

Evaluation of Image Quality in Micro-CT System Using Constrained Total Variation (TV) Minimization

Byung-Du Jo*, Jong-Hwa Choi*, Yun-Hwan Kim*, Kyung-Ho Lee*, Dae-Hong Kim*[†], Hee-Joung Kim*[†]

*Department of Radiological Science, College of Health Science, Yonsei University,

[†]Research Institute of Health Science, Yonsei University, Wonju, Korea

The reduction of radiation dose from x-ray is a main concern in computed tomography (CT) imaging due to the side-effect of the dose on human body. Recently, the various methods for dose reduction have been studied in CT and one of the method is a iterative reconstruction based on total variation (TV) minimization at few-views data. In this paper, we evaluated the image quality between total variation (TV) minimization algorithm and Feldkam-Davis-kress (FDK) algorithm in micro computed tomography (CT). To evaluate the effect of TV minimization algorithm, we produced a cylindrical phantom including contrast media, water, air inserts. We can acquire maximum 400 projection views per rotation of the x-ray tube and detector. 20, 50, 90, 180 projection data were chosen for evaluating the level of image restoration by TV minimization. The phantom and mouse image reconstructed with FDK algorithm at 400 projection data used as a reference image for comparing with TV minimization and FDK algorithm at few-views. Contrast-to-noise ratio (CNR), Universal quality index (UQI) were used as a image evaluation metric. When projection data are not insufficient, our results show that the image quality of reconstructed with TV minimization is similar to reconstructed image with FDK at 400 view. In the cylindrical phantom study, the CNR of TV image was 5.86, FDK image was 5.65 and FDK-reference was 5.98 at 90-views. The CNR of TV image 0.21 higher than FDK image CNR at 90-views. UQI of TV image was 0.99 and FDK image was 0.81 at 90-views. where, the number of projection is 90, the UQI of TV image 0.18 higher than FDK image at 90-views. In the mouse study UQI of TV image was 0.91, FDK was 0.83 at 90-views. the UQI of TV image 0.08 higher than FDK image at 90-views. In cylindrical phantom image and mouse image study, TV minimization algorithm shows the best performance in artifact reduction and preserving edges at few view data. Therefore, TV minimization can potentially be expected to reduce patient dose in clinics.

Key Words: Micro-CT, FDK, Total variation

서 론

의료 방사선 피폭은 의료적인 목적에서 질병의 진단 및 치료과정에서 발생하는 방사선피폭을 말한다. 이는 X-ray를 이용한 진단, 방사선을 이용한 중재적 시술, 방사선 조사를 이용한 치료, 비밀봉 동위원소를 이용한 핵의학적 진단 및 치료 등에서 발생한다. 이 중 X-ray 일반촬영, 유방촬영, Computed Tomography (CT) 등의 X-ray를 이용한 진단

이 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 의료적 피폭은 인위적인 방사선피폭의 95% 이상을 차지하고 있으며 직업적인 피폭에 비해 피폭량이 현저히 많다. 또한, 의료 기술과 컴퓨터의 빠른 발전으로 CT 검사가 환자의 질환의 진단에 중요한 역할을 함으로써 전 세계적으로 검사빈도가 증가하고 있다. CT 검사는 전체 방사선검사에서 차지하는 비율은 낮은 반면, 단순촬영에 의한 방사선피폭과 비교할 때 전체 방사선량에서 차지하는 비율은 상대적으로 높다.¹⁾ 이에 소동물 영상은 점점 임상전의 연구로서 필수적으로 여겨지고 있다. 특히, Micro-computed Tomography (micro-CT)는 높은 공간분해능과 높은 신호대잡음비 때문에 소 동물의 해부학적 영상을 얻는데 널리 사용되고 있다.¹⁻³⁾ 보통 CT 영상재구성에서 널리 사용되는 FDK 알고리즘은 artifact를 최소화 하면서 영상 재구성을 하기 위해서는 적어도 180개 이상의 투영영상데이터가 필요하다.⁴⁾ FDK 알고리즘은 X-ray관을

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(사업명, No. 2012-0004846).

이 논문은 2012년 7월 12일 접수하여 2012년 11월 9일 채택되었음.

책임저자 : 김희중, (220-710) 강원도 원주시 연세대길 1번지

연세대학교 보건과학대학 방사선학과

Tel: 033)760-2983, Fax: 033)760-2562

E-mail: hjk1@yonsei.ac.kr

360° 회전시키면서 최소 180개의 투영영상 데이터 이상을 획득하여 충분한 데이터로 재구성하기 때문에 streak artifact를 제거할 수 있고, 재구성시간이 짧다. 반면, 다른 기기 등과의 비교에서 환자에 대한 선량이 높다는 단점이 있다.⁴⁾ 위에서 거론된 문제를 해결하기 위해서는 촬영속도 자체를 빠르게 하거나 영상재구성을 위한 투영영상 데이터의 수를 줄이는 방법이 있다.⁵⁾ 먼저, 촬영속도를 빠르게 하는 방법은 검출기에서 X-ray를 받아들이는 속도가 줄어들어야만 한다. 하지만, 검출기가 X-ray를 받아들이는 속도가 줄어들게 되면 검출기에 도달하는 X-ray의 양이 줄어들게 되므로 잡음이 증가하게 된다. 다른 방법으로는 직접적으로 촬영시간을 줄일 수 있는 투영영상의 수를 줄이는 것이다. 하지만 선량을 줄이기 위해 투영영상 데이터의 수를 줄이면 streak artifact가 발생하므로 영상의 화질이 저하되게 된다. 만약, 화질 개선을 위해 조사하는 방사선량을 줄이면, 투영영상에 잡음이 증가하게 되므로 재구성 된 영상에서도 잡음이 표현되어 영상의 판독을 어렵게 만든다.⁶⁾ 즉, 적은 수의 투영영상 데이터를 가지고 FDK 알고리즘을 이용하여 재구성한 영상은 원하지 않는 영상 artifact와 noise를 포함하게 된다.

