

List Mode에서 PET/CT Scanner의 직선성 평가

서울대학교병원 핵의학과, 서울대학교 의과대학 핵의학교실¹

최현준 · 김병진 · Mikiko Ito¹ · 이홍재 · 김진의 · 김현주 · 이재성¹ · 이동수¹

Linearity Estimation of PET/CT Scanner in List Mode Acquisition

Hyun Jun Choi, Byung Jin Kim, Mikiko Ito¹, Hong Jae Lee, Hyun Joo Kim, Jae Sung Lee¹ and Dong Soo Lee¹

Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea

¹Department of Nuclear Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea

Purpose: Quantification of myocardial blood flow (MBF) using dynamic PET imaging has the potential to assess coronary artery disease. Rb-82 plays a key role in the clinical assessment of myocardial perfusion using PET. However, MBF could be overestimated due to the underestimation of left ventricular input function in the beginning of the acquisition when the scanner has non-linearity between count rate and activity concentration due to the scanner dead-time. Therefore, in this study, we evaluated the count rate linearity as a function of the activity concentration in PET data acquired in list mode. **Materials & methods:** A cylindrical phantom (diameter, 12 cm length, 10.5 cm) filled with 296 MBq F-18 solution and 800 mL of water was used to estimate the linearity of the Biograph 40 True Point PET/CT scanner. PET data was acquired with 10 min per frame of 1 bed duration in list mode for different activity concentration levels in 7 half-lives. The images were reconstructed by OSEM and FBP algorithms. Prompt, net true and random counts of PET data according to the activity concentration were measured. Total and background counts were measured by drawing ROI on the phantom images and linearity was measured using background correction. **Results:** The prompt count rates in list mode were linearly increased proportionally to the activity concentration. At a low activity concentration (<30 kBq/mL), the prompt net true and random count rates were increased with the activity concentration. At a high activity concentration (>30 kBq/mL), the increasing rate of the prompt net true rates was slightly decreased while the increasing rate of random counts was increased. There was no difference in the image intensity linearity between OSEM and FBP algorithms. **Conclusion:** The Biograph 40 True Point PET/CT scanner showed good linearity of count rate even at a high activity concentration (~370 kBq/mL). The result indicates that the scanner is useful for the quantitative analysis of data in heart dynamic studies using Rb-82, N-13, O-15 and F-18. (**Korean J Nucl Med Technol 2012;16(1):86-90**)

Key Words : Linearity, count rate, activity concentration

서 론

양전자단층촬영은 각종 생화학적 물질의 생체 내 분포를 영상화하여 인체 내의 생리적 지표들을 정량적으로 측정할

수 있어 생화학 또는 병리 현상의 규명과 질병 진단, 치료 후 예후 판정, 치료 계획 등에 유용하게 이용되고 있으며, 그 중요성에 대한 인식이 최근에 매우 높아지고 있다.

PET은 개발 초기에는 뇌신경 분야에 주로 이용되었지만 점차 종양 및 심장 질환의 진단 및 평가를 위한 사용이 주를 이루고 있다. 이처럼 PET은 생체의 기능을 평가하는데 가장 적합하고 종양 분야에서 그 활용도가 매우 높다. PET은 조준기가 필요 없으므로 민감도와 해상도가 단일광자영상장치에 비하여 뛰어난 장점이 있는데 특히 민감도가 우수하므로

• Received: March 8, 2012. Accepted: April 6, 2012.
• Corresponding author: **Hyun Jun Choi**
Department of Nuclear Medicine, Seoul National University Hospital,
28 Yongon_Dong, Jongno-Gu, Seoul 110-744, Korea
Tel: +82-2-2072-3801, Mobile: +82-10-2301-2605
E-mail: chj1022@gmail.com

빠른 영상 획득이 가능하여 방사성추적자의 동태를 실시간에 기록하고 이를 추적자동역학 기법으로 분석하여 각종 생리 및 생화학적 변수들을 정량화하는데 활용되고 있다.

