

Effects of the Geometrical Misalignment on the MTF Measurement

Jun-Woo Kim*

Advanced Process Development Team, Strategy & Innovation Division,
Doosan Heavy Industries and Construction Co., Ltd.

Received: September 24, 2021. Revised: October 20, 2021. Accepted: October 31, 2021.

ABSTRACT

The modulation transfer function (MTF) is calculated to analyze the resolution of the spatial frequency of the image acquired from the x-ray imaging system. In general, the response function of the detector acquires a line spread function (LSF) using a slit-camera, and derives a modulation transfer function through a Fourier transform. Because of the fact that the x-ray must always be incident on the center of the slit-camera, the tilt of the detector and slit-camera caused by the experimenter will affect the detector performance. In addition, if the tilt increases, the performance evaluation of the x-ray image system will be problematic. In this study, we analyzed the experimental and analytical models in the modulation transfer function, ie, the Fourier domain, based on the experimental error and analyzed the effect on the spatial frequency. Furthermore, performance evaluation is being carried out for various x-ray imaging systems, and experimental errors are indispensable, and the extent to which they can be tolerated should be reviewed.

Keywords: X-ray Imaging System, Slit-camera, Line-spread Function, Modulation-transfer Function

I. INTRODUCTION

일반적으로 변조전달함수(modulation-transfer function, MTF)는 엑스선 영상 시스템의 공간분해능을 정량화하기 위해 널리 사용되고 있다^[1]. 변조전달함수는 슬릿-카메라를 사용하여 엑스선 영상 시스템의 선분포함수(line-spread function, LSF)를 획득한 다음, 푸리에 변환을 통해 간단하게 계산될 수 있다^[1]. 하지만 실험자가 검출기와 슬릿-카메라를 부적절하게 셋팅을 하게 되거나 엑스선 소스와 검출기의 표면이 직각을 이루지 않는다면 슬릿 사이로 입사되는 엑스선보다 슬릿 벽을 투과하고, 산란된 엑스선이 슬릿 사이로 도달하는 반응이 지배적이게 될 것이다. 이러한 조정 불량은 변조전달함수에 실험적 오차로 기여되고, 또한 확대율이 증가할수록 그 영향은 더욱 커지게 되므로 엑스선 영상 시스템의 품질에 부정확한 성능을 도출하게 되는데 결과

적으로 검출기를 구매하고자 하는 유저에게 정확한 정보를 주지 못할 것이다^[2-6].

뿐만 아니라 엑스선이 슬릿-카메라에 입사될 때, 슬릿-카메라의 물질 또는 특정 영역대의 엑스선 에너지에 의한 산란선과 특성 엑스선이 발생하게 되는데 조정 불량에 따른 엑스선 물리에 대한 정량적인 추적이 필요할 수도 있을 것이다^[7]. 따라서 본 연구는 엑스선 영상 시스템에서 기하학적인 조정 불량이라 불리는 검출기와 슬릿 사이의 기울임, 확대율에 대한 영상 시스템 성능을 변조전달함수로 실험과 분석모델로 슬릿-카메라의 응답함수를 정량적으로 분석하고자 한다. 나아가 엑스선 영상 시스템 어플리케이션 별 조정 불량에 대한 정량화와 슬릿-카메라에 대한 엑스선의 이론적 투과 분석에 관해 연구하고자 한다.

* Corresponding Author: Jun-Woo Kim

E-mail: kjw89f@gmail.com

Tel:

II. MATERIAL AND METHODS

1. 측정 및 분석

기하학적 조정 불량을 변조전달함수로 측정하기 위한 실험 기하학적 구조는 Fig. 1과 같다. 엑스선 소스와 디텍터 사이의 거리(source-to-detector distance, SDD)는 1500 mm로 확대율은 Fig. 1의 흰 박스와 같이 1부터 2까지 설정하였다. 슬릿-카메라의 물질은 원자번호 74, 텅스텐이고, 두께는 약 1.5 mm, 슬릿 사이 거리는 0.01 mm, 슬릿-카메라를 이루는 전체 각도는 8°이다. 이때 슬릿-카메라로 입사되는 엑스선 에너지는 110 kVp로 설정하였다.

엑스선 영상 시스템의 선분포함수를 검출하기 위한 검출기는 Toshiba 4343R로 3072 × 3072의 픽셀 개수와 0.143 mm의 픽셀 크기를 가지고 있으며 cesium iodine 섬광체를 사용하여 입사 엑스선을 빛의 신호로 변환시켜주는 간접변환방식 검출기이다. 검출기의 크기가 흉부 촬영용이기 때문에 본 연구는 흉부 촬영에서의 조정 불량에 관한 해상도 분석에 해당된다.

