

Effects of Tube Voltage and Tube Current on Exposure Index : Focused on Radiographic Images of Cone Pyramid Phantom

You-Hun Seoung

Department of Radiological Science, College of Health Medical Science, Cheongju University

Received: March 24, 2019. Revised: June 19, 2019. Accepted: October 31, 2019

ABSTRACT

In this study, we investigated the effects of tube voltage (kVp) and tube current (mAs) on an exposure index (EI) applied to a digital radiography. There used an inverter type digital X-ray generator and an image receptor (IR) utilized a portable wireless detector without a grid. Radiographic images were acquired using a cone pyramid phantom produced using a 3D printer. The X-ray tube voltage was increased from 40 kVp to 120 kVp with 10 kVp increment, and the tube current was increased from 1 mAs to 128 mAs with the twice increment. As a result, kVp had logarithmic relationship with the EI as high R^2 value, and mAs had a very high linear relationship too. Also, there was a high correlation between the area dose and the EI of the IR, with the R^2 value being 0.76 or more. In conclusion, it had showed that mAs affected the EI linearly, and that it could be advantageous to adjust the easy-to-predict mAs to maintain proper image qualities.

Keywords: Cone pyramid phantom, Digital radiography, Tube voltage, Tube current, Exposure index

I . INTRODUCTION

아날로그 방식의 방사선 필름영상은 관전압(kilovoltage-peak, kVp)과 관전류량(milliampere-sec, mAs)에 의하여 조사된 X선의 광자가 필름에 도포된 브롬(Br)을 중성화시키면서 발생된 전자가 감광핵을 음이온화 시킨 후 양이온인 은입자가 감광핵으로 모이면서 누적된 정도에 따라 흑화된 영상이다.^[1] 이러한 흑화도는 알루미늄 재질의 계단형 쉐기(step wedge) 팬텀을 X선이 투과되면서 형성된 각 계단의 농도를 농도측정기(densitometry)로 구할 수 있다. 그 결과 X선 조사선량에 대한 필름의 노출 관용도(exposure latitude)가 제한적임을 널리 알고 있다.^[2] 또한 이러한 한계점은 최적의 관전압과 관전류량 설정에 많은 숙련과 노하우를 요구하고 있다.

그러나 방사선 영상검출체에 대한 발전으로 아날로그 영상이 디지털화되면서 노출 관용도는 넓어져 조사선량에 대한 의존도는 상대적으로 낮아졌다. 그로 인하여 방사선사들은 관전압과 관전류

량 선정의 폭이 넓어져 부적절한 조사선량 조건으로 인한 재검사의 부담을 줄일 수 있었다.^[3] 그러나 아날로그 방식에서는 X선 조사조건이 높으면 필름을 더 감광시켜 검게 보이기 때문에 다음 검사에서는 자연스럽게 조사조건을 낮출 수 있다. 반면 디지털 방사선영상에서는 넓어진 노출 관용도로 인하여 관전압과 관전류량 변동에도 불구하고 영상의 질은 크게 좌우되지 않기 때문에 영상만으로는 X선 조사조건을 오류를 환류받기 쉽지 않다. 그 결과 디지털 영상의 노이즈 발생을 우려한 방사선사들이 적정한 X선 조사조건보다 높은 조사조건으로 검사하려는 경향(dose creep)이 있다고 미국의학물리학회(american association of physicists in medicine, AAPM)에서는 지적하고 있다.^[4]

최근에는 X선의 조사정도를 나타낼 수 있는 노출 지수(exposure index, EI)가 디지털 방사선촬영기에서 제공되고 있다.^[5] 이 EI는 방사선사에게 영상검출체의 흡수선량을 대략적으로 알려줌으로써 방사선의 과다 노출 및 과소 노출의 오류를 예방하

* Corresponding Author: Youl-Hun Seoung

E-mail: radimage@cju.ac.kr

Tel: +82-43-229-7993

고 최소화할 수 있도록 하였다. 또한 디지털 영상의 품질관리로 EI를 활용하기도 한다.^[6] EI는 영상 검출체에서 획득된 신호가 공기 커마값과 비례한다는 전제하에 설정되고 있고 영상화된 신호가 히스토그램으로 변환된 정보를 기반으로 하고 있다.^[7] 그러나 기존의 직사각형의 계단형 썸기(step wedge) 팬텀은 산란선에 의한 노이즈가 팬텀 주변에서 발생하기 때문에 불필요한 히스토그램으로 인한 정확한 EI값 평가가 어렵다.

