

변조전달함수 측정에 의한 디지털
X-선 영상시스템의 공간해상도 평가
기법에 관한 연구

연세대학교 보건환경대학원

의공학전공

이 경 하

변조전달함수 측정에 의한 디지털
X-선 영상시스템의 공간해상도 평가
기법에 관한 연구

지도 조 효 성 교수

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2005년 12월 일

연세대학교 보건환경대학원

의공학 전공

이 경 하

이경하의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

연세대학교 보건환경대학원

2005년 12월 일

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 많은 지도와 관심을 가져주신 지도교수 조효성 교수님께 깊은 감사를 드리며, 또한 연구의 부족한 부분을 지적해 주시고 조언해 주신 한봉수 교수님, 김희중 교수님께도 감사드립니다. 지난 2년 6개월간의 석사과정동안 많은 가르침을 주신 김영호 교수님, 이윤선 교수님, 김동윤 교수님, 이경중 교수님, 윤행로 교수님, 윤영로 교수님, 신태민 교수님, 김범민 교수님, 김한성 교수님, 김경환 교수님, 이용흠 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 대학원 생활동안 많은 도움을 주신 교학부 강혜영 선생님께도 감사를 드립니다. 연구실에서 바쁘신 와중에도 많은 도움을 주신 최성일 선생님에게도 감사드립니다. 또한 항상 믿음으로 지켜봐 주시고 제가 힘들 때마다 든든한 힘이 되어 주신 이 세상 하나뿐인 부모님께 고개 숙여 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 마지막으로 제 인생의 동반자이자 친구인 남편 김용규에게도 아낌없는 격려와 배려에 깊은 사랑과 고마움 드립니다.

2005년 12월

이경하 올림

차 례

그림 차례	ii
표 차례	iii
국문 요약	iv
제1장 서 론	1
제2장 디지털 X-선 영상시스템의 해상도 평가	2
2.1 디지털 X-선 영상시스템	2
2.2 변조전달함수 측정에 의한 해상도 평가	3
2.2.1 Pinhole 영상측정법	4
2.2.2 Silt 영상측정법	6
2.2.3 Edge 영상측정법	7
2.2.4 구형과형 차트법	8
제3장 영상획득 실험 및 결과 분석	10
3.1 영상시스템 구성 및 영상획득	10
3.2 실험결과 및 분석	12
3.2.1 Pinhole 영상측정법	12
3.2.2 Silt 영상측정법	16
3.2.3 Edge 영상측정법	18
3.2.4 구형과형 차트법	22
제4장 결 론	25
참고 문헌	28
ABSTRACT	29

그림 차례

그림 2.1 디지털 X-선 영상시스템의 구성	2
그림 2.2 의료영상 시스템에서의 변조전달함수의 정의	3
그림 2.3 파사체대조도 및 영상대조도의 정의	4
그림 2.4 Pinhole 영상측정법에 의한 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도 ..	5
그림 2.5 Slit 영상측정법에 의한 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도	7
그림 2.6 Edge 영상측정법에 의한 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도	8
그림 3.1 변조전달함수를 측정하기 위해 사용된 디지털 X-선 영상시스템	10
그림 3.2 변조전달함수 측정에 사용된 테스트 펜텀들	11
그림 3.3 획득된 pinhole 펜텀의 X-선 영상	12
그림 3.4. Pinhole 펜텀을 이용하여 측정된 PSF 곡선	12
그림 3.5 보정된 2차원 PSF 및 MTF의 분포	13
그림 3.6 Pinhole 펜텀을 이용하여 측정된 1차원 PSF 곡선	14
그림 3.7 Pinhole 펜텀을 이용하여 계산된 1차원 MTF 곡선	15
그림 3.8 획득된 slit 펜텀의 X-선 영상	16
그림 3.9 Slit 펜텀을 이용하여 측정된 LSF 곡선	17
그림 3.10 Slit 펜텀을 이용하여 계산된 MTF 곡선	18
그림 3.11 획득된 edge 펜텀의 X-선 영상	19
그림 3.12 Edge 펜텀을 이용하여 측정된 ESF 곡선	19
그림 3.13 Edge 펜텀을 이용하여 측정된 LSF 곡선	20
그림 3.14 Edge 펜텀을 이용하여 계산된 MTF 곡선	21
그림 3.15 획득된 구형과 차트의 X-선 영상	22
그림 3.16 획득된 구형과형 차트 영상의 농도분포	23
그림 3.17 구형과형 차트를 이용하여 계산된 MTF 곡선	23

표 차례

표 2.1 X-선 MTF 측정용 chart의 종류 및 주파수 범위	9
표 4.1 각 측정 방법에 의해 10% MTF 값에 해당하는 공간주파수	29

국 문 요 약

변조전달함수 측정에 의한 디지털 X-선 영상시스템의 공간해상도 평가기법에 관한 연구

본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 화질을 평가하는 객관적 지표 중의 하나인 공간해상도(spatial resolution)를 변조전달함수(modulation transfer function; MTF)의 측정을 통하여 평가하였다. 변조전달함수의 측정방법에는 직경 10 μm 의 pinhole을 이용하는 법, 폭 10 μm 의 slit을 이용하는 법, edge 테스트 펜톱을 이용하는 법, 그리고 구형파형 차트를 이용하는 법을 사용하였으며, 각각의 방법에 의해 계산된 변조전달함수들을 상호 비교하였다. 영상획득에 사용된 디지털 X-선 영상시스템의 구성은 X-선관(60 kV_p, 5 mA), 96x96 μm^2 픽셀크기를 가진 CMOS 광센서, 100 μm 두께의 CsI(Tl) 신틸레이터, 신호처리회로, 영상처리용 GUI console 등이다. 획득된 디지털 X-선 영상 data는 darkness와 brightness 교정을 통하여 전처리(preprocessing) 되었으며, raw data와 전처리된 data를 이용하여 변조전달함수를 각각 계산하였다. 계산된 변조전달함수는 공간주파수(spatial frequency)가 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 일반적인 경향을 보여 주었으며, 10% MTF 값에 해당되는 공간주파수의 값으로써 평가되는 해상도는 각각의 측정방법에 따라 대략 1.8 - 2.2 LP/mm 범위 내에서 근사한 값을 보여 주었다. 또한 raw data와 전처리된 data로부터 계산된 변조전달함수는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여, 주어진 디지털 X-선 영상시스템에 대한 변조전달함수를 다양한 방법으로 측정함으로써 객관적으로 해상도를 평가하는 기법을 정립할 수 있었으며, 향후 유사한 디지털 의료영상 시스템의 해상도 평가에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심 되는 말 : 디지털 레디오그래피, 변조전달함수, X-선 영상시스템, 공간 해상도, 화질평가

제1장 서론

필름-스크린 방식의 아날로그 X-선 영상 촬영법은 우수한 공간해상도와 저렴한 비용으로 인해 아직까지도 임상에서 많이 활용되고 있다. 그러나 이러한 방식은 필름의 보관장소, 현상과정에서 기인할 수 있는 환경오염, 환자 진료시간의 지연, 영상 데이터의 통합관리 및 기존 영상자료의 활용 등에 많은 문제점을 내포하고 있다 [1,2]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 1980년대 후반부터 지금까지 아날로그 X-선 영상정보를 디지털화하는 디지털 X-선 영상검출기에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근에 의료영상 분야에서 방대한 양의 아날로그 영상자료를 DB화 함으로써 영상자료의 관리, 검색 및 전송의 편리함을 도모하고자 하는 병원정보화시스템(hospital information system; HIS), 의료영상자료의 저장 및 전송시스템(picture archiving and communication system; PACS) 등과 같은 의료정보화 시스템의 구축과 맞물려 효율적인 디지털 X-선 영상시스템에 대한 개발의 필요성이 점차 높아지고 있다 [3,4]. 의료영상 데이터의 디지털화는 영상자료를 전산화 및 정보화하는데 유용하고 여러 가지 영상후처리 기법을 적용하여 사용목적에 부합되는 영상으로 재구성할 수 있으며, 디지털 X-선 영상센서의 조사선량에 대한 선형적인 반응특성 및 높은 민감성으로 인해 기존의 필름-스크린 방식에 비해 관용도(latitude)가 넓고 또한 환자의 피폭선량을 줄일 수 있는 장점이 있다 [5].

본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 화질을 평가하는 객관적 지표 중의 하나인 공간해상도(spatial resolution)를 다양한 방법(직경 10 μm 의 pinhole 이용, 폭 10 μm 의 slit 이용, edge 테스트 펜톤 이용, 구형과형 차트 이용)을 통해 변조전달함수(modulation transfer function; MTF)를 측정함으로써 평가하였으며, 그 결과를 상호 비교하였다. 향후 유사한 디지털 의료영상 시스템의 해상도 평가에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

제2장 디지털 X-선 영상시스템의 해상도 평가

2.1 디지털 X-선 영상시스템

필름-스크린 방식의 X-선 영상시스템은 필름 농도와 같은 물리적인 요소에 의해 표현되는 아날로그 영상정보를 다룬다. 이에 비해 디지털 X-선 영상시스템은 X-선 투과에 대한 행렬 값을 나타내는 영상정보를 다루며, 그 구성은 그림 2.1과 같은 검출방식에 따라 직접방식(direct method)과 간접방식(indirect method)으로 나뉜다 [6,7]. 직접방식의 디지털 X-선 영상시스템은 광전도물질(a-Se, HgI₂ 등)을 사용하여 직접 입사 X-선으로부터 생성된 전기적 신호를 검출하여 X-선 영상을 획득하는 방식으로, 간접방식에 비해 영상의 화질을 감소시키는 중간과정 없이 직접 전기적 신호를 발생하고 외부 인가 전기장 하에서 정공 및 전자가 픽셀 전극을 향해 유도되어 픽셀의 저장 capacitor에 수집된다. 간접방식은 섬광물질(CsI:Tl, NaI:Tl, CdWO₄ 등)을 이용하여 입사 X-선을 가시광으로 전환시킨 후 수광소자(CCD, CMOS, photodiode array 등)를 사용하여 X-선 영상을 획득하는 방식이다.

