

Effect of Image quality and Radiation Dose using Iterative Reconstruction in Adult and Pediatric CT: A Phantom Study

성인과 소아 CT 촬영시 IR 적용에 따른 영상화질 및 선량에 미치는 영향

¹A-ran Ju, ²Jung-Hyun Jo, ³Young-Kyu Oh, ⁴Kyoung-Ki Kim, ⁵Soo-Been Lee, ⁶Pil-Hyun Jeon, ⁷Daehong Kim

¹, First Author Department of Radiological Science, Eulji University

^{2,3,4,5}, Co-Author Department of Radiological Science, Eulji University

⁶, Co-Author Department of Radiology, Wonju Severance Christian Hospital

^{*7}, Corresponding Author Department of Radiological Science, Eulji University, E-mail: goldcollar011@eulji.ac.kr

Received: May 23, 2018., Revised: June 01, 2018., Accepted: June 17, 2018.

Abstract

The main issue of CT is radiation dose reduction to patient. The purpose of this study was to estimate the image quality and dose by iterative reconstruction (IR) for adults and pediatrics. Adult and pediatric images of phantom were obtained with 120 and 140 kV, respectively, in accordance with radiation dose in terms of volume CT dose index (CTDI_{vol}): 10, 15, 20, 25, 30, 35 mGy. Then, the adult and the pediatric images are reconstructed by filtered-backprojection (FBP) and iterative reconstruction (IR). The images were analyzed by signal-to-noise ratio (SNR). SNR is improved when IR and 140 kV are applied to acquire adult and pediatric images. In the adult abdomen, according to diagnostic reference level, the SNR values of bone were increased about 27.84 % and 27.77 % at 120 kV and 140 kV, and the tissue's SNR values of the IR were increased about 29.84 % and 33.46 % 120 and 140 kV, respectively. Dose is reduced to 40% in adults abdomen images when using IR reconstruction. In pediatric images, the bone's SNR were also increased about 17.70% and 18.17 % at 120 kV and 140 kV. The tissue's SNR were increased about 26.73 % and 26.15 % at 120 kV and 140 kV. Radiation dose is reduced from 30% to 50% for bone and tissue images. In the case of examinations for adult and pediatric CT, IR technique reduces radiation dose to patient, and it could be applied to adult and pediatric imaging.

Keywords: IR, FBP, CTDI_{vol}, SNR

1. 서론

전산화단층촬영장치 (Computed Tomography, CT)는 인체의 해부학적 구조를 3 차원으로 표현할 수 있으며, 정확하고 빠른 진단이 가능하기 때문에 영상의학에서 매우 중요한 진단도구가 되었다. CT는 진단영상 중에서 민감도와 특이도가 매우 높기 때문에 환자 선량이 증가할 수 있음에도 불구하고 임상에서 질병진단시 CT 검사는 증가하는 추세다 (2007). CT가 전체 방사선검사에서 차지하는 비율은 약 2.8% 정도이며, 상대적으로 의료피폭에서 차지하는 비중이 약 72%로 가장 많은 피폭의 원인을 차지하고 있다 (2003). 그러나 대부분의 병원에서는 CT 검사로 인해 환자가 받는 방사선피폭은 화질 향상이라는 측면에

가려져 중요한 문제로 인식되고 있지 않다 (2004). 특히, 소아는 성인에 비해 방사선 감수성이 높고 기대수명이 길기 때문에 방사선량 증가에 따른 잠재적 위험성이 매우 크다. 따라서, 소아 CT 검사에서 선량을 줄이기 위한 다양한 노력들이 강조되고 있다 (2004).

소아 촬영 시 선량 감소 방법으로는 관전류변동제어 (Tube Current Modulation, TCM)를 적용하여 CT 프로토콜의 변동에 따른 선량감소 등이 연구되었고, 영상재구성 알고리즘 (Reconstruction Algorithm)을 이용한 선량감소 방법들이 제안되었다 (2014, 2002, 2006). 영상재구성 알고리즘은 영상 잡음과 관련이 있으므로 가능한 경우 영상잡음이 낮은 재구성 알고리즘을 사용하는 것이 저선량에서 영상화질을 좋게 유지하는 방법이다 (2005, 2004). 영상재구성 알고리즘에는 검출기에 투영된 엑스선을 역으로 투영하여 재구성하는 필터역투영재구성방법 (Filtered Back-projection, FBP)과 투영된 측정값을 여러 방향에서 반복적으로 보정하여 재구성하는 반복적재구성방법 (Iterative Reconstruction, IR)이 있다.

