

팬텀을 이용한 소아 PET/CT 검사 시 감쇠보정 CT 선량과 영상 평가

연세의료원 세브란스병원 핵의학과¹, 신구대학교 방사선과²
반영각¹ · 김정열¹ · 박훈희² · 강천구¹ · 임한상¹ · 이창호¹

Evaluation of Dosimetry and Image of Very Low Dose CT Attenuation Correction for Pediatric PET/CT: Phantom Study

Young Kag Bahn¹, Jung Yul Kim¹, Hoon-Hee Park², Chun Goo Kang¹, Han Sang Lim¹ and Chang Ho Lee¹

¹Department of Nuclear Medicine, Severance Hospital, Yonsei University Health System, Seoul, Korea

²Department of Radiology, Shingu University, Seongnam, Korea

Purpose: To evaluate the dosimetry and image of very low dose CT attenuation correction for phantom using pediatric PET/CT. **Materials and methods:** three PET / CT scanners (Discovery STe, BiographTruepoint 40, Discovery 600) as a child-size acrylic phantom and ion chamber dosimeter (Unfous Xi CT, Sweden) using a CT image acquisition parameters (10, 20, 40, 80, 100, 160 mA; 80, 100, 120, 140 kVp) by varying the depth dose and evaluate CTDI_{vol} value. And each attenuation corrected PET/CT images used NEMA PET Phantom™ (NU2-1994) was evaluated by SUV. **Results:** Abdominal diagnosis CT dose in general pediatric (about 10 ages) parameter (100 kVp, 100 mA) than very low dose CT parameter (80 kVp, 10 mA) at the depth dose was reduced approximately 92%, CTDI_{vol} was reduced to about 88%. Each CT attenuation corrected parameters PET images showed no change in the value of SUV. **Conclusion:** for pediatric patients, PET/CT scan can be obtained with very low dose attenuation correction CT (80 kVp, 10 mA), and such attenuation correction CT dose was reduced 100 fold than diagnosis CT dose. PET / CT scan used very low dose CT attenuation correction in pediatric patients can be helpful in reducing radiation dose. (**Korean J Nucl Med Technol 2011;15(2):53-59**)

Key Words : PET / CT, Pediatric, Phantom, Dose

서 론

PET/CT는 성인의 의료영상으로써 종양학, 심장학, 신경학에 이용되고 있다. 2008년 국립 암 정보센터의 자료에 따르면 14세 이하의 소아환자에서 10만 명 중 13.2명에서 암이 발생한다고 보고 되고 있다. 이에 따라, 소아영상에서도 PET/CT는 암의 발견, 병기결정, 치료과정과 예후 판단에 중요한 검사이다. 최근 CT (Computed Tomography)를 이용하

여 감쇠보정 하는 PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography) 검사는 임상에서 많이 이용되고 있다.¹⁻³⁾ PET 영상의 감쇠지도는 ⁶⁸Ge 또는 ¹³⁷Cs 등의 투과선원을 이용하여 만들어 졌으나, PET/CT 시스템은 CT 를 이용하여 감쇠지도를 만들어 냄으로써 검사 시간의 효율적인 단축과 함께 잡음 제거의 측면에서도 우수함을 나타내었다. 일반적으로 PET/CT 영상을 획득하기까지는 CT 토포그램 영상을 획득하여 환자의 위치를 결정하고, 감쇠보정을 위한 CT 영상을 획득한 후 PET 영상을 획득하는 세 단계의 과정으로 진행된다.⁴⁾ 이 과정 중에서 감쇠보정을 위한 CT 영상의 획득은 피폭선량의 증가요인이 되고 있다. 일반적인 복부 CT의 유효선량은 5-10 mSv 정도이고, ¹⁸F-FDG (fluorodeoxyglucose) PET검사의 유효선량은 10 mSv 정도이다.⁵⁾ 그래서 현재는 많은 병원에서 저 선량 CT 를 이용하여 PET/CT 검사를 진

• Received: June 29, 2011. Accepted: July 5, 2011.