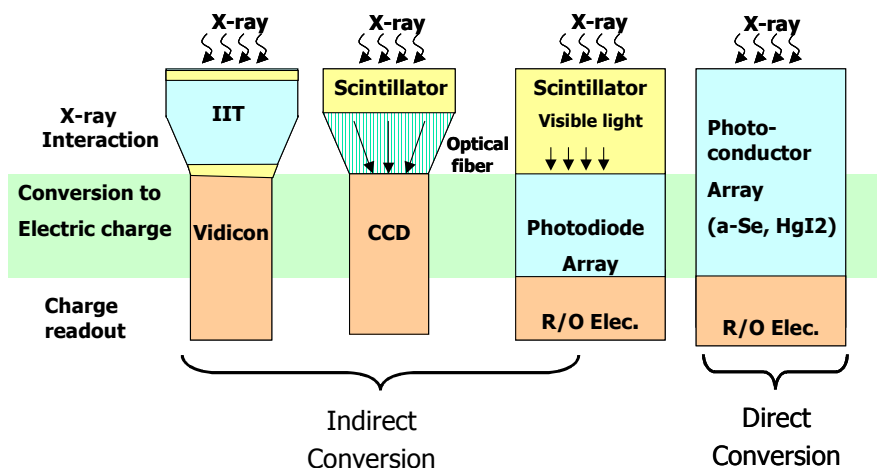


그림 2.1 디지털 X-선 영상시스템의 구성

2.2 변조전달함수 측정에 의한 해상도 평가

영상의 화질을 평가하는 정량적인 지표 중의 하나는 공간해상도이며 공간해상도의 평가에는 변조전달함수가 널리 사용되고 있다. 변조전달함수는 영상시스템의 주파수 응답(frequency response) 특성을 나타내는 것으로써(그림 2.2), 식 (1)에 나타낸 것과 같이 임의의 공간주파수(spatial frequency) f 에 대해 피사체대조도(subject contrast; C_{in})에 대한 영상대조도(image contrast; C_{out})의 비를 공간주파수 0에 대한 MTF로 정규화시킨 것으로 정의되며, 공간정보를 기록하는 영상시스템의 성능을 의미한다 [8,9]. 즉 변조전달함수가 우수하다는 것은 원래(original)의 정보를 충실히 표현하는 해상도(미세한 부분을 재현하는 능력)와 선예도(X-선 감약이 다른 두 부분의 경계를 구별할 수 있는 능력)가 높은 것을 의미한다.



그림 2.2 의료영상 시스템에서의 변조전달함수의 정의

$$MTF(f) = \frac{C_{in}(f)}{C_{out}(f)} / MTF(0) \quad (1)$$

특히 그림 2.3에서와 같이 피사체를 통과한 X-선의 강도분포와 그 때의 영상의 농도분포가 주기함수로 나타날 때 $C_{in}(f)$ 와 $C_{out}(f)$ 는 각각 식 (2)와 (3)과 같이 계산된다. 여기서 X_{max} , X_{min} 은 피사체를 투과한 X-선의 최대 강도 및 최소 강도를, 그리고 G_{max} , G_{min} 은 영상의 최대 농도값 및 최소 농도값을 각각 의미한다.

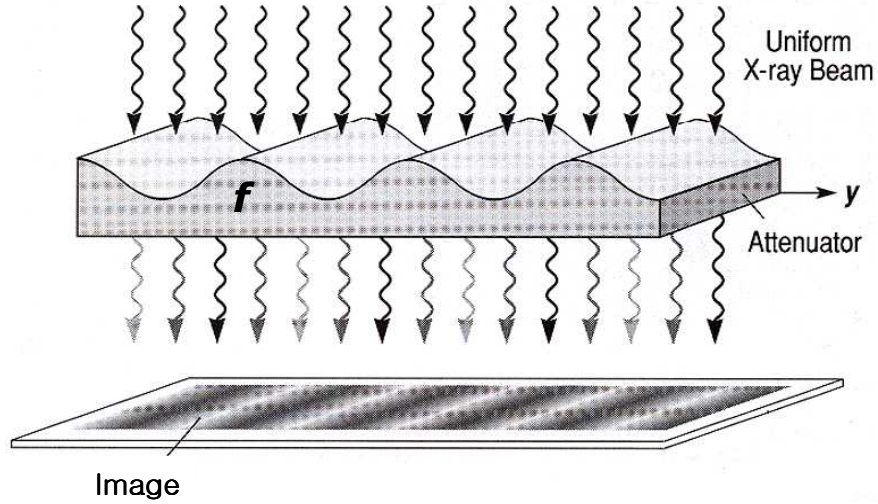


그림 2.3 피사체를 통과한 X-선의 강도분포 및 그 때의 영상의 농도분포가 주기함수로 표현될 때의 과사체대조도 및 영상대조도의 정의

$$C_{in}(f) = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{max} + X_{min}} \quad (2)$$

$$C_{out}(f) = \frac{G_{max} - G_{min}}{G_{max} + G_{min}} \quad (3)$$

일반적으로 변조전달함수를 측정하는 방법에는 pinhole 영상 측정법, slit 영상 측정법, edge 영상 측정법, 그리고 구형과 차트법 등이 사용된다.

2.2.1 Pinhole 영상측정법

공간해상도를 평가하는 유용한 방법 중 하나는 delta function(δ)에 대한 영상

시스템의 반응을 보는 것이며, 그 반응특성을 point spread function(PSF)이라 부른다. 현실적으로 delta function은 직경 10 μm 의 미세 hole을 가진 pinhole 펜톱을 사용하여 표현되며 그 때의 PSF의 반폭치(full-width at half maximum; FWHM)로서 해상도를 표현하는 경우도 있다. 그림 2.4는 직경 10 μm 의 pinhole 펜톱을 이용하여 변조전달함수를 구하는 과정을 모식화한 것으로써, pinhole에 대한 X-선 영상을 획득한 후 Fourier transformation 과정을 거치면 2차원 변조전달함수인 MTF(u,v)가 구해진다. 여기서 u, v는 각각 x, y에 대한 공간주파수 성분을 나타낸다. 그림 2.4에서 나타난 바와 같이 영상시스템의 입력에 해당되는 pinhole의 주파수 성분은 모든 주파수 성분이 균일하게 포함되어 있으며, 따라서 PSF의 주파수 성분의 분포인 MTF(u,v)는 영상시스템의 2차원 주파수 응답특성을 나타낸다.

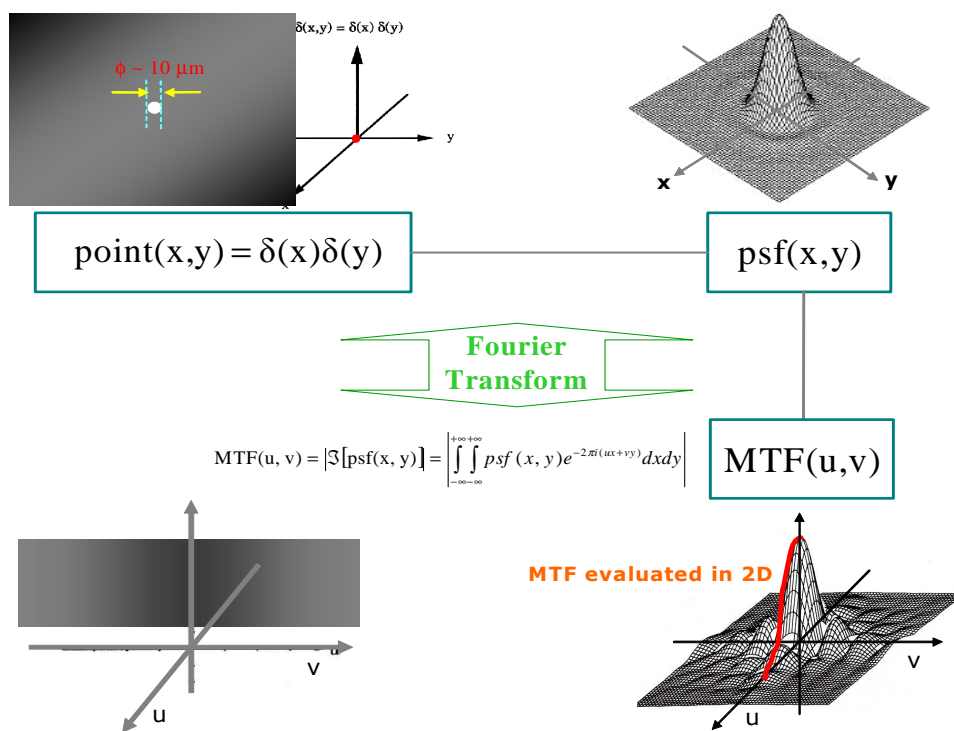


그림 2.4 Pinhole 영상측정법에 의한 2차원 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도

2.2.2 Slit 영상측정법

Slit 영상측정법은 점(point)의 1차원인 일련의 line에 대한 영상시스템의 반응을 보는 것으로써 그 반응특성을 line spread function(LSF)이라 부른다. 현실적으로 line은 직경 10 μm 의 미세 간격을 지닌 slit 펜툼을 사용하여 표현된다. 그림 2.5는 slit 펜툼을 이용하여 변조전달함수를 구하는 과정을 모식화한 것으로써, slit에 대한 영상을 획득한 후 Fourier transformation 과정을 거치면 1차원 변조전달함수인 $\text{MTF}(u,0)$ 가 구해진다. 그림 2.5에서 나타낸 바와 같이 영상시스템의 입력에 해당되는 line의 주파수 성분은 1차원 주파수 성분이 균일하게 포함되어 있으며, 따라서 LSF의 주파수 성분의 분포인 $\text{MTF}(u,0)$ 는 영상시스템의 1차원 주파수 응답특성을 나타낸다. 2차원 PSF의 분포가 등방향적(isotropic)이면 1차원 $\text{MTF}(u,0)$ 로도 충분히 영상시스템의 주파수 응답특성을 기술할 수 있다.

