기 1 mm<sup>3</sup>의 F-18 점 선원을 만들어 중심에서부터 5 cm 벗어난 위치까지 공간 분해능을 측정하였다. 민감도를 측정하기 위하여 스캐너의 축방향 길이와 동일한 길이 12.7 cm의 F-18 선 선원을 만들고 두께 2 mm의 알루미늄 관을 1개에서 5개까지 차례로 씌우며 절대 민감도를 계산하였다. 산란분획과 NECR 측정하기 위하여 두 가지 NEMA 산란 팬텀(랫(rat): 지름 50 mm, 길이 150 mm/마우스(mouse): 지름 25 mm, 길이 70 mm)을 이용하였고, F-18 선 선원(랫: 353 MBq, 마우스: 201 MBq)를 만들어 14반감기(25.6시간) 동안 데이터를 획득하였다. F-18의 중심에서 공간 분해능은 반경, 접선, 축 방향에서 각각 1.53, 1.50, 2.33 mm이고, 체적 공간 분해능은 5.43 mm<sup>3</sup>이었다. 절대민감도는 6.61%이었다. F-18 최대 NECR은 486 kcps @121 MBq (랫 팬텀), 1056 kcps @128 MBq (마우스 팬텀)이었다. 랫과 마우스의 산란분획은 각각 20.59%, 7.93%이었다. 이 연구에서 최신 소동물용 PET인 Inveon PET의 표준성능을 평가하였고 소동물 PET영상 획득에 유용함을 보여주었다.

중심단어: NEMA, 소동물용 PET, 성능평가

### 서 론

양전자방출단층촬영(Positron Emission Tomography: PET)은 방사성의약품이나 방사성동위원소를 인체에 주입하여 생리학적, 생화학적인 반응을 영상화하고, 이를 정량화할 수 있어 많은 분야에서 이용되고 있다. 최근 PET/CT와 SPECT/CT과 같은 융합형 영상장비는 개별 영상 장비의 단점과 한계점을 극복하기 위하여 개발된 장비로 그 이용도가 급격하게 증가하는 추세이다.<sup>1)</sup> 임상용 PET 스캐너를 소동물 실험에 이용하는 것은 분해능, 민감도에 한계가 있기에 소동물 실험에 실질적으로 유용한 정보를 제공해줄 수 있는 고분해능, 고민감도의 소동물용 장비를 사용한 연구가 활발하다.<sup>2,3)</sup> Inveon PET (Siemens medical solutions, Knoxville,

USA)은 PET, SPECT, CT가 결합된 소동물용 삼중영상 장비로 전임상 연구에 적극 활용될 것으로 기대한다.<sup>4)</sup>

이처럼 핵의학 영상 장비 기술이 진보함에 따라 영상장비의 성능평가 방법도 발전하고 있으며 다양한 사양의 장비를 모두 표준화하여 비교하는 것은 어려워 표준화된 방법인 NEMA (National Electrical Manufacturers Association)를 이용한다.<sup>5-7)</sup> 국제 표준 방법으로 스캐너의 성능을 평가하는 것은 실험의 디자인, 결과 영상의 분석에 도움을 주고 장비 간 객관적인 비교가 가능하며 나아가 정도 관리를 통한 영상의 질 향상을 가져올 수 있다.<sup>8,9)</sup> 따라서 이 연구에서는 시스템의 성능 평가에 표준인 NEMA에서 제안한 방법 중 소동물용 PET 성능 평가 방법인 NEMA NU 4-2008을 적용하여 Inveon PET의 공간분해능, 민감도, 산란분획과 NECR (Noise equivalent count rate)을 측정하였다.

### 대상 및 방법

#### 1. PET 스캐너

Inveon PET 스캐너의 검출부는 1.51×1.51×10 mm<sup>3</sup>의 섬광결정 400 (20×20)개가 모여 이루어진 검출기 블록 64개

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단 원자력기술개발사업(20090078289, M20702010002-08N0201-00200) 및 한국원자력의학원 자체연구개발사업(50331-2010)의 지원을 받았다. 이 논문은 2010년 2월 18일 접수하여 2010년 5월 10일 채택되었음.  
 책임저자 : 김진수, (139-706) 서울시 노원구 공릉2동  
 한국원자력의학원 방사선의학연구소 분자영상연구부  
 Tel: 02)970-1661, Fax: 02)970-2416  
 E-mail: kjs@kirams.re.kr

Table 1. Comparison of small animal PET systems.