따라서 본 연구에서 X선이 방사형으로 조사되는 점을 착안하여 원뿔형 피라미드 팬텀을 3D 프린팅 기술로 자체 제작하여 관전압과 관전류량이 EI에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

II. MATERIALS AND METHODS

1. 재료

방사선 발생장치는 인버터방식의 디지털 X선 발생장치(XGEO GC-85A, SAMSUNG, Korea)를 사용했으며 영상검출체는 이동형의 무선 디텍터를 그리드 없이 사용하였다. 디텍터의 사양은 다음과 같다. 크기는 14×17 inch, 2446×3040 pixels, amorphous silicon TFT, 픽셀의 깊이(depth)는 14 bits, 공간해상력은 3.57 lp/mm, 픽셀 피치(pitch)는 140 μm 이었다.

2. 원뿔형 피라미드 팬텀 제작

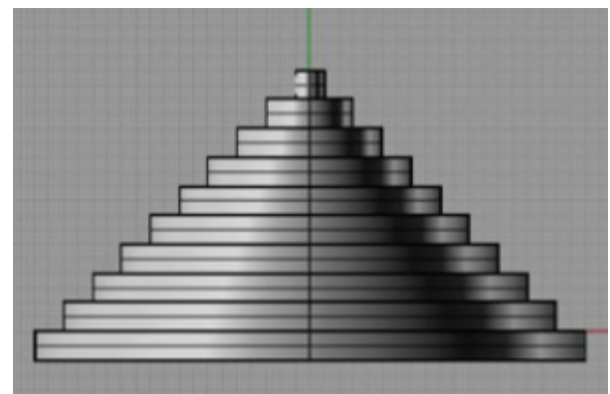
EI의 유효한 영상 획득을 위한 원뿔형 피라미드 팬텀은 용융적층방식(fused deposition modeling, FDM)의 3D 프린터(Sindoh, DP 200, Korea) 장비를 이용하여 제작하였다. 3D 프린터 소재는 선행연구에서 주로 사용한 폴리락트산(polylactic acid, PLA)을 사용하였다.^[8] 팬텀의 모델링은 3D 전용 모델러 프로그램(CADian3D, IntelliKorea, Korea)을 이용하여 설계하였다. 형태는 Fig. 1과 같이 총 10 계단의 원뿔형 피라미드 형태로 크기는 직경 190 mm, 높이 100 mm, 계단별 높이 10 mm, 계단별 간격 10 mm로 설계하여 X선의 감약을 정규화시켰다. 출력을 위한 G-code 변환은 오픈소스 Cura 엔진(Ultimaker Co.)을 기반으로 개발된 3D 프린터 제조사의 전용 소프트웨어를 사용하였다. 3D 프린팅 출

력은 내부를 100% 충전시켰으며 그 밖의 출력 조건은 Table 1과 같이 설정하였다.

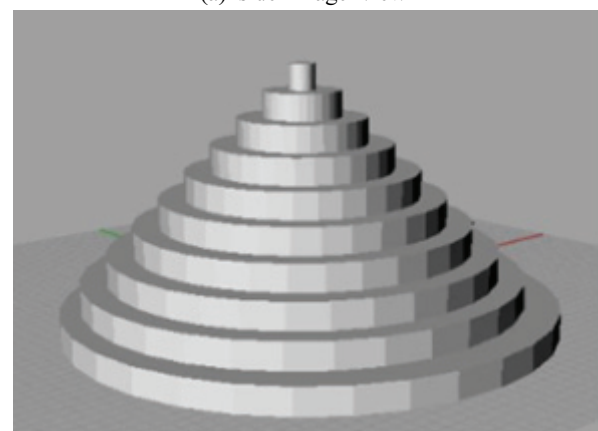
Table 1. The output parameters of 3D printing.