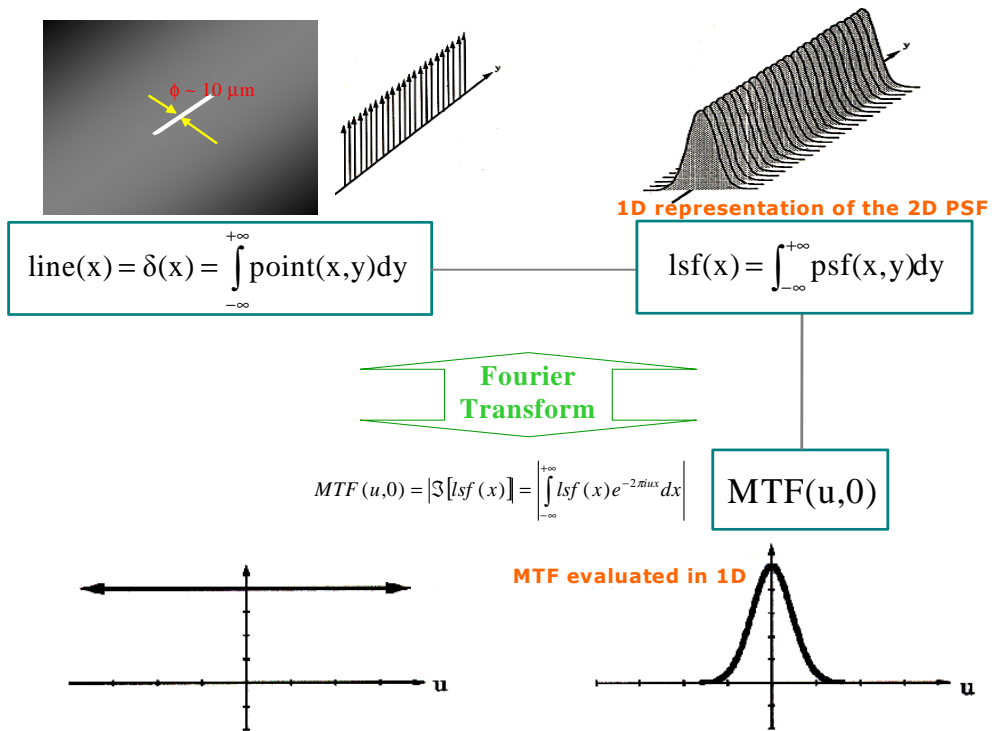


그림 2.5 Slit 영상측정법에 의한 1차원 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도

2.2.3 Edge 영상측정법

Edge 영상측정법은 텅스텐이나 납으로 만들어진 예리한 edge 테스트 펜툼을 사용하는 것을 제외하고는 slit 영상측정법과 유사하다. Edge에 대한 영상시스템의 반응특성을 edge spread function(ESF)이라 부르며, 이를 미분하면 slit 영상측정법에서와 같이 LSF이 계산된다. 그림 2.6은 edge 펜툼을 이용하여 1차원 변조전달함수를 구하는 과정을 모식화한 것이다.

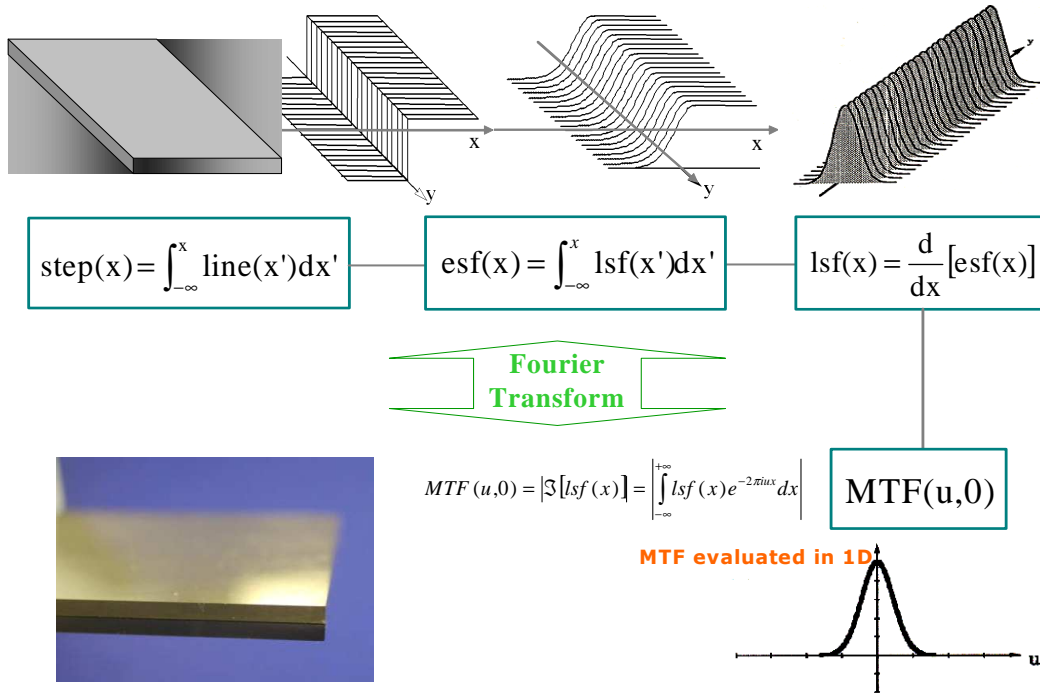


그림 2.6 Edge 영상측정법에 의한 1차원 변조전달함수를 구하는 과정의 모식도

2.2.4 구형과형 차트법

변조전달함수는 영상시스템의 입력강도가 정현파형(sinusoidal)일 때 정의되나 정현파형 차트는 그 제작이 어려우므로 실제 구형과형(rectangular) chart를 사용하여 구하게 되며, Coltman의 관계식을 적용하여 최종 MTF로 환산하게 된다. 구형과 차트법에 의한 MTF의 측정순서는 다음과 같다.

- (1) 적절한 구형과 chart의 선정 : 사용할 전압이나 필요 주파수 영역 등을 고려해서 선택해야 한다. X-선 MTF 측정용 chart에는 다음과 같이 규격화 되어 있다.

표 2.1 X-선 MTF 측정용 chart의 종류 및 주파수 범위

용도	종류	주파수범위 (단위LP/mm)
일반용	M-IW 50R,M-IPB 50R M-IW 50D,M-IPB 50D	0.5~5.0
고압용	M-IW 100R,M-IPb100R M-IW 100D,M-IPB 100D	
저압용	M-2SUS 45R,M-2년 45D	1.0~8.0
	M-2Sn40R,M-2Sn40D	0.5~10.0
II용	M-3W 100R,M-3Pb100R	0.5~6.3
	M-3W 100D,M-3Pb100D	0.5~6.0
확대용	M-4Au 30R	2.0~20

(2) 구형과 chart의 촬영 : chart를 영상시스템에 밀착해서 촬영한다. 이때 X-선속의 중심을 chart의 중앙에 맞추어야 한다. Chart 영상에 의한 구형과형 MTF를 각각의 공간주파수에 해당되는 부분의 고농도부(G_{max})와 저농도부(G_{min})의 값을 측정하여 구한다.

(3) Coltman의 관계식을 이용하여 구형과형 MTF를 정현과형 MTF로 변환한다. 이 때 사용되는 Coltman 관계식은 식 (4)와 같다:

$$R(u) = \frac{\pi}{4} \left(S(u) + \frac{1}{3} S(3u) - \frac{1}{5} S(5u) + \frac{1}{7} S(7u) - \frac{1}{9} S(9u) + \dots \right) \quad (4)$$

여기서 $R(u)$ 및 $S(u)$ 는 각각 정현과형 및 구형과형에 대한 MTF를 나타내며, u 는 공간주파수(LP/mm)를 나타낸다.

제3장 영상획득 실험 및 결과 분석

3.1 영상시스템 구성 및 영상획득 실험

본 연구에서 사용된 디지털 X-선 영상시스템은 X-선관(60 kV_p, 5 mA), 96 μm x 96 μm 픽셀크기를 가진 CMOS 광센서, X-선을 가시광으로 변환시켜 주는 100 μm 두께의 CsI(Tl) 신틸레이터, 신호처리회로, 영상처리용 GUI console로 구성되었다. 그림 3.1은 구성된 디지털 X-선 영상시스템을 보여 준다(좌: CMOS 광센서, 중: 테스트 펜텀, 우: X-선관). 이 때 사용된 테스트 펜텀들은 아크릴 판을 이용하여 확대율 M이 1.3이 되도록 X-선관과 CMOS 광센서 사이에 위치시켰다.

