JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 377-384 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.377

고정형(Stationary-gantry) 희소뷰(Sparse-view) CT 보안검색시스템의 공간분해능 평가

김영조[1], 최광윤[1,*], 정춘호[1], 박형규[1]

[1](주) 에스에스티랩

The Evaluation of Spatial Resolution of Stationary-gantry Sparse-view CT Security-screening System

YoungJo Kim[1], KwangYoon Choi[1,*], Chunhe Zheng[1] and HyeongKyu Park[1]

[1]SSTLabs Co., Ltd., 504-2, 9-22, Pangyo-ro 255beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13486, Republic of Korea

Abstract In this study, the image quality assessment, especially spatial resolution evaluation, for Sparse-view CT reconstructed images was performed. The main goal of the experiment is to evaluate Modulation Transfer Function by using American Standard Method for Measurement of Computed Tomography System Performance (ASTM E1695-95) which uses the edge test object. To compare with the ASTM method, a different method, the radial-type edge profile, to measure MTF using the edge method also performed. Both approaches were tested on the same image acquired by the stationary-gantry sparse-view CT security-screening system using cylindrical test phantom manufactured in accordance with ANSI 42.45. Both of the spatial resolutions at 10% modulation are 0.195, 0.203 lp pixel^{-1}, respectively. The method implemented by ASTM E1695-95 showed higher reliability and had a relatively more accurate spatial resolution result than the radial-type edge profile method.

Key words: 3D Security-Screening System, Sparse-view CT, ASTM E1695-95, MTF (Modulation Transfer Function), Spatial resolution

1. 서 론

CT (Computed Tomography, 전산화단층촬영)는 X-선 영상기술을 이용한 3D 영상복원 방식의 단층촬영기술을 의미한다. 기술의 발달에 따라 의료, 산업, 보안 분야 등 그 활용 영역 또한 확대되고 있다.

디지털 X-선 영상의 이미지 품질을 평가하는 기본적인 인자로는 공간분해능(Spatial resolution), 대조도(Contrast), 잡음(Noise) 등의 요소가 있으며, 공간분해능을 평가하는 객관적 지표로서 변조전달함수(Modulation Transfer Function: MTF)의 계산을 통한 측정 방법이 있다[1].

변조전달함수(MTF)를 측정하는 방법에는 해상력 Chart를 이용하는 방법, edge 테스트팬텀을 이용하는 방법, 슬릿 카메라를 이용하는 방법, 핀홀을 이용하는 방법 등이 사용되고 있다[2].

CT 영상에서 edge 법을 통한 MTF의 계산은 일반 2D X-선 영상에서의 계산과 기본적인 원리는 유사하다. 하지만 Fujita의 방법[3]에 의한 샘플링 pitch를 확보하기 위한 presampling의 과정을 3D 영상재구성 과정을 통해 얻어진 슬라이스 이미지에 적용하기에는 한계를 지닌다.

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** KwangYoon Choi
Tel. +82-31-609-2230 Fax. +82-31-609-2232 E-mail. kychois@sstlabs.net

Received 31 October 2023 **Revised** 24 November 2023 **Accepted** 29 November 2023

또한 edge 팬텀과 검출기의 픽셀 열과의 미세 각도(2~3°)로 의도적인 오정렬(misalignment)하는 과정 자체도 레이저 빔을 이용하여야 하는 번거로움이 수반될 수 있다[2].

이에 본 연구에서는, 3D 보안검색장비의 영상품질기준을 제시하는 ANSI42.45의 표준 측정 방법(ASTM E1695-95)에 따라 MTF를 계산하였고 2D edge 법과의 presampling 방식의 차이를 규명하였다. 또한 방사형 Edge profile의 방법으로도 MTF를 계산하여 두 가지 방법의 측정 결과를 비교함으로써 ASTM 방식의 측정 방법의 유효성을 판단하고 또한 두 방법의 차이에 대해서도 고찰하였다[4,5].

2. 대상 및 방법

2.1. 영상의 획득

본 실험에 사용한 3D 보안검색시스템은 고정형 갠트리 보안검색 CT (E3S-690, SSTLabs, Korea)로서, X-선 소스(source)의 회전 없이 고정된 투영영상(9 views)을 통해 영상을 획득하였다. 3차원 영상재구성은 희소뷰 측정으로부터 Deep learning을 적용하여 9 views에 최적화된 알고리즘으로 재구성하였다.

X-선 발생은 160 kV, 1 mA, 텅스텐 타겟의 팬(fan) beam 선원을 사용하였고, focal spot은 0.8 m의 사이즈를 가진다. X-선 검출기는 CsI 신틸레이터 센서를 사용한 1.5 pixel pitch, 1.4×3.2 mm pixel active size의 영상검출기를 라인형으로 모듈화하여 사용하였다.