따라서 위의 문제점을 해결하기 위해서는 획득한 투영데이터의 잡음을 필터링하거나 잡음을 제거할 수 있는 재구성 알고리즘을 사용하는 것이 중요하다. 이전에 작성된 논문에서 TV minimization 알고리즘이 CT나 micro-CT에서 우수한 화질의 영상을 얻을 수 있으면서 피폭선량을 줄일 수 있다고 보고된 바 있다.⁷⁾ TV minimization 알고리즘은 적은 수의 투영데이터로 부터 정확한 신호 또는 영상을 복구할 수 있는 인접한 각 픽셀 간의 경사도 차이의 합을 기반으로 한다.⁷⁻¹⁰⁾ TV minimization 알고리즘은 CT나 micro-CT에

서 영상 경사도의 차이를 적절하게 활용할 수 있다. 이러한 이유로, 최근에 반복재구성방식에 기초하는 TV minimization 방법이 각광받고 있다.^{7,11,12)} 이에 본 연구에서는 micro-CT를 사용하여 원통형 팬텀과 mouse 영상을 fully-sampled data보다 적은 수의 투영데이터를 획득 한 뒤, Matlab (2008b) 프로그램을 사용하여 구현한 TV minimization 알고리즘과 기존의 FDK 알고리즘으로 재구성한 영상을 비교 및 평가하였다. 이는 micro-CT 시스템에서 TV minimization 알고리즘의 적용 가능성과 화질이 우수하면서도 피폭선량을 줄일 수 있는 방법을 제시하기 위함이다.

재료 및 방법

1. 장비 및 재료

1) 획득영상장치: 본 연구에서는 micro-CT (DRGem, Harmony80H series, Korea)를 사용하였다. 이 장치의 최대관전압은 80 kVp이고, 검출기는 평판형 형태이다. X-ray tube와 검출기가 일회전 당 최대 400장의 투영데이터를 획득할 수 있다. Fig. 1은 TV minimization 알고리즘 평가를 위해 원통형 팬텀과 mouse의 두 가지 물체에 대하여 실험 영상을 획득한 것을 보여주고 있다. Fig. 1a 원통형 팬텀 영상은 polymethyl methacrylate (PMMA)로 이루어진 실린더 형태에 서로 다른 물질 들이 삽입되어 있다. A는 공기, B는 iodine 1 ml과 distilled water 3 ml의 혼합물, C는 iodine 1 ml과 distilled water 2 ml의 혼합물, D는 iodine 1 ml과 distilled water 1 ml의 혼합물, 그리고 E는 물로 구성되어 있다. 여기서, B, C, D 부분은 contrast-to-noise ratio (CNR) 평가 시 신호 영역으로 사용되었고, 원통형 팬텀을 이루고 있는 PMMA 부분은 background 영역으로 사용되었다. Fig. 1b 영상은 mouse

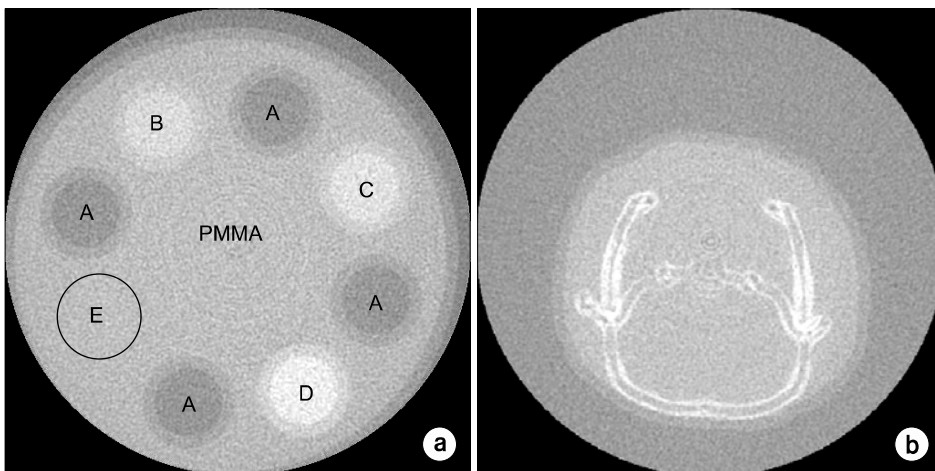


Fig. 1. Reconstructed image as a reference using FDK algorithm at 400 projection view for (a) cylindrical phantom (A: Air, B: Iodine 1 ml+Distilled water 3 ml, C: Iodine 1 ml+Distilled water 2 ml, D: Iodine 1 ml+Distilled water 1 ml, E: water) and (b) experimental mouse image acquired with micro-CT.

의 두부를 micro-CT를 이용하여 촬영한 영상이다. Fig. 1a, b (50 kVp, 900 μ A) 영상은 50 kVp, 900 μ A를 사용, 400장의 투영데이터를 가지고 FDK 알고리즘으로 재구성 되었으며, 영상의 크기는 512 \times 512이다. 적은 투영데이터로 부터 TV minimization 알고리즘과 FDK 알고리즘을 이용하여 얻은 영상과의 비교를 위한 참고영상으로 사용되었다. TV minimization 알고리즘의 효과를 확인하기 위해서 사용된 투영 데이터의 개수는 20, 50, 90, 180개이다.