• Corresponding author: Young Kag Bahn

Department of Nuclear Medicine, Severance Hospital, Yonsei University Health System, 250 Seongsanno, Seodaemun-gu, Seoul, 120-752, Korea

Tel: +82-2-2228-6065, Fax: +82-2-312-0578

E-mail: Bahnkyk@yuhs.ac

행하고 있다. PET/CT 검사는 성인 환자뿐만 아니라 소아 환자에게도 많이 적용되고 있다. 소아 환자의 경우 성인에 비하여 몸의 크기가 작기 때문에 어른과 같은 방사선량에 노출되더라도 방사선 감수성이 더 높기 때문에 유효선량은 어른에 비해 더 높게 계산 하여야 하고, 어른에 비해 평균수명이 길어 방사선 피폭에 의한 암 발생률이 높아 피폭선량의 관리가 필요하다.^{1,6)} 그러므로 본 논문은 팬텀을 이용하여 소아 PET/CT 검사 시 초저선량 CT를 이용한 감쇠보정에서 영상과 선량을 평가 하였다.

실험재료 및 방법

1. 장비 및 실험재료

실험장비는 본원에 설치된 3대의 PET/CT 장비인 Discovery STe (General Electric Healthcare, Milwaukee, MI, USA), Biograph Truepoint 40 (Siemens Medical Systems, CTI, Knoxville, TN, USA), Discovery 600 (General Electric Healthcare, Milwaukee, MI, USA) 을 이용하여 실험을 하였다(Table 1). PET/CT 영상 평가 방법은 NEMA PET Phantom™ (NU2-1994) 을 사용하였다. 팬텀에 물을 가득 채우고 ¹⁸F-FDG 370 MBq 을 주입하여, 충분히 흔들어준 다음, 60분 후에 CT 토포그램으로 위치를 확인한 후 CT검사를 진행 한 후, PET 방출영상을 1 bed 획득하였다.

2. 심부선량 측정방법

심부선량을 측정하기 위하여 조직등가물질로 이루어진 아크릴 팬텀을 사용하였고, 25×25×0.8 cm³ 9개와 25×25×1.57 cm³ 의 중심부에 1.5 cm 구멍을 가진 아크릴 팬텀 1장을 가운데 위치 하고 중앙부 구멍에 심부선량을 측정 할 수 있는



Tissue-Equivalent Acrylic Phantom
 25 x 25 x 0.80 cm³ * 9EA
 25 x 25 x 1.57 cm³ with center hole * 1EA
 Center hole 1.5 cm

Fig. 1. The use of tissue-equivalent acrylic phantom was evaluated about 10 years pediatric radiation-absorbed doses.



Fig. 2. The use of an ion-chamber dosimeter (Unfous Xi CT, Sweden), the radiation-absorbed doses of attenuation correction CT for PET images were measured 5 times each.

Table 1. Specifications of PET/CT system

Description	Discovery STe	Biograph TruePoint 40	Discovery 600
PET Subsystem			
Crystal material	BGO	LSO	BGO
Number of rings	24	52	24
Ring diameter (mm)	886	842	810
Patient port (mm)	700	700	700
Crystal number	13,440	32,448	12,288
Crystal size (mm ³)	4.7×6.8×30	4×4×20	4.7×6.8×30
Coincidence window (ns)	9.75	4.5	9.5
Acquisition mode	2D and 3D	3D	3D
Trans axial FOV (mm)	700	605	700
Axial FOV (mm)	157	216	157
Slice thickness (mm)	3.37	2	3.37
Transmission source	Ga-68	Ga-68	Ga-68
CT subsystem			
Gantry aperture (mm)	500	500	700
Variation scan speed	0.5 rotation/s	0.19 cm/s	0.5 rotation/s
Anode heat storage capacity (MHU)	6.3	6	6.3
Minimum slice thickness (mm)	2	2	2

BGO=bismuth germinate; LSO=lutetium oxyorthosilicate; PMT=photomultiplier; FOV=field of view

이온 챔버 선량계 (Unfous Xi CT, Sweden) 를 삽입 한 후 CT 토포그램으로 위치를 잡았다(Fig. 1-2). 그리고 각 장비 별 CT 스캔 조건으로 Discovery STe, BiographTruepoint 40, Discovery 600 장비 모두 관전압을 80, 100, 120, 160 kVp 를 사용하였고, 관전류는 Discovery STe 와 Discovery 600은 10, 20, 40, 80, 160 mA 를 BiographTruepoint 40 은 11, 20, 40, 80 mA 를 사용하였다. 각 조건 별 스캔을 마친 후 심부선량을 측정 하였다. 측정은 각 장비 별, 조건 별 각각5회 실시 하여 신뢰도를 높였다. 그리고 본 팬텀들은 25x25x8.87 cm³ 의 부피로 소아 10세 정도의 크기와 유사하기 때문에 소아의 심부선량평가를 위해 사용하였다.