데이터 획득 방법에는 여러 가지 기준에 의해서 PET 데이터 획득 모드 및 저장 방식을 구분할 수 있다. PET 스캔동안 발생한 이벤트를 기록하는 방식은 리스트 모드와 프레임 모드로 나눌 수 있다. 리스트 모드는 발생한 각 이벤트(감마선 검출, 프레임 또는 베드의 시작 신호, 게이트를 위한 트리거 신호 등)에 대한 각종 정보(시공간적 위치, 감마선의 에너지 등)를 모두 기록하는 방식이다. 리스트 모드 데이터에 향후 필요한 모든 정보를 기록하여 두면 사용자가 원하는 형태의 프레임 모드 데이터로의 변환이 가능하다. 리스트 모드로 저장된 데이터는 보통 수 Gbyte 정도의 저장 공간을 필요로 하여 과거에는 임상적으로 쓰이지 않았으나 근래에 들어 컴퓨터 저장 매체의 용량이 커지고 데이터 전송 기술이 발전함에 따라 다양한 검사에 리스트 모드 스캔이 이용되고 있다.

근래 들어 3D PET이 보편화되고 섬광결정의 수가 늘어남에 따라 프레임 모드 데이터의 크기가 리스트 모드 데이터 크기에 근접하는 경향이 있어 리스트 모드 데이터의 사용이 보다 늘어날 전망이다.

대표적으로 심근관류 PET은 발생기에서 생산되는 Rb-82와 사이클로트론에서 생산되는 ^{13}N -ammonia, ^{15}O -H₂O를 사용하여 영상을 얻을 수 있다. PET 영상은 SPECT 영상에 비해 정확한 감쇠보정을 실시할 수 있고 반감기가 짧은 방사성의약품을 사용하므로 더 많은 양의 방사성의약품을 투여할 수 있으며 해상도가 높아 영상의 질이 우수하다. 심근관류 PET은 혈관확장제 부하 시와 휴식기의 심근관류를 정량화하여 관상동맥예비혈류량(CFR)을 구할 수 있다. 균형관상동맥질환을 진단하는 데는 심근관류 PET이 심근관류 SPECT보다 우수하다.

Rb-82 심근관류 PET은 관상동맥질환을 찾는 진단능력이 우수하고(예민도 92%, 특이도 88%) 검사시간도 휴식/부하 영상을 얻는데 걸리는 전체 시간이 30분미만으로 짧다. 그런데 이 검사는 Rb-82를 40-60 mCi 정도로 많은 양이 환자에게 투여되는데 count rate가 매우 높아 dead time에 의한 계수의 손실로 정량적 평가를 하는데 문제가 있을 수도 있다. 손실되는 카운트가 많아지면 count value와 방사능 농도 사이의 직선성이 유지되지 않아 관상동맥예비혈류량이 실제보다 낮게 평가될 수 있다. 따라서 이 검사의 신뢰성 확보를 위해 본 연구에서는 Biograph 40 True Point PET/CT (Siemens, U.S.A)를 사용하여 activity에 따른 count value를 측정하여 스캐너의 직선성을 평가하였다.

실험재료 및 방법

본 연구에서는 Biograph 40 True Point PET/CT (Fig. 1)의 count value에 따른 직선성을 cylindrical phantom을 사용하여 3차원 영상 획득 모드에서 리스트 모드로 설정하여 측정하였다. 이 연구에서 사용한 Biograph 40 True Point PET/CT 시스템의 사양은 아래와 같다(Table 1).

실험을 위하여 cylindrical phantom을 사용하였다. 이 phantom은 폴리에틸렌 재질의 원형 실린더 모형(외경 12 cm, 높이 10.5 cm)으로 내부는 빈공간이다(Fig. 2).

내부의 빈 공간에 F-18 333 MBq과 물 800 mL를 넣고 prompt counts, net true counts, random counts를 구하기 위한 실험을 하였다. 이 때 내부에 물방울 빈공간이 없도록 하여 오차가 최소한이 되도록 하였다. Count value를 측정하기 위하여 횡축방향과 축방향의 중심에 cylindrical phantom을 위치시키고 CT 영상을 획득한 후 7반감기(반감기는 F-18: 109.77분) 동안 PET 영상을 획득하였다. 또한 영상을 획득할



Fig. 1. Biograph 40 True Point PET/CT scanner.