2. 실험방법 및 측정조건

1) **Total variation minimization:** Total variation minimization 알고리즘은 샘플이 적은 주파수 정보로부터 정확한 재구성을 할 수 있게 Matlab (2008b)을 사용하여 개발하였다. 기본적으로 신호의 total variation은 영상에서 픽셀과 픽셀 사이에서 신호의 변화가 얼마나 있는지를 나타내며, 인접하여 있는 픽셀 간 경사도 차이의 전체 합을 total variation이라 하고, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\|f_{h,w}\|_{TV} = \sum_{h,w} |\nabla f_{h,w}| = \sum_{h,w} \sqrt{(f_{h+1,w} - f_{h,w})^2 + (f_{h,w+1} - f_{h,w})^2} \tag{1}$$

만약, pixel values를 $f_{h,w}$ 라 할 때, 영상의 경사도는 식 (1)의 우변항으로 표현된다. Total variation의 장점을 이용한 iterative algorithm 개발은 영상의 각 pixel 경사도를 최소화한 것이다.³⁾

아래의 Fig. 2a, b는 영상의 total variation의 예를 나타낸 것이다.⁷⁾ Fig. 2a는 Shepp-Logan cylindrical phantom을 나타내고 있고, 이를 식 (1)을 사용하여 각 픽셀 간의 경사도 차이를 표현하면 Fig. 2b와 같이 영상의 경계면에 대한 값이

표현되며, Fig. 2b의 total variation은 1460.6이다.

2) **Imaging model:** 측정된 데이터 g 와 재구성된 영상 f 는 M, N 의 벡터로 설명될 수 있다. $g=(g_1, g_2, \dots, g_M)^T, f=(f_1, f_2, \dots, f_N)^T$, 여기서 M 은 투과된 X-ray의 양을 의미하고, N 은 image voxel들을 의미한다. Cone Beam Computed Tomography (CBCT)에서 영상 모델은 이산적인 linear system으로 가정하였다.

$$g = Hf \tag{2}$$

H 는 $M \times N$ 의 크기를 가진 시스템 매트릭스로 X-ray가 영상 픽셀들을 지나갈 때 얼마나 기여를 하는지를 모델링한 것이다. 이러한 영상 모델을 가지고 주어진 투영데이터의 정보를 식 (2)의 역행렬을 이용하여 구하면 영상재구성이 가능하다. 적은 수로 샘플링 된 데이터에서, 위의 식 (2)을 기반으로 하는 영상 재구성기법은 제약적 최적화 방법으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f^* = \operatorname{argmin} \|f\|_{TV} \quad s.t. \quad D(f) \leq \epsilon \quad \text{and} \quad f_n \geq 0 \tag{3}$$

$\|f\|_{TV}$ 를 TV 영상이라고 말하며, 영상의 경사정도를 표현한다. 최적화된 식은 제약을 만족하는 최소의 TV를 선택하고, $M \ll N$ 의 조건을 만족할 때, 이 방법이 의미를 지니게 된다. 그리고 인자 ϵ 은 영상재구성에서 데이터 불일치로 인한 영향을 조절하기 위해서 사용되었다.³⁾

3) **영상분석:** 영상의 정량적 분석을 위해 contrast-to-noise ratio (CNR)과 universal quality index (UQI)를 각각 Matlab (2008b)을 이용하여 구하였다. CNR은 선택된 신호의 관심 영역과 background의 관심영역 사이의 영상의 대조도와 노

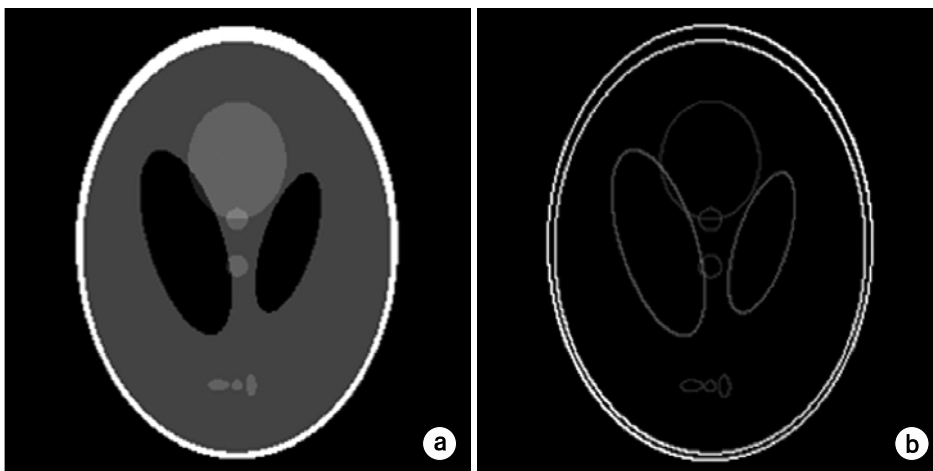


Fig. 2. (a) Shepp-Logan phantom shown in a gray scale level. (b) Magnitude of the image gradient of the Shepp-Logan phantom and total variation is 1460.6 by using equation (1).