3. 영상획득방법

세 대의 PET/CT 스캐너를 사용하여 NEMA PET PhantomTM

을 이용하여 각 장비 별로 1 Bed 스캔을 진행하다(Fig. 3).

심부선량 측정방법과 동일한 CT 스캔 조건으로 Discovery STe, BiographTruepoint40, Discovery600 장비 모두 관전압을 80, 100, 120, 160 kVp를 사용하였고, 관전류는 Discovery STe와 Discovery 600은 10, 20, 40, 80, 160 mA를 BiographTruepoint 40은 11, 20, 40, 80 mA를 사용하였다 (Table 2). PET 스캔 조건은 각 장비 별 임상에서 사용하는 조건을 사용하여 Discovery STe 장비는2분 30초 와 6시간 방출영상을 획득하여 재구성 법은 Iterative 방법을 사용하고, 각 각 Iteration 2회, Subset 20회를 사용하여 재구성하였다. BiographTruepoint 40 장비는 2분 30초와 6시간 방출영상을 획득하여 재구성 법은 Iterative 3D 방법을 사용하고, 각각 Iteration 3회, Subset 8회를 사용하여 재구성하였다. Discovery 600 장비는 2분과 6시간 방출영상을 획득하여 재구성 법은 Iterative 방법을 사용하여 각각 Iteration 2회, Subset 16회를



NEMA PET Phantom (NU2-1994)

Dimensions: 8" dia x 8.98" l (20.3 x 22.8 cm)

I.D.: 7.76" dia (19.7 cm)

Wall Thickness: 0.12" (3 mm)

Volume Without Inserts: 6047 ml

Volume With Three Inserts: 4180 ml

Volume of Fillable Insert: 289 ml

Fig. 3. The NEMA PET PhantomTM (NU2-1994) is designed in accordance with the recommendation by the National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Fillable inserts are transparent Lucite. The solid insert is Teflon. Insert are inserted thru the lid.

Table 2. CT and PET acquisition parameters for CT and PET image evaluation

CT scan

	Discovery STe	Biograph TruePoint 40	Discovery 600
Tube Voltage (kVp)	80, 100, 120, 160	80, 100, 120, 160	80, 100, 120, 160
Tube Current (mA)	10, 20, 40, 80, 160	11, 20, 40, 80	10, 20, 40, 80, 160
Pitch	1.35 : 1	1.15 : 1	1.357 : 1
Scan time (sec)	2	2	2
Slice thickness (mm)	3.75	5	3.75

PET scan

	Discovery STe	Biograph TruePoint 40	Discovery 600
Emission time	2min 30sec, 6hrs	2min 30sec, 6hrs	2min, 6hrs
Reconmethod	Itertive	Itertive 3D	Itertive
Iteration	2	3	2
Subset	20	8	16
Matrix size	128 x 128	128 x 128	128 x 128

사용하여 재구성하였다. 각 CT 스캔 조건의 영상을 PET 방출영상의 감쇠보정 영상으로 사용하여 PET 영상을 평가하였다. 나머지 영상 획득 조건은 동일하게 설정하였다. PET 영상의 방출스캔 6시간 획득은 영상 획득시간에 대한 영향을 최소화 하기 위해 진행되었다.

4. 영상분석방법

각 장비에서의 각 CT 조건 별 CT 영상과 감쇠보정 된 PET 영상을 Advantage Workstation 4.3 워크스테이션을 이용하여 VOI (Volume of Interest) 를 사용하여 각 영상의 중앙의 종축 30%, 단면 중심부위의 70% 를 설정하여 CT 영상의 CT 값 (CT number) 과 PET 영상의 표준섭취계수 (SUV; Standard uptake value) 평균의 변화를 5회 측정하여 평균을 분석하였다(Fig. 3). 통계분석은 대응표본 T-test 를 이용하였다(Fig. 4).