Parameter	Value	Parameter	Value
Infilling (%)	100	Nozzle Temp. (°C)	210
Layer Height (mm)	0.2	Heat-Bed Temp. (°C)	60
Extra Shell (mm)	0.8	Nozzle Diameter (mm)	0.4
Printing Speed (mm/s)	100	Activate Raft	Raft
Bottom/Top Thickness (mm)	0.7	First Layer Height (mm)	0.3
Retract Speed (mm/s)	30	X/Y direction interval (mm)	0.8
Retract Distance (mm)	6	Z direction interval (mm)	0.2
Fill Overlap (%)	15	Filament Diameter (mm)	1.75
Filament	PLA	Deposition Method	Linear line

*PLA: Poly Lactic Acid



(a) side image view



(b) 3D modeling view

Fig. 1. Design of Cone Pyramid Phantom.

3. 실험조건

실험장비 설치에 제작된 원뿔형 피라미드 팬텀을 Fig. 2와 같이 디텍터 정중앙에 위치하고 디텍터와 X선원간의 거리는 임상에서 주로 많이 설정하는 100 cm로 하였다. 조사야는 산란선에 의한 디텍터 영향을 최소화하기 위해 디텍터 전체를 포함하였다. X선의 관전압 조사조건은 40 kVp부터 120 kVp까지 10 kVp 씩 증가시켰고 각 관전압에서 관전류량은 원뿔형 피라미드 팬텀의 계단 높이를 두 배씩 증가시켰기 때문에 선량의 규칙적인 감약을 고려하여 1 mAs에서부터 128 mAs까지 대수(logarithm)적으로 증가시켜 조사선량을 정규화시켰다. 이때 X선 조정실에서 X선 영상 모니터에 표시되는 EI값을 기록하였다.

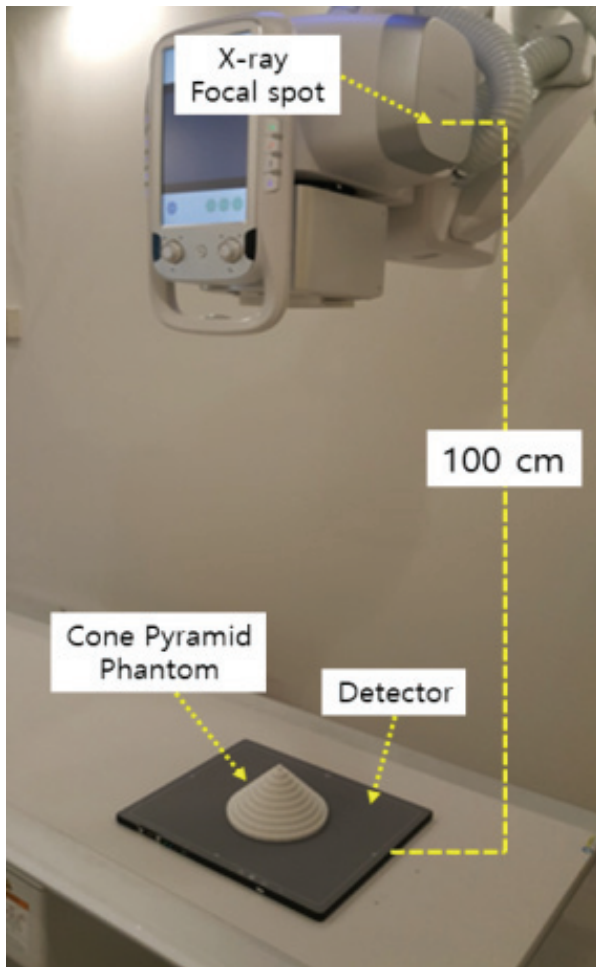


Fig. 2. Illustration of experimental set-up of cone pyramid phantom on the detector.

