

CT 선량 측정 프로그램을 이용한 PET/CT 검사 환자의 예측 유효 선량의 분석

서울아산병원 핵의학과

김정선 · 정우영 · 박승용

Analysis of Patient Effective Dose in PET/CT; Using CT Dosimetry Programs

Jung Sun Kim, Woo Young Jung and Seung Yong Park

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

Purpose: As PET/CT come into wide use, it caused increasing of expose in clinical use. Therefore, Korea Food and Drug Administration issued Patient DRL (Diagnostic Reference Level) in CT scan. In this study, to build the basis of patient dose reduction, we analyzed effective dose in transmission scan with CT scan. **Materials and Methods:** From February, 2010 to March 180 patients (age: 55±16, weight: 61.0±10.4 kg) who examined ¹⁸F-FDG PET/CT in Asan Medical Center. Biograph Truepoint 40 (SIEMENS, GERMANY), Biograph Sensation 16 (SIEMENS, GERMANY) and Discovery STe8 (GE healthcare, USA) were used in this study. Per each male and female average of 30 patients doses were analyzed by one. Automatic exposure control system for controlling the dose can affect the largest by a patient's body weight less than 50 kg, 50-60 kg less, 60 kg more than the average of the three groups were divided doses. We compared that measured value of CT-expo v1.7 and ImPACT v1.0. The relationship between body weight and the effective dose were analyzed. **Results:** When using CT-Expo V1.7, effective dose with BIO40, BIO16 and DSTe8 respectably were 6.46±1.18 mSv, 9.36±1.96 mSv and 9.36±1.96 mSv for 30 male patients respectably 6.29±0.97 mSv, 10.02±2.42 mSv and 9.05±2.27 mSv for 30 female patients respectably. When using ImPACT v1.0, effective dose with BIO40, BIO16 and DSTe8 respectably were 6.54±1.21 mSv, 8.36±1.69 mSv and 9.74±2.55Sv for 30 male patients respectably 5.87±1.09 mSv, 8.43±1.89 mSv and 9.19±2.29 mSv for female patients respectably. When divided three groups which were under 50 kg, 50-60 kg and over 60 kg respectably were 6.27 mSv, 7.67 mSv and 9.33 mSv respectably using CT-Expo V1.7, 5.62 mSv, 7.22 mSv and 8.91 mSv respectably using ImPACT v1.0. Weight and the effective dose coefficient analysis showed a very strong positive correlation($r=743$, $r=0.693$). **Conclusion:** Using such a dose evaluation programs, easier to predict and evaluate the effective dose possible without performing phantom study and such dose evaluation programs could be used to collect basic data for CT dose management.

(Korean J Nucl Med Technol 2010;14(2):77-82)

Key Words : Effective dose, PET/CT, CT-Expo, ImPACT

서 론

의료용 엑스선 사용이 증가함에 따라 인류가 받는 총 방

사선 피폭 중 의료에서의 방사선 피폭이 약 80~90%를 차지하고 있어 이를 줄이기 위한 저감화 대책이 세계보건기구(World Health Organization), 국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection) 등에서 국제적으로 진행되고 있으며, 각 국가가 자국 실정에 맞도록 의료 피폭 저감을 위하여 환자 선량 권고량(Diagnostic Reference Level)을 확립하도록 권고 하고 있다.¹⁾ 한국의 식품의약품안전평가원에서는 2009년 9월에 'CT 엑스선 검사

• Received: September 15, 2010. Accepted: September 30, 2010.
• Corresponding author: **Woo Young Jung**
Department of Nuclear Medicine, Asan Medical Center, Asan
byeongwon-gil 86, SongPa-gu, Seoul 138-736, Korea
Tel: +82-2-3010-5421, Fax: +82-2-3010-5425
E-mail: wyjung@amc.seoul.kr

에서의 환자 선량 권고량 가이드라인'을 발간하고 각 기관에서 CT 검사 시 환자 선량을 저감하도록 권고 하고 있다.²⁾ PET/CT 기기는 이전 세대의 PET 시스템과 비교하여 해부학적 영상과 기능적 영상 정보를 함께 제공하고 검사 소요 시간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있어 임상에서의 그 사용과 보급이 크게 증가 하고 있다. 대한핵의학회 통계 자료에 의하면 PET/CT 검사 건수가 2006년 100,530건, 2007년 184,824건, 2008년 248,935건, 2009년 308,663건으로 급격히 증가하는 추세이며 PET/CT 검사 시 감쇄 보정을 하기 위한 CT 검사 역시 증가하여 검사 과정에서 피폭 선량이 증가 되고 있어 의료 피폭의 저감 대책을 포함한 방사선 안전 관리의 체계적인 구축이 필요하다.²⁾

본 연구에서는 PET/CT 검사에서의 환자 선량 데이터베이스를 구축하여 환자 선량 저감을 위한 초석을 세우기 위해 CT 선량 측정 프로그램을 사용하여 CT를 사용한 투과 스캔 시 환자가 받는 예측 유효 선량을 비교 분석하였다.