IR 방법은 FBP 방법보다 같은 방사선량을 이용하여 우월한 화질의 영상을 재구성하거나, 또는 적은 방사선량으로 동등한 화질의 영상을 재구성하며 통계원리에 따라 측정된 데이터로 이어진 소멸이벤트의 가능성 있는 분포추정치를 계산하며, 종종 FBP 기법에서 흔히 발생하는 노이즈 프로파일 및 스트릭 아티팩트에 대한 저항성을 제공하며 특정 방향에서 투영이 희박하거나 누락되어 있을 때 우수한 것으로 간주된다. 그러나 그 방대한 계산량에 의한 긴 소요시간으로 인하여 범용적 활용에 제한이 있었으나 최근 컴퓨터 기술의 비약적인 발달로 인하여 계산시간이 많이 단축되어 현재 CT 분야에서 실질적으로 큰 공헌을 하고 있다 (1984, 1985, 2009, 2009).

일반적으로 CT는 120 kV의 관전압을 사용하여 영상을 획득하는데, 140 kV의 관전압에 대한 영향을 분석한 연구는 보고되지 않았다. 이에 본 연구에서는 성인과 소아 팬텀을 이용하여 140 kV 관전압을 사용했을 때, IR 영상의 화질과 선량에 대한 영향을 연구하고자 하며, 그 결과를 120 kV의 관전압으로 획득한 영상 및 선량과 비교하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 전산화단층촬영장치 및 팬텀

CT 영상은 64 채널의 CT 장치 (Brilliance 64, Philips, Netherland)를 이용하여 획득하였다. 이 CT 장치의 관전압은 80, 120, 140 kV를 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 120과 140 kV의 관전압을 사용하였다. 영상 획득용 팬텀 (Phantom kit, Philips, Netherland)를 사용하였다. 팬텀의 지름은 소아와 성인의 복부둘레를 기준으로 각각 16, 32 cm를 기준으로 설정하였다.

2.1.2. 영상재구성 알고리즘

CT 영상은 FBP 와 IR 방법을 이용하여 재구성되었다. CT 영상 재구성을 위해 현재 널리 사용되고 있는 FBP 알고리즘은 IR 방법과 비교하기 위해 사용되었다. FBP 알고리즘은 투영 과정과 역투영 과정을 거쳐서 재구성 영상을 만들 수 있고, FBP 의 투영상에 대한 알고리즘은 다음 식과 같다 (2005).

$$\rho(\theta, \zeta) = \int dx dy f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \zeta) \quad (1)$$

식 1 에서 $\rho(\theta, \zeta)$ 는 각 좌표 ζ 에서 각도 θ 일 때의 투영상을 의미하며, 이를 역투영하는 방법은 다음 식과 같다.

$$f(x, y) = \int_0^\pi d\theta \rho(\theta, \zeta) * k(\zeta) \Big|_{\zeta=x \cos \theta + y \sin \theta} \quad (2)$$

$\rho(\theta, \zeta) * k(\zeta)$ 는 각 좌표 ζ 에서 투영상 값과의 필터 과정이며, 이때 $\rho(\theta, \zeta)$ 는 투영상이고 $k(\zeta)$ 는 필터이다. $\int_0^\pi d\theta$ 는 필터된 데이터인 $\rho(\theta, \zeta) * k(\zeta)$ 의 값들을 각도 θ 에서 적분한 값이다. 최종적으로 식 1 의 투영 및 식 2 의 필터 역투영 과정을 통하여 단층영상인 $f(x, y)$ 를 획득할 수 있다.

IR 방법은 수학적 통계모델에 기반을 두고 각 픽셀의 측정 수치가 새롭게 계산된 픽셀로 변형되고 이상적인 값으로 수렴할 때 반복적 계산을 멈추게 된다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다 (2002).

$$a_i^{k+1} = \frac{a_i^k}{\sum_j M_{i,j}} \times \sum_j M_{i,j} \frac{p_j}{\sum_i M_{i,j} a_i^k} \quad (3)$$

a_i^k 는 현재 추정된 영상이며, p_j 는 투영상이고, $M_{i,j}$ 는 영상 공간 위치 i 에서 방출된 광자의 확률이다. IR 방식의 장점은 노이즈나 아티팩트를 미리 정의된 모델에 특정 검사 대상에 활용하기 때문에 FBP 방식 보다 비슷한 선량일 때 우월한 화질의 영상을 획득할 수 있다. 그러나 영상재구성 시 긴 소요시간이 걸리는 단점이 존재했지만, 최근 컴퓨터 성능의 진보로 인하여 계산 시간이 많이 단축되었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 선량기준