4. 유효 EI값과 선량값의 설정

X선의 과노출과 과부족으로 인한 영상의 손실은 EI에 영향을 줄 수 있기 때문에 Fig. 3(a)과 총 10 계단의 원형이 완전히 관찰되는 영상만을 선택하여 해당되는 유효한 EI값과 영상검출체의 면적선량값($\text{dGy}\cdot\text{cm}^2$)을 사용하였다. Fig. 3(b), (c), (d)와 같이 영상정보가 소실된 경우에는 배제하였다. 최종 획득된 영상은 DICOM (digital imaging and communications in medicine, DICOM)파일로 보관하였으며 영상의 관찰과 면적선량값은 범용 영상분석 프로그램인 Image J. (NIH, USA)를 이용하여 평가하였다. 또한 관전류량이 대수적으로 증가하였기 때문에 측정값들의 등간격 유지를 위해 EI값과 면적선량값은 log값으로 변환하였다.

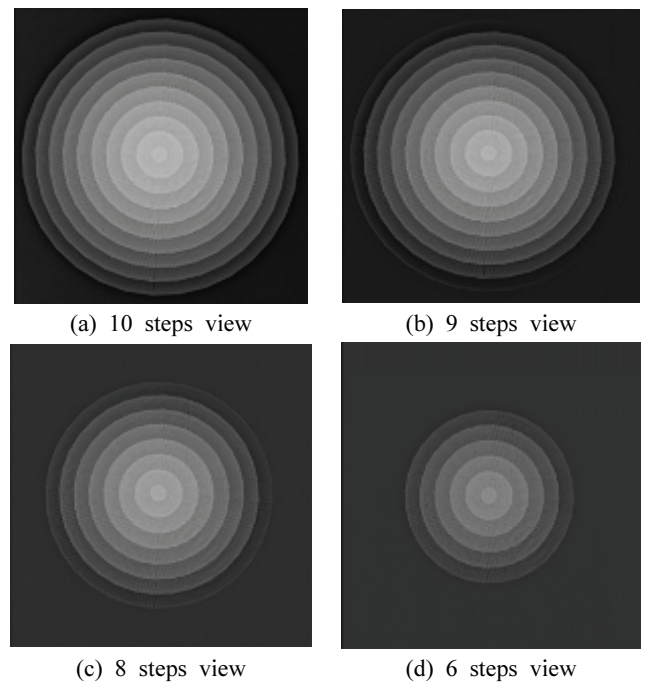


Fig. 3. Radiography of cone pyramid phantom.

5. 통계적 분석

본 실험에서 수집된 자료는 관전압별로 관전류량과 EI 그리고 영상검출체의 면적선량과 EI를 단순회귀모형에 적용하여 추세선을 도출하였고 결정계수(R^2)를 구하여 1에 가까운 선형성을 평가하였다.

III. RESULTS

1. 유효한 원뿔형 피라미드의 팬텀 방사선 영상

관전압과 관전류량의 변화에 따른 원뿔형 피라미드의 팬텀 영상은 Fig. 4와 같다. 이 중에서 총 10 계단의 유효한 원뿔형 피라미드의 팬텀 영상은 40 kVp에서는 64 mAs까지, 50 kVp에서는 16 mAs까지, 60 kVp와 70 kVp에서는 8 mAs까지, 80 kVp에서는 4 mAs까지, 90 kVp, 100 kVp 그리고 110 kVp에서는 2 mAs까지, 120 kVp에서는 1 mAs에서 유효한 영상을 보였다.