	Inveon*	R4 <sup>†</sup>	Focus 120 <sup>‡</sup>
Crystal material	LSO	LSO	LSO
Crystal size (mm <sup>3</sup> )	1.5×1.5×10	2.1×2.1×10	1.5×1.5×10
Crystal pitch (mm)	1.59	2.45	1.59
Crystal array	20×20	8×8	12×12
No. of detector blocks	64	92	96
Total No. of crystals	25,600	6,144	13,824
No. of rings	80	36	48
Ring diameter (cm)	16.1	15	15
Axial FOV (cm)	12.7	7.8	7.6
Transaxial FOV (cm)	10	10	10
Solid angle/4π	0.62	0.46	0.45

\*Data published by Bao et al.<sup>4), †Data published by Knoess et al.<sup>14), ‡Data published by Kim et al.<sup>2).</sup></sup></sup>

로 구성되어있다. 총 25,600개의 LSO (Lutetium Oxyorthosilicate) 섬광 결정들이 각각 320개의 결정을 가진 80개의 검출기 링을 구성하고 있다. 링의 지름은 16.1 cm이며, 스캐너의 횡축 시야(Transaxial field of view)는 10.0 cm, 종축 시야(Axial field of view)는 12.7 cm이다.<sup>4)</sup> 기존의 PET 스캐너보다 크기가 작은 섬광결정을 사용하여 공간 분해능이 향상된 영상을 얻을 수 있고, 섬광의 소멸시간이 빠른 LSO 섬광결정과 고속 신호처리회로를 사용하여 NECR을 향상시켰다. 또한 확장된 종축 시야는 민감도의 향상, 전신 촬영 시 촬영 시간의 단축 효과를 얻을 수 있다. Table 1에서 Inveon과 다른 소동물용 PET의 사양을 비교하였다.<sup>2,4,10)</sup> 실험에 사용한 동시계수 창 3.432 ns이었다.

## 2. 공간 분해능

공간 분해능은 재구성된 영상면에 나타나는 인접한 두 점을 구별하여 검출해 낼 수 있는 시스템의 능력을 의미하는데, 작은 기관까지 영상으로 나타내야 하는 소동물용 장비에서는 특히 중요하다.<sup>11)</sup> 공간 분해능을 측정하기 위하여 내경 1.1 mm, 두께 0.2 mm의 가는 유리관에 크기 1 mm<sup>3</sup>의 F-18 점 선원을 만들었다. 에너지 창 350~625 keV, 동시계수 창 3.432 ns에서 불음 시간 손실이 5%를 넘지 않는지 확인하였다. NEMA NU 4-2008에서는 Na-22 점 선원을 사용하여 시스템의 공간 분해능을 측정하였다. 하지만 이 실험에서는 양전자 비정거리가 다른 핵종과 비교 연구를 위하여 임상 및 전임상에서 가장 많이 사용하는 핵종인 F-18 선원을 사용하였다. PET영상 획득은 스캐너의 횡축, 종축 시야의 중심에 점 선원을 위치시킨 다음 스캐너의 중심에서 반경(radial) 방향으로 선원을 움직이면서 데이터를

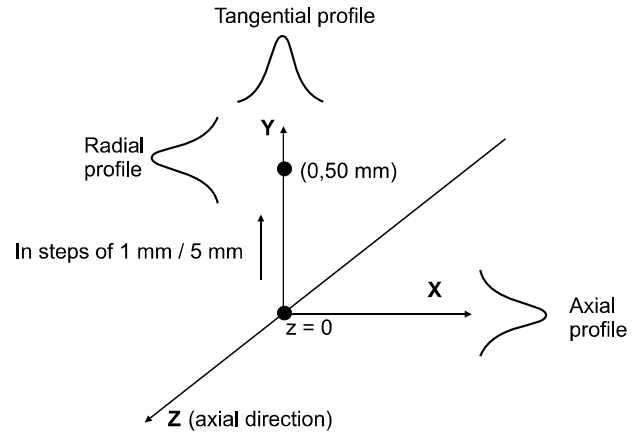


Fig. 1. Positions of source for spatial resolution measurement.

획득하였는데 5 mm까지는 1 mm 간격으로, 이후부터 방향 시야의 끝까지는 5 mm 간격으로 선원의 위치를 옮겨가며 획득하였다(Fig. 1). PET 데이터는 5분 동안 획득하였으며 각각의 계수는 10<sup>5</sup> 이상의 계수를 얻어야 한다는 조건을 만족시켰다.<sup>8)</sup>

획득한 3D 사이노그램을 2D로 재배열한 다음 램프필터만 적용하여 여과후역투사방법(Filtered back projection: FBP)으로 영상을 재구성하였다. 이 때 각 화소의 크기는 0.258×0.258 mm<sup>2</sup>로 예상 공간 분해능의 1/5보다 작아야 한다는 NEMA의 조건을 충족시켰다. 이 때 화소 크기가 너무 작으면 파일 용량 커지는 단점이 있으므로 영상 분석에 적절한 값을 사용하여야 한다.<sup>12)</sup> 재구성한 영상에서 최대값을 갖는 화소를 중심으로 접선 방향(tangential direction, x축 방향), 반경 방향(radial direction, y축 방향), 축 방향(axial direction, z축 방향)의 프로파일(profile)을 구하였다(Fig. 1). 최대값을 갖는 화소를 인접한 두 화소의 값과 포물선 정합(parabolic fitting)하여 최고점을 결정한 다음 최고점의 1/2 되는 부분과 1/10 되는 부분의 값을 선형 보간법을 통해 계산한 후 전체반값두께(full width at half maximum: FWHM)와 전체 1/10값두께(full width at tenth maximum: FWTM), 체적 공간 분해능을 구하였다.