결 과

1. CT영상평가

CT 영상의 평가는 팬텀 실험을 통하여 각 각의 장비 별, 조건 별 CT 값의 표준편차로서 평가하였다. CT 값의 표준편차가 Discovery STe 장비는 80 kVp 10 mA에서 41.5였고, 140 kVp 160 mA에서 4.3 이었다. BiographTruepoint 40 장비는 최고 25.4에서 최저 4였고, Discovery 600 장비에서는 최고 76.8에서 최저 4.5였다. 표준편차가 관전압과 관전류가 낮을수록 높아져 CT영상에 큰 영향을 미친다. 최고 조건 120 kVp 160 mA 의 표준편차는 약 4.2, 보통 성인의 저 선량CT 의 120 kVp 20 mA의 표준편차가 약 14 이고, 최저조건 80 kVp 10 mA 는 약 47.5이므로 단순히 CT 값의 표준편차로 CT 영상을 평가한다면 영상의 질이 최고조건에 비해 약 91% 저하되었고, 저 선량CT에 비해 66% 저하되었다(Fig. 5). 육안평가에서도 CT영상의 질이 관전압, 관전류 의 조건이 높아질수록 좋아지는 것을 볼 수 있다(Fig. 6).

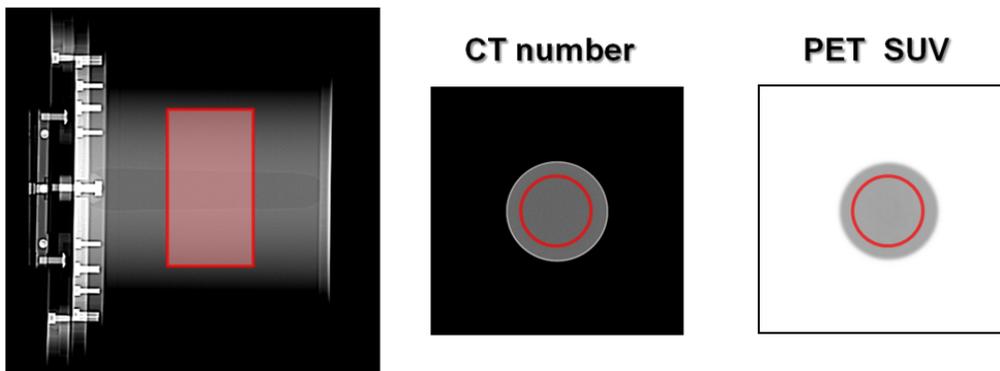


Fig. 4. The volume of interest (VOI) in order to a measurement standardized uptake values (SUV) and CT numbers is selected from the phantom images. Because 30% at the central part of a 1 bed image and 70% at the central part of the images are reconstructed in order to obtain an SUV.

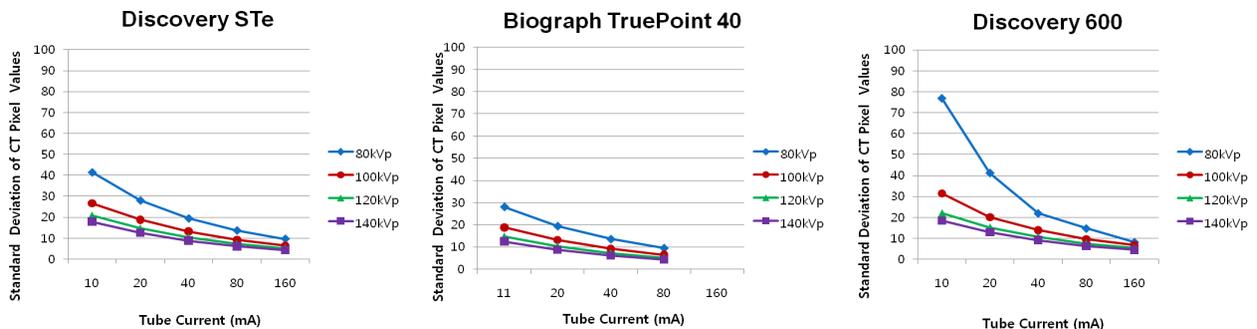


Fig. 5. Graph show CT noise in the NEMA PET PhantomTM as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in term of the standard deviation of the CT numbers for VOI.