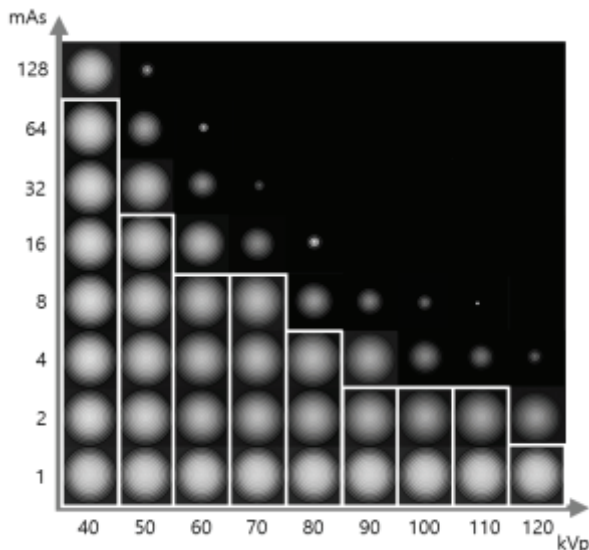
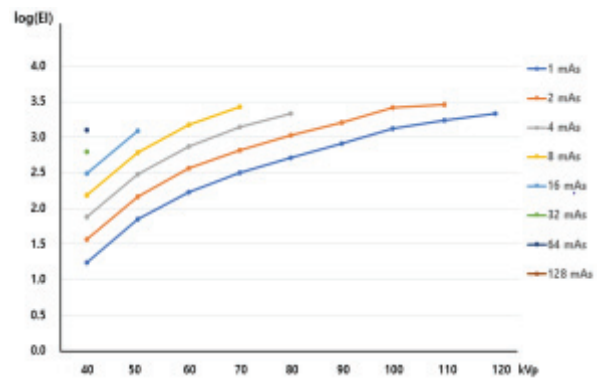


Fig. 4. Effective radiography of cone pyramid phantom changes in kVp and mAs.

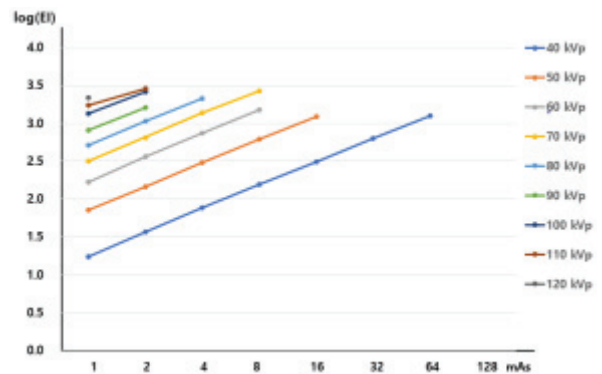
2. 관전압과 관전류량 변화에 따른 EI의 단순회귀 분석

유효하게 획득된 원뿔형 피라미드의 팬텀 영상을 바탕으로 관전압과 관전류량을 측정하였다. 그 결과 X선 조사조건의 변화에 따른 EI값의 단순회귀 결과는 Fig. 5와 같다. 관전압 변화에 따른 EI값의 추세선과 R^2 는 1 mAs에서 $y = 0.9670 \ln(x) + 1.1941$, $R_2 = 0.9974$, 2 mAs에서 $y = 0.8945 \ln(x) + 2.1817$, $R^2 = 0.9996$, 4 mAs에서 $y = 0.9307 \ln(x) + 1.5414$, $R_2 = 0.9980$, 8 mAs에서 $y = 0.9058 \ln(x) + 1.8723$, $R_2 = 0.9995$ 로 모두 R_2 가 0.99 이상의 높은 신뢰도를 갖는 로그함수그래프로 나타났다.

반면 관전류량 변화에 따른 EI값의 추세선과 R_2 는 1 mAs에서 $y = 0.3092 x + 0.9435$, $R^2 = 0.9998$, 2 mAs에서 $y = 0.3097 x + 1.5456$, $R^2 = 0.9999$, 4 mAs에서 $y = 0.3150 x + 1.9179$, $R^2 = 0.9995$, 8 mAs에서 $y = 0.3102 x + 2.1937$, $R^2 = 0.9990$ 로 모두 R_2 가 0.99 이상의 높은 신뢰도를 갖는 선형함수 그래프로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5. Simple regression analysis of exposure index changes in (a) kVp and (b) mAs.