표 1 에 보는 바와 같이 성인과 소아의 복부에서의 CT 선량 진단참조수준 (Diagnostic Reference Level, DRL)인 Volume CT Dose Index (CTDI_{vol})을 기준으로 관전압, 관전류의 변화 및 영상재구성 방법에 따른 영상화질의 경향을 평가하였다 (2002). 진단참조수준에 따르면 성인은 복부 지름 32 cm를 기준으로 선량준위는 25 mGy 며, 소아는 복부 지름 16 cm를 기준으로 선량 준위는 20 mGy 다.

Table 1. Diagnostic reference levels (DRL) and achievable doses for adult and pediatric CT as CTDI_{vol}.

Region	Phantom Diameter (cm)	DRL (mGy)
Adult Abdomen-pelvis	32	25
Pediatric 5 Years old abdomen-pelvis	16	20

2.2.2. 촬영조건

성인의 복부는 32 cm 지름을 가진 팬텀을 촬영하였고, 소아의 복부는 16 cm 지름을 가진 팬텀을 촬영하였다. 이때 슬라이스 두께는 5 mm이고, 영상재구성 방법은 FBP 와 IR 을 적용하였으며 관전압은 120 과 140 kV 로 촬영하였다. 각 관전압에 대한 방사선량은 CTDI_{vol}을 기준으로 10, 15, 20, 25, 30, 35 mGy 로 선량을 증가시키면서 촬영하였고, 표 1 에 기술되어 있는 진단참고수준을 기준으로 비교 및 평가하였다. 촬영 조건은 표 2 에 기술되어 있다.

Table 2. Experiment parameter for tube voltages, dose as CTDI_{vol}, slice thickness, and reconstruction methods.

	Adult abdomen	Pediatric abdomen
kV		120 & 140 kV
CTDI _{vol}		10, 15, 20, 25, 30, 35 mGy
Slice Thickness		5 mm
Reconstruction		FBP & IR

2.2.3. 영상분석 및 평가

성인과 소아의 복부를 기준으로 관전압, 선량, 영상재구성 방법에 따라 획득된 영상의 화질은 신호대잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR)로 평가하였다. SNR 식은 아래와 같다.

$$SNR = \frac{|S_m - B_m|}{S_{SD}} \quad (4)$$

여기서 S_m 신호의 관심영역 (Region of Interest, ROI)의 평균값이며, B_m 은 백그라운드의 ROI 의 평균값이다. S_{SD} 는 신호의 ROI 의 표준편차(Standard Deviation, SD) 값을 나타내고 있다.

성인과 소아의 복부 둘레를 모사한 팬텀에서 SNR 을 획득할 때 관심영역 (Region of Interest, ROI)은 그림 1(A)와 (B)에 표기되어 있다. 그림 1(A)와 (B)에서 신호 물질은 뼈와 조직으로 설정하였고, 백그라운드 물질은 물로 설정하였다. 그림 1(A)는 지름 32 cm의 둘레를 가진 성인의 복부 팬텀이며, 1 번과 2 번은 각각 뼈와 조직이고 3 번은 백그라운드이다. 그림 1(B)는 지름 16 cm의 소아의 복부 팬텀이고, 뼈와 조직은 각각 4, 6 번이며 5 번은 백그라운드이다. 따라서, SNR 평가 시 성인과 소아에서 뼈와 조직의 SNR 값이 각각 산출되었다.