## 3. 민감도

민감도는 선원으로부터 초당 검출기에서 검출되는 참계수값의 비율이다. 즉 “검출한 참계수값/방사선원의 세기”이며 참계수값은 초당 계수값인 count per second (cps)로 표현할 수 있고, 방사선원의 세기를 1초당 붕괴되는 방사선원의 양인 disintegration per second (dps)로 표현할 수 있어 백

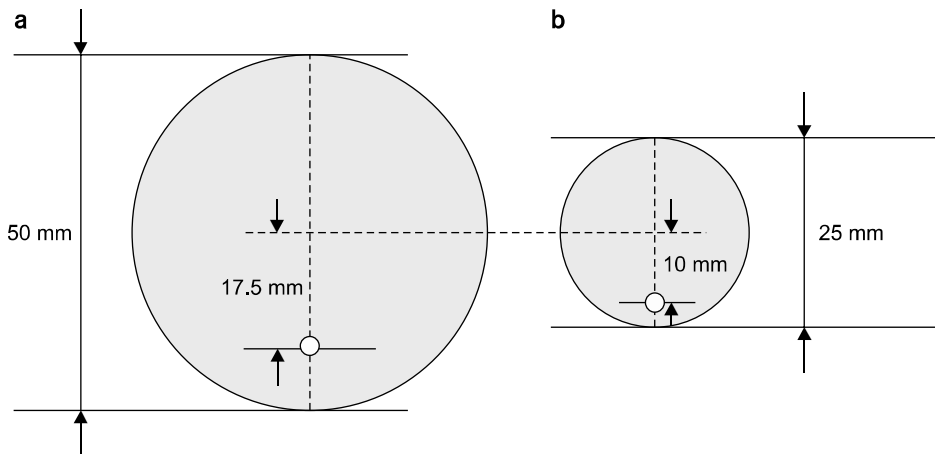


Fig. 2. Schematics of (a) rat sized and (b) mouse sized scatter fraction phantom recommended by NEMA NU 4-2008.

분율로 표시할 수 있다.<sup>12)</sup> 참계수율이 선형으로 나타날 수 있을 정도로 불응시간손실이 1% 이하의 낮은 방사능 농도에서 시행해야 하였다. NEMA NU 4-2008에서는 Na-22 점선원의 사용을 권고하였으나 이 실험에서는 향후 원자핵 붕괴의 특성이 다른 핵종과 민감도 비교 연구를 위하여 F-18 선 선원을 사용하였고 민감도를 측정하는 방법은 NEMA NU 2-2007에서 사용하는 방법을 사용하였다. 자세한 사항은 다음과 같다. 먼저 F-18 선 선원(초기 방사능 세기 451.4 kBq, 길이 12.7 cm)을 만들어 FOV의 중심에 위치를 맞추고 축방향 시야 길이와 동일한 길이, 두께 2 mm 알루미늄 관을 1개에서 5개까지 차례로 씌우며 에너지 창 350~750 keV에서 각각 5분 동안 측정하였다. 감쇠매질의 두께가 증가함에 따른 계수 변화를 측정하여 매질이 없을 때의 동시계수율을 구하였다. 이때 자연붕괴에 의한 감쇠, 자연방사능, LSO 섬광 결정에 의한 내인성 방사능(intrinsic activity)을 보정해주었다. 이후 선형 회기분석과 외삽을 하여 감쇠매질이 없는 이상적인 상태의 절대 민감도를 구하였다.

#### 4. 산란분획과 NECR

산란분획은 “산란계수/(산란계수+참계수)”로서 PET 데이터 중 산란계수의 비율을 나타내는 것이며 NECR은 일종의 신호 대 잡음비로 영상의 질을 평가하는 척도이다.<sup>13)</sup> 특히 3D에서는 산란, 랜덤계수가 증가해 신호 대 잡음비가 방사선원의 양에 비례하지 않으므로 더욱 중요하며 아래 식으로 구하였다.<sup>8)</sup>

$$NECR = \frac{T^2}{T+S+R}$$

이 때 T는 참계수, S는 산란계수, R은 랜덤계수율이다.

산란분획과 잡음등가계수(Noise Equivalent Count Rate: NECR)를 측정하기 원형 실린더모형의 NEMA NU 4-2008 산란 팬텀(폴리에틸렌 비중 0.96 g/cm<sup>3</sup>)을 사용하였다. 본 실험에서는 두 종류의(랫: 지름 50 mm, 길이 150 mm/마우스: 지름 25 mm, 길이 70 mm) NEMA 산란 팬텀을 이용하였다.<sup>8)</sup> 랫 팬텀은 중심축에서 17.5 mm, 마우스 팬텀은 10 mm 떨어진 곳에 지름 3.2 mm의 구멍이 있다(Fig. 2). NECR의 최대 값을 구하기 위해서는 불응시간이 50% 이상 되는 고선량(high activity)의 선원으로 실험을 시작해야 하므로 F-18 선 선원(초기 방사능 세기 랫: 316.35 MBq/ 마우스: 206.09 MBq)을 만들어 구멍에 넣었다. 350~750 keV에서 14분간(25.6시간)까지 영상을 획득하는데 선원의 방사능이 강한 처음부터 6시간까지는 3분 동안, 이후부터는 5분 동안 측정하였다. 또한 산란 팬텀에서 선원은 빼고 팬텀만 놓고 1시간 동안 배후 방사능을 측정하였다.