스캔을 위해 컨베이어(conveyor)를 이용해 물체를 시스템에 통과시켜 영상을 얻었다. 터널 통과 후 2차원 projection images가 획득되고 3D 영상재구성(voxel size: 1×1×1 mm)을 통해 이미지를 복원하였다.

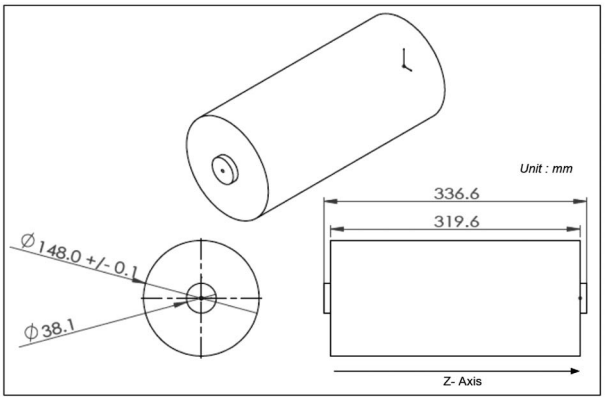

Fig. 1. Test object description [5].

Fig. 1의 팬텀의 경우, ANSI 42.45 (IEC 62945) 규격을 기반으로 제작된 Verif-IQ (Battelle, USA)를 사용하였다.

원통형의 아세탈 재질로 이루어진 팬텀이며, z축 방향은 보안검색시스템의 투입구를 통과하는 방향이다. 영상의 분석에 이용한 단면은 X-Y면(axial plane, 축상면)이 사용되었다.

2.2. 변조전달함수(MTF)

변조전달함수란 어떠한 영상시스템에서의 주파수 응답(frequency response)이며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$MTF(u,v) = \frac{|FT_{out}(u,v)|}{|FT_{in}(u,v)|} \quad (1)$$

즉, Input Modulation에 대한 Output Modulation을 의미한다.

이는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dx} ERF(x) = PSF(x) \quad (2)$$

$$MTF(s_x) = FT|PSF(x)| \quad (3)$$

여기서, s_x는 x 방향에서의 spatial frequency (공간주파수)를 의미한다.

즉, ERF (Edge Response Function)를 인접차분(미분)한 값이 PSF (Point Spread Function)이며, PSF를 Fourier Transform (FT)하면 MTF를 구할 수 있다.

2.3. Edge 방법

2D X-ray 영상에서의 edge 테스트팬텀을 이용한 MTF의 계산은 Fig. 2의 방식이 현재 널리 사용되고 있다. Fujita에 의해 제안되고 Samei에 의해 구체화된 이 방법은 edge 테스트팬텀을 디텍터 픽셀 열에 대해서 2~3°의 인위적 각도를 만들어 디텍터의 한계 최대공간주파수 이상의 샘플링 간격을 만들어냄으로써 MTF를 측정하는 방식이다[2,3].

위의 방식을 3D 재구성 이미지에서 적용하는 것에는 한계를 지닌다. 2D 방식이 검출기 픽셀 방향에 따라 각도를 미세 각도로 정렬해야 하는 과정은 차치하더라도 영상재구성의 360° 방향에 따른 모든 각도의 MTF를 구하는 것을 적용하기에는 어려움이 따르기 때문이다. 영상재구성 알고리즘의 완성도에 따라 각도에 따른 편차 또한 존재하며 정확한 측정을 위해서는 이 또한 평가에 반영되어야 한다.

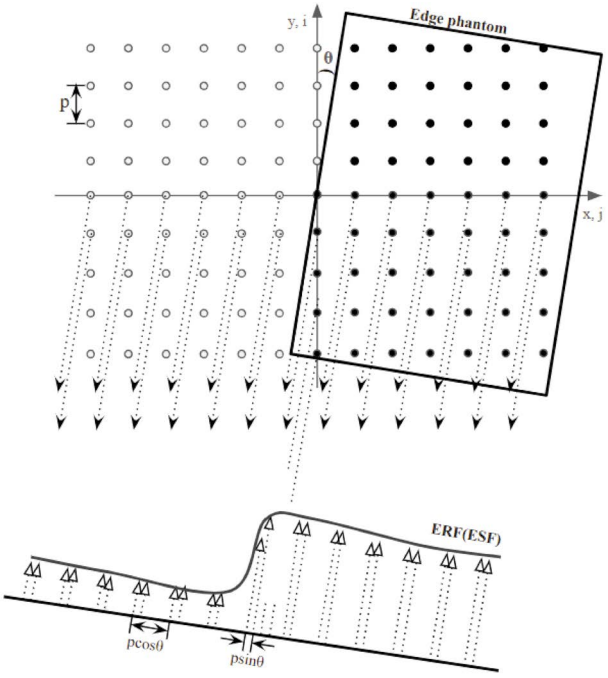

Fig. 2. Reprojection and binning of the two-dimensional edge image data into a one-dimensional trace perpendicular to the edge [2].