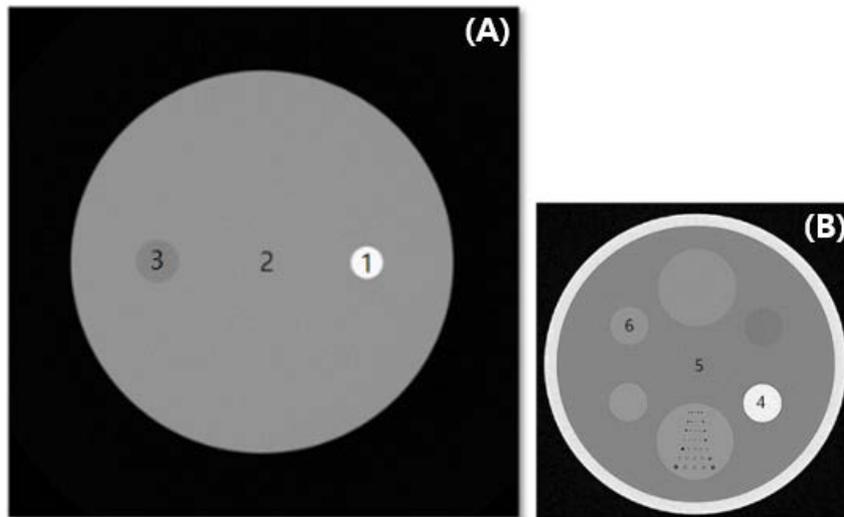


Figure 1. (A) is adult abdomen and (B) is pediatric abdomen image. image. ROI 1 is bone, ROI 2 is tissue and ROI 3 is background.

3. 결과

3.1. 성인영상에서 화질과 선량

그림 2 는 성인 복부 팬텀에서 관전압과 영상재구성 방법에 의해 선량의 변화에 따른 SNR 의 추세를 보여주고 있다. 그림 2(A)는 뼈에 대한 SNR 의 변화를 나타내고 있는데 120 kV 와 140 kV 모두에서 IR 기법의 화질이 FBP 기법에 비해서 모든 선량에 대해서 증가하는 추세이다. DRL 인 25 mGy 의 선량을 기준으로 했을 때, 120 kV 과 140 kV 영상에서 IR 의 SNR 은 FBP 의 SNR 보다 각각 27.84 %, 27.77 % 증가하였다. 또한, FBP 와 IR 영상에서 140 kV 로 촬영한 영상의 SNR 은 120 kV 로 촬영한 영상의 SNR 에 비해 각각 4.86 %, 4.80 % 증가하였다. 120 kV 촬영 시 DRL 기준으로 FBP 의 SNR 와 비슷한 화질을 갖는 IR 의 SNR 일 때 선량은 25 mGy 에서 15 mGy 로 40% 감소하였고, 140 kV 영상에서도 마찬가지로 선량은 25 mGy 에서 15 mGy 로 40% 선량 감소효과를 보였다.

그림 2(B)는 조직에 대한 SNR 의 변화를 나타내고 있으며, 120 kV 와 140 kV 의 영상 모두에서 같은 선량지점의 IR 의 SNR 이 FBP 의 SNR 보다 증가했으며, 선량이 증가할수록 SNR 값도 증가하는 추세를 보여주고 있다. 25 mGy 의 DRL 선량을 기준으로 설정했을 때, 120 kV 와 140 kV 의 영상에서 IR 영상의 SNR 이 FBP 영상에 비해 29.84 %, 33.46 % 증가함을 보였다. FBP 와 IR 영상에서 140 kV 로 촬영한 영상은 120 kV 로 촬영한 영상과 비교하여 SNR 값이 각각 7.86 %, 10.87 % 증가하였다. DRL 기준 선량일 때 120 kV 로 촬영하여 FBP 로 획득한 영상과 비슷한 SNR 을 갖는 IR 의 SNR 일 때 선량은 25 mGy 에서 15 mGy 로 선량이 40% 감소하였으며, 140 kV 영상에서도 선량이 25 mGy 에서 15 mGy 로 40% 선량 감소 효과를 보였다.