실험재료 및 방법

1. 대상

서울아산병원 PET검사실에서 2010년 2월부터 3월까지 Biograph Truepoint 40 (SIEMENS, GERMANY, 이하 BIO40), Biograph Sensation 16 (SIEMENS, GERMANY, 이

하 BIO16), Discovery STE8 (GE healthcare, USA, 이하 DSTe8)을 이용하여 ¹⁸F-FDG Whole body PET/CT 검사를 시행한 환자 중 만 18세 미만의 소아 환자를 제외한 180명(나이: 55±16세 체중: 55±18 kg)의 검사 자료를 대상으로 하여 예측 유효 선량을 분석하였다.

2. CT 노출 조건 및 선량 측정

각 기기의 CT 조건은 BIO40에서 120 Kv, 100 ref. mAs (CAREdose 4D), rotation cycle 0.5s, pitch 0.8이었고 BIO16에서 120 Kv, 100 ref. mAs (CAREdose 4D), rotation cycle 0.5s, pitch 1.25이었으며 DSTe8에서 140 Kv, 25~210 mA (AUTO mA), rotation cycle 0.8s, pitch 1.675로 설정하였다.

각 기기에서 PET/CT 검사 시 위의 CT 조건을 사용한 투과스캔을 하였을 때 환자가 받는 유효 선량을 측정하였다. 선량 측정은 국제방사선방호위원회(National Radiological Protection Board)의 Monte Calo 선량 자료를 이용하여 유효 선량을 예측할 수 있도록 상용화된 컴퓨터 프로그램인 CT-Expo v1.7 (GSF, Germany)과 ImpACT v1.0 (NRPB, UK)을 사용하였다(Fig. 1, Fig. 2).

3. 분석 방법

각 기기에서 검사한 환자 선량 자료를 비교하기 위하여 각

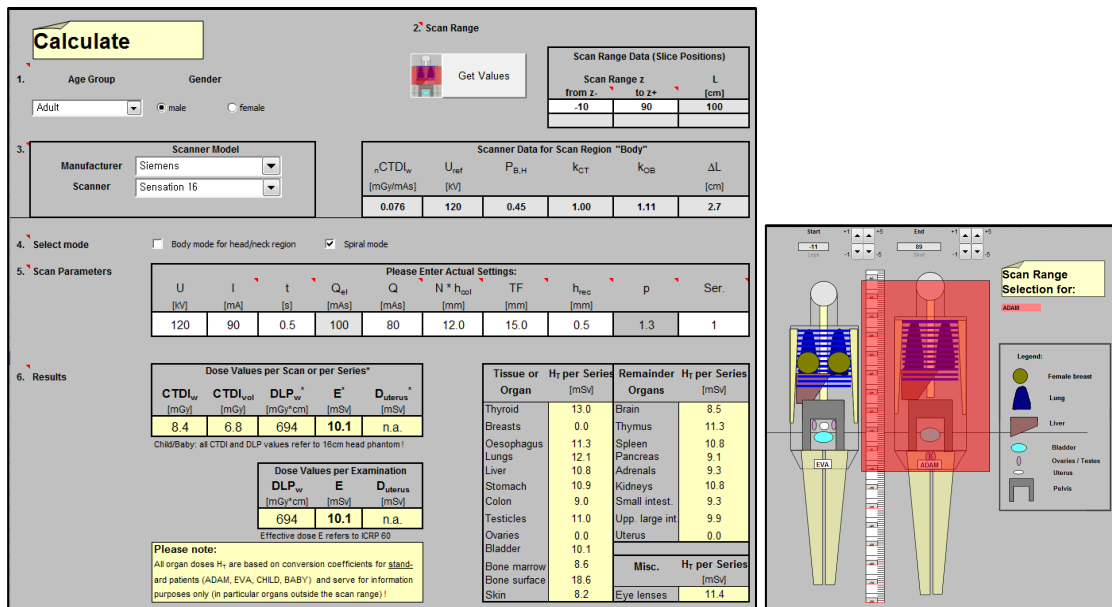


Fig. 1. Enter the parameters which are vendor, scanner type sex, Kv, mA, rotation cycle, table feed, collimation and scan range you can get the effective dose (CT-expo v1.7).