Fig. 2는 실험 지오메트리의 모식도이며 Fig. 2-(b)와 같이 검출기와 슬릿-카메라의 기울임(θ)이 발생하게 되면 엑스선 영상 시스템의 선분포함수는 왜곡이 발생하여 검출기의 해상도의 정확성이 저하되게 된다. 실험적으로 Fig. 2-(b)와 같은 기울임을 셋팅하고자 하였을 때, 검출기와 슬릿-카메라를 기울이는 것 자체가 불가능하기 때문에 오히려 실험적 오차가 더 발생할 우려가 있다. 따라서 Fig. 2-(c)와 같이 Δx 만큼 슬릿-카메라의 위치를 이동시켜 기울임을 쉽게 대체할 수 있으며 Eq. (1), (2)와 같이 표현된다.

엑스선 영상 시스템의 해상도와 대조도의 전달을 공간주파수의 증가에 따라 기술하는 변조전달함수는 슬릿-카메라를 이용하여 계산될 수 있다. Eq. (3)과 같이 검출기의 1차원 방향의 임펄스 응답함수인 선분포함수를 슬릿-카메라로부터 획득하고 난 다음, Eq. (4)와 같이 푸리에 변환(Fourier transformation, FT)을 통해 변조전달함수를 계산하게 되는 것이다.

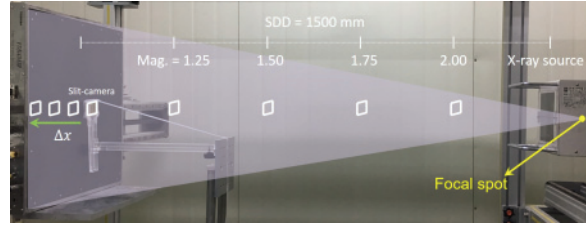


Fig. 1. Experimental Geometry to Investigate the Geometric Misalignment as Modulation-Transfer Functions.

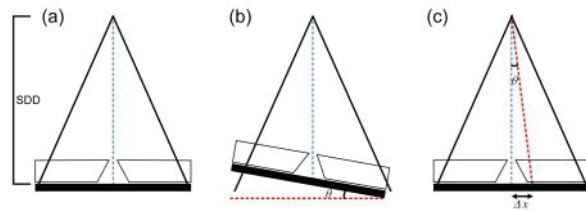


Fig. 2. Example of the Geometrical Diagram for Experiment with Misalignment. (a) Normal, (b) Tilting, and (c) Shifting.

$$\tan\theta = \frac{\Delta x}{SDD} \quad (1)$$

$$\Delta x = \tan\theta \times SDD \quad (2)$$

$$LSF(x) = \frac{LSF(x)}{\int LSF(x)dx} \quad (3)$$

$$MTF(u) = FT\{LSF(x)\} \quad (4)$$

여기서, x 는 공간 도메인에서의 영상좌표를 의미하며 u 는 x 의 푸리에 conjugation이다.

엑스선 영상 시스템에 확대율이 발생하게 되면 공간주파수가 확대율, m 에 의해 나누기 연산이 수행되는데 최종 변조전달함수는 Eq. (5)와 같이 간단한 주파수 보정으로 나타낼 수 있다^[8].

$$MTF(u') = MTF(u/m) \quad (5)$$

Table 1. Parameters to know the Slit-camera Thickness from the Analytical Model

Symbol	Description
(x_s, y_s)	엑스선 생성 위치
(x_d, y_d)	엑스선 검출 위치
θ	엑스선 입사 각도
Φ	슬릿과 슬릿 사이의 각도
z_h	슬릿 윗 부분의 높이
z_g	검출기와 슬릿 사이의 거리
z_0	0
t	슬릿의 두께 ($z_h - z_g$)
l	엑스선이 슬릿 내부를 통과할 때의 투과 거리
w	슬릿 윗 부분의 jaw 넓이
$Z_{slitA}(x), Z_{slitB}(x)$	슬릿 내부의 jaw 양쪽 벽면을 나타내는 직선의 방정식
$Z_{SD}(x)$	엑스선 생성 위치와 검출 지점을 통과하는 직선의 방정식
$Z_C(x)$	점 A와 점 B를 통과하는 직선의 방정식
θ_C	Z_C 와 검출기 평면과의 상대 각도
x_B	점 B의 x좌표
$(x_{SDA}, z_{SDA}), (x_{SDB}, z_{SDB})$	Z_{SD} 와 Z_{slitA}, Z_{slitB} 와의 각 교점
$X_{SD}(z)$	Z_{SD} 직선의 방정식을 z 에 관한 식으로 나타낸 방정식