Table 1. Specifications of Biograph 40 True Point PET/CT scanner

Patented PET Detector Assembly	
Detector material	Lutetium Oxyorthosilicate(LSO)
Crystal dimensions	4.0×4.0×20 mm
Crystals per detector block	192
Photomultiplier tubes (PMTs)	4 per block
Number of detector rings	39. (52) ³
Number of detector blocks	144. (192) ³
Transaxial FOV	605 mm
Axial FOV	162 mm. (216) ³

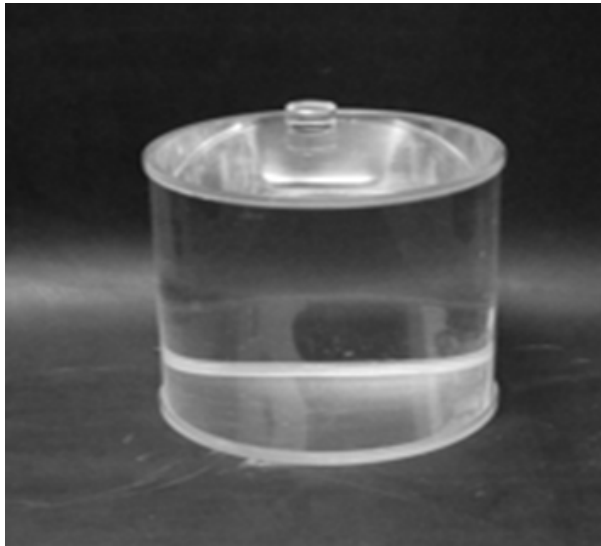


Fig. 2. Cylindrical phantom

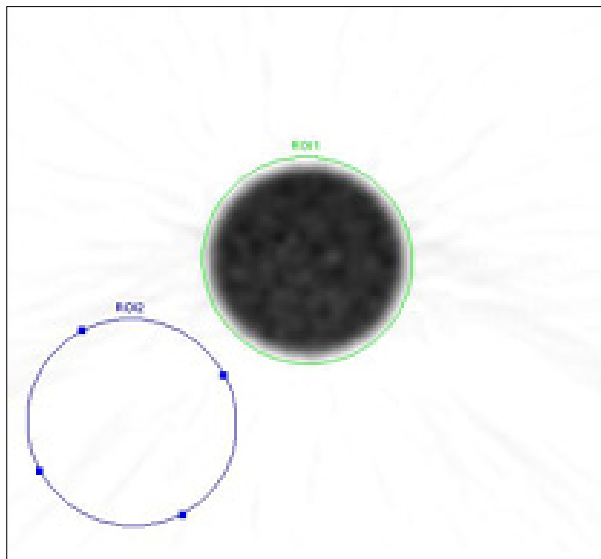


Fig. 3. Background correction.

Table 2. Reconstruction parameter

Algorithm	FBP	OSEM 2D
Filter	Gaussian filter	Gaussian filter
Matrix size	256 × 256	256 × 256
Zoom	1.0	1.0
FWHM	5 mm	5 mm
Iteration number	-	4 (8 subsets)

때 한 bed로 설정 하고 bed 당 10분으로 하여 리스트 모드로 설정하였다. 이렇게 얻은 데이터에서 sinogram을 얻었으며 dead time, attenuation, scatter, random counts에 대한 correction을 하였다.

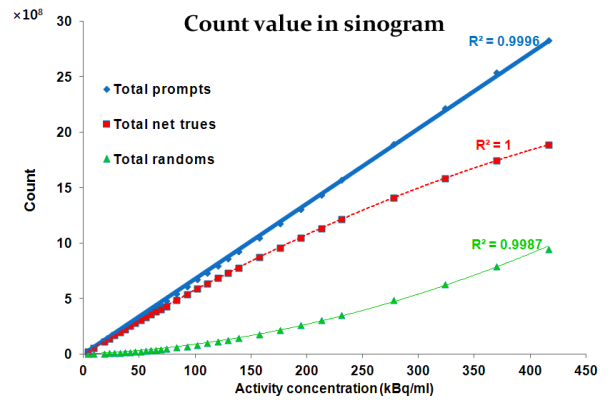


Fig. 4. Total prompts (thick solid line), total net trues (dotted line) and total random (thin solid line) count value in list mode true.