기기 별로 남, 여 30명씩 선량의 평균을 분석하였다. 또한 자동 노출 제어 시스템(Auto Exposure Control system)으로 선량 조절 시 가장 큰 영향을 줄 수 있는 환자의 체중에 따른 환자 선량을 비교하기 위하여 50 kg 미만, 50~60 kg 미만, 60 kg 이상 세 집단으로 나누어 선량의 평균을 분석하고 체중과 유효 선량의 상관관계를 분석하였다.

결 과

1. BIO40에서 검사를 시행한 환자의 유효 선량 비교 (CT-Expo v1.7 vs ImPACT v1.0)

BIO40에서 검사한 환자의 유효 선량을 CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0을 사용하여 예측하였을 때, 남자 환자 30명은

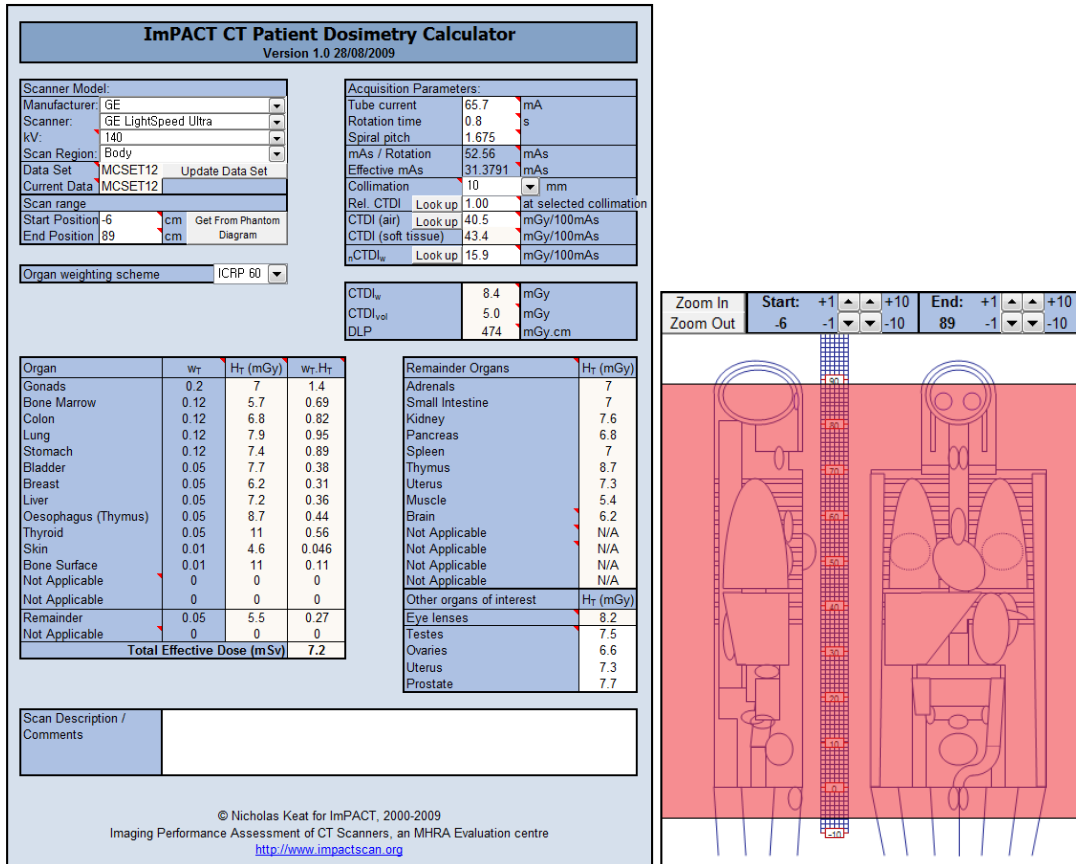


Fig. 2. Enter the parameters which are vendor, scanner type, Kv, mA, rotation cycle, pitch, collimation and scan range you can get the effective dose (ImPACT v1.0).