2.3.1. ASTM E1695-95 표준에 의한 방법

ASTM E1695-95에 의한 표준 MTF 측정 방법은 Fig. 3처럼 3D 재구성된 원통형 테스트팬텀의 슬라이스 단면 영상을 추출하여 측정하게 된다. 원통형(디스크) 팬텀의 edge 프로파일을 생성하여 ERF (Edge Response Function)를 구한다. 얻어진 ERF를 인접차분(미분)하여 PSF (Point Spread Function)를 구하고 PSF의 푸리에변환을 통해 MTF를 계산한다[5].

ASTM 표준 테스트 방법을 정리하면 다음과 같다.

1) 팬텀 영상의 중심을 계산한다. 슬라이스 단면은 Fig. 4와 같은 원 모양이다.
2) 원의 edge에 해당하는 부분을 포괄할 수 있는 내부 원과 외부 원을 설정한다.
3) 내부 원과 외부 원의 영역에 있는 모든 픽셀들을 대상으로 원으로부터의 거리를 계산한다.
4) 계산된 거리의 순서로 픽셀 값을 재배열한다.
5) 하나의 픽셀을 일정하게 나누어 bin을 만들고 각 bin에 픽셀 값을 분리하여 넣는다. 본 연구에서는 하나의 bin을 0.1 픽셀로 설정하였다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같이 거리에 따른 픽셀 값을 도식화할 수 있다.
6) 각 bin들의 값의 평균을 구한다. 선택영역 사이의 거리에 해당하는 픽셀 값을 구한다(Fig. 6).
7) ERF 값을 조각단위(piece-wise), 최소제곱 입방정계

Fig. 3. The procedure of ASTM method.

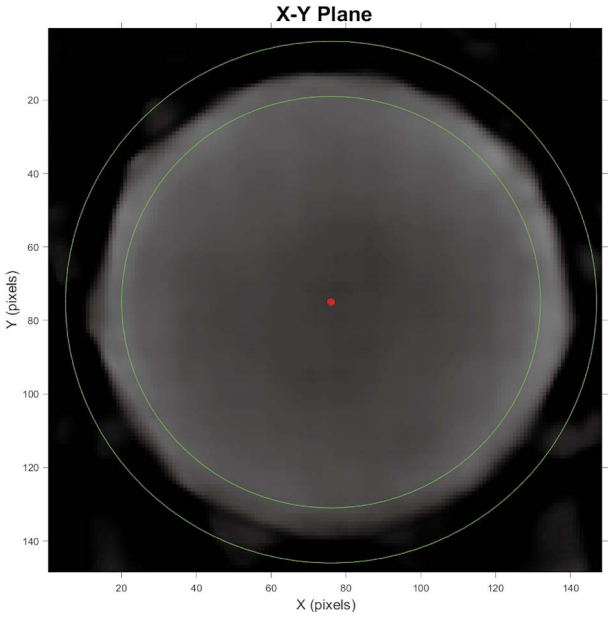

Fig. 4. Selection of the inner and outer radii.

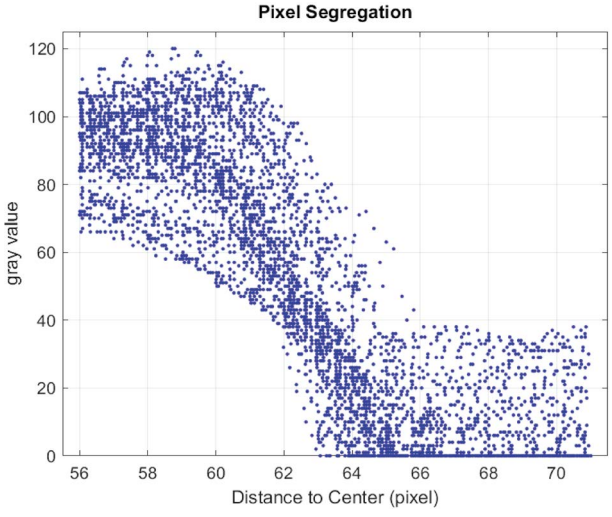

Fig. 5. Segregation of the values into equal bins.