그리고 검출기와 슬릿-카메라의 기울임과 확대율에 따른 유효 개구율(effective-aperture, A_{eff})은 Eq. (6)와 같다.

$$A_{eff}(mm) = \left[2\pi \int_0^\infty MTF^2(u) u du \right]^{-1/2} \quad (6)$$

마지막으로 조정 불량에 따른 정렬오차를 정량적으로 계산하기 위해 Eq. (7)과 같이 분석하고자 하였다.

$$\text{Misalignment} = \frac{MTF_{\theta^\circ}}{MTF_{0^\circ}} \quad (7)$$

여기서, 0° 는 슬릿-카메라와 검출기의 기울임이 없는 상태에서 획득한 변조전달함수로 기준을 의미하며, θ° 는 조정 불량량이 발생하였을 때, 획득되는 변조전달함수를 의미한다. 따라서 우리는 기준이 되는 변조전달함수와 기울임에 따른 변조전달함수의 비를 조정 불량으로 보고, 이를 정량화하였다.

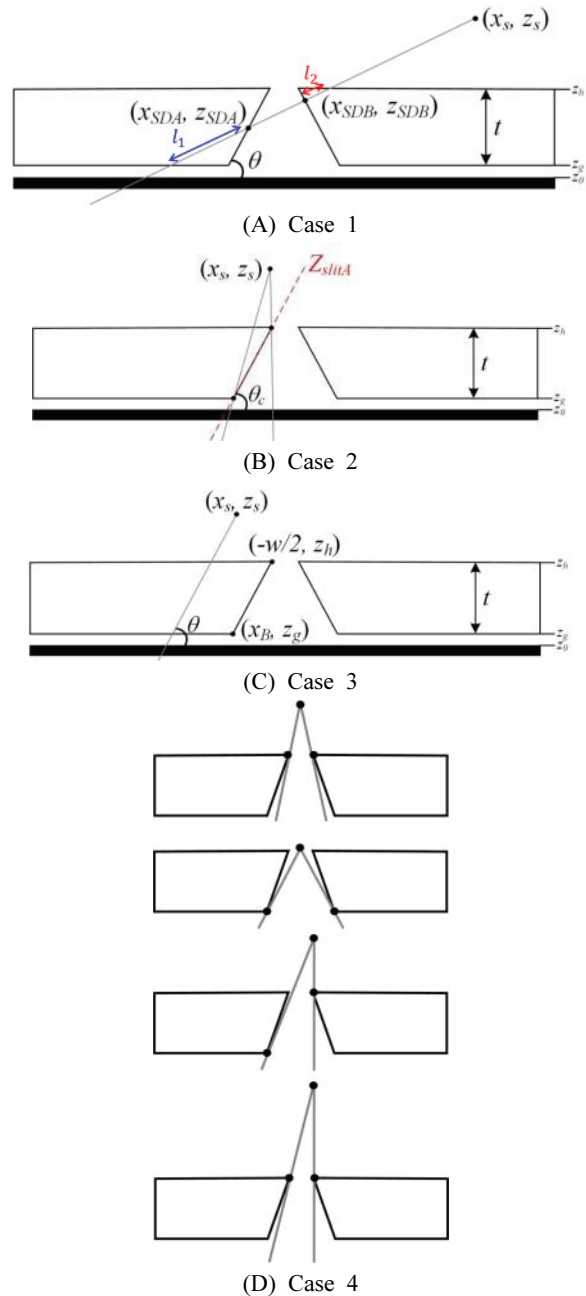


Fig. 3. Various Geometry for an Analytical Model which X-ray Beam Path through a Slit-Camera.

2. 슬릿-카메라 모델

실험에서의 변조전달함수를 검증하기 위해 엑스선이 슬릿-카메라를 투과해 가는 반응들이 다양하기 때문에 총 4 케이스로 세분화하여 분석모델을 설명하고자 한다. 또한, 분석모델로부터 다양한 각도의 엑스선이 슬릿-카메라를 투과해 나가는 두께를 알기 위한 정보로 Table 1에 그 파라미터들의 의미를 자세하게 나타내었다.