Table 1. Estimated effective dose of BIO40 for CT in PET/CT scans using CT-Expo v1.7 and ImPACT v1.0

| | Sex | Average | SD | Median | 1 st Quartile | 3 rd Quartile | Minimum | Maximum |
|---------------|-----|---------|------|--------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|
| CT-expo (mSv) | M | 6.46 | 1.18 | 6.30 | 5.78 | 7.27 | 4.30 | 9.40 |
| | F | 6.29 | 0.97 | 6.25 | 5.50 | 6.90 | 4.40 | 8.50 |
| ImPACT (mSv) | M | 6.54 | 1.21 | 6.40 | 5.87 | 7.37 | 4.30 | 9.50 |
| | F | 5.87 | 1.09 | 5.90 | 5.15 | 6.60 | 3.70 | 8.10 |

Table 2. Estimated effective dose of BIO16 for CT in PET/CT scans using CT-Expo v1.7 and ImPACT v1.0

| | Sex | Average | SD | Median | 1 st Quartile | 3 rd Quartile | Minimum | Maximum |
|---------------|-----|---------|------|--------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|
| CT-expo (mSv) | M | 9.36 | 1.96 | 7.80 | 6.25 | 9.30 | 6.90 | 12.60 |
| | F | 10.02 | 2.42 | 7.70 | 6.18 | 9.95 | 6.80 | 13.90 |
| ImPACT (mSv) | M | 8.36 | 1.69 | 7.25 | 6.23 | 8.30 | 6.20 | 11.00 |
| | F | 8.43 | 1.89 | 6.80 | 5.80 | 8.40 | 5.80 | 12.00 |

각각 6.46±1.18 mSv, 6.54±1.21 mSv, 여자 환자 30명은 각각 6.29±0.97 mSv, 5.87±1.09 mSv이었다(Table 1).

2. BIO16에서 검사를 시행한 환자의 유효 선량 비교 (CT-Expo v1.7 vs ImPACT v1.0)

BIO16에서 검사한 환자의 유효 선량은 남자 환자 30명은 각각 9.36±1.96 mSv, 8.36±1.69 mSv 여자 환자 30명은 각각 10.02±2.42 mSv, 8.43±1.89 mSv이었다(Table 2).

3. DSTe8에서 검사를 시행한 환자의 유효 선량 비교 (CT-Expo v1.7 vs ImPACT v1.0)

DSTe8에서 검사한 환자의 유효 선량은 남자 환자 30명은 각각 9.36±1.96 mSv, 9.74±2.55 mSv, 여자 환자 30명은 각각 9.05±2.27 mSv, 9.19±2.29 mSv이었다(Table 3).

4. 각 기기에서 검사를 시행한 환자의 체중에 따른 환자 선량 비교(CT-Expo v1.7 vs ImPACT v1.0)

BIO40에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50~60 kg 미만, 60 kg 이상으로 체중별로 세 개의 집단으로 나누어 환자 선량을 측정하였다. CT-expo v1.7로 측정을 하였을 때 각각 6.05±1.77 mSv, 6.18±1.05 mSv, 6.80±1.06 mSv이었고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때 각각 5.06±1.46 mSv, 5.72±0.86 mSv, 6.42±0.96 mSv이었다. BIO16에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50-60 kg 미만,

60 kg 이상으로 체중별로 세 개의 집단으로 나누어 환자 선량을 측정하였다. CT-Expo v1.7로 측정을 하였을 때 각각 7.74±0.66 mSv, 8.58±0.93 mSv, 10.88±1.32 mSv 이었고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때 각각 6.60±0.54 mSv, 7.45±0.69 mSv, 9.43±1.11 mSv이었다. DSTe8에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50-60 kg 미만, 60 kg 이상으로 체중 별로 세 개의 집단으로 나누어 환자 선량을 측정하였다. CT-Expo v1.7로 측정했을 때 각각 5.03±0.95 mSv, 8.25±1.66 mSv, 10.33±1.68 mSv였고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때 각각 5.20±1.01 mSv, 8.51±1.53 mSv, 10.9±1.87 mSv이었다(Table 4).

체중과 유효 선량의 상관관계를 분석하였을 때 CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0에서 Pearson 정률상관계수가 각각 0.743, 0.692으로 매우 강한 양의 상관관계가 있었다(Fig. 3).