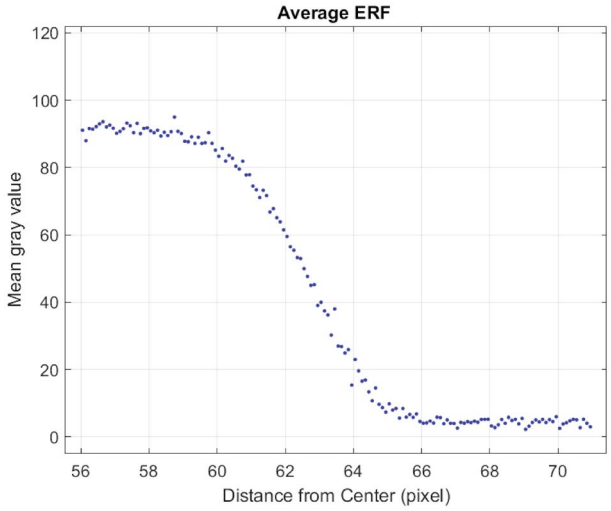

Fig. 6. Average of the value for each bin.

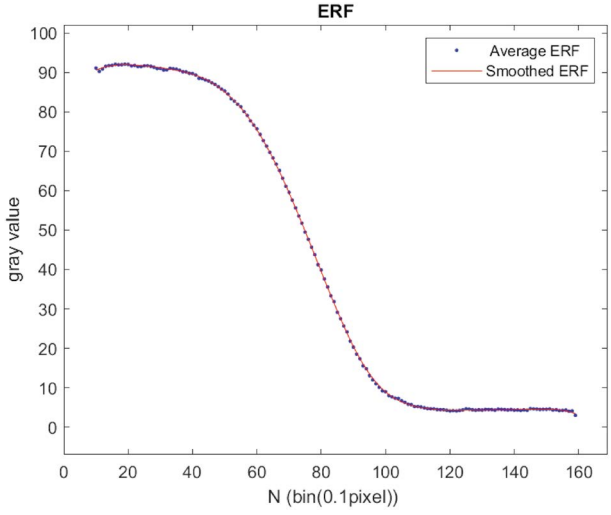

Fig. 7. The smoothed ERF after least-square cubic fit.

(least-square cubic fit) 과정을 통해 smoothing한다.

8) 커브의 필요치 않는 부분을 잘라내고 원하는 영역의 최종 ERF 값을 얻는다(Fig. 7).

2.3.2. 방사형 Edge Profile에 의한 방법

방사형 Edge profile 방법(Fig. 8)은 원형 팬텀 이미지의 중심을 기준으로 360° 방사방향에 대한 Edge profile을 통해서 ERF를 구하는 방법이다[6].

방사형 Edge profile을 이용한 측정 방법을 정리하면 다음과 같다.

1) 팬텀영상의 원의 중심을 계산한다.

2) 원의 중심을 기준으로 다수의 방사형 edge profile을 생성시킨다. 본 연구에서는 10° 간격으로 36개의 Edge profile을 생성시켰다.

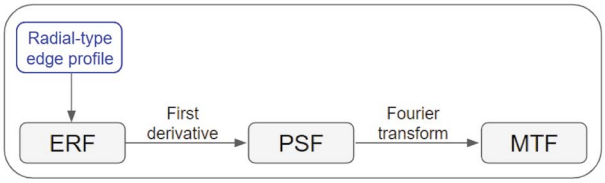

Fig. 8. The procedure of radial type edge profile method.

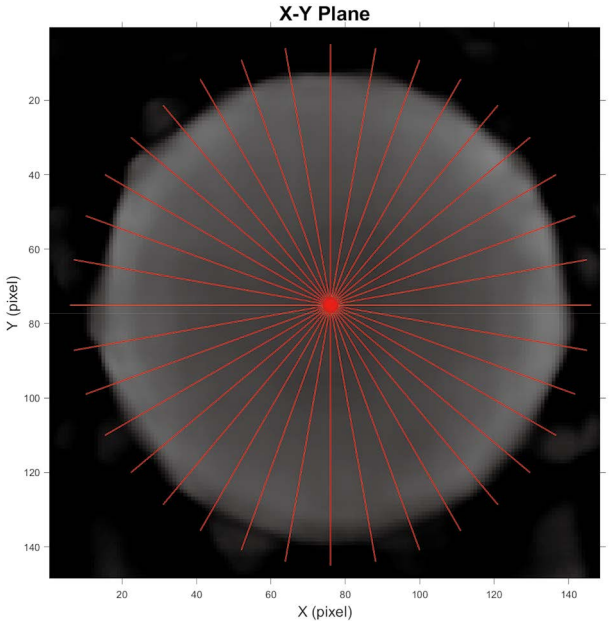

Fig. 9. Generation of the radial type edge profiles.