2. PET 영상평가

각 장비 별 임상에서 사용되는 PET 방출스캔 영상획득 조건으로 진행한 SUV_{mean} 값으로 평가했다. SUV_{mean} 값이 Discovery STe 장비는 80 kVp 10 mA에서 1 ± 0.1 였고, 140 kVp 160 mA에서 1 ± 0.1 이었다. BiographTruepoint 40 장비는 0.98 ± 0.03 에서 0.97 ± 0.04 였고, Discovery 600 장비에서는 1.1 ± 0.1 에서 1.1 ± 0.1 이었다. Discovery STe 와 Discovery 600 장비에서는 모든 조건의 SUV_{mean} 값이 동일하였고, Biograph Truepoint 40 장비에서는 0.97 ± 0.37 이었으나, p 값이 0.89로 0.05보다 높아 영상에는 통계적으로 유의한 변화가 없었다 (Fig. 7). 육안평가에서도 PET 영상의 질이 관전압, 관전류의 조건의 변화에 따라 영상의 변화가 없음을 볼 수 있다 (Fig. 8). PET 방출스캔 6시간 영상획득 조건으로 진행한 SUV_{mean} 값의 평가가 Discovery STe 장비는 80 kVp 10 mA 에서 1 ± 0 이었고, 140 kVp 160 mA에서 1 ± 0 이었다. Biograph Truepoint 40 장비는 0.95 ± 0.01 에서 0.94 ± 0.01 이었고, Discovery

600 장비에서는 1.1 ± 0 에서 1 ± 0 이었다. Discovery STe 장비와 Discovery 600 장비에서는 모든 조건의 SUV_{mean} 값이 1 ± 0 로 동일하였다. BiographTruepoint 40 장비에서는 평균 0.945 ± 0.01 이었고, p 값이 0.93로 0.05보다 작아 통계적으로 동일하다고 할 수 있다(Fig. 9). 육안평가에서도 PET 영상의 질이 관전압, 관전류의 조건의 변화에 따라 영상의 변화가 없음을 볼 수 있다(Fig. 10).

3. 심부선량평가

Discovery STe 장비는 80 kVp 10 mA에서 0.072 mGy였고, 140 kVp 160 mA에서 5.922 mGy였다. BiographTruepoint 40 장비는 0.618 mGy 와 22.71 mGy였고, Discovery 600 장비에서는 0.123 mGy와 9.148 mGy였다. 관전압과 관전류가 높을수록 심부선량이 높아졌다. 최저조건 80 kVp 10 mA가 최고 조건 120 kVp 160 mA 보다 심부선량이 Discovery STe 는 약 98.8%, BiographTruepoint 40은 97.3%, Discovery 600

Image Evaluation : CT Images (Discovery 600)

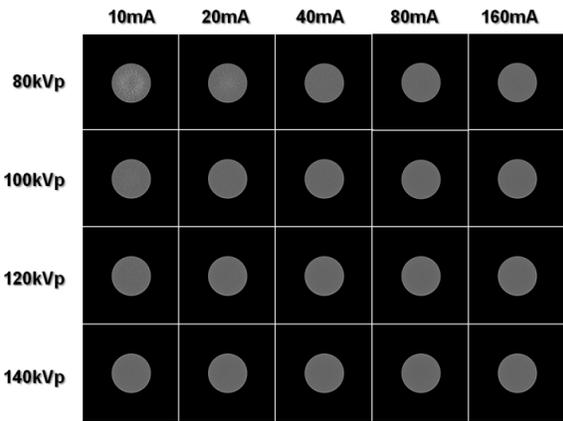


Fig. 6. Adequacy of CT (Discovery 600) images as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the uniform NEMA PET Phantom™ (NU2-1994).