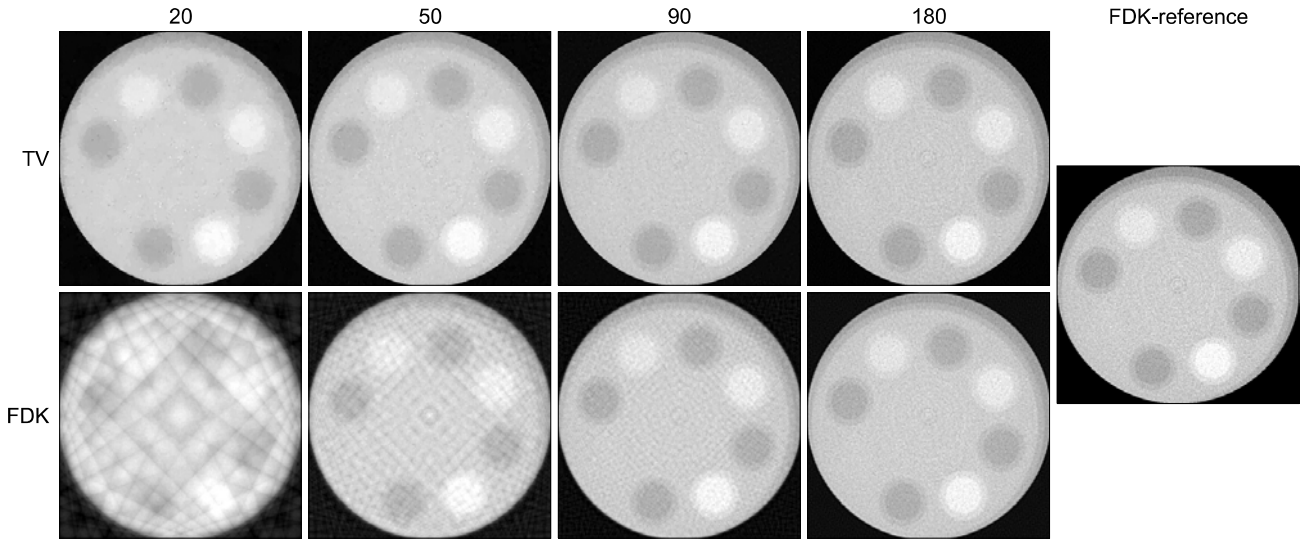


Fig. 3. Comparison between phantom images obtained by using TV minimization and FDK algorithm, respectively, at 20, 50, 90, 180 projection view. Reconstructed image at 400 view was used as a reference image for evaluation of image quality between TV minimization and FDK algorithm at few view.

이즈 특성을 평가하는 개념으로 일반적으로 널리 사용되는 영상 평가 방법이다. 원통형 팬텀 영상에서, 신호와 background에 각각 같은 크기의 관심영역 두 개를 설정하여 CNR 평가를 수행하였다. UQI는 두 영상간의 행과 열이 일치하는 곳의 픽셀 값들의 차이가 얼마나 나는지를 평가하는 방법으로 두 영상간의 일치도를 나타낸다. 원통형 팬텀 영상에서는 CNR과 UQI를 값을 도출하였고, mouse 영상에서는 신호 영역에 충분한 관심영역을 설정할 수 없기 때문에, UQI 값만 계산하였다.

CNR은 아래의 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$CNR = \frac{|A - B|}{\sqrt{A_{SD}^2 + B_{SD}^2}} \quad (4)$$

식 (4)에서 A는 설정된 관심영역 내에서 신호의 평균값이고, B는 background의 평균값, A_{SD} 는 신호의 표준편차, B_{SD} 는 background 표준편차이다.

UQI는 참조영상의 관심영역과 위치가 일치하는 비교영상에서 관심영역의 비교이며, UQI를 도출하기 위한 식 (5), (6)을 다음과 같이 표현하였다.

$$\bar{f}_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_{jn}, \quad \sigma_j^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (f_{jn} - \bar{f}_j)^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 \bar{f}_j 는 관심영역의 픽셀 값들의 평균값이며, σ_j 는 관심영역의 표준편차이다. 두 개의 영상을 비교하는 경우, $j=0, 1$ 이 된다.

$$Cov_{f_1, f_0} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (f_{1n} - \bar{f}_1)(f_{0n} - \bar{f}_0) \quad (6)$$

$Cov\{f_1, f_0\}$ 는 공분산으로 두 변수의 관계를 나타낸다.^{6,13)} N' 은 관심영역 영역에서 voxel들의 수를 의미한다. 식 (5), (6)을 이용하여 UQI를 나타내면 다음과 같이 정의된다.

$$UQI = \frac{2Cov\{f_1, f_0\}}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2} \frac{\bar{f}_1 \bar{f}_0}{\bar{f}_1^2 + \bar{f}_0^2} \quad (7)$$

결 과

본 연구에서는 TV minimization에 기초한 반복적 영상 재구성 알고리즘을 이용하여 적은 수의 투영데이터를 가지고 영상을 재구성하고, 참고영상으로써 FDK 알고리즘으로 재구성한 영상과 비교 및 평가를 수행하였다. 영상은 원통형 팬텀과 mouse 영상을 사용하였다. 적은 선량으로도 유사한 화질의 영상을 찾기 위하여 투영영상 수를 세분화하여 실험하였으며, 정량적인 비교를 위하여 원통형 팬텀 영상에

서 수평방향(Y=434)을 따라 영상 프로파일을 비교하였고, mouse 영상에서는 수평방향(Y=333)을 따라 영상 프로파일을 비교하였다. 마지막으로 정량적 평가를 수치적으로 표현하기 위한 화질평가인자 CNR, UQI를 사용하여 두 영상간의 유사성 및 대조도 대 잡음비를 구하였다.