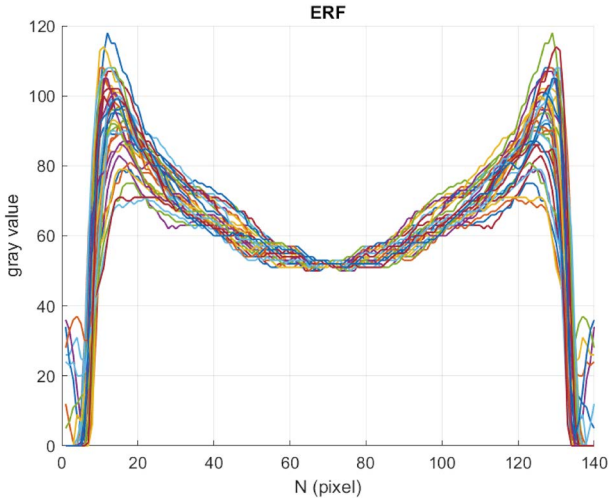

Fig. 10-1. Multiple edge response function.

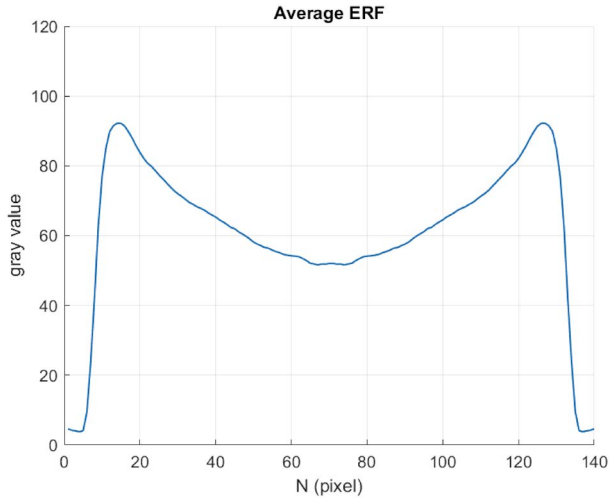

Fig. 10-2. Average ERF.

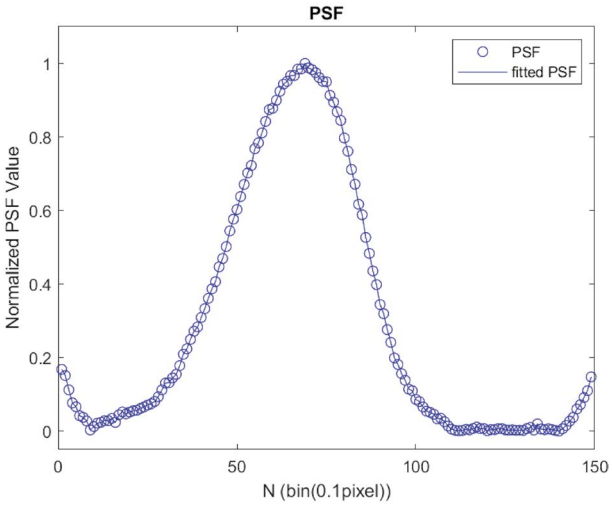

Fig. 12. Point spread function.

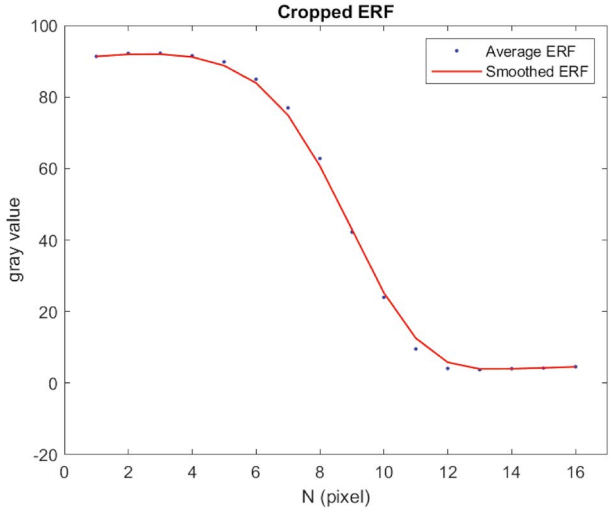

Fig. 11. Cropped ERF curve.