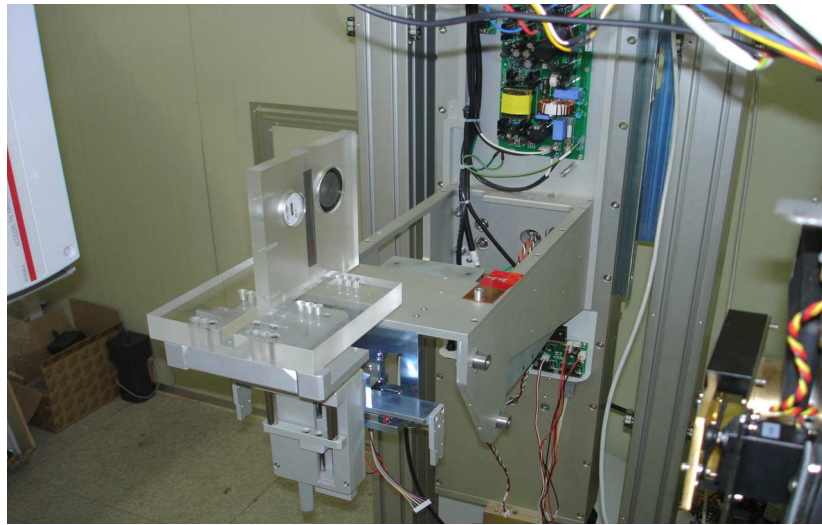
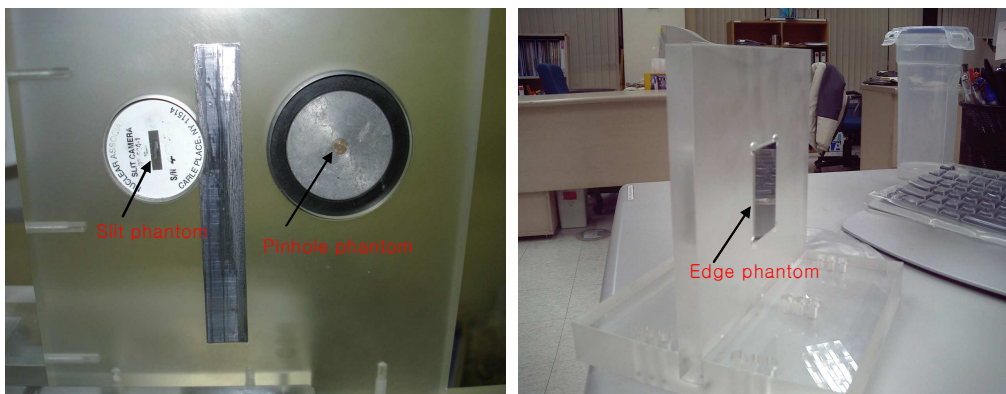


그림 3.1 변조전달함수를 측정하기 위해 사용된 디지털 X-선 영상시스템

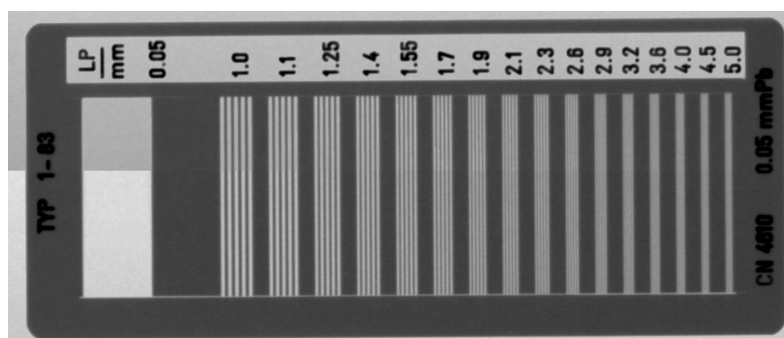
사용된 테스트 펜텀들은 Nuclear Associates 사의 pinhole camera(Model: 07-633), single slit camera(Model: 07-624), 구형과형 차트(Model: 07-523; < 5

LP/mm)를 이용하였으며, edge 펜툼은 3 mm 두께의 stainless steel의 한쪽 끝을 밀링 처리하여 제작하였다. 그림 3.2는 사용된 테스트 펜툼들의 실물을 보여 준다.



(a)

(b)



(c)

그림 3.2 변조전달함수 측정에 사용된 테스트 펜툼들: (a) silt 및 pinhole 펜툼, (b) edge 펜툼, (c) 구형과형 차트

디지털 X-선 영상시스템으로부터 촬영된 테스트 펜툼 영상의 보정 (preprocessing)을 위하여 테스트 펜툼이 없이 X-선관을 off한 상태에서 dark 영상을, 그리고 X-선관을 on한 상태에서 bright 영상을 촬영하여 매 번 영상의 raw data에서 보정하였다. 영상획득에 사용된 X-관의 관전압은 60 kV_p이며, 관전류는 5 mA이다.

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 Pinhole 영상 측정법

그림 3.3은 변조전달함수를 구하기 위해 pinhole 펜텀을 사용하여 촬영한 X-선 영상을 보여 준다((a): raw data, (b) corrected data). 중심에 pinhole 영상이 선명하게 나타남을 알 수 있으며, 상하의 점 영상은 pinhole 펜텀을 지지하고 있는 물체의 영상이다. 그림 3.4는 획득된 X-선 영상의 2차원 PSF 분포를 보여 준다.

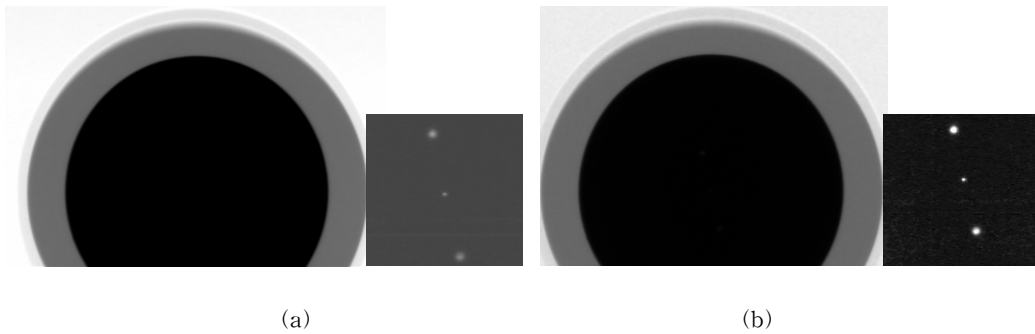


그림 3.3 획득된 pinhole 펜텀의 X-선 영상: (a) raw data, (b) corrected data

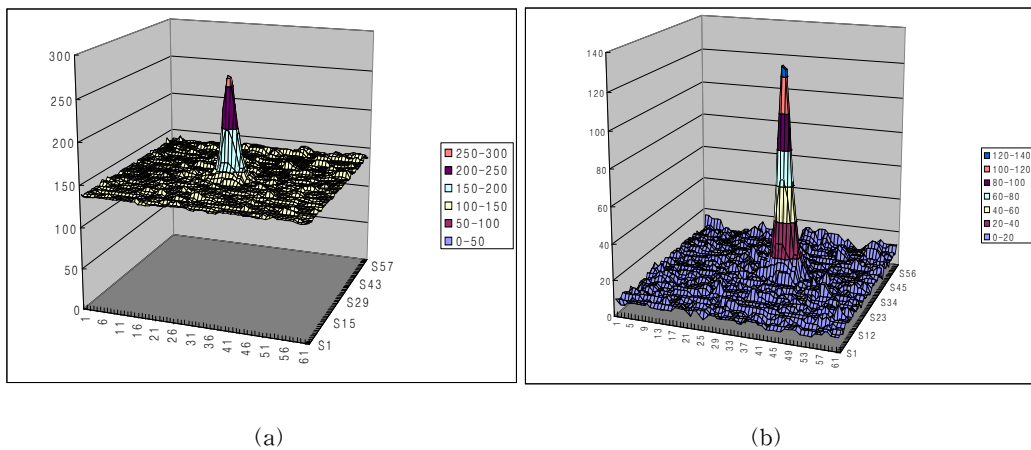


그림 3.4. Pinhole 펜텀을 이용하여 측정된 PSF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

측정된 PSF로부터 변조전달함수를 구하기 위해서 pinhole 주변의 grayscale를 최소 grayscale 값으로 보정한 후 Fourier transformation을 취하였다. 그림 3.5는 보정된 PSF 분포와 이 때 계산된 2차원 MTF 곡선을 보여 준다. 그림 3.6은 측정된 2차원 PSF로부터 1차원 PSF를 구하기 위해 x와 y 방향으로 최고점을 지나는 궤적을 따라 각각의 농도분포를 측정하였다.