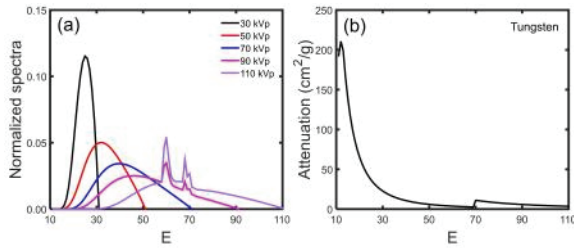


Fig. 4. Information used to Obtain the Line Spread Function from the Analytic Model. (a) Various x-ray Spectra, (b) Mass Attenuation Coefficient of Tungsten Slit-camera.

2.1. 케이스 1

Fig. 3-(a)는 슬릿-카메라로 입사하는 엑스선이 슬릿의 양 벽면을 통과하면 좌측 슬릿-카메라 두께 l_1 과 우측 슬릿-카메라 두께 l_2 가 발생한다. 투과 거리가 증가하기 때문에 엑스선의 감쇠가 많이 일어나지만 모델로부터 엑스선은 슬릿-카메라의 센터를 기준으로 z방향 위에서 발생되기 때문에 케이스 1과 같은 반응은 거의 없다. 그럼에도 불구하고 슬릿-카메라 위에 어떠한 물체가 놓여 있는 상태로 엑스선을 발생시킨다면 물체에서 산란되는 엑스선은 케이스 1과 같은 반응을 보일 것이다. 엑스선이 슬릿-카메라의 좌/우를 통과하는 길이는 Eq. (8), (9), (10)과 같다.

$$l_1 = \sqrt{\left(\left(\frac{z_g - z_s}{\tan\theta} + x_s - x_{SDA}\right)^2 + (z_{SDA} - z_g)^2\right)} \quad (8)$$

$$l_2 = \sqrt{\left(\left(\frac{z_h - z_s}{\tan\theta} + x_s - x_{SDB}\right)^2 + (z_{SDB} - z_s)^2\right)} \quad (9)$$

$$l = l_1 + l_2 \quad (10)$$

2.2. 케이스 2

Fig. 3-(b)는 입사하는 엑스선이 슬릿-카메라 jaw 벽면으로 입사된 후, 슬릿-카메라의 아래로 투과해 나가는 경우로 실질적인 엑스선 영상 시스템의 해상도에 영향을 미치는 케이스이다. 이러한 케이스를 통해서 엑스선 영상이 획득될 때, 선분포함수의 피크 값이 sharp할 수도 있고, broad할 수도 있게 된다. 여기서, jaw는 슬릿에 각진 부분을 의미한다.

2.3. 케이스 3

Fig. 3-(c)는 입사하는 엑스선이 jaw의 벽면을 거치지 않고, 슬릿의 윗면을 투과해서 아래 면으로 오는 경우로 엑스선의 감쇠가 가장 많이 일어나는 케이스이다.

2.4. 케이스 4

Fig. 3-(d)는 슬릿-카메라로 입사하는 엑스선이 슬릿-카메라를 투과하지 않고, 슬릿과 슬릿 사이로 입사되는 경우를 나타내고 있으며 이때, 슬릿 두께 t 는 0이 된다. 검출기에 엑스선이 검출될 때, 값은 $e^{-\mu t}$ 로 나타낼 수 있는데 두께가 0이기 때문에 신호는 1로 측정된다. 즉, 해당 지오메트리로 엑스선이 슬릿으로 들어오면 모든 엑스선을 다 측정하는 것을 의미한다.

분석 모델을 위해 발생하는 엑스선은 Fig. 4-(a)와 같이 정규화된 다양한 엑스선 스펙트럼을 사용하였으며 Fig. 4-(b)와 같이 다양한 에너지의 엑스선 스펙트럼에 따른 슬릿-카메라 물질, 텅스텐에 해당하는 감쇠계수를 고려하여 모델 결과를 도출하였다. 이때, 사용된 모델 수식은 Eq. (11)과 같다.

$$I_{\text{tungsten}} = S(E) I_0 e^{-\int_0^l \mu_{\text{tungsten}}(E) dt} \quad (11)$$

여기서, I_{tungsten} 는 슬릿-카메라 텅스텐의 신호, $S(E)$ 는 스펙트럼, $\mu_{\text{tungsten}}(E)$ 는 텅스텐의 감쇠계수를 의미한다.