스캐너에서 얻은 모든 계수가 포함되어야 하므로 아무런 보정도 하지 않았고 SSRB (single slice rebinning) 방법으로 3D 사이노그램을 2D로 재배열 하였다. 산란분획은 전체 계수 중 산란 계수의 비율로 구하는데 계수손실이 1% 미만 이고, 랜덤(random)계수율이 참계수율의 1% 미만 이 되도록 낮은 방사능 세기에서 얻었으므로 이 때의 랜덤계수는 무시할 수 있을 정도로 작았다. 획득 데이터에서 위의 조건을 만족하는 마지막 프레임을 이용하여 검출된 전체감마선중의 산란선의 비인 산란 분획을 구하였다.

## 결 과

### 1. 공간 분해능

FBP로 재구성한 영상의 공간 분해능(FWHM)은 횡단면 중심에서 접선, 반경, 축 방향에서 각각 1.51, 1.54, 2.34 mm 이었다. FWTM은 각각 3.17, 3.32, 5.20 mm이었다. 체적 공간 분해능은 중심에서 5.42 mm<sup>3</sup> 반경 반향으로 5 cm 벗어난 지점에서 19.52 mm<sup>3</sup>이었다(Fig. 3).

### 2. 민감도

선 선원에 1개부터 5개까지 알루미늄 관을 씌워 PET 데이터 획득하고 자연붕괴와 배후방사능을 교정한 후 Fig. 4에서와 같이 회기 분석하여 감쇠매질이 없는 이상적인 상황의 민감도를 구하였다. 축방향 시야의 중심에서 절대 민감도는 6.61%이었다.

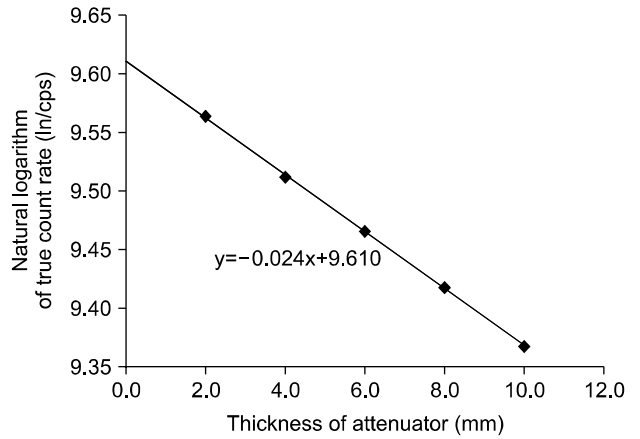


Fig. 4. Attenuation free sensitivity value was extrapolated from natural logarithm of true count rate versus thickness of attenuator.