3. EI와 영상검출체 선량의 단순회귀분석

유효한 원뿔형 피라미드 팬텀 영상의 DICOM 파일에서 획득된 면적선량값과 EI값의 상관관계를 나타내는 추세선은 Fig. 6과 같다. 이 추세선의 R_2 값은 0.7656으로 비교적 높은 선형적 상관관계를 보였다. 이때 $\log(\text{EI})$ 의 최대값은 3.457, 최소값은 1.240이었으며, $\log(\text{dGy}\cdot\text{cm}^2)$ 의 최대값은 0.795 ($=6.24 \text{ dGy}\cdot\text{cm}^2$), 최소값은 -1.046 ($=0.09 \text{ dGy}\cdot\text{cm}^2$)이었다.

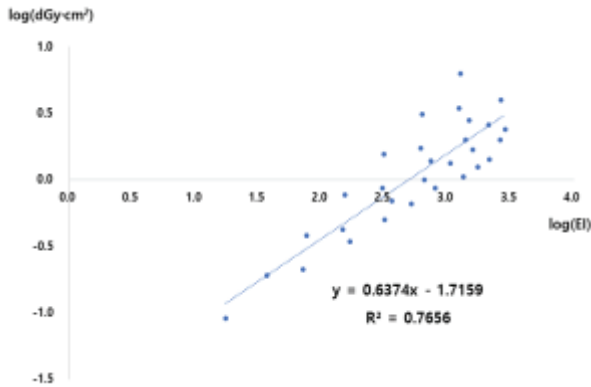


Fig. 6. Simple regression analysis of exposure index with area does on detector.

IV. DISCUSSIONS

본 연구에서는 관전압과 관전류량이 디지털 방사선영상에서 제공되고 있는 EI값에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. EI값은 노출된 관심영역에서 히스토그램의 중간값을 표현하기 때문에 불필요한 영상은 EI값에 영향을 줄 수 있다. 그런데 방사선 영상의 대조도를 측정하기 위해 전통적으로 사용된 직사각형의 계단형 췌기 팬텀은 Fig. 7과 같이 2차 산란선에 의하여 팬텀 주변(적색 화살표)에 인공물이 발생하기 때문에 EI값을 평가하기에는 부적절하였다.

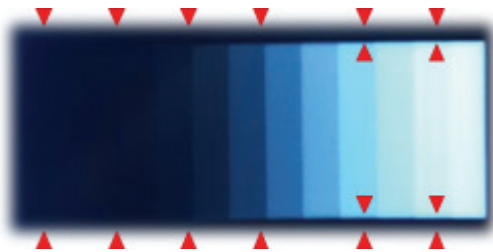


Fig. 7. Artifact (red arrow) on the Al step wedge phantom by scatter rays.

이러한 문제점을 본 연구에서는 X선의 방사 형태와 기하학적으로 유사한 원뿔형의 팬텀을 제작하여 주변에서 발생하는 인공물을 최소화하여 기존 선행연구방법과 다른 차별성과 독창성을 가지고 있다.^[9] 그러나 제작한 팬텀은 기존의 계단형처럼 각 계단의 높이만큼씩 증가시켜 얻어진 농도가 노광량의 대수값에 비례하도록 피라미드 형태로 제

작하였다.