III. RESULT

1. 해상도

Fig. 5-(a)는 검출기 표면에서 슬릿-카메라를 Δx 만큼 이동시켜 기울임을 적용한 경우의 변조전달함수 결과를 나타낸다. 기울임이 0° 에서 4° 까지는 공간주파수에 따라 거의 유사한 변조전달함수 특성을 보이고 있으나 5° 이상의 기울임이 발생하게 되면 슬릿-카메라의 양 벽면을 투과하는 입사 엑스선의 비율이 증가하게 되어 선분포함수, 변조전달함수의 의미를 상실하게 하고, 실험적으로 획득이 어려운 한계가 있었다.

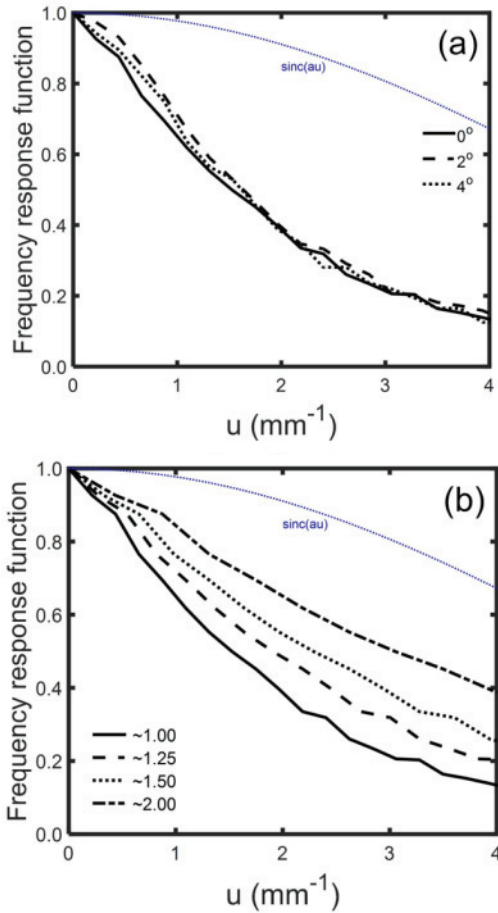


Fig. 5. Fourier Analysis of Misalignment obtained from Experimental. (a) Modulation Transfer Function according to Tilt-angle, (b) Modulation Transfer Function according to Magnification.

Fig. 5-(b)는 확대율을 1부터 2까지 증가시켰을

때의 변조전달함수 특성을 나타내며 확대율이 증가할수록 전반적으로 해상도와 대조도 성능이 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5- (a), (b)에 파란색 점선, $\text{sinc}(au)$ 는 검출기가 가지고 있는 픽셀크기에 대한 변조전달함수로 검출기가 줄 수 있는 최대 변조전달함수를 의미한다.

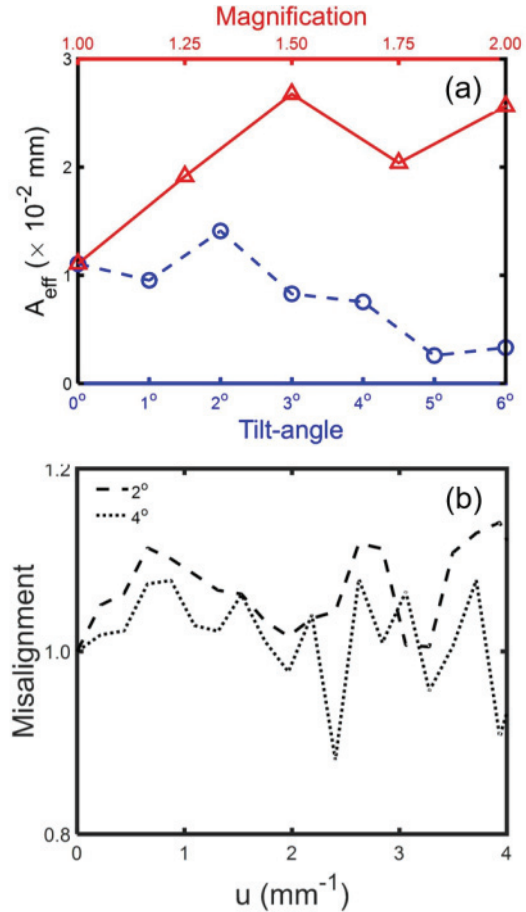


Fig. 6. (a) Effective-Aperture for Misalignment as Function of Tilt-angle, (b) Fourier Analysis of Misalignment.