1. Phantom study

원통형 팬텀 영상의 투영영상 데이터가 180에서 20으로 감소함에 따라 FDK 알고리즘 영상의 경우 FDK-reference의 영상과 비교하였을 때, 90개 투영데이터를 이용한 재구성 영상부터 투영데이터가 20개로 적어짐에 따라 영상정보의 부족으로 인한 streak artifact가 발생하였다. 반면, 투영데이

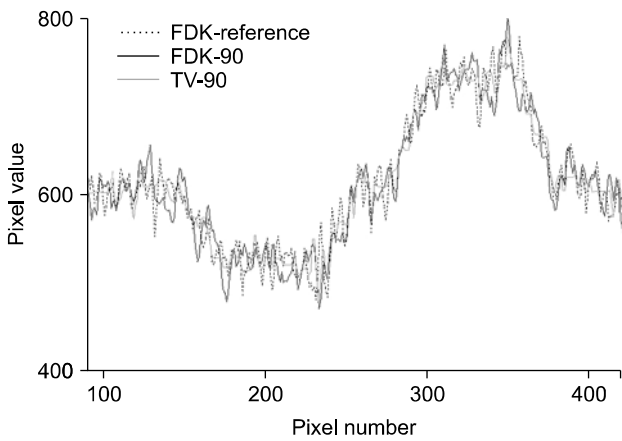
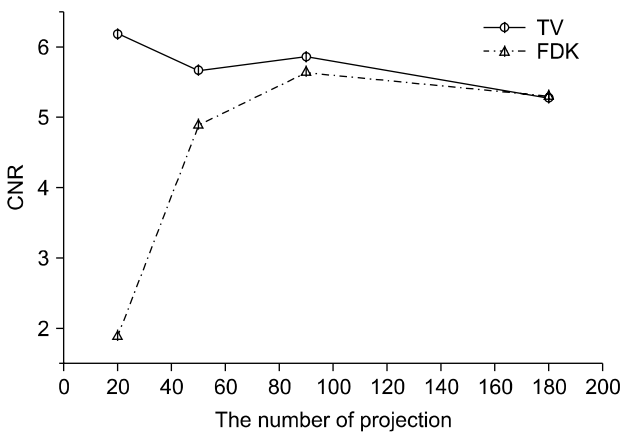


Fig. 4. Image profiles along the line Y=434 of the images in the horizontal directions obtained with the TV algorithm and FDK algorithm. The corresponding FDK-400 profiles are plotted as the thin lines.



터가 90개 이하로 획득한 TV영상들과 FDK-reference 영상을 비교해 보았을 때, streak artifact 발생이 상대적으로 감소하였다. 그리고, TV영상에서 streak artifact 감소로 FDK-reference영상과 유사함을 보이고 있다. 하지만, FDK-reference 보다 영상의 질이 다소 떨어진 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 3으로부터 TV 알고리즘을 사용할 시, 90개 이상의 투영데이터를 가지고 재구성한 영상은 FDK 알고리즘 사용할 때 보다, streak artifact가 줄어드는 것을 보였다. Fig. 4는 90개의 프로젝션데이터에서 FDK 알고리즘과 TV 알고리즘 그리고 FDK-reference 영상의 profile (Y=434)을 보여주고 있다. FDK 알고리즘 영상보다 TV 알고리즘 영상이 FDK-reference 영상의 프로파일과 유사하고, 노이즈가 줄어든 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 TV 알고리즘과 FDK 알고리즘의 CNR, UQI를 보여주고 있다. TV영상의 CNR 측정값이 5.86, FDK영상은 5.65로 두 개의 영상에서 CNR 값이 0.21 차이가 났다. UQI는 두 영상간의 상관정도를 수치적으로 나타내는 것으로 1에 가까울수록 두 영상 사이의 일치함을 뜻하며, TV영상의 UQI 측정값은 0.99, FDK영상은 0.81로 TV영상이 FDK영상에 비하여 원영상과의 일치성이 0.18 높은 결과를 보였다.

2. Mouse study

Fig. 6은 원통형 팬텀 영상의 분석 후 mouse 영상에 대해서도 똑같은 연구를 수행하였다. 결과에서 투영영상 데이터가 180에서 20으로 감소함에 따라 원통형 팬텀 연구결과와 같이 90개 이하의 투영데이터로 재구성한 영상부터 streak artifact가 FDK 알고리즘을 이용하여 재구성한 영상보다 현저히 감소하였다. Mouse 영상에서 streak artifact로

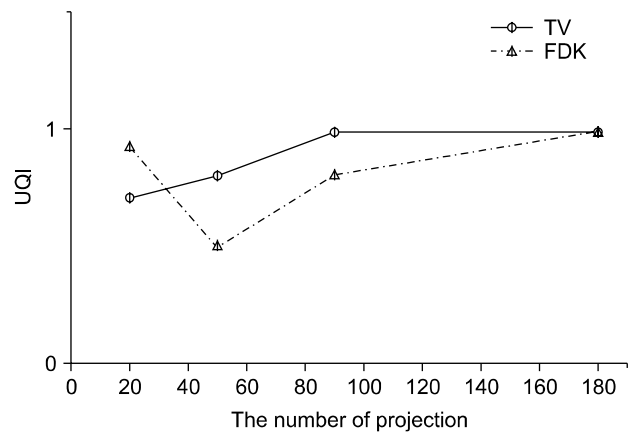


Fig. 5. UQI and CNR as functions of projection views, computed from the phantom images reconstructed using the FDK and TV algorithms. The straight line displays the corresponding CNR and UQI in the FDK-reference image.