디지털 방사선영상은 아날로그 방사선영상보다 훨씬 광범위한 노출수준(관용도)에서 적절한 영상의 대조도를 생성 할 수 있다. 본 연구에서도 유효한 영상을 획득하기 위해 필요한 최소 선량과 최대 선량이 약 69.3배 차이가 나타나 동적범위가 넓음을 확인할 수 있었다. X선의 과도한 노출은 노이즈를 감소시키지만 환자 선량이 증가한 고화질의 영상이 생성 될 수 있다. 대부분의 영상의학과 판독의는 과도한 X선 노출에 의한 포화가 발생하지 않는 수준에서 높은 선량을 사용하여 획득된 영상에 대해서는 이의를 제기하지 않는다.^[10] 따라서 방사선사들은 노출 조건을 향상시켜 더 좋은 품질의 영상을 획득하려는 경향이 발생한다. 때문에 환자의 과도한 방사선 노출에 대한 안전 문제를 인식하지 못하는 주요한 원인이 된다. AAPM의 Task Group 116 (TG-116)에서는 모든 X선이 검출기에 조사된 후 적절한 지수를 EI값으로 제공하여 방사선사들이 상대적인 선량값을 확인할 수 있도록 하였다.^[11]

X선관에서의 X선 조사조건은 주로 관전압과 관전류량으로 조정한다. 이 두 인자는 피사체의 내부 영상을 얻는데 중요한 요인이다. 관전압은 X선의 투과력을 좌우하여 영상의 대조도를 결정하고 관전류량은 영상의 명암을 조절한다. 특히, 관전류량은 선량과 비례적인 관계가 있다. 본 연구결과 관전압은 EI와 높은 R²값으로 로그 함수적 관계가 있었으며 관전류량은 매우 높은 선형적인 관계가 있었다. 또한 영상 검출체의 면적선량과 EI도 R²값이 0.76 이상으로 비교적 높은 상관관계가 있었다. 이러한 선량과 EI값과의 상관관계는 선행연구와도 일치한다.^[12] 따라서 디지털 방사선영상에서 적절한 선량의 노출은 각 제조사에서 제시하는 EI값의 범위 내에 있는지를 확인하는 노력이 필요하다. 만약 과도한 X선의 노출이 있다면 적절한 영상품질의 유지를 예측하기에 용이한 관전류량을 조절하는 것이 유리하며 mAs는 두 배씩 증가시키거나 50%씩 감소시키면서 조절하는 것이 유의미하다고 판단된다. 관전압은 디지털 방사선영상에서 동일한 유효 선량일 때 낮은 관전압 설정은 팬텀 실험뿐만 아니라 임상 연구에서도 신호 대 잡음비(signal to

noise ratio, SNR)를 높이고 영상품질을 크게 향상시키는 것으로 보고되고 있다.^[13] 이러한 결과는 본 연구결과와 유사하였지만 관전압은 EI값에 대하여 로그 함수적으로 증가하기 때문에 관전압의 15% 법칙을 적용하면서 조절할 필요가 있다.

본 연구에서는 EI값이 관전압과 관전류량에 미치는 영향을 알아보고자 했기 때문에 영상검출체의 성능, 그리드 사용과 필터 사용 등의 다양한 기술적 요소를 배제한 한계점이 있다. 따라서 향후 미 적용된 요인들을 추가하여 방사선 저감화기술을 상세화할 필요가 있으며 본 연구에서 제시한 실험 방법은 EI와 디지털 방사선영상 품질에 대한 정도 관리 기술로 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

V. CONCLUSIONS

본 연구에서는 디지털 영상검출체와 EI의 특성을 고려하여 자체 제작한 원뿔형 피라미드 팬텀으로 관전압과 관전류량이 EI값에 미치는 구체적인 상관관계를 규명했다는 데 큰 의미가 있으며, 적절한 영상품질 유지와 선량감소를 위해서는 예측이 용이한 mAs를 주로 조절하는 것이 유리하다고 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017-2019학년도에 청주대학교 보건의료과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음

References

[1] R. W. Gurney, N. F. Mott, "The Theory of the Photolysis of Silver Bromide and the Photographic Latent Image," Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, Vol. 164, No. 917, pp. 151-167, 1938.

[2] J. Heo, "A New Approach in Sensitometry of X-ray Film to Use Aluminium Step wedge," J. Radiological Science and Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 35-41, 1983.

[3] M. Uffmann, C. Schaefer-Prokop, "Digital radiography: the balance between image quality and required radiation dose," European Journal of Radiology, Vol. 72, No. 2, pp. 202-208, 2009.