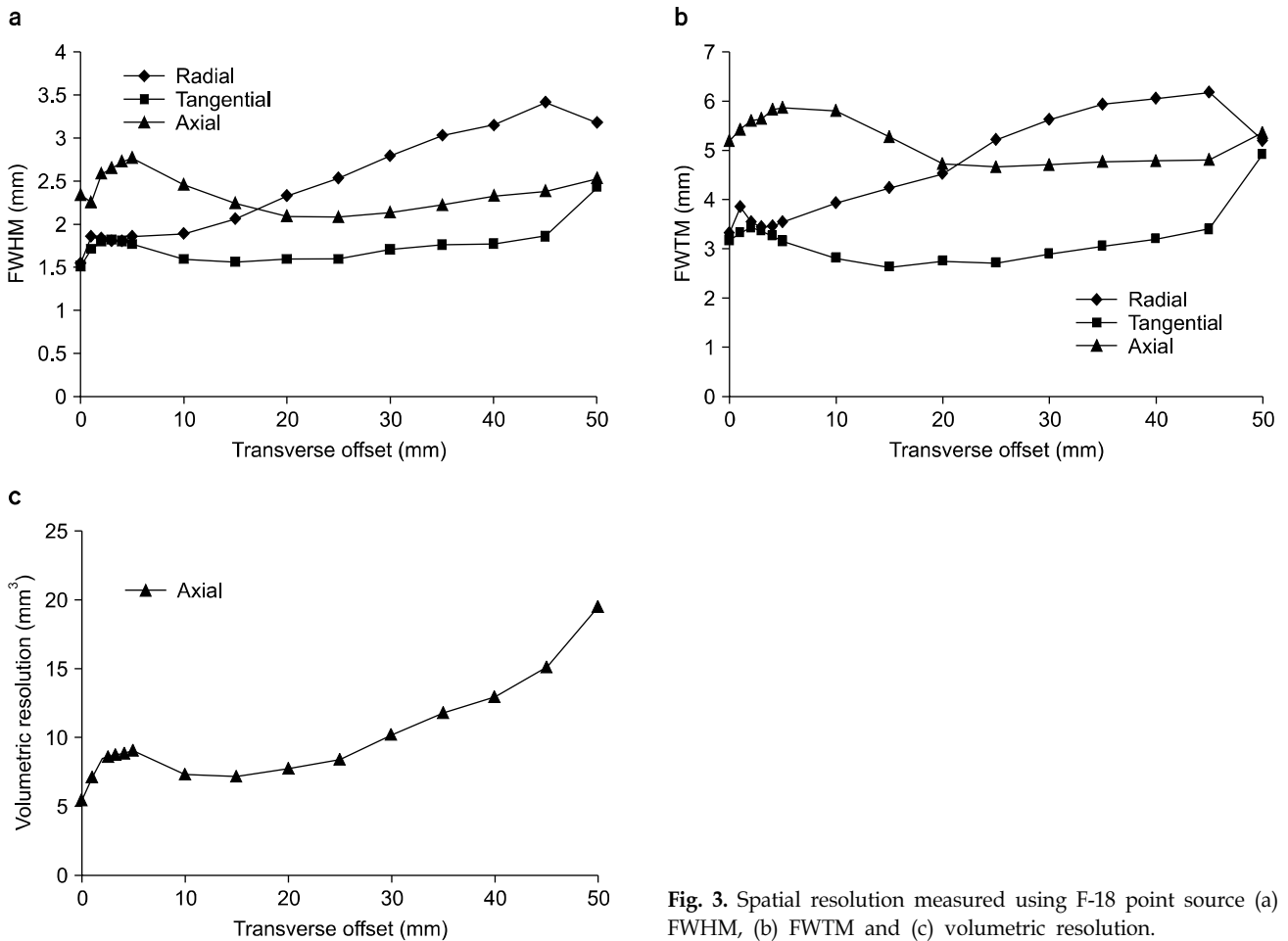


Fig. 3. Spatial resolution measured using F-18 point source (a) FWHM, (b) FWTM and (c) volumetric resolution.

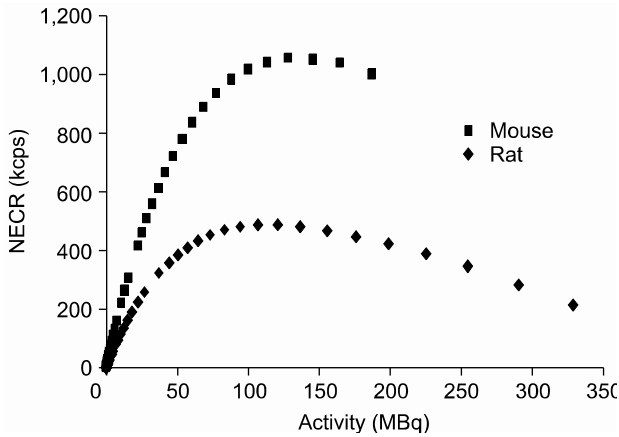


Fig. 5. NECR of rat and mouse phantom. Closed square and diamond were for mouse and rat, respectively.

### 3. 산란분획과 NECR

Fig. 5은 에너지창 350~750 keV에서의 NECR 곡선이다. F-18 최대 NECR은 486 kcps @121 MBq (랫 팬텀), 1056 kcps @128 MBq (마우스 팬텀)이었다. 랫과 마우스의 산란 분획은 각각 20.59%, 7.93%이었다.

## 고 찰

### 1. 공간 분해능

Inveon PET 시스템의 공간 분해능은 횡단면 중심에서 접선, 반경, 축 방향에서 각각 1.51, 1.54, 2.34 mm이다. MicroPET R4 (R4)의 각 방향 분해능은 1.66, 1.65, 1.85 mm<sup>13)</sup>이고, MicroPET Focus 120에서는 각각 1.13, 1.18, 1.45 mm<sup>2)</sup>이다. 공간 분해능을 결정하는 요소 중 하나가 섬광결정의 크기인데 Inveon과 Focus 120은 1.51×1.51×10 mm<sup>3</sup>, R4는 2.1×2.1×10 mm<sup>3</sup>의 섬광결정을 가지고 있다. Table 2에 국내에서 사용하고 있는 지멘스사에서 출시한 소동물 전용 PET 검출기 시리즈의 섬광결정 크기와 공간 분해능 값을 정리하였다.<sup>2,14)</sup> 섬광결정의 크기가 작을수록 위치정보를 자세히 검출 할 수 있기 때문에 섬광 결정의 크기가 큰 R4의 공간 분해능이 가장 크다. Inveon과 Focus 120의 섬광결정의 크기가 같은데 Focus120 스캐너의 공간 분해능이 좋은 이유는 공간 분해능을 측정한 선원의 크기 차이 때문이다. 이전 연구에서는 0.25 mm의 Na-22 점선원을 사용하였다.<sup>2)</sup> 선원의 크기를 보정한 접선, 반경, 축방향의 공간 분해능은 InveonPET이 1.17, 1.13, 2.12 mm이고 Focus 120이 1.15, 1.10, 1.54 mm<sup>2)</sup>이다. 한편 공간 분해능의 크기를 결정하는 섬광결정의 크

Table 2. Comparison of spatial resolution and crystal size.