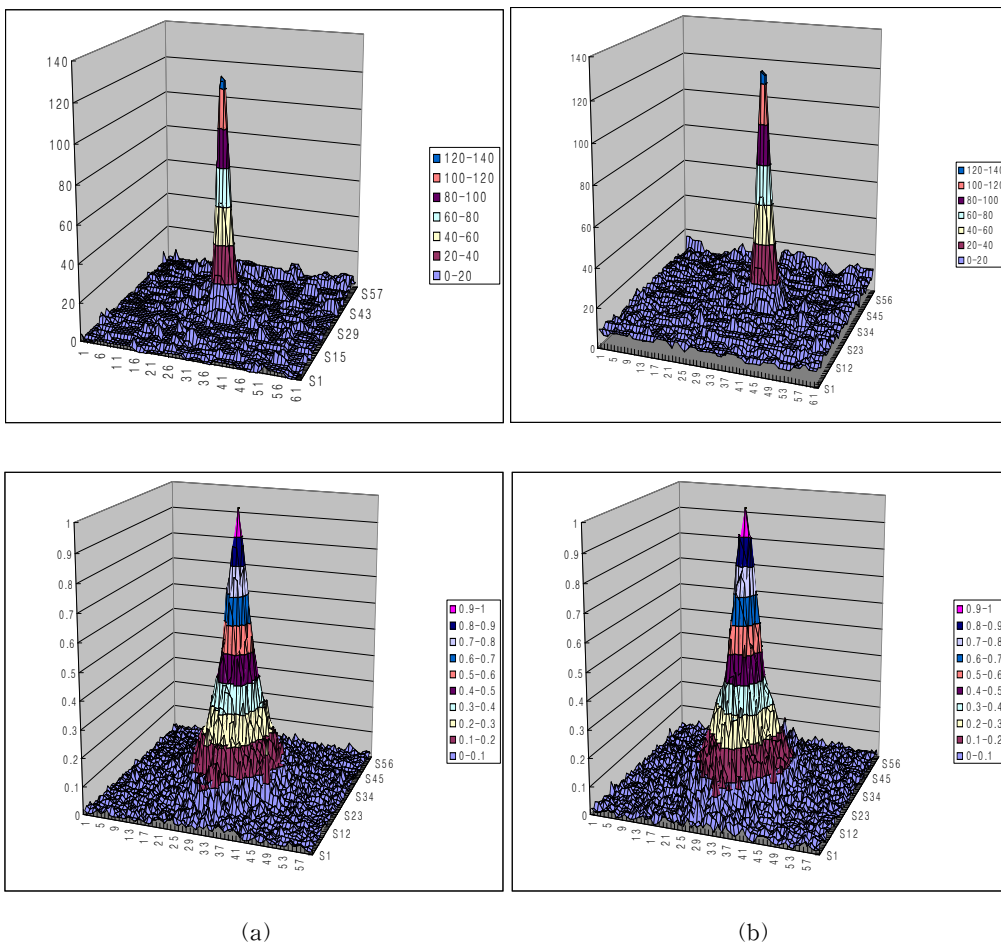
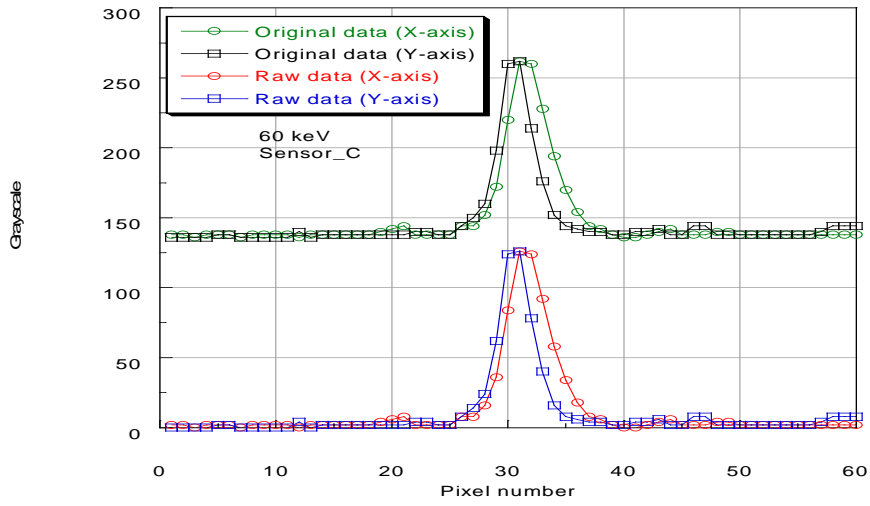
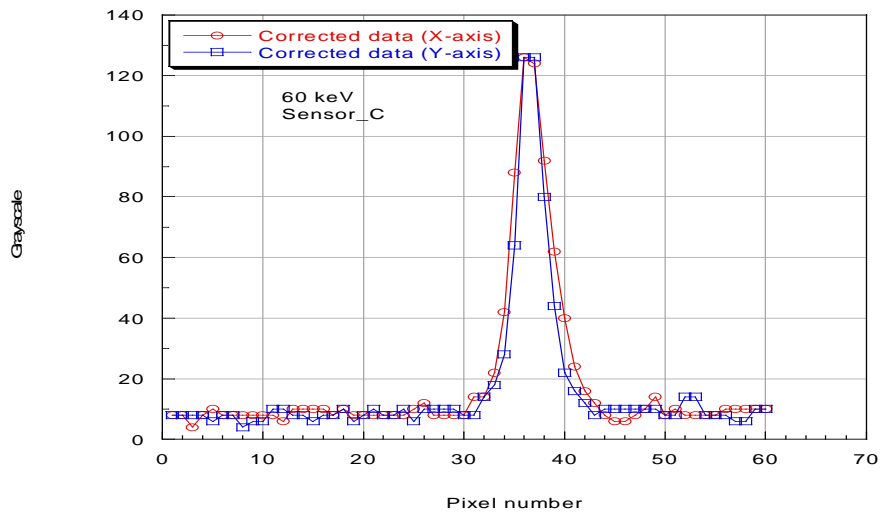


그림 3.5 보정된 2차원 PSF 및 MTF의 분포: (a) raw data, (b) corrected data



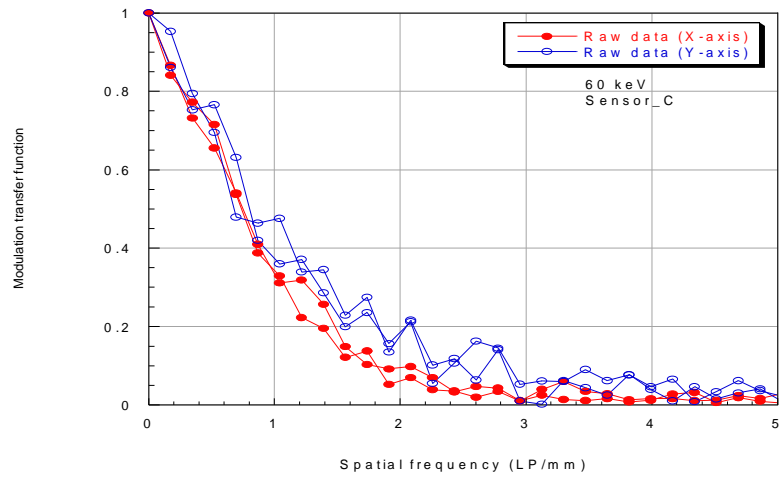
(a)



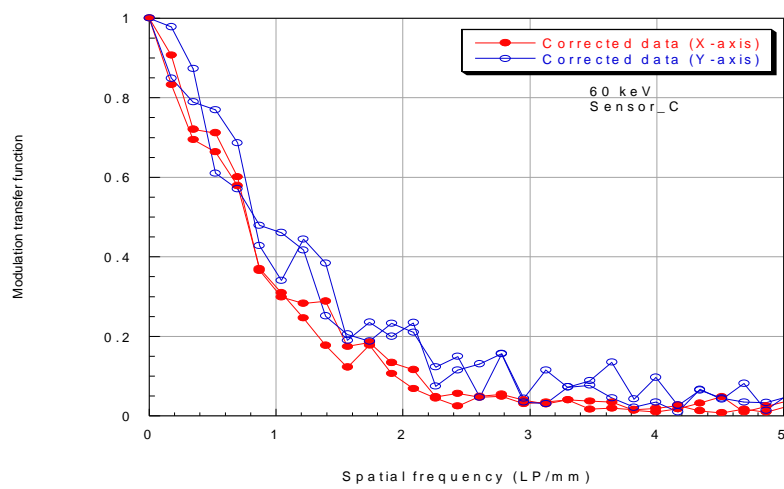
(b)

그림 3.6 Pinhole 펜텀을 이용하여 측정된 x, y방향으로의 1차원 PSF 곡선: (a) raw data,

(b) corrected data



(a)



(b)

그림 3.7 Pinhole 펜텀을 이용하여 계산된 1차원 MTF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

그림 3.7은 Fourier transformation 한 후, 최종적으로 계산된 1차원 MTF 곡선을 보여 준다. 일반적으로 공간해상도는 MTF 값이 10%일 때의 공간주파수로 평가 되는데, 그림 3.7에 나타낸 바와 같이 pinhole 영상측정법에 의한 공간해상도는 약 1.8 LP/mm 정도였으며, 보정 전후의 해상도 값은 거의 변화가 없었다. 또한 x, y 방향으로의 MTF 값은 동일하지 않고 약간의 편차를 가지고 있는데 이는 사용된 디지털 X-선 영상시스템의 광특성이 부분적으로 차이가 있음으로 인해 기인되었다고 생각된다.

3.2.2 Slit 영상 측정법

그림 3.8은 변조전달함수를 구하기 위해 slit 펜툼을 사용하여 촬영한 X-선 영상을 보여 준다((a): raw data, (b) corrected data). 그림 3.9는 slit 영상을 가로 질러 임의의 한 궤적을 따라 측정된 LSF를 보여 준다.