[4] J. A. Seibert, D. K. Shelton, E. H. Moore. "Computed radiography x-ray exposure trends," Acad. Radiol, Vol. 3, No. 4, pp. 313-8, 1996.

[5] S. J. Shepard, J. Wang, M. Flynn, et al. "An exposure indicator for digital radiography: AAPM Task Group 116 (executive summary)," Medical Physics, Vol. 36, No. 7, pp. 2898-3812, 2009.

[6] S. Yang, J. B. Han, N. G. Choi, S. G. Lee, "The Review of Exposure Index in Digital Radiography and Image Quality," J. Radiat. Prot. Res., Vol. 38, No. 1, pp. 29-36, 2013.

[7] R. Schaezting, "Management of pediatric radiation dose using Agfa computed radiography," Pediatric Radiology, Vol. 34, No. 3, pp. S207-S214, 2004.

[8] Y. H. Seoung, "Comparison of Hounsfield Units by Changing in Size of Physical Area and Setting Size of Region of Interest by Using the CT Phantom Made with a 3D Printer," J. Radiological Science and Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 421-427, 2015.

[9] H. W. Jeong, J. W. Min, "A Case Study of Application of Exposure Index in Computed Radiography by Using Human Chest Phantom," J. Radiological Science and Technology, Vol. 41, No. 6, pp. 533-538, 2018.

[10] W. Huda, A. M. Sajewicz, K. M. Ogden, D. R. Dance, "Experimental investigation of the dose and image quality characteristics of a digital mammography imaging system," Medical Physics, Vol. 30, No. 3, pp. 442-448, 2003.

[11] M. L. Butler, L. Rainford, J. Last, P. C. Brennan, "Are exposure index values consistent in clinical practice? A multi-manufacturer investigation," Radiation Protection Dosimetry, Vol. 139, No. 1-3, pp. 371-374, 2010.

[12] J. A. Seibert, R. L. Morin, "The standardized exposure index for digital radiography: an opportunity for optimization of radiation dose to the pediatric population," Pediatric Radiology, Vol. 41, No. 5, pp. 573-581, 2011.

[13] G. Ullman, M. Sandborg, D. R. Dance, R. A. Hunt, G. A. Carlsson, "Towards optimization in digital chest radiography using Monte Carlo modeling," Physics in Medicine and Biology, Vol. 51, No. 11, pp. 2729-2743, 2006.

관전압과 관전류량이 노출 지수에 미치는 영향 : 원뿔형 피라미드 팬텀 방사선영상 중심으로

성열훈

청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과

요 약

본 연구에서는 관전압과 관전류량이 디지털 방사선영상에서 적용되고 있는 노출 지수에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 방사선발생장치는 인버터방식의 디지털 X선 발생장치를 사용했으며 영상검출체는 포터블 형태의 무선 디텍터를 그리드 없이 사용하였다. 방사선영상은 3D 프린터를 이용하여 제작한 원뿔형 피라미드 팬텀을 이용하여 획득하였다. X선의 관전압 조사조건은 40 kVp부터 120 kVp까지 10 kVp 씩 증가시켰고 각 관전압에서 관전류량은 1 mAs에서부터 128 mAs까지 배수적으로 증가시켰다. 그 결과 관전압이 EI와 높은 R²값으로 로그 함수적 관계가 있었으며 관전류량이 매우 높은 선형적인 관계가 있었다. 또한 영상 검출체의 면적선량과 EI도 R²값이 0.76 이상으로 높은 상관관계가 있었다. 결론적으로 관전류량이 EI에 선형적으로 영향을 주었으며, 적절한 영상품질 유지를 위해서는 예측이 용이한 관전류량을 주로 조절하는 것이 유리하다고 판단된다.

중심단어: 원뿔형 피라미드 팬텀, 디지털 방사선영상, 관전압, 관전류량, 노출 지수

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	성열훈	청주대학교 보건의료과학대학 방사선학과	교수