Model	Crystal size (mm <sup>3</sup> )	Radial (mm)	Tangential (mm)	Axial (mm)
Inveon	1.5×1.5×10	1.54	1.51	2.34
R4*	2.1×2.1×10	1.65	1.66	1.85
Focus 120 <sup>†</sup>	1.5v1.5×10	1.18	1.13	1.45

\*Data published by Knoess et al.<sup>14)</sup>, <sup>†</sup>Data published by Kim et al.<sup>2)</sup>.

기, PET 링 반경, 양전자의 비정거리 등을 고려하여 이론적으로 계산한 각 스캐너의 공간 분해능 값은 F-18 선원을 사용한 Inveon은 1.04 mm이며, Na-22 선원을 사용한 Focus 120은 1.16 mm이었다. 다음은 공간 분해능을 결정하는 요소를 고려하여 공간 분해능을 계산하는 계산식이다.

$$FWHM = 1.25 \sqrt{\left(\frac{D_{crystal}}{2}\right)^2 + (0.0022D_{system})^2 + p^2 + b^2}$$

이 때 D<sub>crystal</sub>는 섬광결정의 크기, D<sub>system</sub>는 링 반경, p는 양전자 비정거리(0.45 mm@Na-22, 0.3 mm@F-18), b는 블록 검출기의 영향을 고려한 요소이며 이 연구에서는 0으로 가정하였다.

NEMA NU 4-2008에서는 중심에서 5, 10, 15, 25 mm 떨어진 지점에서의 공간 분해능을 측정하기를 권고하였지만 이 연구에서는 보다 상세한 정보를 얻기 위하여 1 mm, 5 mm 간격으로 횡단면 시야의 끝까지 측정하였다. 스캐너의 중심에서 멀어질수록 공간 분해능이 저하되는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 반경방향 공간 분해능이 현저하게 저하되었는데 이것은 Bao 등,<sup>4)</sup> Knoess 등<sup>14)</sup>의 논문 결과와도 같은 경향을 보인다. 이것은 소동물용 PET 스캐너의 경우 민감도 향상을 위하여 길이 방향 성분이 큰 섬광결정을 사용하였기 때문에 감마선의 반응위치 오차가 PET 스캐너의 외곽으로 갈수록 커지는 현상 때문이다.<sup>15)</sup>

### 2. 민감도

민감도는 PET기기의 감마선 계측 효율을 의미하는 것으로서 투여한 방사능의 세기와 PET에서 계측한 감마선의 계수의 비율로 표현한다. 민감도가 좋은 PET 스캐너를 사용하면 PET 영상획득 시간을 줄이거나 투여하는 방사성 물질의 양을 줄일 수 있다.

PET 민감도는 섬광결정의 종류, 블록 검출기안의 섬광결정의 유효면적(packaging fraction) 및 길이, 종축방향 길이에

따라 좌우된다. Inveon PET의 경우 Focus 120혹은 R4에 비하여 종축방향 길이가 약 70% 길어진 시스템으로서 민감도의 향상을 기대할 수 있다.

이 연구에서는 Inveon PET 스캐너의 종축길이에 맞게 설계한 NEMA NU 2-2007 형태의 민감도 팬텀을 이용하여 매질이 없는 이상적인 상황에서 PET 시스템에서 감마선을 검출할 수 있는 효율인 절대 민감도를 측정하였다. Inveon PET 스캐너의 절대 민감도는 에너지창 350~750 keV, 동시계수 창 3.432 ns에서 6.61%이었다. 이는 같은 장비에서 에너지창 350~700 keV, 동시계수 창 3.432 ns에서의 6.85% 결과를 보인 Bao 등<sup>4)</sup>의 논문에서와 비슷한 결과이다. Focus 120 스캐너는 350~650 keV, 동시계수창 6 ns조건에서 3.8%<sup>2)</sup>이고 R4 스캐너는 350~650 keV, 동시계수창 6 ns 조건에서 2.45%<sup>14)</sup>이다. Table 3에서 스캐너의 종축시야, 에너지창, 동시계수창에 따른 민감도를 나타내었다.<sup>2,14)</sup> Inveon과 Focus 120의 데이터 획득 조건이 다르므로 절대적인 비교를 할 수는 없지만 종축시야의 길이가 늘어난 비율만큼 민감도가 향상된 것을 알 수 있다. 블록 검출기안의 섬광결정의 유효 면적은 Inveon과 Focus 120은 92%이고, R4는 80%이다. 한편, Focus 120과 R4의 경우 PET 검출기 링크기와 종축시야가 거의 비슷하지만 Focus 120의 민감도가 높은 것은 Focus 120의 섬광결정 유효면적이 크기 때문이며,

Knoess 등이 측정한 R4민감도의 경우 R4 스캐너의 종축 방향 길이에 비하여 긴 18.3 cm 길이의 Ge-68 선 선원을 사용하여 민감도를 측정하였다.