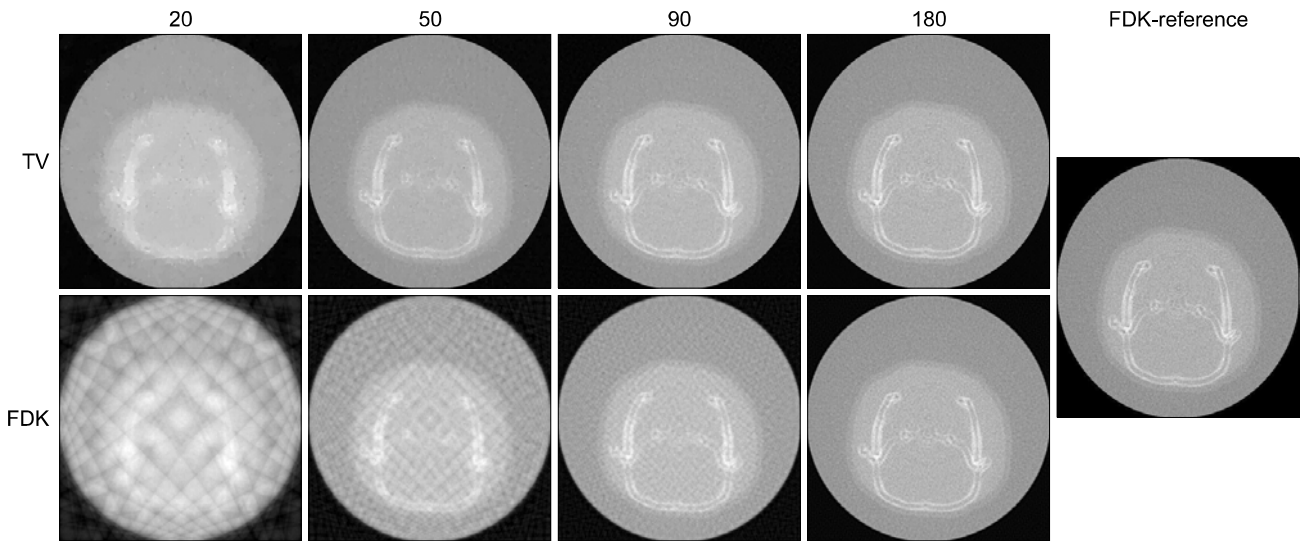


Fig. 6. Comparison between mouse images obtained by using TV minimization and FDK algorithm, respectively, at 20, 50, 90, 180 projection view. Reconstructed image at 400 view was used as a reference image for evaluation of image quality between TV minimization and FDK algorithm at few view.

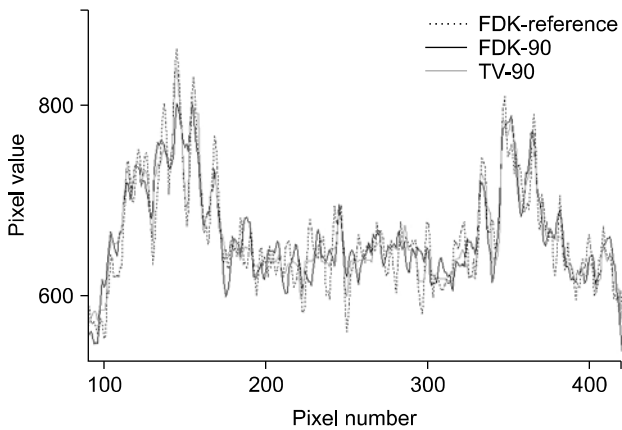


Fig. 7. Image profiles along the line Y=333 of the images in the horizontal directions obtained with the TV algorithm and FDK algorithm. The corresponding FDK-400 profiles are plotted as the thin lines.

인한 잡음으로 edge들이 사라진 것을 볼 수 있다. 특히 20, 50개의 투영영상을 가지고 재구성한 영상에서 blurring이 발생하기 때문에 edge들이 선명하지 않다.

Fig. 7은 90개의 투영데이터에서 FDK 알고리즘과 TV 알고리즘 그리고 FDK-reference 영상의 profile (Y=333)을 보여주고 있다. TV 알고리즘을 사용하여 재구성한 영상의 프로파일은 FDK-reference 영상과 구별하기 힘들 정도로 유사하다. Fig. 8은 TV 알고리즘과 FDK 알고리즘의 UQI를 보여주고 있다. Mouse 영상의 UQI측정값은 TV영상에서 0.91,

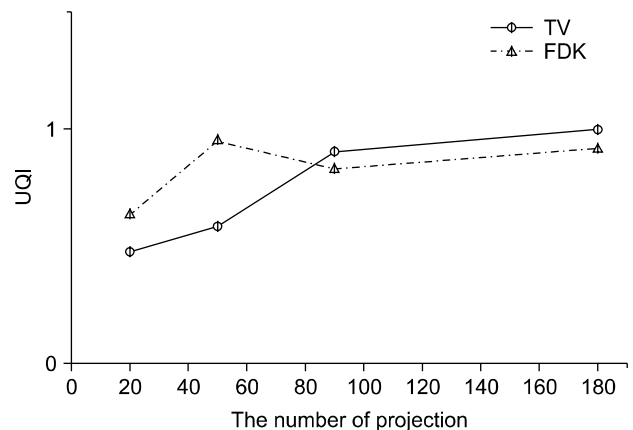


Fig. 8. UQI as functions of projection views, computed from the mouse images reconstructed using the FDK and TV algorithms. The straight line displays the corresponding UQI in the FDK-reference image. In the mouse study UQI of TV was 0.91 and FDK was 0.83.

FDK영상은 0.83으로 FDK-reference 영상과의 일치성이 TV 영상에서 0.08 높게 나왔다. Fig. 8에서 투영데이터가 20에서 60개 사이의 영역에서 UQI가 반전되어 FDK가 더 높게 나타나는 현상이 있다. 이는 TV 알고리즘을 사용하여 영상을 재구성하였을 때, 적은 수의 투영데이터를 재구성하면서 정보의 부족으로 인하여 CT number 값이 줄어들게 되어 FDK의 UQI 값이 오히려 더 높게 나타나는 것이다.

고찰 및 결론

최근 CT촬영에서 선량감소가 이슈화 되고 있다. 이에 본 연구에서는 micro-CT를 이용하여 원통형 팬텀과 mouse 영상을 얻어 total variation을 이용하여 재구성하고, FDK와 비교하여 UQI와 CNR을 통하여 정량적으로 평가 해 보았다. 이를 통하여 화질이 개선됨을 알 수 있었고 투영데이터가 줄어들어서 선량 감소를 기대 할 수 있었다.