Fig. 6-(a)는 확대율과 검출기 슬릿-카메라의 기울임이 증가함에 따른 유효 개구율의 경향을 보고자 한 결과로 확대율이 증가하면 유효개구율이 증가하지만 확대율이 1.5 일 때 가장 높은 값을 나타낸다. 또한, 기울임이 증가하면 2° 일 때, 가장 유효개구율이 높다. 즉, 실험 오차가 해상도를 증가시켜 검출기에 적절치 못한 성능을 높이는 격이 된다. 따라서 성능평가 시 실험 오차를 줄이는 노력이 필요할 것이다.

Fig. 6-(b)는 공간주파수 증가에 따라 기울임 정도가 미치는 영향을 조정 불량으로 나타낸 결과이다. 2° 일 때가 4° 일 때보다 조정 불량이 큰 것을 보아 적절한 슬릿-카메라의 기울임이 존재함을 의미한다. 조정이 잘 이루어진다면 값이 거의 1에 가깝지만 공간주파수 2 mm^{-1} 를 기준으로 양 측면에서 오차가 크게 발생하고 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 특정 주파수에서의 해상도, 대조도 성능이 변하는 것을 의미한다.

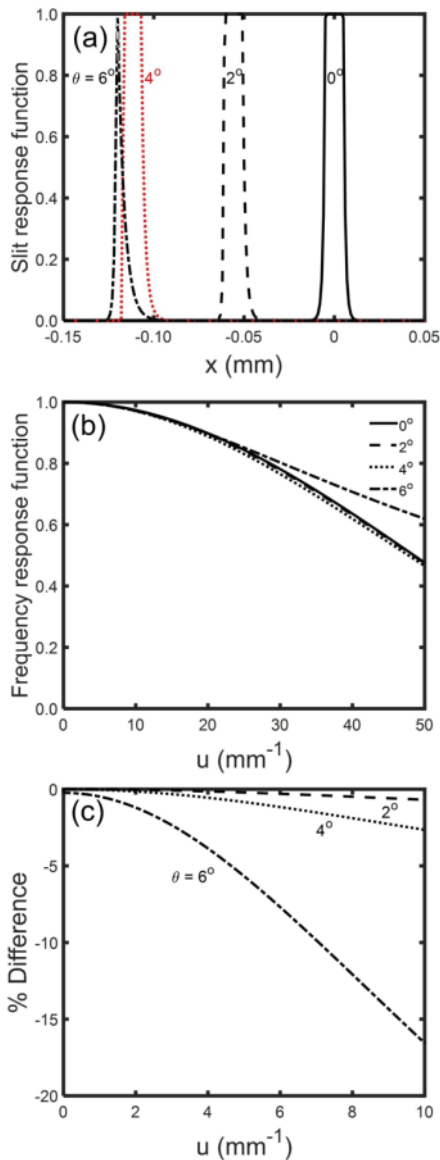


Fig. 7. Fourier analysis of Misalignment Obtained from Analytic Model. (a) Line-Spread Function (LSF) according to Tilt-Angle, (b) Modulation-Transfer Function (MTF) according to Tilt-Angle, (c) Quantification of the Difference of MTF with Tilt-Angle.

2. 모델 결과

Fig. 7은 실험적으로 획득한 검출기, 슬릿-카메라 조정 불량에 대한 변조전달함수를 비교 분석하기 위해 개발된 분석모델로부터 계산한 선분포함수, 변조전달함수이다.