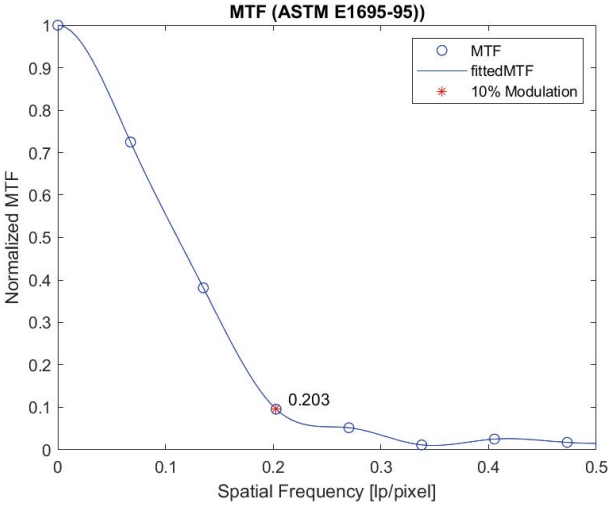

Fig. 13. MTF curve (by ASTM).

3) 이를 도식화하면 Fig. 10-1과 같은 각도별 ERF를 나타낼 수 있다.
4) 3)의 값을 평균하여 Average ERF를 구한다(Fig. 10-2).
5) 원하는 edge 영역의 프로파일을 선택하여 ERF를 구한다.
6) Smoothing 과정을 거쳐 최종 ERF 값을 얻는다.

3. 결 과

결과의 분석에 있어서 본 연구의 raw 영상은 최소한의 view 수를 갖는 고정형 갠트리 CT로 얻은 영상으로 재구성하였음을 다시 한 번 밝혀둔다. 이는 일반 보안검색장비의 projection 수보다 훨씬 제한된 projection 수, 단 9 뷰(view)로 재구성된 영상의 결과임을 의미한다. 또한 3D 재구성을 위한 Iso-centering 이외의 영상후처리(post image processing)하지 않은 원본의 시료이므로 영상의 품질에 관하여 상대적인 비교의 대상은 아니다.

다만 본 연구는 동일 이미지에서 MTF의 측정 방식만 다르게 하여 두 결과를 비교하였으므로 측정 방식의 평가에 대한 비교의 의미는 있을 것으로 본다.

영상분석에 사용한 재구성영상은 원시(raw) 데이터의 영상이며 희소뷰(sparse-view)의 특성으로 view 수의 제한

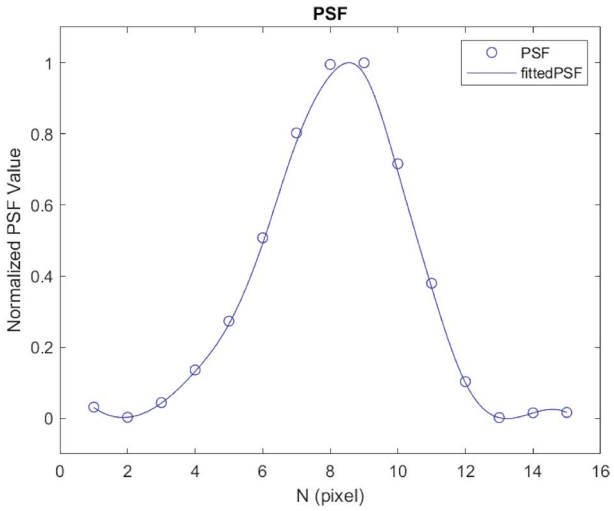

Fig. 14. Point spread function.

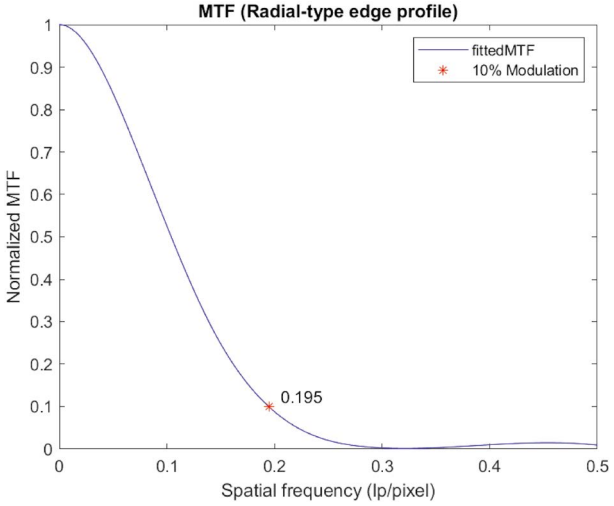

Fig. 15. MTF curve (by Radial-type).

에 의한 streak artifact 및 CT value의 불균일함 등이 존재한다. 이러한 요소도 영상의 분해능에 저해의 요소로 작용되고 있으며 평가에도 반영하여 측정되었다.