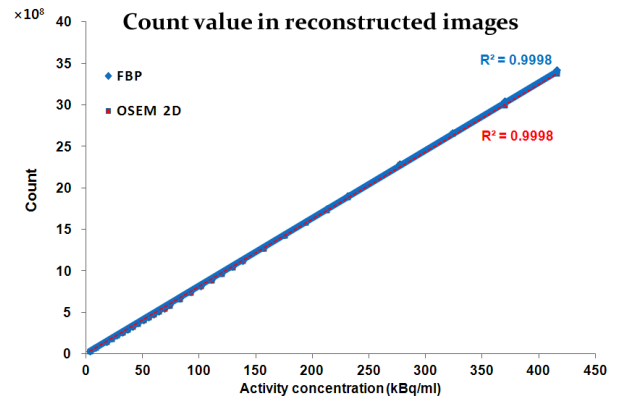


Fig. 5. FBP (thick solid line) and OSEM 2D (dotted line) count value in list mode true.

영상을 획득한 후 방사선원의 위치와 크기에 영향을 받지 않는 여과후역투사방법(filtered backprojection 이하 FBP)을 사용하여 영상을 재구성하였고, 주로 사용하는 OSEM 2D (ordered subset expectation maximization 2D) 반복적 영상 재구성 방법 (iterative reconstruction)을 사용하여 두 알고리즘에 의한 count value의 차이를 비교하고 알고리즘 외의 parameter 는 각각 동일하게 설정하였다(Table 2).

재구성된 phantom의 영상에 ROI를 설정하여 count value와 background를 측정하고 background correction을 사용하여 count value를 측정하였다(Fig. 3).

PET/CT에서 PET 영상을 얻을 때 방사선원의 양에 따라 달라지는 count rate는 3차원 모드에서 랜덤, 산란 계수의 증가로 참 계수율이 낮아지기 때문에 임상에서 영상의 정량적 분석에 중요한 인자로 사용하고 있다. 이 연구에서는 방사선원의 양에 대하여 prompt counts, net true counts, random counts의 변화를 관찰하고 영상을 재구성하여 count value와 background를 측정하여 그 변화를 관찰하였다.

Table 3. Count values in sinogram and reconstructed images at activity concentration in list mode acquisition of 3D mode
(Unit: counts)

방사능 농도 kBq/mL	Total prompts	Total net trues	Total randoms	FBP	OSEM 2D
416.25	2,833,075,579	1,886,766,811	946,308,768	3,420,715,001	3,375,787,501
370	2,541,968,233	1,748,951,263	793,016,970	3,029,460,281	2,990,097,185
323.75	2,215,637,187	1,583,609,965	632,027,222	2,650,351,252	2,652,493,915
277.5	1,897,299,748	1,409,020,813	488,278,935	2,277,552,361	2,277,084,254
231.25	1,569,930,011	1,214,584,161	355,345,850	1,893,088,583	1,886,223,144
212.75	1,439,815,084	1,132,770,949	307,044,135	1,734,877,189	1,732,368,506
194.25	1,310,036,159	1,048,409,722	261,626,437	1,580,555,082	1,579,554,615
175.75	1,180,868,781	961,526,520	219,342,261	1,421,931,179	1,423,731,290
157.25	1,052,650,774	872,320,985	180,329,789	1,267,580,999	1,269,027,220
138.75	925,024,806	780,338,175	144,686,631	1,113,577,650	1,117,397,255
129.5	861,469,766	733,296,287	128,173,479	1,039,918,919	1,038,758,023
120.25	798,165,427	685,620,348	112,545,079	963,959,834	961,154,864
111	735,093,776	637,236,737	97,857,039	887,627,806	885,617,025
101.75	672,313,937	588,195,705	84,118,232	811,274,617	811,665,689
92.5	609,898,769	538,546,115	71,352,654	737,028,240	735,563,993
83.25	547,665,885	488,122,225	59,543,660	660,926,064	660,464,215
74	479,959,864	432,218,453	47,741,411	580,008,800	578,767,536
69.375	449,657,555	406,802,075	42,855,480	542,148,402	542,606,525
64.75	421,121,165	382,644,913	38,476,252	507,923,949	507,997,220
60.125	393,583,135	359,133,660	34,449,475	474,547,005	474,125,320
55.5	363,040,745	332,831,688	30,209,057	438,172,633	437,593,974
50.875	332,645,829	306,416,113	26,229,716	400,454,549	400,678,159
46.25	302,192,873	279,675,225	22,517,648	363,664,229	363,723,914
41.625	271,856,639	252,779,511	19,077,128	327,419,104	326,928,313
37	241,594,600	225,675,043	15,919,557	290,846,136	289,341,060
32.375	211,149,348	198,131,829	13,017,519	253,655,440	253,186,449
27.75	180,871,726	170,465,276	10,406,450	216,507,953	216,883,291
23.125	150,588,517	142,519,230	8,069,287	180,552,806	180,559,868
18.5	120,381,552	114,352,179	6,029,373	143,837,759	144,006,161
9.25	60,348,202	57,532,162	2,816,040	71,533,846	71,565,741
3.7	24,530,071	23,064,406	1,465,665	28,590,932	28,368,585