### 3. 산란분획과 NECR

높은 NECR 값을 갖는다는 것은 동일조건에서 영상을 획득하여도 영상의 질이 더 좋다는 것을 의미한다. 방사선량이 증가하면 참계수, 산란계수가 증가 하지만 방사능량이 지나치게 크면 랜덤계수의 비율이 높아져 NECR이 감소하게 된다. 에너지창이 좁으면 산란선이 줄고 산란분획 감소되어 참계수율이 증가하기 때문에 높은 NECR값을 얻을 수 있으나, 민감도가 감소하기 때문에 원하는 양질의 영상을 얻기 위해서는 오랜 시간 획득해야 하므로 효율적이지 않다. 또한 섬광결정의 소멸시간이 짧은 것이 좋은데 LSO가 40 ns로 불응시간 손실을 최소화 시켰다. 한편 NaT (TI)의 소멸시간은 230 ns, BGO는 300 ns, GSO는 60 ns<sup>13)</sup>이다. Inveon PET은 동시계수창을 2.808, 3.432, 4.056, 4.680 ns 네 가지 중에서 선택하여 사용할 수 있는데 다른 시스템에서 사용하던 10 ns, 6 ns보다 짧아 랜덤계수의 비율을 줄일 수 있다.

최대 NECR은 486 kcps @121 MBq (랫 팬텀), 1056 kcps @128 MBq (마우스 팬텀)이었다. 이는 같은 장비에서 350~625 keV, 3.432 ns 조건에서 590 kcps @110 MBq (랫 팬텀), 1670 kcps @130 MBq (마우스 팬텀)이 결과를 얻은 Bao 등<sup>4)</sup>의 논문과 비교해볼 때 에너지창이 달라 절대적인 값의 비교는 어렵지만 마우스와 랫에서의 최대값의 차이가 둘 다 2.5배 정도로 비슷하므로 유의한 결과라 할 수 있다. Focus 120 스캐너는 350~650 keV, 동시계수창 6 ns조건에서 201 kcps (랫 팬텀), 741 kcps (마우스 팬텀)이고 R4 스캐너에서는 250~750 keV, 동시계수창 6 ns조건에서 94 kcps (랫 팬텀), 174 kcps (마우스 팬텀)이다. Inveon PET의 최대 NECR은 Focus 120보다 2배 R4보다 5배 더 높았다. 팬텀의 크기와 PET 데이터 획득 조건이 다르기 때문에 절대적인 비교

Table 3. Comparison of sensitivity with axial FOV, energy window and coincidence window.

Model	Axial FOV (mm)	Energy window (keV)	Coincidence window (ns)	Sensitivity (%)
Inveon	12.7	350~750	3.432	6.61
R4*	7.8	350~650	6	2.45
Focus 120 <sup>†</sup>	7.6	350~650	6	3.8

\*Data published by Knoess et al.<sup>14)</sup>, <sup>†</sup>Data published by Kim et al.<sup>2)</sup>.

Table 4. Comparison of NECR and scatter fraction with energy window and coincidence window.

Model	Energy window (keV)	Coincidence window (ns)	Phantom size (cm)		Scatter fraction (%)		Peak NECR (kcps)	
			Rat	Mouse	Rat	Mouse	Rat	Mouse
Inveon	350~750	3.432	5 Ø, 15 L	2.5 Ø, 7 L	20.59	7.93	486	1,056
R4*	350~650	6	6 Ø, 9.6 L	4.3 Ø, 7.6 L	38.0	32.0	94	174
Focus 120 <sup>†</sup>	350~650	6	6 Ø, 15 L	3 Ø, 7 L	22.9	11.6	201	741

Ø: diameter, L: length, \*Data published by Knoess et al.<sup>14)</sup>, <sup>†</sup>Data published by Kim et al.<sup>2)</sup>.

는 할 수 없지만 각 스캐너에서 랫과 마우스의 산란분획은 Table 4와 같다. Inveon PET이 가장 넓은 에너지창을 사용하는데도 산란분획이 가장 작았고 이는 영상의 대조도 향상에 기여한다. 이러한 Inveon PET의 NECR이 증가한 요인 중 하나는 고속 신호처리 회로 사용으로 인한 결과이다.<sup>16)</sup>