3.1. ASTM E1695-95 방법의 결과

15개의 픽셀에 해당하는 영역을 픽셀당 10개의 bin으로 나누어 sampling된 ERF의 인접차분의 결과이다. PSF의 반치전폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)의 측정 결과 3.9 pixels의 결과를 나타냈다.

공간분해능의 척도인 10% MTF의 측정값은 0.203 lp pixel^{-1}의 결과를 나타냈다.

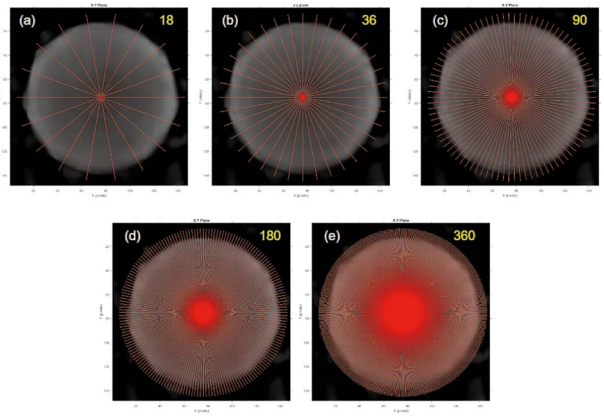

Fig. 16. The number of radial edge profiles. (a) 18 lines, (b) 36 lines, (c) 90 lines, (d) 180 lines, (e) 360 lines.

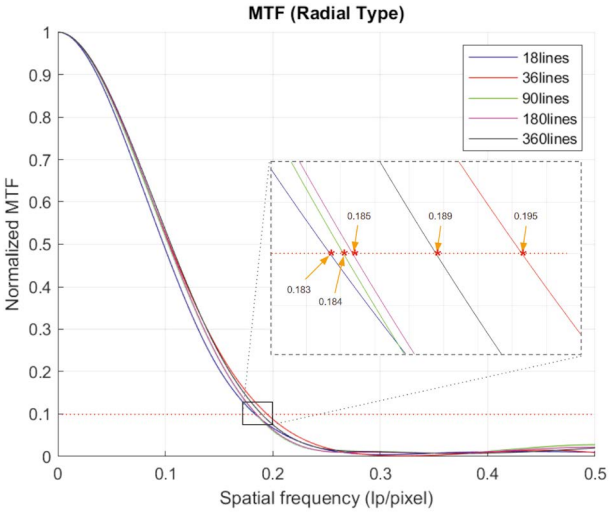

Fig. 17. MTF curve depending on the number of lines.

3.2. 방사형 Edge Profile에 의한 방법의 결과

방사형 Edge profile에 의한 방식으로 측정된 PSF의 반치전폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)은 측정 결과 4.0 pixels의 결과를 나타냈다.

또한 10% MTF의 측정값은 0.195 lp pixel^{-1}의 결과를 보였다.

방사형 Edge profile 수의 변화에 따른 10% Modulation을 비교해본 결과에서는 18, 36, 90, 180, 360 lines에 대해서 각각 0.183, 0.195, 0.184, 0.185, 0.189의 값을 보였다. Line의 수가 증가할수록 약소한 변화가 보이나 선형성을 갖는 것으로 보기에는 어려운 것으로 분석된다.

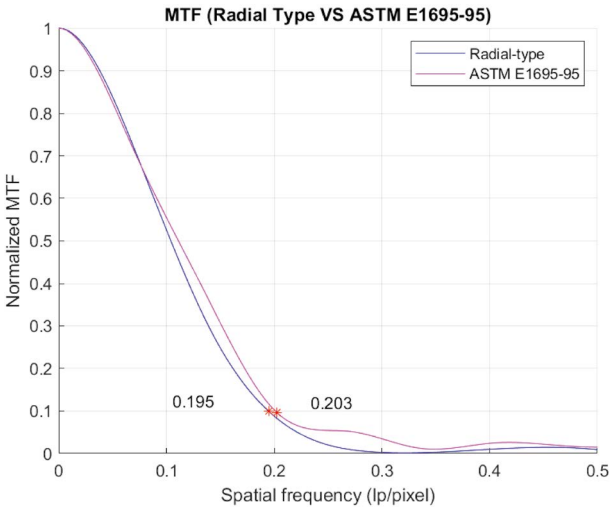

Fig. 18. Comparison of the result of two methods.