Image Evaluation – PET Emission 2min Scan Images (Discovery 600)

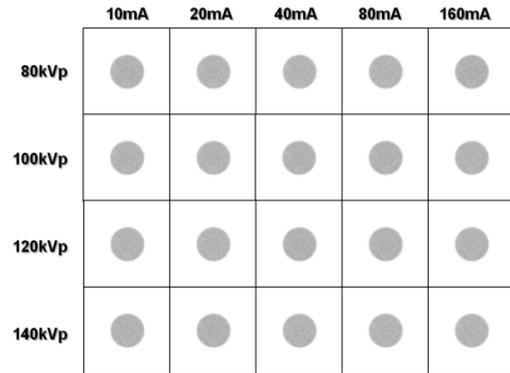


Fig. 8. Adequacy of 2 minutes emission scan PET (Discovery 600) images as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the uniform NEMA PET Phantom™ (NU2-1994).

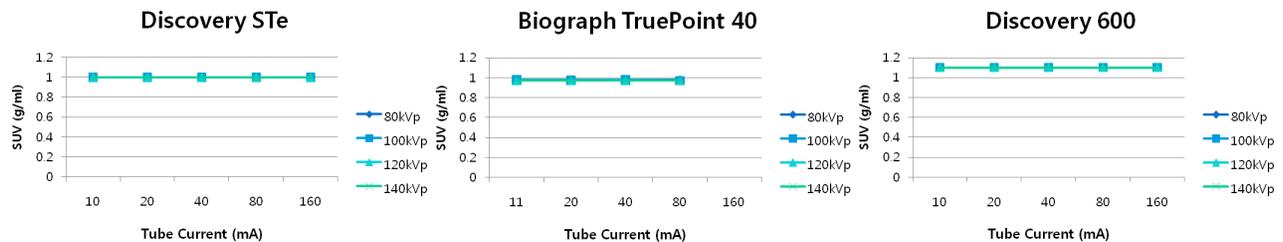


Fig. 7. Graph show 2 min and 2 min 30 sec emission PET images as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the NEMA PET Phantom™ in term of the SUVs for VOI.

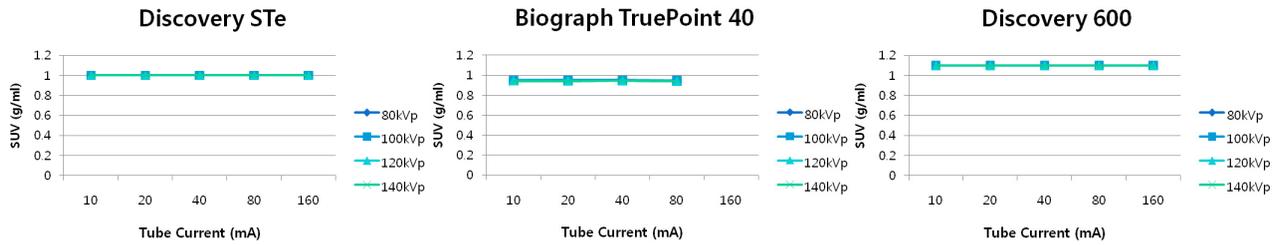


Fig. 9. Graph show 6 hours emission PET images as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the NEMA PET Phantom™ in term of the SUVs for VOI.

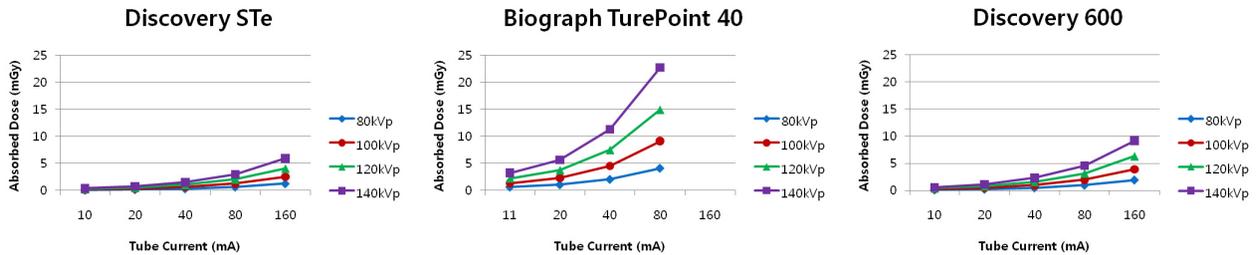


Fig. 11. Graph show CT absorbed dose as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the acrylic phantom.