결 과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 리스트 모드를 이용한 3D 영상에 대한 total prompts, net trues, random count value의 곡선과 FBP와 OSEM 2D로 재구성한 영상의 count value에 대한 그래프이다.

Sinogram에서 count value는 횡축방향과 축방향의 중심에서 측정되었다. 3차원 영상획득 모드에서 리스트 모드를 이용하여 측정된 count value는 다음과 같다(Table 3).

Total prompt counts는 방사능농도에 비례하여 증가하였다. Net true counts와 random counts는 비교적 저영역의 방사능 농도에서는 비례하여 증가하지만 방사능 농도가 높아질수록 random counts의 증가율은 방사능농도의 제곱에 비

례하여 더욱 증가하는 경향을 보이고 net true counts의 증가율은 감소되었다. 이는 3D 모드에서 검출되는 감마선의 양이 매우 많아 dead time에 의한 counts의 손실이 크기 때문이다. 그리고 FBP와 OSEM 2D 알고리즘으로 재구성하여 측정된 count value는 방사능농도에 비례하며 직선성이 유지되었고 알고리즘에 따른 count value의 차이는 거의 없었다.

결 론

PET 영상의 정량적 분석을 위하여 리스트 모드를 이용하는 것이 효과적인데 특히 심장 PET과 같이 많은 양의 동위원소를 주입하게 되는 경우에 높은 count rate 때문에 PET/CT scanner의 count rate에 따른 직선성이 유지되는지가 중요하다. 3차원 모드에서는 2차원 모드에 비하여 검출되는 감마선의 양이 훨씬 많아 dead time에 의한 계수 손실이 크며, random, scatter counts의 비율이 높아 적절한 방사능 범위를 넘어가면 true counts가 오히려 감소하기 때문에 직선성이 유지되지 않는다면 정량적 분석이 매우 어렵게 된다. Scatter counts는 true counts와 비례하지만 random counts는 방사능의 양과 비례하여 검출되는 true counts에 영향을 미치므로 이러한 사실을 모두 고려하여 직선성이 유지되는지를 평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서 Biograph 40 True Point PET/CT는 재구성된 영상에서 낮은 방사능농도뿐만 아니라 비교적 높은 방사능농도(~416.25 kBq/mL)에서도 측정된 count value와 방사능농도 사이의 직선성이 유지되는 것을 보여주었다. 따라서 실험에서 사용한 PET/CT는 많은 양의 방사성동위원소를 사용하는 Rb-82, N-13, O-15, F-18을 이용하는 heart dynamic PET study에서 데이터의 정량적 분석에 유용할 것으로 판단된다.

최근 들어 납 격자가 없이 3차원 모드로만 영상을 얻을 수 있는 PET 스캐너들이 대부분인데 주로 사용하는 static mode나 frame mode 외에 list mode를 이용한 연구들도 많아지고 있다. 따라서 3차원 모드의 list mode를 이용하는 연구에 대해 이해하고 더 많은 연구가 필요하다.