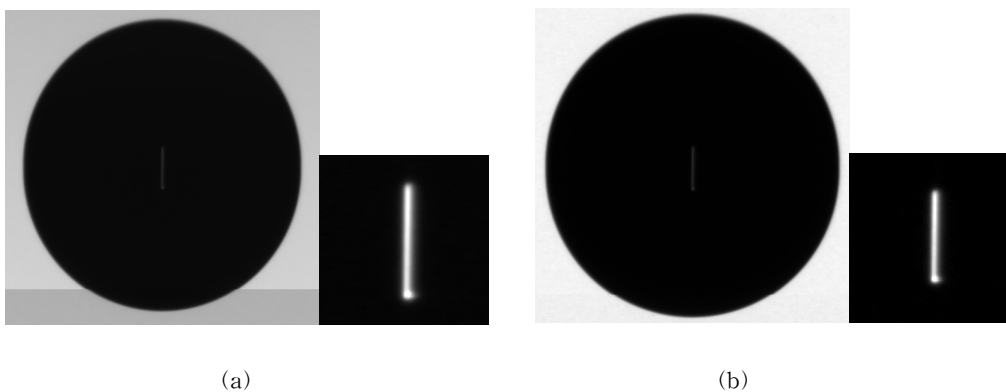
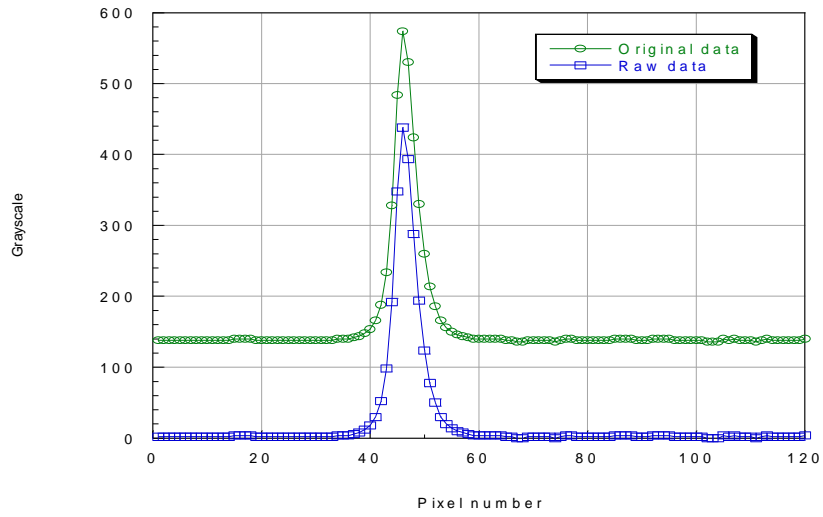
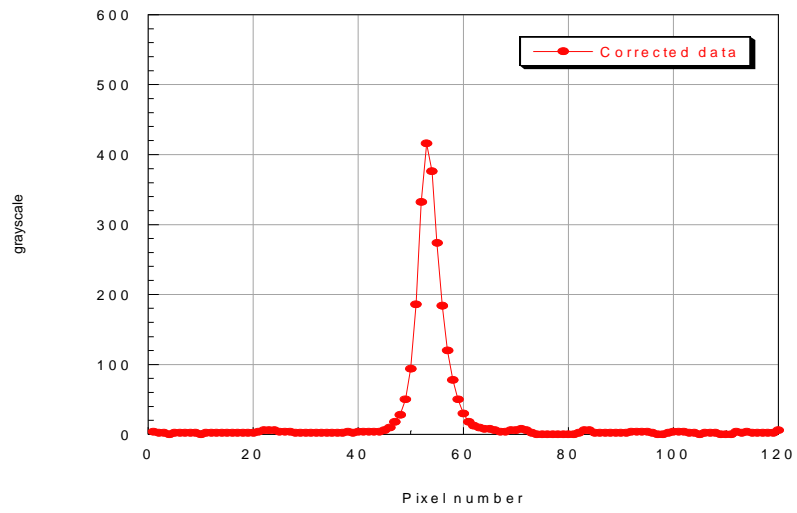


그림 3.8 획득된 slit 펜툼의 X-선 영상: (a) raw data, (b) corrected data



(a)



(b)

그림 3.9 Slit 펜툼을 이용하여 측정된 LSF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

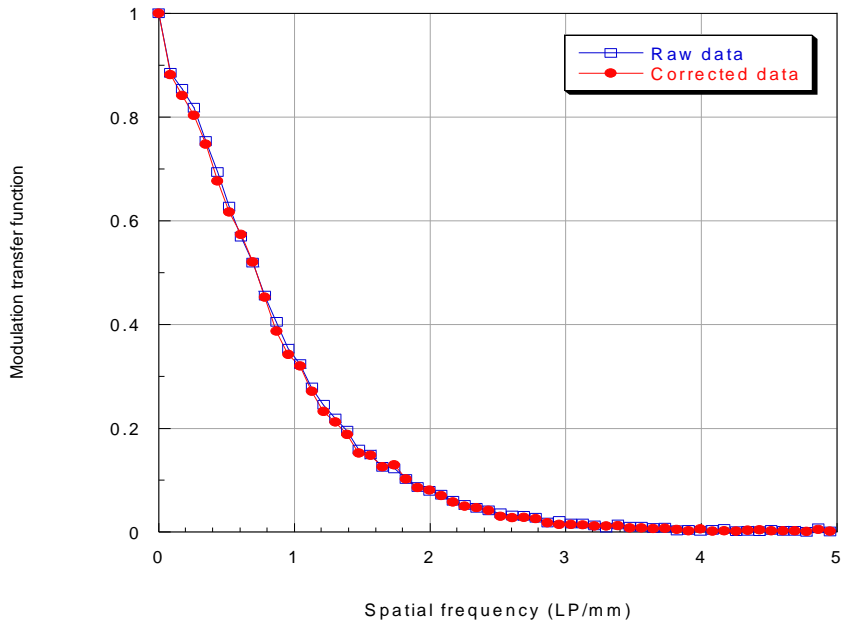


그림 3.10 Slit 펜톤을 이용하여 계산된 MTF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

그림 3.10은 slit 펜톤을 이용하여 최종적으로 계산된 MTF 곡선을 보여 준다. 그림 3.10에서 나타난 바와 같이 slit 영상측정법에 의한 공간해상도는 약 1.8 LP/mm 정도였으며, 보정 전후의 해상도 값은 거의 변화가 없었다.

3.2.3 Edge 영상 측정법

그림 3.11은 변조전달함수를 구하기 위해 edge 펜톤을 사용하여 촬영한 X-선 영상을 보여 준다((a): raw data, (b) corrected data). 그림 3.12는 edge 영상의 능도분포인 ESF 곡선을 보여 준다.



그림 3.11 획득된 edge 펜툼의 X-선 영상: (a) raw data, (b) corrected data

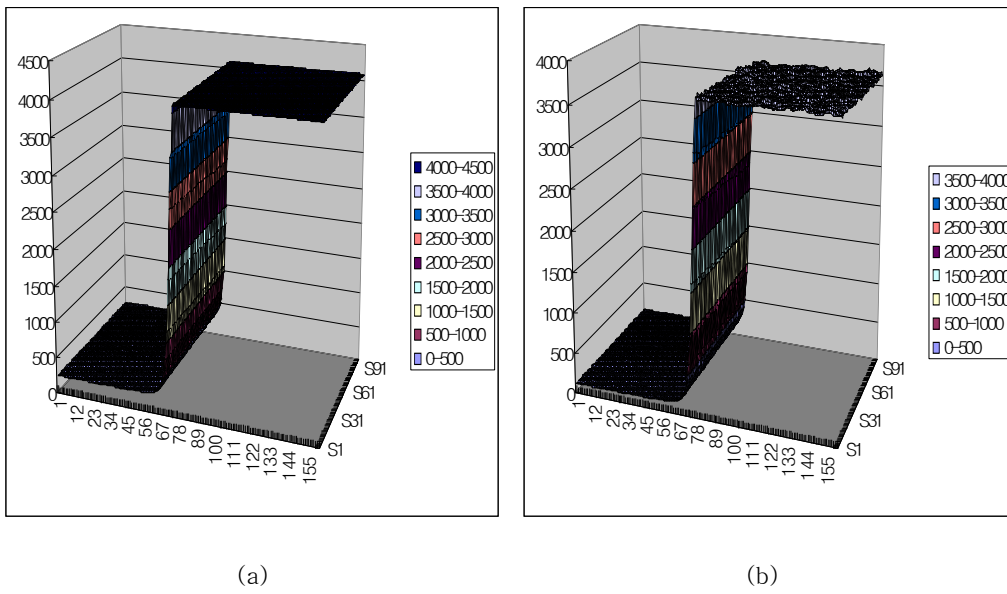
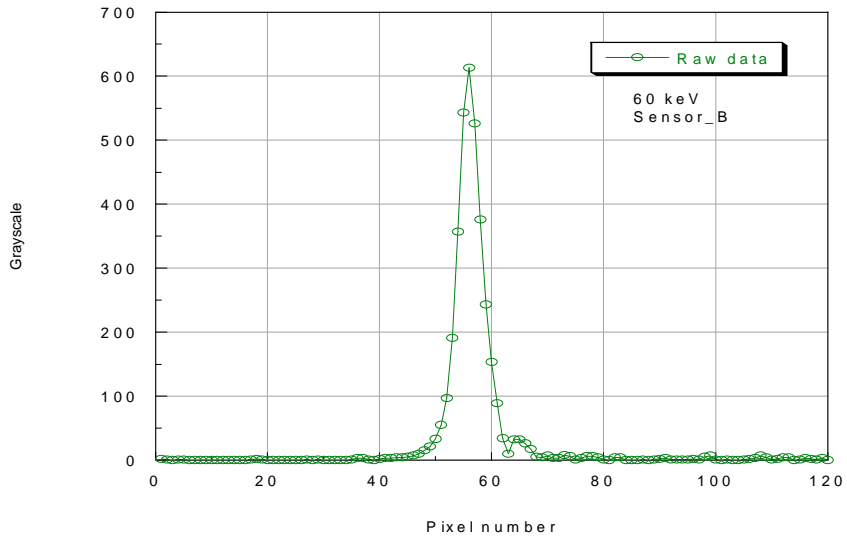
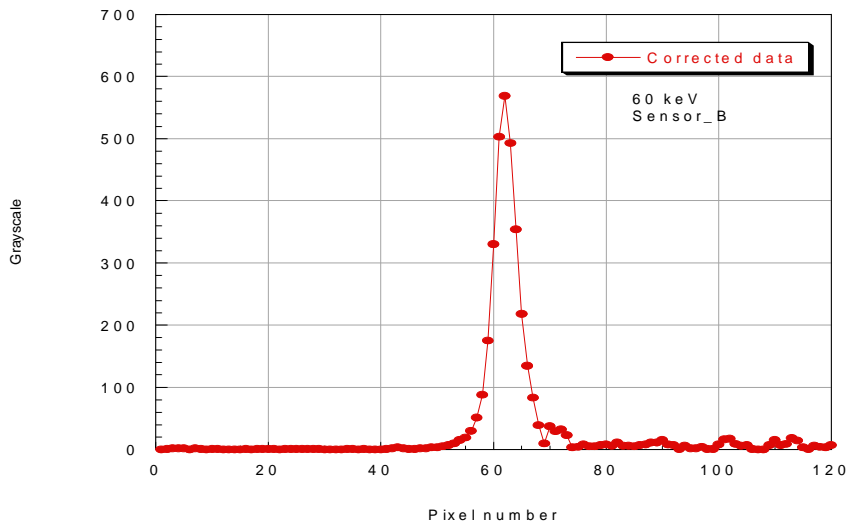