Image Evaluation – PET Emission 6hrs Scan Images (Discovery 600)

	10mA	20mA	40mA	80mA	160mA
80kVp					
100kVp					
120kVp					
140kVp					

Fig. 10. Adequacy of 6 hours emission scan PET (Discovery 600) images as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current in the uniform NEMA PET Phantom™ (NU2-1994).

은 98.7% 감소되었다(Table 3).

고 찰

본 연구에서는 팬텀을 이용하여 소아 PET/CT 검사 시 초저선량 CT를 이용하여 감쇠보정에서 영상과 선량을 평가 하였다. 본 연구에서는 팬텀을 이용하여 소아 PET/CT 검사 시 초저선량 CT를 이용하여 감쇠보정에서 영상과 선량을 평가 하였다. NEMA PET Phantom™ 을 이용 10세 기준의 소아

를 가정하여 PET/CT영상을 획득하였고, 같은 부피의 아크릴 팬텀을 이용하여 심부선량을 측정하였다. 그러나 다양한 연령의 소아를 적용하는 팬텀 실험을 못하였고, 성인의 경우 CT 선량 조건에서의 PET/CT 영상을 평가하지 못했다. 하지만 Frederic H. Fahey 등의 논문에서 다양한 연령의 소아 팬텀을 이용하여 심부선량을 평가 하였고, 성인에서도 CT 선량의 변화에 따른 PET/CT 영상과 심부선량을 평가하였다.¹⁾ 그러나 Frederic H. Fahey 등은 한 가지 PET/CT 장비에서만 선량과 영상을 평가하였지만, 본 논문에서는 세 가지 장비를 이용하여 선량과 영상을 평가하여 실험의 결과에서는 더욱 타당한 결과를 도출하였다. 감쇠 보정은 PET/CT 영상의 질을 높이고 정량적인 정확도를 획득하기 위한 중요한 인자이다. 일반적으로 CT 에 의한 선량은 CTDI_{vol}로 표현이 된다. Son 등의 논문에 의하면 표준 CTDI 머리 팬텀을 이용하여 CT 투과 스캔에 대한 선량 측정을 수행하였을 경우, 관전류 값이 증가할 수록 등가 선량 값이 증가한다는 연구 결과가 보고된 바 있다.⁷⁾ 그러므로 임상에서 PET/CT 검사 시 다양한 신체 조건의 소아 환자는 CT 검사 조건을 관전류를 낮춤으로서 소아환자의 피폭선량을 감소시킬 수 있다.

결 론

팬텀을 이용한 소아 PET/CT 실험 시 최저 선량 CT 조건 (80 kVp, 10 mA) 을 적용하여 최고 조건(140 kVp 160 mA)

Table 3. CT Dose as a Function of PET/CT scanner, Tube Voltage, and Tube Current.

PET/CT Scanner	Tube Voltage	CTDI _{vol} (mGy)				
		10 mA	20 mA	40 mA	80 mA	160 mA
Discovery STe	80 kVp	0.07252	0.1546	0.3122	0.6246	1.246
	100 kVp	0.1569	0.3161	0.6296	1.259	2.529
	120 kVp	0.2505	0.5055	1.024	2.053	4.088
	140 kVp	0.3608	0.7338	1.471	2.954	5.922
BiographTruepoint 40	80 kVp	0.618	1.036	2.019	4.071	
	100 kVp	1.315	2.27	4.511	9.091	
	120 kVp	2.172	3.693	7.452	14.92	
	140 kVp	3.204	5.618	11.28	22.71	
Discovery 600	80 kVp	0.1234	0.2435	0.4876	0.9782	1.943
	100 kVp	0.2448	0.4894	0.9756	1.96	3.9
	120 kVp	0.3971	0.7903	1.573	3.167	6.331
	140 kVp	0.5705	1.14	2.285	4.57	9.148

보다 97% 이상 심부선량을 감소시킬 수 있다. CT 영상에는 관전압과 관전류의 조건이 낮아 질수록 영상의 질이 현저히 떨어졌다. 하지만 감쇄보정을 진행한 PET 영상에는 영향 없었다. 임상에서 소아 환자의 PET/CT 검사 시 CT의 진단이 필요 없는 PET 영상만을 획득하고자 한다면, 소아 환자의 신체에 적절히 적용한 최저 선량 CT를 감쇄보정을 하여, 유효 선량을 성인에 비하여 약 90% 이상 감소시켜 피폭 선량 저감에 도움이 될 것이다.