Table 1. Comparison of the both of the measurement result

No.	Measurement	Radial type	ASTM
1	Sampling pitch	1 px	0.1 px
2	FWHM of PSF	4.0 px	3.9 px
3	10% modulation	0.195 lp px^{-1}	0.203 lp px^{-1}

3.3. 두 방식의 결과 비교

두 방식의 10% Modulation 값을 비교하였을 때, ASTM E1695-95의 방법은 0.203 lp $pixel^{-1}$, 방사형 Edge profile (36 lines)은 0.195 lp $pixel^{-1}$의 결과를 보였다 (Fig. 18, Table 1). 근소한 결과의 차이는 두 방식에서 영역 내 사용하는 픽셀 데이터의 범위 차이에 따른 것으로 사료된다.

4. 고 찰

X선 영상품질의 주요 평가인자 중의 하나인 공간분해능의 평가에 있어서, edge 방식에 의한 MTF의 측정에 대한 연구를 수행하였다.

2D 영상에서의 일반적으로 사각형 형태의 텅스텐이나 납으로 만들어진 Edge를 사용하여 측정하는 것과 다르게 3D 영상의 평가에서는 원통형, 원형 디스크 또는 볼 (Ball) 형상의 팬텀을 사용하여 영상을 획득하고 재구성하여 분석에 사용한다.

3D 보안검색시스템에 있어서 ANSI 42.45에서 규정하는 ASTM E1695-95의 표준방법으로 MTF를 측정하는 경우의 이점은 다음으로 사료된다.

첫째, Composite edge profile을 통해 sampling pitch를 조절할 수 있다. 픽셀당 bin의 크기를 조절하여 분리할 수 있다. 위 실험에는 한 픽셀을 10 bins로 균일하게 나누어 sampling을 하였다. 이는 영상에서의 픽셀사이즈보다 미세한 샘플링을 하는 presampling에 해당하는 과정으로 2D edge 법과 비교하여서도 팬텀의 미세한 각도 (2~3°) 조절의 과정이 필요하지 않는 장점을 가진다.

둘째, 방사형 Edge profile 방식에서 비해서 계산의 신뢰도가 높다. 이는 분석에 사용되는 픽셀의 수에서도 차이를 가진다. ASTM E1695-95의 방식에서 내부의 원과 외부의 원 사이의 영역에 있는 픽셀의 수는 5972 픽셀의 data를 이용해 계산을 수행한 반면, 방사형 라인 profile에 들어간 픽셀의 수는 540개 (15 pixels × 36 lines 기준)로 약 10배의 차이이다. Fig. 17에서와 같이 5 case에 대한 값을 구하면 0.187 ± 0.0049로서 라인 수에 따라 분석에 들어가는 픽셀의 수도 다르고 오차를 지닌다. 따라서 방사형 Edge profile로 적용하기 위해서는 미세한 각도로 일정 수준의 이상의 라인 수가 필요하다.

5. 결 론

MTF 측정 시 ANSI 42.45의 기준 (ASTM E1695-95의 표준방법)을 적용하였으며, 방사형 Edge profile 방식으로 측정한 결과와도 비교하여 측정 결과의 유효성을 확인하였다.

또한 희소뷰 (sparse view) CT의 재구성영상에서 보이는 streak artifact가 반영된 영상의 MTF를 계산하기 위한 edge 방법에 대해서 검토하였다.

국내에서 최초로 제작된 고정형 갠트리 희소뷰 3D 보안검색장비를 이용하여 공간분해능 측정에 대한 구체적인 방법과 결과를 제시하였다는 점에서 이 연구의 학술적 의의를 둔다.

사 사

본 연구는 국토교통부 지능형 휴대수하물 보안검색 기술개발사업의 연구비 지원 (RS-2021-KA162822)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bushberg JT, Seiber JA, Leidholdt EM Jr. and Boone JM. 2001. The essentail physics of medical imaging. 2nd ed. pp. 253-291. Williams & Wilkins.
2. Samei E, Flynn MJ and Reimann DA. 1998. A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device. *Med. Phys*. **25**(1):102-113.
3. Fujita H, Tsai D-Y, Itoh T, Doi K, Morishita J, Ueda K and Ohtsuka A. 1992. A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. *IEEE Trans. Med. Imaging* **11**(1):34-99.
4. ASTM E1695-95. Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance. ASTM International.
5. ANSI42.45-2011. American National Standard for Evaluation the Image Quality of X-ray Computed Tomography (CT) Security-Screening Systems. IEEE Standards Assosication. New York.
6. Wang YF, Que J-M, Cao D-Q, Sun C-L, Zhao W, Wei C-F, Shi R-J and Wei L. 2013. Measurement of the spatial resolution and the relative density resolution in an industrial cone-bean micro computed tomography system. *Chinese Phys. C* **37**(7):078202.