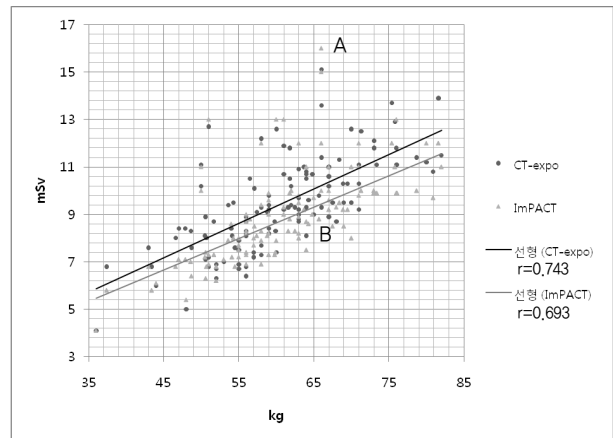


Fig. 3. Correlation between effective dose and weight shows positive correlation.

Table 3. Estimated effective dose of DSTe8 for CT in PET/CT scans using CT-Expo v1,7 and ImPACT v1,0

| | Sex | Average | SD | Median | 1 st Quartile | 3 rd Quartile | Minimum | Maximum |
|----------------|-----|---------|------|--------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|
| CT-expo (mSv) | M | 9.36 | 1.96 | 7.80 | 6.25 | 9.30 | 6.90 | 12.60 |
| | F | 9.05 | 2.27 | 7.25 | 6.20 | 8.88 | 5.00 | 15.10 |
| ImPACT (mSv) | M | 9.74 | 2.55 | 7.65 | 6.30 | 9.50 | 5.40 | 16.00 |
| | F | 9.19 | 2.29 | 6.95 | 5.73 | 9.38 | 4.10 | 13.00 |

Table 4. Comparing effective dose of patients, classify by weight

| | BIO40 | | | BIO16 | | DSTe8 | |
|----------------|----------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | Weight | Average | SD | Average | SD | Average | SD |
| CT-ecpo (mSv) | <50 kg | 6.05 | 1.77 | 7.74 | 0.66 | 5.03 | 0.95 |
| | 50~60 kg | 6.18 | 1.05 | 8.58 | 0.93 | 8.25 | 1.66 |
| | >60 kg | 6.80 | 1.06 | 10.88 | 1.32 | 10.33 | 1.68 |
| ImPACT (mSv) | <50 kg | 5.06 | 1.46 | 6.60 | 0.54 | 5.20 | 1.01 |
| | 50~60 kg | 5.72 | 0.86 | 7.45 | 0.69 | 8.51 | 1.53 |
| | >60 kg | 6.42 | 0.96 | 9.43 | 1.11 | 10.9 | 1.87 |

고 찰

각 기기 별로 검사를 시행한 환자의 자료를 대상으로 하여 측정된 유효 선량은 BIO40에서 가장 낮은 수치를 나타내었고 BIO16과 DSTe8에서 비슷한 수치로 확인 되었다. 이는 각 기기의 노출 조건이 다르기 때문이기도 하지만 CT 스캐너 설계의 기하학적인 차이가 있어 스캐너 X선관 초점에서 회전 중심까지 거리, X선 빔의 필터, 검출 시스템의 효율, 데이터 수집 전자 회로의 잡음 수준, 재구성 알고리즘에 차이에 기인한 것으로 사료된다.¹⁾ 서울아산병원에서 ¹⁸F-FDG Whole body PET/CT 검사를 시행한 180명의 환자의 자료를 대상으로 CT-Expo v1.7을 사용하여 유효 선량을 측정된 값의 평균과 ImPACT v1.0을 사용하여 유효 선량을 측정된 값의 평균은 각각 8.37 ± 2.22 mSv, 7.96 ± 2.22 mSv로 CT-Expo v1.7을 사용하여 측정하였을 때 조금 더 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 CT-Expo v1.7에서는 여자와 남자를 구분할 수 있어 여자의 자궁과 난소의 조직 가중치를 추가하여 계산하였기 때문에 높게 측정된 것으로 사료된다.³⁾ 체중에 따른 환자의 선량을 비교해 본 결과, 체중이 증가 할수록 유효 선량이 증가하는 것은 자동 노출 제어 시스템이 환자의 체적에 따라 mA값을 변조하기 때문에 선량이 증가하는 것으로 사료된다.⁴⁾ BIO40의 유효 선량 비교 결과(Table 1)에서 ImPACT v1.0의 결과 중 최소값 4.30 mSv와 최대값 9.50 mSv로 약 2.2배의 차이가 있는 것은 최소값이 측정된 환자와 최대값 측정된 환자의 체중이 각각 42.6 kg, 110.8 kg으로 약 2.6배의 차이가 나는 것에 기인한 것으로 해석 할 수 있다. 또한 그림 3에서 환자 A와 B가 체중이 비슷함에도 불구하고 유효 선량의 차이가 크게 나는 것은 환자 A가 162.1 cm 66 kg으로 177.1 cm 67 kg인 환자 B보다 비만 체형이었고 또한 PET/CT 검사 시 일반적으로는 팔을 올리고 검사를 시행하지만 환자 A는 팔을 내리고 검사를 시행하여 체적이 증가하였기 때문에 선량이 증가한 것으로 생각된다.