그림 3.12 Edge 펜툼을 이용하여 측정된 ESF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data



(a)



(b)

그림 3.13 Edge 펜텀을 이용하여 측정된 LSF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

그림 3.13은 그림 3.12에서 나타낸 ESF를 미분하여 구한 LSF 곡선을 보여 준다. 그림 3.14는 edge 펜툼을 이용하여 최종적으로 계산된 MTF 곡선을 보여 준다. 그림 3.14에서 나타낸 바와 같이 edge 영상측정법에 의해 계산된 공간해상도는 약 1.6 LP/mm 정도였으며, 보정 전후의 해상도 값은 거의 변화가 없었다.

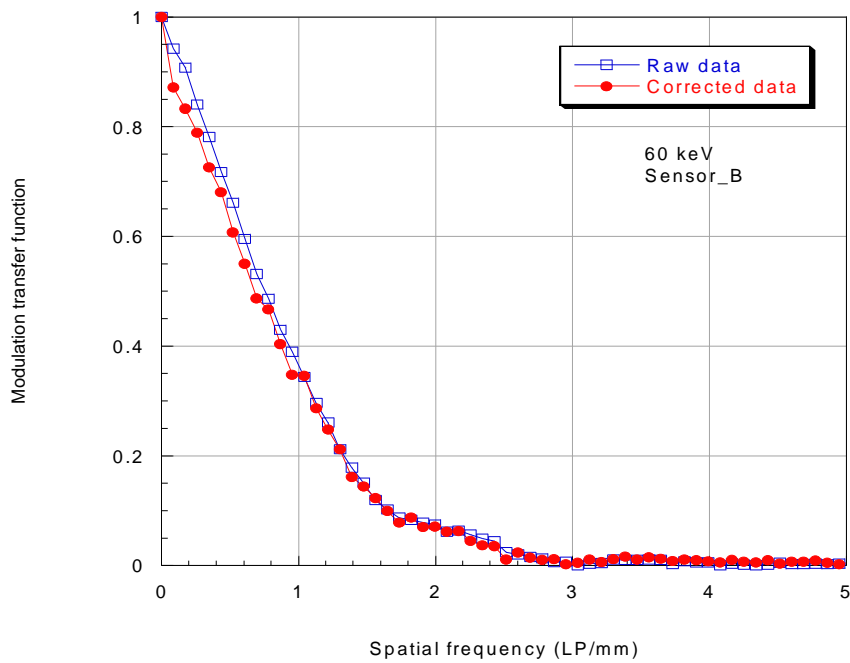


그림 3.14 Edge 펜툼을 이용하여 계산된 MTF 곡선: (a) raw data, (b) corrected data

3.2.4 구형과형 차트법

그림 3.15는 변조전달함수를 구하기 위해 구형과 차트를 사용하여 촬영한 X-선 영상을 보여 준다((a): raw data, (b) corrected data). 그림 3.16은 이 때 획득된 구형과형 영상을 가로 질러 측정된 농도분포를 나타내고 있다.

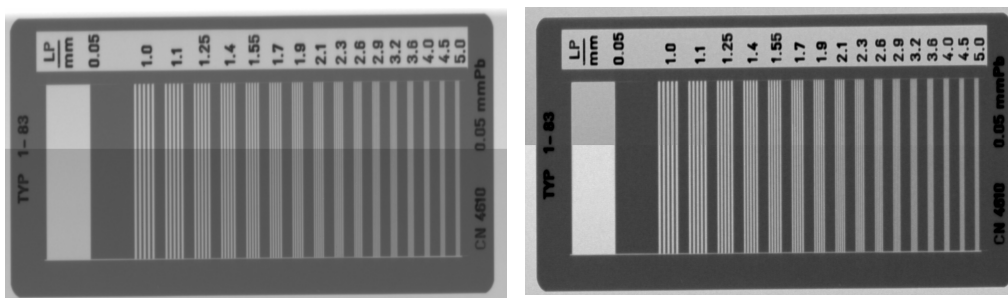
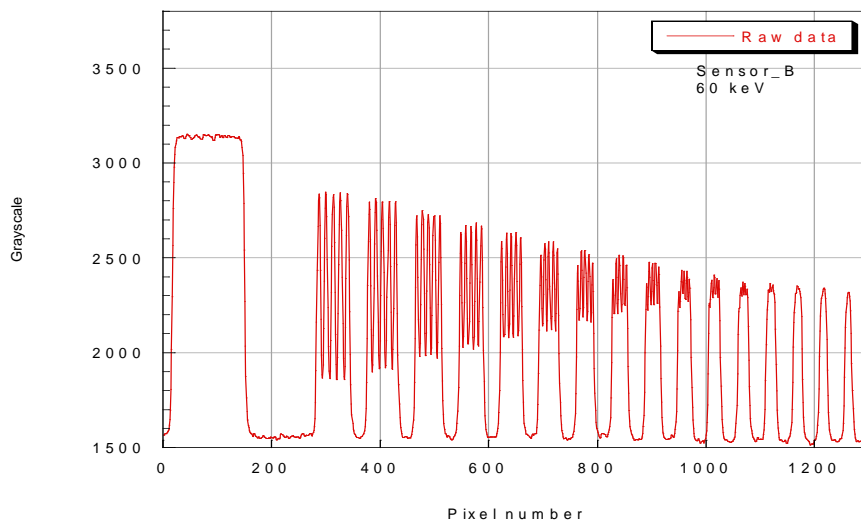
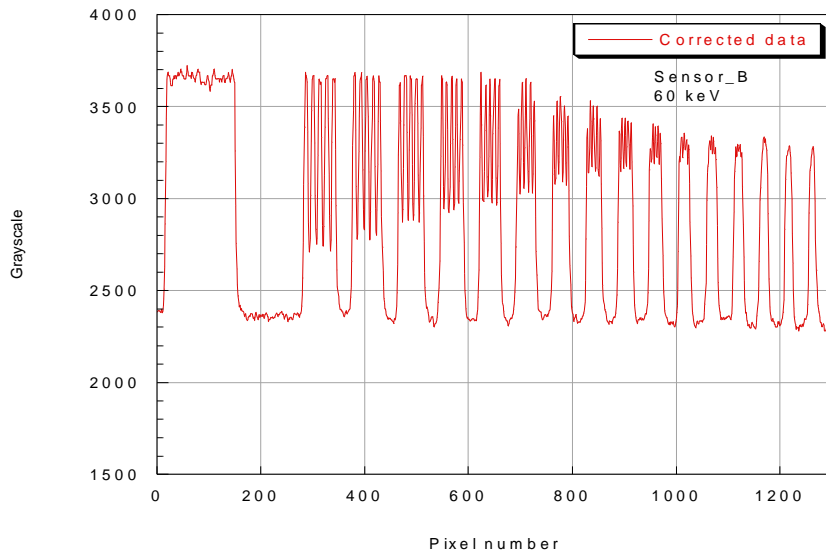


그림 3.15 획득된 구형과 차트의 X-선 영상: (a) raw data, (b) corrected data



(a)



(b)

그림 3.16 획득된 구형파형 차트 영상의 농도분포: (a) raw data, (b) corrected data

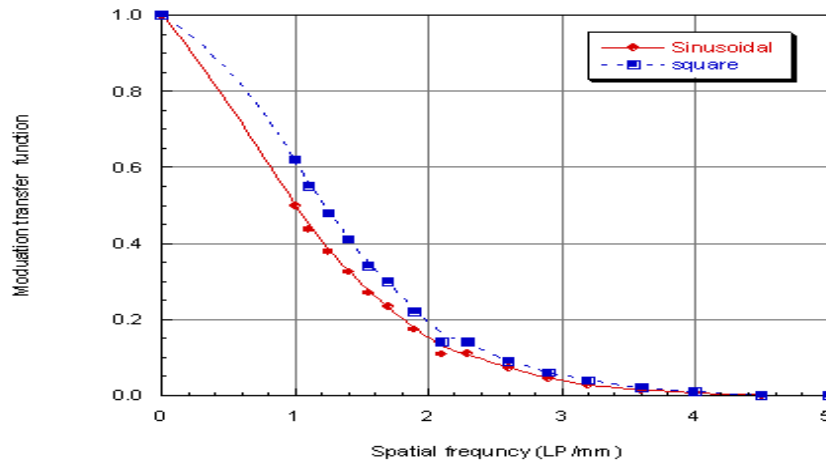


그림 3.17 구형파형 차트를 이용하여 계산된 MTF 곡선

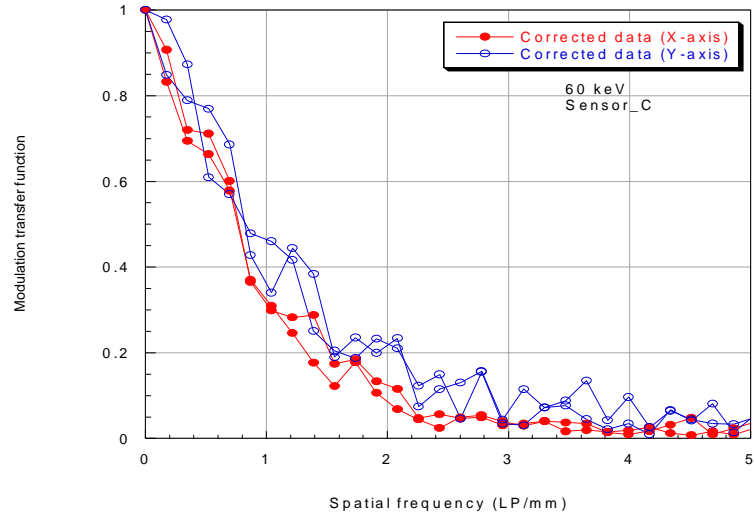
그림 3.17은 구형과형 차트를 이용하여 최종적으로 계산된 MTF 곡선을 보여 준다. 그림 3.17에서 나타낸 바와 같이 구형과형 차트법에 의한 공간해상도는 약 2.2 LP/mm 정도였다.