## 결 론

이 연구에서는 Inveon PET의 공간 분해능, 민감도, 산란 분획, NECR을 측정하였다. Inveon PET은 다른 소동물용 PET에 비하여 개선된 성능을 보이고 있어 영상의 질 향상은 물론 저선량, 단축된 스캔 시간으로도 원하는 질의 영상을 얻을 수 있을 것이라 기대한다. 이 연구의 결과는 이후 소동물 PET 실험의 연구에 도움을 주어 최적의 영상 획득 조건을 결정하기 위한 기초 자료가 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Zaidi H, Prasad R: Advances in multimodality molecular imaging. *J Med Phys* 34:122-128 (2009)
2. Kim JS, Lee JS, Im KC, et al: Performance measurement of the microPET focus 120 scanner. *J Nucl Med* 48:1527-1535 (2007)
3. Hanin FX, Pauwels S, Bol A, Breeman W, de Jong M, Jamar F: Tumor uptake of Ga<sup>68</sup>-DOTA-Tyr3-octreotate: animal PET studies of tumor flow and acute somatostatin receptor modulation in the CA20948 rat model. *Nucl Med Biol* 37:157-165 (2010)
4. Bao Q, Newport D, Chen M, David BS, Arion FC: Performance evaluation of the Inveon dedicated PET preclinical tomograph based on the NEMA NU-4 standards. *J Nucl Med* 50:401-408 (2009)
5. Daube WM, Karp JS, Casey ME, et al: PET performance measurements using the NEMA NU 2-2001 standard. *J Nucl Med* 43:1398-1409 (2002)
6. Lee BI: Quality assurance and performance evaluation of PET/CT. *Korean J Nucl Med* 42:137-144 (2008)
7. Karp JS, Daube WM, Hoffman EJ, et al: Performance standards in positron emission tomography. *J Nucl Med* 32:2342-2350 (1991)
8. Rosslyn: Performance measurements for small animal positron emission tomographs (PETs). NEMA standards publication NU 4-2008. National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (2008)
9. Rosslyn: Performance measurements of positron emission tomographs. NEMA standards publication NU 2-2007. National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (2007)
10. Yuan CT, Ruangma A, Rowland D, Stefan, et al: Performance evaluation of the microPET Focus: A third-generation microPET scanner dedicated to animal imaging. *J Nucl Med* 46:455-463 (2005)
11. Lee BI, Lee JS, Kim JS, Lee DS, Choi CW, Lim SM: Performance characteristics of microPET R4 scanner for small animal imaging. *Korean J Nucl Med* 39:49-56 (2005)
12. Kim JS, Lee JS, Lee DS, Chung JK, Lee MC: Performance evaluation of Siemens CTI ECAT EXACT 47 scanner using NEMA NU 2-2001. *Korean J Nucl Med* 38:259-267 (2004)
13. Kim JS, Lee JS, Lee BI, Lee DS, Chung JK, Lee MC: Performance characteristics of 3D GSO PET/CT scanner (Philips GEMINI PET/CT). *Korean J Nucl Med* 38:318-324 (2004)
14. Knoess C, Siegel S, Smith A, et al: Performance evaluation of the microPET R4 PET scanner for rodents. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 30:737-747 (2003)
15. Bartzakos P, Thompson CJ: A PET detector with depth-of-interaction determination. *Phys Med Biol* 36:735-748 (1991)
16. Atkins B, Austin D, Mintzer R, Siegel S, Gleason S: A data acquisition and event processing module for small animal SPECT imaging. Nuclear Science Symposium Conference Record. 2007, Hawaii, pp. 2897-2900

## Performance Measurement of Siemens Inveon PET Scanner for Small Animal Imaging

A Ram Yu\*<sup>†</sup>, Jin Su Kim\*, Kyeong Min Kim\*, Young Sub Lee\*<sup>†</sup>, Jong Guk Kim\*, Sang Keun Woo\*, Ji Ae Park\*, Hee Joung Kim<sup>†</sup>, Gi Jeong Cheon\*

\*Molecular Imaging Research Center, Korea Institute Radiological and Medical Science, Seoul,

<sup>†</sup>Department of Radiological Science, College of Health Science, Yonsei University, Wonju, Korea

Inveon PET is a recently developed preclinical PET system for small animal. This study was conducted to measure the performance of Inveon PET as recommended by the NEMA NU 4-2008. We measured the spatial resolution, the sensitivity, the scatter fraction and the NECR using a F-18 source. A 3.432 ns coincidence window was used. A 1 mm<sup>3</sup> sized F-18 point source was used for the measurement of spatial resolution within an energy window of 350~625 keV. PET acquisition was performed to obtain the spatial resolution from the center to the 5 cm offset toward the edge of the transverse FOV. Sensitivity, scatter fraction, and NECR were measured within an energy window of 350~750 keV. For measuring the sensitivity, a F-18 line source (length: 12.7 cm) was used with concentric 5 aluminum tubes. For the acquisition of the scatter fraction and the NECR, two NEMA scatter phantoms (rat: 50 mm in diameter, 150 mm in length; mouse: 25 mm in diameter, 70 mm in length) were used and the data for 14 half-lives (25.6 hr) was obtained using the F-18 line source (rat: 316 MBq, mouse: 206 MBq). The spatial resolution of the F-18 point source was 1.53, 1.50 and 2.33 mm in the radial, tangential and axial directions, respectively. The volumetric resolution was 5.43 mm<sup>3</sup> in the center. The absolute sensitivity was 6.61%. The peak NECR was 486 kcps @121 MBq (rat phantom), and 1056 kcps @128 MBq (mouse phantom). The values of the scatter fraction were 20.59% and 7.93% in the rat and mouse phantoms, respectively. The performances of the Inveon animal PET scanner were measured in this study. This scanner will be useful for animal imaging.

**Key Words:** NEMA, Small-animal PET, Performance measurement