FDK 알고리즘과 TV 알고리즘을 이용하여 재구성한 영상은 Fig. 3와 Fig. 6에서 보여주고 있다. FDK의 경우에는 투영데이터를 고역통과 필터를 거친 후에 역투영을 하기 때문에 edge 성분을 비교적 잘 보존하기는 하지만, 그와 함께 streak artifact를 발생시켜 투영수가 적은 경우 edge 보존도에서 취약한 성질을 나타낸다. 반면, TV의 경우에는 적은 투영데이터에서 streak artifact가 발생되지 않았다. 다시 말하면, FDK 알고리즘을 사용하여 재구성한 영상은 streak artifact나 noise가 영상에 확연하게 나타난다. 하지만, TV 알고리즘을 사용하여 재구성한 영상에는 거의 나타나지 않았다. 또한, 90개 투영데이터를 사용하여 재구성한 원통형 팬텀과 mouse 영상을 보면, 원통형 팬텀영상에서 TV의 CNR 측정값은 5.86, FDK는 5.65로 나타났으며, 이 측정값은 FDK-reference 영상의 CNR 측정값이 5.98이라는 점에서 FDK 알고리즘을 사용하여 재구성 하였을 때보다, TV 알고리즘을 이용하여 재구성한 영상이 FDK-reference의 영상의 질과 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한, 원통형 팬텀의 경우 TV의 UQI 측정값은 0.99, FDK는 0.81로 TV영상이 FDK 영상에 비하여 원영상과의 일치성이 0.18 높았다. UQI는 측정값이 1에 가까울수록 FDK-reference 영상과 유사하다는 의미를 가진다. TV의 측정값이 FDK 측정값보다 0.18 높게 나왔다는 점에서 TV 알고리즘을 사용하여 재구성한 영상이 원본영상과 유사하다. 원통형 팬텀 영상의 분석 후 mouse 영상에 대해서도 똑같은 연구를 수행하였다. Micro-CT를 이용하여 획득한 mouse 영상을 TV와 FDK 재구성 하였을 때, TV의 UQI 측정값은 0.91, FDK는 0.83으로 FDK-reference 영상과의 일치성이 TV영상에서 0.08 높게 측정되었다. 원통형 팬텀 영상에서 FDK와 TV의 UQI 차이 값이 0.18로 mouse 영상의 UQI 차이 값 0.08보다 원본영상과의 일치성이 보다 좋게 나타났다. 이는 원통형 팬텀의 경우 그 구조가 단순하여 영상의 희박성(sparcity)이 높기 때문인 것으로 생각된다. 하지만 90개의 투영영상 이하에서는 UQI값과 CNR값이 영상정보의 불충분 때문에 화질평가인자로 사

용하기에는 적절하지 않았다.^{14,15)}

위의 결과에서 보듯이 저선량 CT같이 투영영상의 수가 제한되는 경우에 있어서 재구성 알고리즘은 FDK보다 TV와 같은 반복적 연산 알고리즘이 정확한 영상을 만들어 내는데 효과적인 것으로 판단할 수 있다. 앞의 결과를 통하여 적은 투영데이터 수에서 TV minimization 알고리즘을 사용할 때 영상화질이 개선됨을 알 수 있었고 투영데이터가 줄어들어서 선량 감소를 기대 할 수 있었다. 본 연구에서는 적은 투영데이터를 가지고 TV minimization 알고리즘으로 재구성한 영상을 보여주었다. 비록 180개의 투영영상으로 재구성한 것이 적합하지만, 우리는 90개의 투영영상을 선택하여 비교하였다. 이는 선량 감소가 두 배가 될 것이라고 예상되기 때문이다. 또한, 20, 50개의 투영영상으로 재구성된 영상의 질이 비교적 적절하지 않기 때문이기도 하다.

원통형 팬텀과 같이 비교적 단순하고 얻어야 하는 감쇠 계수가 적은 영상에 대해서는 TV 알고리즘이 우수한 성능을 보이는 것으로 보고되고 있다. 즉, 기존의 micro-CT의 투영 데이터의 사분의 일이 되는 투영데이터를 사용하여 영상을 재구성하여 비교평가 한 결과 투영영상 데이터의 수가 제한되는 경우에 FDK 알고리즘보다 TV minimization 알고리즘이 X-ray 조사시간을 줄임으로서 피폭선량을 줄이는데 효과적이다. 특히, 조사시간의 단축은 물체의 움직임으로 인한 영상 화질의 저하를 감소시킬 수 있을 것이다. 본 연구에서는 더 나아가 micro-CT를 사용해 인체 내부와 비슷한 mouse의 영상을 사용해 실제 CT에서의 상황을 가정해 알고리즘의 효용성을 검증해 보았다. 하지만 반복적 영상재구성방법은 FDK에 비해 연산 시간이 수백배 이상이 소요되기 때문에 TV 알고리즘의 실제 활용을 위해서는 알고리즘의 고속화가 선행되어야 할 것이다. 앞으로 다양한 물체에 대하여 화질이 변화하지 않고 재구성 시간을 단축할 수 있는 알고리즘 연구가 더 필요 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Ford NL, Thornton MM, Holdsworth DW: Fundamental image quality limits for microcomputed tomography in small animals. *Med Phys* 30(11):2869-2877 (2003)
2. Lee SC, Kim HK, Chun IK, et al: A flat-panel detector based micro-CT system: performance evaluation for small-animal imaging. *Phys Med Biol* 48(24):4173-4185 (2003)
3. Cho S, Bian J, Pelizzari CA, et al: Region-of-interest image reconstruction in circular cone-beam microCT. *Med Phys* 34(12):4923-33 (2007)