제4장 결 론

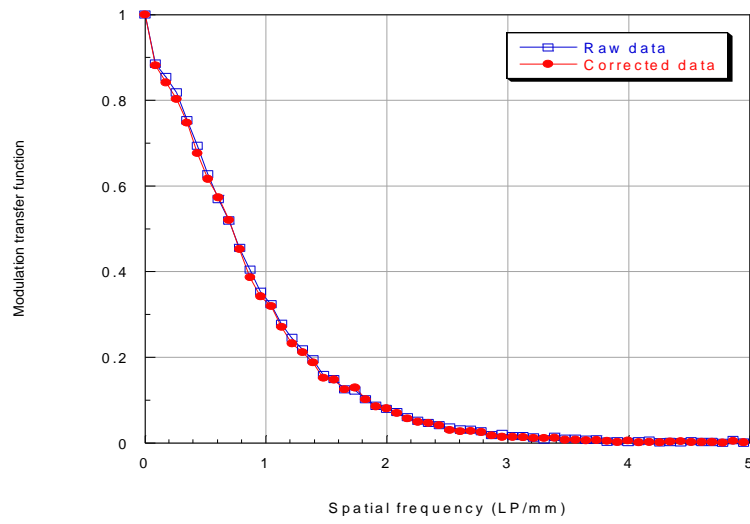
본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 화질을 평가하는 객관적 지표 중의 하나인 공간해상도를 다양한 방법(직경 10 μm 의 pinhole 이용, 폭 10 μm 의 slit 이용, edge 테스트 펜툼 이용, 구형과형 차트 이용)을 통해 변조전달함수를 측정함으로써 평가하였으며, 그 결과를 상호 비교하였다. 각 방법에 의해 측정된 최종 변조전달함수 곡선은 아래 그림과 같으며, 10% MTF 값에서 평가된 공간주파수는 표 4.1에 나타낸 바와 같이 대략 1.8 LP/mm로 평가되었으며, 각각의 측정법에 의한 결과들은 약 10% 범위 내에서 일치하였다. 특히 edge 영상법에 의한 결과가 pinhole이나 slit 영상법에 의한 결과보다 나쁘게 평가된 이유 중의 하나는 제작된 edge 펜툼의 가장자리가 정밀하게 가공되지 않으므로써 기인하였다고 판단되며, 구형과형 차트법에 의한 결과의 차이는 Coltman 관계식에 의해 근사적으로 평가됨으로써 기인된다고 생각된다. 결과적으로 slit 영상측정법이 가장 정확한 1차원 변조전달함수 곡선을 도출하였으며 pinhole 영상측정법은 2차원 변조전달함수를 필요로 할 때 유용한 측정법임을 알 수 있었다. 향후 유사한 디지털 의료영상 시스템의 해상도 평가에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

표 4.1 각 측정 방법에 의해 10% MTF 값에 해당하는 공간주파수

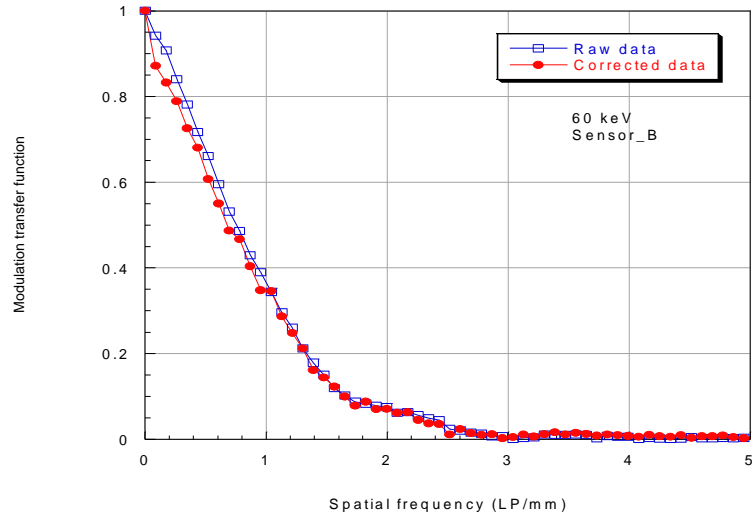
측정 방법	10% MTF에 해당하는 공간주파수(LP/mm)
Pinhole 영상측정법	~ 1.8
Slit 영상측정법	~ 1.8
Edge 영상측정법	~ 1.6
구형과형 차트법	~ 2.2



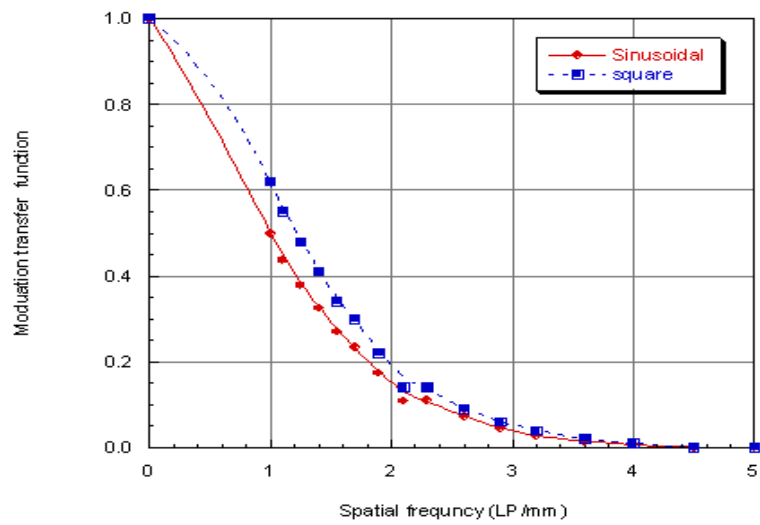
[Pinhole 영상측정법에 의한 MTF 곡선]



[Slit 영상측정법에 의한 MTF 곡선]



[Edge 영상측정법에 의한 MTF 곡선]



[구형과형 차트법에 의한 MTF 곡선]

참 고 문 헌

- [1] 김영일 외 18인, *Analog and Digital 의료영상정보학*, 대학서림, 2001.
- [2] <http://www.etimesi.com/news>.
- [3] H.J. Kim, "analysis of an a-Si:H PIN Diode for the Flat Panel Detector; Leakage Current and Radiation Damages", KAIST Ph.D. Thesis, 2002.
- [4] K. Fetterly and N. Hangiandreou, "Image Quality Evaluation of a Desktop Computed Radiography System", *Med. Phys.*, Vol. 27, pp. 2669-2679, 2000.
- [5] 권덕문 외 13인, *의료영상정보학의 실험과 분석·토의*, 흥퍼냄, 2005.
- [6] K. Kump, P. Granfors, and P. Gobert, "Digital X-ray Detector Technology", Elsevier, pp. 221-226, 1998.
- [7] A. Smith, *Fundamentals of Digital Mammography: Physics, Technology and Practical Considerations*, Direct Ray Technology Co., 2003.
- [8] L. Antonuk, J. Siewerdsen, and W. Huang, "Radiation Response of Amorphous Silicon Imaging Array at Diagnostic Energy", *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 41, pp. 1500-1505, 1994.
- [9] B. Hasegawa, *Medical X-ray Imaging*, Med. Phys. Publishing Co., 1991.

ABSTRACT

A Study on the Spatial-Resolution Evaluation Techniques for a Digital X-ray Imaging System by Measuring Modulation Transfer Function (MTF)

Lee, Kyeong Ha

Dept. of Biomedical Engineering

The Graduate School

Yonsei University

In this study, we have evaluated the spatial resolution of a digital X-ray imaging system by measuring modulation transfer function (MTF). In MTF measurements we used four different methods using a pinhole of a 10 μm diameter, a slit of a 10 μm width, a edge test phantom, and a line test pattern, and compared each result for comparison. The digital X-ray imaging system we tested consists of a conventional X-ray generator (60 kV_p, 5 mA), a CMOS photosensor of a 96x96 mm² pixel size, a CsI(Tl) scintillator of a 100 μm thickness, a readout board for signal processing, and a GUI console for image processing. The acquired digital X-ray image data were postprocessed with a dark and bright correction process, and both the raw and the corrected image data were used to calculate corresponding MTF curves. The resulting MTF curves, as expected, decreased gradually with spatial frequency, and the spatial frequencies at the 10% MTF value were in the range of 1.8-2.2 LP/mm, depending on the used techniques, with a discrepancy of about 10%. In addition, the MTF curves were almost identical for the raw and corrected

data.

We hope this study will be helpful for the MTF measurements of similar digital X-ray imaging systems in the future.

Key words : digital radiography, modulation transfer function, X-ray imaging system, spatial frequency, image quality evaluation