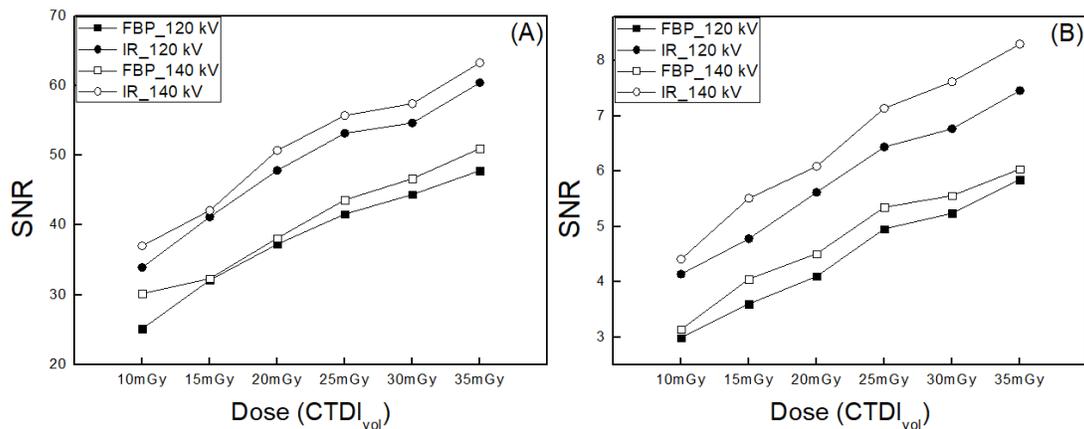


Figure 2. SNR values in accordance with CTDI_{vol} for (A) adult abdomen bone and (B) tissue.

3.2. 소아영상에서 화질과 선량

그림 3 은 소아 복부 팬텀에서 선량의 변화에 따른 SNR 의 추세를 보여주고 있으며 관전압과 영상재구성 기법에 따른 효과를 보여주고 있다. 그림 3(A)는 뼈에 대한 SNR 의 변화를 나타내고 있으며 동일한 관전압과 같은 선량에서 IR 기법의 SNR 이 FBP 기법의 SNR 에 비해서 높은 값을 보였다. 소아의 DRL 인 20 mGy 의 선량을 기준으로 했을 때, 120 kV 과 140 kV 영상에서 IR 의 SNR 은 FBP 의 SNR 보다 각각 17.70 %, 18.17 % 증가하였다. 또한, FBP 와 IR 영상에서 140 kV 로 촬영한 영상의 SNR 은 120 kV 로 촬영한 영상의 SNR 에 비해 각각 15.91 %, 16.38 % 증가하였다. 120 kV 촬영 시 DRL 기준으로 FBP 의 SNR 와 비슷한 화질을 갖는

IR의 SNR 일 때 선량은 20 mGy 에서 약 12 mGy 로 약 40% 감소하였고, 140 kV 영상에서도 선량은 20 mGy 에서 14 mGy 로 약 30% 선량 감소효과를 보였다.

그림 3(B)는 조직에 대한 SNR의 변화를 나타내고 있으며, 동일 선량과 같은 선량 지점에서 IR의 SNR이 FBP의 SNR보다 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 선량이 증가할수록 SNR 값도 증가하는 추세를 보여주고 있다. 소아 팬텀의 DRL인 20 mGy 선량을 기준으로 설정했을 때, 120 kV와 140 kV의 영상에서 IR 영상의 SNR이 FBP 영상의 SNR과 비교했을 때 26.73%, 26.15% 증가함을 보였다. FBP와 IR 영상에서 140 kV로 촬영한 영상은 120 kV로 촬영한 영상과 비교하여 SNR 값이 각각 7.31%, 6.82% 증가하였다. DRL 선량일 때 120 kV로 촬영하여 FBP로 획득한 영상과 비슷한 SNR을 갖는 IR의 SNR에서 선량은 20 mGy에서 10 mGy로 선량이 50% 감소하였으며, 140 kV 영상에서도 선량이 20 mGy에서 10 mGy로 50% 선량 감소효과를 보였다.

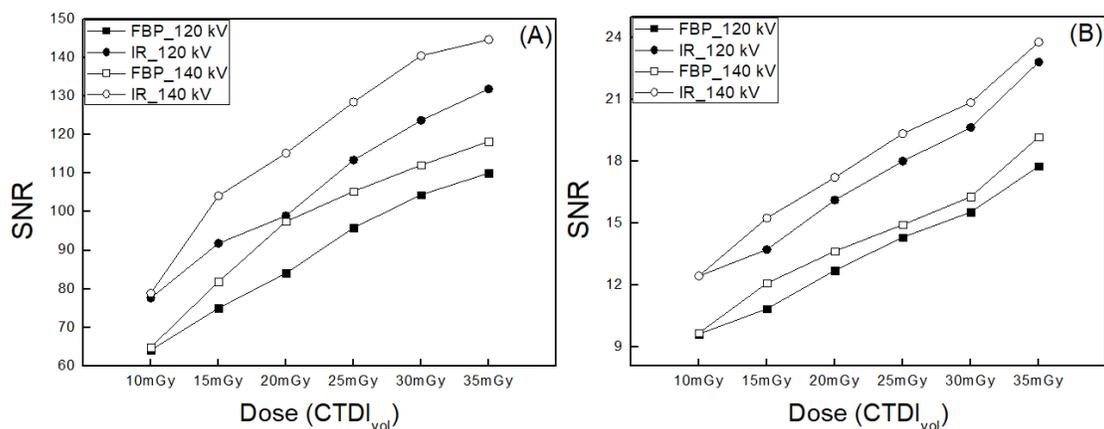


Figure 3. SNR values in accordance with CTDI_{vol} for (A) pediatric abdomen bone and (B) tissue.