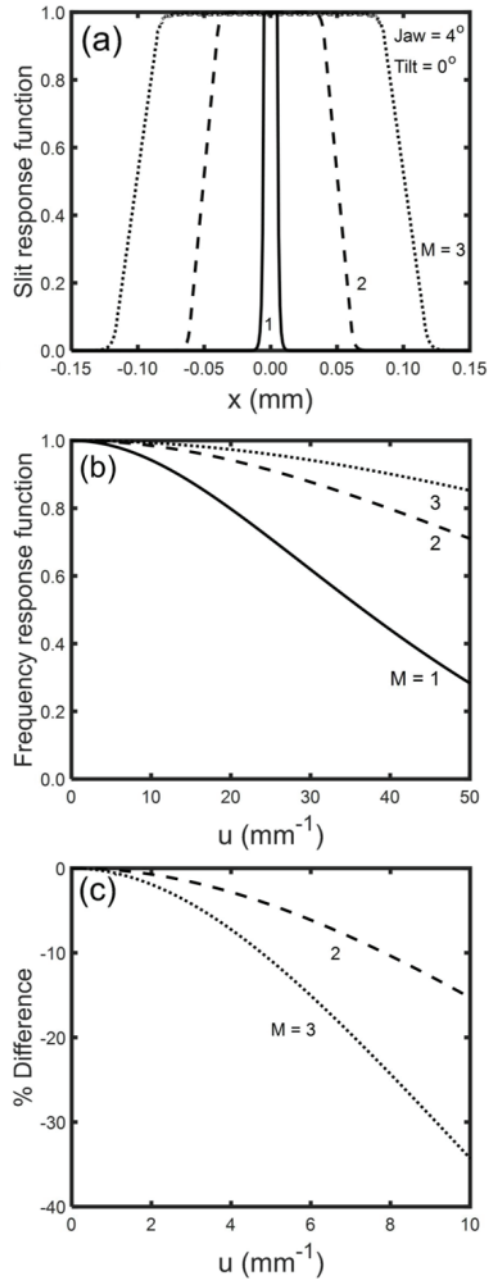


Fig. 8. Fourier analysis of Misalignment Obtained from Analytic Model. (a) LSF according to Magnification, (b) MTF according to Magnification, (c) Quantification of the Difference of MTF with Magnification.

Fig. 7-(a)는 기울임 증가에 따른 선분포함수를 나타낸 결과로 기울임이 증가할수록 슬릿 사이의 거리가 점점 좁아져 최종적으로 6° 일 때, 날카롭게 솟아오른 선분포함수를 볼 수 있다. 그리고 기울임이 4° 일 때, 선분포함수의 좌측이 수직인 것을 볼 수 있는데, 이는 검출기 슬릿-카메라의 기울임을 간단히 Δx 로 대체해도 된다는 것을 의미하며 즉, 기울임만으로도 선분포함수의 경향성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7-(b)는 분석모델로 획득한 기울임에 따른 변조전달함수를 나타내며 기울임이 증가할수록 선분포함수에서 날카로운 응답함수가 변조전달함수의 증가로 나타나고 있다. 즉, fig. 7(a)의 6° 선분포함수가 나머지 선분포함수에 비해 피크 부분에서 날카로운 응답함수를 보이기 때문이다. Fig. 7-(c)는 기울임 증가가 변조전달함수에서 발생하는 차이를 정량적으로 나타낸 결과로 기울임이 증가할수록 그 차이는 커지고 있다.

Fig. 8-(a)는 확대율 증가에 따른 선분포함수 결과이며 확대율이 증가할수록 피크 포인트가 넓어지고 있는데 field of view가 증가하는 것을 의미하고, 좁은 영역을 넓게 확대해서 볼 수 있음을 말한다. Fig. 8-(b)는 확대율 증가에 따른 변조전달함수 결과로 확대율이 증가할수록 변조전달함수의 성능이 증가하고 있으며 실험적으로 획득한 변조전달함수와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 8-(c)는 확대율 증가가 변조전달함수에서 발생하는 차이를 정량적으로 나타낸 결과로 확대율이 증가할수록 기울임 증가보다 큰 차이를 보이고 있다.

IV. DISCUSSION

본 연구는 실험적으로 발생하는 기하학적 조정 불량에 대해 변조전달함수로써 이를 정량화하였으며, 이를 분석하기 위한 모델을 개발하여 실험결과의 경향성을 잘 설명해주고 있음을 확인하였다. 실험적으로 기울임을 약 4° 정도 주었을 때까지는 변조전달함수를 잘 기술하지만 특정 각도 5° 이상 되면 슬릿-카메라의 양 벽면을 통과하는 엑스선이 증가하게 되므로 검출기 위에 텅스텐 필터가 놓여 흡수, 산란 등의 반응이 증가시키는 격이 된다. 따라서, 선분포함수와 변조전달함수의 의미를 상실하

게 되는 것이다.

실험적으로 획득한 변조전달함수를 기울임에 따라 조정 불량 정도를 확인하였을 때, 조정 불량은 공간주파수 2 mm^{-1} 를 기준으로 양 측면 값의 오차가 발생함을 확인할 수 있었고, 이러한 조정 불량은 픽셀 크기가 다소 큰 Toshiba 4343R 검출기에서는 극심한 차이를 볼 수는 없었다.