본 연구에서 제한점은 첫째, CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0은 CT 조건 입력 시 자동 노출 제어 시스템을 적용하는 방법이 없어 환자에게 조사된 mA의 평균을 구하여 평균 mA값을 입력하여 계산하였다. 하지만 Brix G, et al.의 선행된 연구들에서 평균 mA를 입력하여 환자 선량을 계산한 값이 약 7% 높게 측정되며 Alderson phantom에 TLD를 장착하여 실제로 측정된 값과 큰 차이를 보이지 않는다는 결과가 발표된 바 있다.⁵⁾ 각 프로그램의 제작사가 자동 노출 제어 시스템을 적용할 수 있는 옵션을 업데이트 한다면 보다 정확한

측정이 가능 할 것이라고 생각한다. 둘째, 유효 선량이 체중에 비례하여 증가한다기 보다는 스캔 범위 내의 체적에 비례하는 것이 정확하나 환자의 체적을 계산할 수 없어 체중에 비례한다는 가설을 세웠고 팔을 내리고 검사하여 체적이 증가한 환자의 데이터를 제외시키지 않았다.

결 론

¹⁸F-FDG Whole body PET/CT 검사 시 CT의 사용에 의해서 약 8 mSv의 유효선량이 피폭되는 것을 예측 할 수 있었다. 또한 ICRP 80의 데이터를 참고하여 ¹⁸F-FDG만의 유효 선량을 예측 계산하였을 때, 본 연구의 대상 환자들의 평균 체중인 60.8 kg을 적용하고 1 kg 당 7.4 MBq의 ¹⁸F-FDG를 투여하게 되면 약 11 mSv가 피폭되는 것으로 예측 할 수 있다. 따라서 PET/CT 검사 중 CT에서 받는 약 8 mSv와 ¹⁸F-FDG를 투여하여 체내에서 피폭된 11 mSv를 모두 합산하면 약 19 mSv의 피폭을 받을 것으로 예상할 수 있다. 이는 2009년 RSNA (Radiological Society of North America)에서 발표한 자료를 참고하여 비교하면 1회 복부 CT 검사의 약 1.9배의 유효선량이 피폭되는 것으로 환자의 유효 선량 관리 및 모니터링이 반드시 필요 할 것으로 판단된다. 이와 같은 상용화된 선량 평가 프로그램을 사용하면 Phantom 연구를 시행하지 않더라도 유효 선량의 예측 및 평가가 가능하고, CT 선량 관리를 위한 기초 자료를 수집하는데 활용 될 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

PET/CT 기기의 설치가 증가함에 따라 PET/CT 검사 시 감쇄 보정을 위한 CT 검사 역시 증가하여 검사 과정에서 피폭 선량이 증가 되고 있어 의료 피폭의 저감 대책을 포함한 방사선 안전 관리의 체계적인 구축이 필요하다. 본 연구에서는 PET/CT 검사에서의 환자 선량 데이터베이스를 구축하여 환자 선량 저감을 위한 초석을 세우기 위해 CT 선량 측정 프로그램을 사용하여 CT를 사용한 투과 스캔 시 환자가 받는 CT의 예측 유효 선량을 비교 분석하였다.