요 약

Rb-82를 이용한 PET 검사는 심근 관류의 임상적 평가에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 그러나 PET/CT의 dead time 때문에 count value와 방사능농도 사이의 직선성이 유지되지 않는다면 데이터를 획득할 때 좌심실 입력 함수가 과

대평가되어 심근관류가 과대평가될 수 있다. 본 연구에서는 리스트 모드에서 획득한 PET data에서 방사능농도에 따른 count value의 직선성을 평가하였다.

Biograph 40 True Point PET/CT를 이용하여 직경 12 cm, 길이 10.5 cm의 cylindrical phantom에 F-18 333 MBq과 물 800 mL를 채우고 7반감기동안 10min frame/bed로 리스트 모드를 이용하여 획득하였다. Raw data는 OSEM (order: 4, subsets: 8)과 FBP (Gaussian filter FWHM 5 mm) 알고리즘을 이용하여 재구성하였다. Sinogram 정보에서 prompt counts, net true counts, random counts를 측정하였다. 재구성된 phantom 영상에 ROI를 설정하여 총 계수와 background를 측정하고 background correction을 사용하여 count value를 측정하여 직선성을 평가하였다.

리스트 모드를 이용하여 sinogram에서 측정된 prompt counts는 방사능농도에 비례하여 증가하였다. 낮은 방사능농도에서 net true counts와 random counts는 방사능농도에 따라 증가하였다. 높은 방사능농도에서는 net true counts의 증가율이 점차 감소되었고, 반면에 random counts의 증가율은 증가하였다. 그리고 OSEM과 FBP 알고리즘으로 재구성된 영상에서 측정된 count value의 차이는 없었고 방사능농도에 비례하여 count value가 증가하고 직선성이 유지되었다.

Biograph 40 True Point PET/CT scanner는 재구성된 영상에서 낮은 방사능농도뿐만 아니라 높은 방사능농도(~ 416.25 kBq/mL)에서도 측정된 count value와 방사능농도 사이의 직선성이 유지되는 것을 보여주었다. 따라서 실험에서 사용한 PET/CT scanner는 Rb-82, N-13, O-15, F-18을 이용한 heart dynamic PET study에서 데이터의 정량적 분석에 유용

할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. 고창순. 핵의학 제3판. 고려의학 2008;87-90, 351-375.
2. Kim JS, Lee JS, Lee BI and Lee DS. Performance Characteristics of 3D GSO PET/CT Scanner (Philips GEMINI PET/CT). J Nucl Med 2004;38:318-24.
3. Kim JS, Lee JS, Lee DS, Chung J-K and Lee MC. Performance evaluation of Siemens CTI ECAT EXACT 47 scanner using NEMA NU2-2001. Korean J Nucl Med 2004;38:259-67.
4. 원경숙. PET and PET/CT in Clinical Cardiology. J Nucl Med 2005;39:124-32.
5. Bernd O. Knoop, Kurt Jordan and Terry Spinks. Evaluation of PET count rate performance. Eur J Nucl Med 1989;15:705-711.
6. Carney, J.P.J., Yap, J.T., Townsend, D.W. PET count rate performance and CT image quality of a 16-slice LSO PET/CT for clinical whole-body imaging. Radiat Phys Chem 2004;71: 963-965.
7. J.P.J. Carney and D.W. Townsend. Clinical count rate performance of a LSO PET/CT scanner utilizing a new front-end electronics architecture with sub-nanosecond intrinsic timing resolution. Radiat Phys Chem 2006;2182-2185.
8. K. Kitamura and H. Murayama. Count Rate Performance Simulations For Next Generation 3D PET Scanners. KEK Proceedings 2001;22:108-114.
9. L R MacDonald, R E Schmitz, A M Alessio, S D Wollenweber, CWStearns, A Ganin, R L Harrison, T K Lewellen1 and P E Kinahan. Measured count-rate performance of the Discovery STE PET/CT scanner in 2D, 3D and partial collimation acquisition modes. Phys Med Biol 2008;53:3723-3738.