4. **Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW**: Practical cone-beam algorithm. *J Opt Soc Am A* 1(6):612-619 (1984)
5. **김혜선**: 저선량 CT 영상 재구성 알고리즘의 구현 및 이의 정량적 평가. *경희대학교* (2012)
6. **한동균, 박건진, 고신관**: 재구성 알고리즘 변화에 따른 CT 영상의 화질 평가. *KJDIM* 12(2):127-132 (2010)
7. **Sidky EY, Kao CM, Pan X**: Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT. *J Xray Sci Technol* 14:119-139 (2006)
8. **Candès E, Romberg J, Tao T**: Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans. Inform Theory* 52:489-509 (2006)
9. **Sidky EY, Pan EY**: Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization. *Phys Med Biol* 53:4777-4807 (2008)
10. **Choi K, Wang J, Zhu L, et al**: Compressed sensing based cone-beam computed tomography reconstruction with a first-order method. *Med Phys* 37(9):5113-5125 (2010)
11. **Bian J, Siewerdsen JH, Han X, et al**: Evaluation of sparse-view reconstruction from flat-panel-detector cone-beam CT. *Phys Med Biol* 55:6575-6599 (2010)
12. **Ng M, Wang F, Yuan XM**: Fast minimization methods for solving constrained total-variation superresolution image reconstruction. *Multidim Syst Sign Process* 22:259-286 (2011)
13. **Min J, Cho G, Cho S**: Sparse-view image reconstruction in prospectively gated micro-CT for fast and low-dose imaging. *J Korean Phys Soc* 60(7):1157-1160 (2012)
14. **Velikina J, Leng S, Chen GH**: Limited view angle tomographic image reconstruction via total variation minimization. *ISSN* 8(2):651020.1-651020.12 (2007)
15. **이흥노, 박상준, 박순철**: 압축센싱 소개. *전자공학회지* 38(1): 19-30 (2011)
16. **Li MH, Yang HQ, Kudo H**: An accurate iterative reconstruction algorithm for sparse objects application to 3D bloodvessel reconstruction from a limited number of projections. *Phys Med Biol* 47:2599-2609 (2002)

Micro-CT 시스템에서 제한된 조건의 Total Variation (TV) Minimization을 이용한 영상화질 평가

*연세대학교 보건과학대학 방사선학과, †연세대학교 보건과학연구소

조병두* · 최종화* · 김윤환* · 이경호* · 김대홍*[†] · 김희중*[†]

최근 Computed tomography (CT) 조사선량의 인체에 대한 부정적 영향이 부각됨에 따라 선량을 줄이는 연구가 활발히 진행되고 있고, 이로 인하여 소 동물에 관한 연구는 점점 임상전의 연구로서 필수적으로 여겨지고 있다. 최근에는 피폭 선량을 줄일 수 있는 방법으로서 이론적으로 투영 데이터가 충분하지 않을 때 정확하게 영상을 재구성 하는 것이 가능한 Total Variation (TV) minimization 알고리즘이 각광받고 있다. 이에 본 연구에서는 micro-CT (DRGem, Harmony80H series, Korea) 시스템에서 획득한 적은 수의 투영 데이터를 가지고 TV minimization에 기초한 반복적 영상 재구성 알고리즘과 기존의 Feldkamp-Davis-Kress (FDK) 알고리즘을 사용하여 영상을 재구성하고 두 알고리즘의 영상 화질을 비교 및 평가하였다. TV minimization 알고리즘의 효과를 평가하기 위해서, 먼저 서로 다른 농도의 조영제, 물, 공기가 들어있는 원통형 팬텀을 제작하였고, micro-CT를 사용하여 영상을 획득하였다. Tube와 검출기 일회전 당 최대 400개의 투영 데이터를 획득할 수 있으며, TV minimization 알고리즘의 영상 복원의 정도를 평가하기 위해서 20, 50, 90, 180장의 적은 투영 데이터를 추출하였다. 영상 비교평가를 위한 참고 영상(FDK-reference 영상)은 마찬가지로 400개의 투영데이터를 이용하여 FDK 알고리즘으로 재구성하였고, 20, 50, 90, 180장의 투영데이터를 가지고 TV minimization 알고리즘, FDK 알고리즘을 이용하여 재구성한 영상과 FDK-reference 영상의 프로파일, Contrast-to-noise ratio (CNR), Universal quality index (UQI)를 각각 비교평가 하였다. 또한, 소 동물에 관한 연구를 위하여 mouse 영상에 관하여 프로파일과 UQI를 분석하여 비교평가 하였다. 결과적으로 90개의 투영데이터를 사용하여 재구성한 원통형 팬텀 영상을 분석하였을 때, TV minimization 영상(TV-90) 및 FDK 영상(FDK-90)의 CNR과 UQI를 비교하였을 때 FDK-90보다 TV-90에서 CNR이 0.21, UQI가 0.18 증가하였다. 원통형 팬텀 영상과 같은 조건에서 mouse 영상을 사용하였을 때, UQI는 FDK-90보다 TV-90에서 0.08 증가하였다. 결론적으로 본 연구결과는 기존의 micro-CT의 투영 데이터의 사분의 일이 되는 투영데이터를 사용하여 영상을 재구성하여 비교평가 한 결과 투영영상 데이터의 수가 제한되는 경우에 FDK 알고리즘보다 TV minimization 알고리즘이 X-ray 조사시간을 줄임으로서 피폭선량을 줄이는데 효과적으로 기여할 것으로 기대된다. 특히, 조사시간의 단축은 물체의 움직임으로 인한 영상 화질의 저하를 감소시키는데 기여할 것으로 사려된다.

중심단어: Micro-CT, FDK, Total variation