BIO40, BIO16, DSTe8 에서 ¹⁸F-FDG PET/CT 검사를 시행한 180명을 대상으로 하였다. 각 기기 별로 남, 여 30명씩 선량의 평균을 분석하였다. 자동 노출 제어 시스템으로 선량 조절 시 가장 큰 영향을 줄 수 있는 환자의 체중 별로 50 kg 미만, 50-60 kg 미만, 60 kg 이상 세 집단으로 나누어 선량의

평균을 분석하였다. CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0을 사용하여 선량 측정을 한 값을 비교 분석하고 체중과 유효 선량의 상관관계를 분석하였다.

BIO40에서 검사한 환자의 유효 선량을 CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0을 사용하여 예측하였을 때, 남자 환자 30명은 각각 6.46±1.18 mSv, 6.54±1.21 mSv, 여자 환자 30명은 각각 6.29±0.97 mSv, 5.87±1.09 mSv 이었다. BIO16 에서 검사한 환자의 유효 선량은 남자 환자 30명은 각각 9.36±1.96 mSv, 8.36±1.69 mSv 여자 환자 30명은 각각 10.02±2.42 mSv, 8.43±1.89 mSv 이었다. DSTe8에서 검사한 환자의 유효 선량은 남자 환자 30명은 각각 9.36±1.96 mSv, 9.74±2.55 mSv, 여자 환자 30명은 각각 9.05±2.27 mSv, 9.19±2.29 mSv 이었다. 각 기기에서 검사를 시행한 환자의 체중에 따른 환자의 선량을 비교하기 위해, BIO40에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50~60 kg 미만, 60 kg 이상으로 체중별로 세 개의 집단으로 나누어 환자 선량을 측정하였다. CT-expo v1.7로 측정을 하였을 때 각각 6.05±1.77 mSv, 6.18±1.05 mSv, 6.80±1.06 mSv이었고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때 각각 5.06±1.46 mSv, 5.72±0.86 mSv, 6.42±0.96 mSv이었다. BIO16에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50-60 kg 미만, 60 kg 이상으로 체중 별로 나누어 환자 선량을 측정하였다. CT-Expo v1.7로 측정을 하였을 때 각각 7.74±0.66 mSv, 8.58±0.93 mSv, 10.88±1.32 mSv이었고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때 각각 6.60±0.54 mSv, 7.45±0.69 mSv, 9.43±1.11 mSv이었다. DSTe8에서 검사를 시행한 환자를 대상으로 하여 50 kg 미만, 50-60 kg 미만, 60 kg 이상으로 체중 별로 나누어 환자 선량을 예측하였다. CT-Expo v1.7로 측정했을 때 각각 5.03±0.95 mSv, 8.25±1.66 mSv, 10.33±1.68 mSv 이었고 ImPACT v1.0으로 측정했을 때

각각 5.20±1.01 mSv, 8.51±1.53 mSv, 10.9±1.87 mSv이었다. 체중과 유효 선량의 상관관계를 분석하였을 때 CT-Expo v1.7과 ImPACT v1.0에서 Pearson 정률 상관관계수가 각각 0.743, 0.692으로 매우 강한 양의 상관관계가 있었다.

피폭 선량의 예측이 필요할 경우 이와 같은 상용화된 선량 평가 프로그램을 사용하면 Phantom 연구를 시행하지 않더라도 유효 선량의 예측 및 평가가 가능하고, CT 선량 관리를 위한 기초 자료를 수집하는데 활용 될 수 있을 것으로 생각 된다.

REFERENCES

1. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). *ICRP* 2007;102
2. CT 엑스선검사에서의 환자 선량 권고량 가이드라인. *식품의약품안전평가원* 2009
3. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. *ICRP* 80 1997
4. U. Lechel, C. Becker, G. Langenfeld-Jager, G. Brix (2009), Dose reduction by automatic exposer control in multidetector computed tomography: comparison between measurement and calculation: *Eur Radiol* 2009;19:1027-1034
5. Brix G, Lechel U, Veit R, Trucknbrodth R, Stamm G, Coppentrath EM, Griebel J, Nage HD (2004) Assessment of a theoretical formalism for dose estimation in CT: an anthropomorphic phantom study, *Eur Radiol* 14:1275-1284
6. Bingsheng Huang, Martin Wai-ming Law, Pek-Lan khong, Whole-body PET/CT Scanning: Estimation of Radiation Dose and Cancer Risk. *Radiology* 2009;251:1-April
7. Soni C, Noah Federman, Di Zhang, Kristen N, Soujanya N, Estimated cumulative radiation dose from PET/CT in children with malignancies: a 5-year retrospective review: *Pediatr Radiol* 2010;40:681-686