요 약

최근 PET/CT 검사는 성인 암환자뿐만 아니라 소아 암환자에게도 많이 적용하고 있다. 그러나 소아 환자의 경우 성인에 비하여 방사성 감수성이 높아 피폭선량의 관리를 필요로 하고 있다. 그러므로 본 저자는 팬텀을 이용하여 소아 PET/CT 검사 시 감쇄보정 CT 선량과 영상을 평가하였다.

3대의 PET/CT 장비 (Discovery STe, BiographTruepoint 40, Discovery 600)로 소아 사이즈의 아크릴 팬텀과 이온 챔버 선량계 (Unfous Xi CT, Sweden)를 이용하여 CT 영상 획득 조건 (10, 20, 40, 80, 100, 160 mA; 80, 100, 120, 140 kVp)을 변화시켜 심부선량과 CTDI_{vol} 값을 평가하였다. 그리고 NEMA PET Phantom[™]을 이용하여 같은 CT 조건으로 PET 영상을 획득하여 감쇄보정 된 각 PET 영상을 SUV 값과 신호 대 잡음 비로 평가하였다. 심부선량은 일반적으로 소아 복부 CT 조건 (100 kVp, 100 mA) 보다 최소 CT 조건 (80 kVp, 10 mA)에서의 심부선량은 약 92% 감소되었고, CTDI_{vol} 값은 약 88% 감소되었다. 각 CT 조건에 따라 감쇄보정된 PET 영상은 SUV 값에 변화가 없었고, 신호 대 잡음

비도 영향을 받지 않았다. 팬텀을 이용한 소아 PET/CT 실험 시 최저 선량 CT 조건 (80 kVp, 10 mA)을 적용하여 감쇄보정을 진행한 PET 영상에는 영향 없었다. 소아 환자의 PET/CT 검사 시 CT의 진단이 필요 없는 PET 영상만을 획득하고자 한다면, 소아 환자의 신체에 적절히 적용한 최저 선량 CT를 감쇄보정을 하여, 유효 선량을 성인에 비하여 약 90% 이상 감소시켜 피폭 선량 저감에 도움이 될 것이다.

REFERENCES

1. Frederic H. Fahey, Matthew R. Palmer, Keith J. Strauss. Dosimetry and Adequacy of CT-based Attenuation Correction for Pediatric PET: Phantom Study 1. *Radiology* 2007;243:96-104.
2. Michael J. Gelfand. Dosimetry of FDG PET/CT and other molecular imaging applications in pediatric patients. *Pediatr Radiol* 2009; 39:46-56.
3. Takeshi Murano, Ukide Tateish, Takeshi Iinuma. Evaluation of the risk of radiation exposure from new 18FDG PET/CT plans versus conventional X-ray plans in patients with pediatric cancers. *Ann Nucl Med* 2010; 24:261-267.
4. Adam M. Alessio, Paul E. Kinahan, Vivek Manchanda. Weight-Based, Low-Dose Pediatric Whole-Body PET/CT Protocols. *J Nucl Med* 2009; 50:1570-1578.
5. Susan McQuattie. Pediatric PET/CT Imaging: Tip and Technique. *J Nucl Med Technol* 2008; 36:171-178.
6. Hossein Jadvar, Leonard P. Connolly, Frederic H. Fahey. PET and PET/CT in Pediatric Oncology. *Semin Nucl Med* 2007; 37:316-331.
7. 손혜경, Turkington Timothy G, 권윤영, 정해조, 김희중. CT 영상을 이용한 감쇄보정시 조영제가 PET 영상에 미치는 영향. *의학물리* 2005; 16:132-201.