4. 고찰 및 결론

사람의 평균수명이 늘어나고 있고 건강에 대한 사람들의 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 CT를 이용한 검사가 증가하였고, 환자가 받는 피폭선량 또한 큰 폭으로 증가하였다. 또한 소아 CT 검사가 증가하고 있는데 소아는 성인에 비해 방사선에 대한 감수성이 매우 높기 때문에 CT 검사에 주의가 필요하다. 이에 본 연구에서는 참고문헌에서 권고하고 있는 DRL을 기준으로 하여 IR 기법의 선량과 화질에 대한 영향을 확인하였고, 이 결과를 FBP의 결과와 비교하였다.

그림 2와 3의 연구 결과에 따르면 성인과 소아 팬텀 CT 검사 시 동일한 실험조건에서 IR 기법을 적용했을 때 SNR 값이 FBP의 SNR과 비교하여 증가하는 경향을 보였다. IR 방법의 효과가 증명된 부분은 동일 관전압에서 IR과 FBP의 적용부분이고, 성인 팬텀을 이용하여 뼈 영상을 획득했을 때, 기준 DRL에서 120 kV와 140 kV의 영상에서 SNR의 향상이 각각 27.84%와 27.77%였다. 기준 DRL에서 관전압 증가에 따른 SNR 향상의 효과는 있었으나, 영상재구성 방법에 의한 SNR 향상에 비해서 그 효과는 적었다. 성인 팬텀의

조직 영상에서는 기준 DRL 일 때 동일 관전압에서 IR의 적용에 따른 SNR의 향상이 두드러졌으나, 관전압 상승에 의한 SNR 향상의 영향은 IR을 적용했을 때에 비교해서는 적었다. 따라서, 성인의 CT 촬영 시 뼈와 조직의 SNR 증강을 위해서는 관전압의 증가보다는 동일 관전압일 때 IR을 적용하면 SNR 증가효과가 우수한 것으로 확인되었다.

그림 3의 소아 팬텀을 이용한 연구 결과에 따르면, 뼈 영상의 SNR 증강을 위해 동일한 관전압에서 IR과 FBP 영상을 비교하였고, 동일한 영상재구성 방법에서 관전압 변화에 따른 영상의 SNR을 비교하였다. 소아의 뼈 영상에서 관전압 120 kV와 140 kV일 때 IR 적용 시 SNR이 각각 17.70%, 18.17% 증가하였고, IR과 FBP 영상에서 관전압을 140 kV를 사용했을 때 SNR이 각각 15.91%, 16.38% 증가하였다. 소아의 뼈 영상에서 동일 관전압에서 IR 영상과 동일 영상재구성 방법에서의 140 kV 영상의 SNR 향상 효과는 비슷하게 증가하였다. 그러므로, 소아의 뼈 영상의 SNR 증가를 위해서는 동일 선량에서 IR을 적용하거나 관전압을 140 kV로 증가시킨다면 화질 개선 효과가 있을 것으로 생각된다. 하지만, 소아 팬텀의 조직의 경우 동일 관전압에서의 IR 영상의 SNR 향상이 동일 재구성방법에서의 140 kV 관전압 효과보다 SNR 향상 측면에서 더 많은 증가폭을 보이고 있다. 소아 조직 영상의 경우 동일 선량에서 관전압의 증가보다는 IR 방법의 적용이 화질 개선에 더 많은 역할을 할 것으로 기대된다.

선량 감소 효과 측면을 고려하기 위해 성인의 DRL 25 mGy와 소아의 DRL 20 mGy를 기준으로 하고 이때 FBP 영상의 SNR을 획득하여 이것과 비슷한 SNR을 갖는 IR 영상의 선량이 어느 정도인지 확인하였다. 성인 팬텀의 IR 영상에서의 선량 감소효과는 뼈와 조직 영상에서 모두 40%의 선량 감소 효과를 보였다. 소아 팬텀의 IR 영상에서는 최소 30%에서 최대 50% 선량 감소 효과를 보였다. 이는 IR 방법은 DRL 이하의 선량으로도 FBP 방법을 적용했을 때의 기준 DRL에서의 영상과 동일한 화질을 얻을 수 있는 효과가 있다.