나아가 미세한 조정 불량을 허용할 수 있는 오차 범위를 설정할 필요가 있고, 엑스선 영상 시스템, 검출기 변환방식 등등에 따라 오차의 크기가 다를 것이므로 공간주파수상에서 오차를 보정할 수 있는 기법이 필요하다고 사료된다. 현재, 분석모델로부터 획득한 결과는 primary 엑스선에 해당되므로 실제 실험에서 발생하는 산란선 및 특성 엑스선에 대한 영향이 배제된 상태이다. 따라서, 몬테칼로 시뮬레이션으로부터 다양한 슬릿-카메라의 물질, 두께, 각도에 따른 엑스선 물리반응을 추적할 수 있는 절차를 통해 분석 모델을 보강할 필요가 있을 것이다.

Reference

- [1] I. Cunningham, *Handbook of Medical Imaging*, Vol. 1, SPIE Press, Washington, 2000 (Chapter 3).
- [2] C. D. Bradford, W. W. Pepler, J. M. Waidelich, "Use of a slit camera for MTF measurement", *Medical Physics*, Vol. 26, No. 11, pp. 2286-2294, 1999. <https://doi.org/10.1118/1.598742>
- [3] S. Tang, G. T. Barnes, R. L. Tanner, "Slit camera focal spot measurement errors in mammography", *Medical Physics*, Vol. 22, No. 11, pp. 1803-1814, 1995. <https://doi.org/10.1118/1.597636>
- [4] C. D. Bradford, W. W. Pepler, J. T. Dobbins III, "Performance characteristics of a Kodak computed radiography system", *Medical Physics*, Vol. 26, No. 1, pp. 27-37, 1999. <https://doi.org/10.1118/1.598781>
- [5] J. T. Dobbins III, D. L. Ergun, L. Rutz, D. A. Hinshaw, H. Blume, D. C. Clark, "DQE(f) of four generation of computed radiography acquisition devices", *Medical Physics*, Vol. 22, No. 10, pp. 1581-1593, 1995. <https://doi.org/10.1118/1.597627>
- [6] S. A. Pistrui-Maximean, J. M. Letang, A. Koch, A.

H. Walenta, G. Montarou, D. Babot, "Measurement and Monte Carlo modeling of the spatial response of scintillation screens", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 581, No. 3, pp. 719-727, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.07.153>

- [7] U. Neitzel, E. Buhr, G. Hilgers, P. R. Granfors, "Determination of the modulation transfer function using the edge method: Influence of scattered radiation", *Medical Physics*, Vol. 31, No. 12, pp. 3485-3491, 2004. <https://doi.org/10.1118/1.1813872>
- [8] E. Samei, N. T. Ranger, A. MacKenzie, I. D. Honey, J. T. Dobbins III, C. E. Ravin, "Effective DQE (eDQE) and speed of digital radiography systems: An experimental methodology", *Medical Physics*, Vol. 36, No. 8, pp. 3806-3817, 2009.
<https://doi.org/10.1118/1.3171690>

변조전달함수 측정에 있어 기하학적 조정 불량이 해상도에 미치는 영향

김준우*

두산중공업 전략/혁신부문 신공정기술개발팀

요 약

엑스선 영상 시스템으로부터 획득한 영상의 공간주파수에 대한 해상도를 분석하기 위해 변조전달함수(modulation-transfer function, MTF)를 계산한다. 일반적으로 검출기의 응답함수는 슬릿-카메라를 사용하여 선분포함수(line-spread function, LSF)를 획득하고, 푸리에 변환을 거쳐 변조전달함수를 도출한다. 엑스선이 항상 슬릿-카메라 중심에 입사해야 된다는 조건 때문에 실험자에 의해 발생하는 검출기와 슬릿-카메라의 기울임은 검출기 성능에 영향을 미치게 된다. 이와 더불어 기울임에 확대율이 더해진다면 엑스선 영상 시스템의 성능평가에 문제가 발생할 것이다. 본 연구에서는 실험적 오차에 기인하여 이를 변조전달함수, 즉 푸리에 도메인에서 실험과 분석모델을 해석하였고, 공간주파수에 미치는 영향을 분석하였다. 나아가 다양한 엑스선 영상 시스템에 있어 성능평가가 실시되어야 할 것이고, 실험적 오차는 불가결하게 발생하며 이를 허용할 수 있는 범위에 대한 검토가 이루어져야 한다.

중심단어: 엑스선 영상 시스템, 슬릿-카메라, 선분포함수, 변조전달함수

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김준우	두산중공업 전략/혁신부문 신공정기술개발팀	선임연구원