성인과 소아의 CT 검사 시 환자 선량을 감소시키기 위하여 IR 방법을 적용했을 때 화질의 효과를 FBP 방법과 비교하였다. 본 연구 결과에 따르면 환자 선량을 줄이기 위한 방법으로 IR 기법을 적용했을 때 선량감소효과가 증대되는 것으로 확인할 수 있었다. 성인의 CT 검사 시 뼈와 조직의 SNR 증가를 위해서는 관전압 증가보다는 IR 기법을 적용하면 화질 향상에 기여할 것으로 생각된다. 소아 CT 검사 시 조직의 화질 향상은 IR 기법을 적용하는 것의 효과가 크지만, 소아의 뼈 검사 시 IR 기법을 사용하거나 관전압을 140 kV로 증가시키면 화질 향상에 기여할 것으로 사료된다.

References

- American College of Radiology (2002). ACR Practice Guideline for Diagnostic Reference Levels in Medical X-ray Imaging. American College of Radiology.
- Brenner, D. J. and Elliston, C. D. (2004). Estimated Radiation Risks Potentially Associated with Full-Body CT Screening. *Radiology*, 232(3), 735-738.
- Bruyant, P. P. (2002). Analytic and iterative reconstruction algorithms in SPECT. *J. Nucl. Med.*, 43(10), 1343-1358.

- Cody, D. D., Moxley, D. M., Krugh, K. T., O'Daniel, J. C., Wagner, L. K., and Eftekhari, F. (2004). Strategies for formulating appropriate MDCT techniques when imaging the chest, abdomen, and pelvis in pediatric patients. *Am. J. Roentgenol.*, 182(4), 849-859.
- Donnelly, L. F., and Frush, D. P. (2003). Pediatric multidetector body CT. *Radiol. Clin. N. Am.*, 41(3), 637-655.
- Goo, H., W. and Suh, D. S. (2006). Tube current reduction in pediatric non-ECG-gated heart CT by combined tube current modulation. *Pediatr. Radiol.*, 36(4), 344-351.
- Greess, H., Nömayr, A., Wolf, H., Baum, U., Lell, M., Böwing, B., Kalender, W., and Bautz, W. A. (2002). Dose reduction in CT examination of children by an attenuation-based on-line modulation of tube current (CARE Dose). *Eur. Radiol.*, 12(6), 1571-1576.
- Hara, A. K., Paden, R. G., Silva, A. C., Kujak, J. L., Lawder H. J., and Pavlicek, W. (2009). Iterative reconstruction technique for reducing body radiation dose at CT: feasibility study. *Am. J. Roentgenol.*, 193(3), 764-771.
- Kalra, M. K., Maher, M. M., Toth, T. L., Hamberg, L. M., Blake, M. A., Shepard, J. A., and Saini, S. (2004). Strategies for CT radiation dose optimization. *Radiology*, 230(3), 619-628.
- Lange, K., and Carson, R. (1984). EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography. *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 8(2), 306-316.
- Lee, J. K., Jang, S. J., and Jang, Y. I. (2014). Medical Radiation Exposure in Children CT and Dose Reduction. *J. Korea. Cont. Assoc.*, 14(1), 356-363.
- Payne, J. T. (2005). CT radiation dose and image quality. *Radiol. Clin. North. Am.*, 43(6), 953-962.
- Vardi, Y., Shepp, L. A., and Kaufman, L. (1985). A Statistical Model for Positron Emission Tomography. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 80(389), 34-37.
- Xu, J., Mahesh, M., and Tsui, B. M. W. (2009). Is iterative Reconstruction Ready for MDCT?. *J. Am. Coll. Radiol.*, 6(4), 274-276.
- You, J., Zeng, G. L., and Liang, Z. (2005). FBP algorithm for Attenuated Fan-Beam Projections. *Invers Probl.*, 21(5), 1179-92.
- Yoo, B. G., Lee, J. S., Jang, K. J., Jeon, S. H., Kim, Y. S., and Kweon, D. C., (2007). Comparison Radiation Dose of Z-Axis Automatic Tube Current Modulation Technique with Fixed Tube Current Multi-Detector Row CT Scanning of Lower Extremity Venography. *J. Radiol, Prot.*, 32(3), 123-133.