

CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선  
영상시스템의 구현 및 영상특성  
평가에 관한 연구

연세대학교 대학원

의공학과

정 만 희

CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선  
영상시스템의 구현 및 영상특성  
평가에 관한 연구

지도 조 효 성 교수

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2004년 6월 일

연세대학교 대학원

의공학과

정 만 희

정만희의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

연세대학교 대학원

2004년 6월 일

## 감사의 글

먼저, 오늘의 제가 있기까지 항상 곁에서 힘이 되어 주시고 깊은 이해와 믿음으로 후원해주신 사랑하는 부모님과 여동생 윤희에게 감사드립니다.

항상 인격적으로 따뜻한 격려와 바른길을 제시해주시고 연구에 대한 열정과 자세를 가르쳐주신 조효성 교수님께 감사드립니다. 학부와 대학원 과정에서 많은 가르침을 주신 김동운 교수님, 자상한 총고로 본 논문을 이끌어주신 한봉수 교수님께 감사드립니다. 그리고 저에게 많은 도움을 주시고 아껴주신 김법민 교수님께 감사드립니다. 또한 의공학이란 분야가 무엇인지 깨닫게 해주시고 많은 가르침을 주신 윤형로 교수님, 이운선 교수님, 이경중 교수님, 윤영로 교수님, 김영호 교수님, 신태민 교수님, 이철규 교수님, 김한성 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 지금까지 대학생활과 대학원 생활을 열심히 할 수 있게 도움을 주신 청파 한승룡 이사장님과 경영정보학과 이종민 교수님, 그리고 청파 장학회 동기인 호열이와 우석에게 감사드립니다. 같은 연구실에서 동고동락하며 도움을 아끼지 않았던 상목이형, 대기, 기수, 성일, 충근에게 감사를 전합니다. 연구실의 막내이자 귀염둥이들인 방사선학과 학부생 근영이, 지은이, 소영이에게도 감사를 전합니다. 그리고 논문을 쓰면서 많은 도움을 받았던 동선이형, 동규형, 재우형, 승진이형, 경무, 영운, 균정, 광영이형에게 감사를 드립니다. 세상에 하나밖에 없는 우리 96학번 동기들, 진술, 성재, 덕현, 종수, 정진, 기수, 영호, 신근, 원철, 인범, 덕원, 주신, 광규, 새롬, 경국, 응규, 그리고 중, 고등학교 때부터 지금까지 많은 격려와 힘을 주었던 석규, 연우, 세명이에게도 감사드립니다. 매치포인트 동아리에서 기쁨을 함께 했던 가족 같은 해관이형, 민석이, 태선이, 용훈이, 준호, 소영이, 대호, 영진이, 상용이, 윤희이에게도 감사를 전합니다. 대학원 생활을 함께 시작했던 태균이, 기훈이형, 사업씨, 재영선배, 그리고 제가 논문을 지도 했던 주희, 예일, 제현, 희림, 혜영, 금옥에게도 감사를 전합니다. 또한 저의 부족한 부분을 많이 채워주시고 많은 가르침을 주신 부산대학교 김호경 교수님께도 감사드립니다.

우리 손자가 최고라며 좋아하시던 할아버지, 할머니, 그리고 하늘에 계시는 증조모님께 감사드립니다. 그리고 어려울 때 항상 사랑과 이해의 마음으로 지켜봐준 향나에게 감사드리며, 사랑하는 모든 분들께 미흡하나마 이 작은 노력의 결실을 바칩니다.

2004년 6월에 새로운 삶을 준비하며  
정만희 올림

## 차 례

|  |      |
|--|------|
| 그림 차례 .....  | iv   |
| 표 차례 .....   | vii  |
| 국문 요약 .....  | viii |
| <br>   |      |
| 제1장 서론 .....   | 1    |
| <br>   |      |
| 제2장 X-선 영상시스템 .....                                    | 4    |
| 2.1 Conventional Film/Screen 방식의 X-선 영상시스템 .....       | 4    |
| 2.1.1 X-선 발생장치 .....                                   | 4    |
| 2.1.2 X-선 영상시스템의 원리 .....                              | 5    |
| 2.2 디지털 방식의 X-선 영상시스템 .....                            | 6    |
| 2.2.1 직접방식(Direct Radiography) .....                   | 7    |
| 2.2.2 간접방식(Indirect Radiography) .....                 | 8    |
| 2.3 영상특성 평가 .....                                      | 9    |
| 2.3.1 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio; SNR) .....        | 9    |
| 2.3.2 변조전달함수 (modulation transfer function; MTF) ..... | 11   |
| 2.3.3 잡음력스펙트럼 (noise power spectrum; NPS) .....        | 13   |
| 2.3.4 양자검출효율 (detective quantum efficiency; DQE) ..... | 14   |
| <br>   |      |
| 제3장 몬테카를로 X-선 영상 모의실험 코드 .....                         | 18   |
| 3.1 X-선 영상 모의실험 코드의 알고리즘 .....                         | 18   |
| 3.2 X-선 영상 모의실험의 영상시스템 구조 .....                        | 21   |

|   |    |
|---|----|
| 제4장 CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선 영상시스템의 구현 .....                | 23 |
| 4.1 CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선 영상시스템의 구조설계 .....              | 23 |
| 4.1.1 CMOS 영상센서의 특성 .....                               | 23 |
| 4.1.2 RadEye1™ CMOS 영상센서 .....                          | 26 |
| 4.1.3 RadEye2™ CMOS 영상센서 .....                          | 27 |
| 4.2 CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선 영상시스템의 구성 .....                | 30 |
| 4.2.1 영상센서와의 인터페이스 회로설계 .....                           | 30 |
| 4.2.2 AD 컨버터 회로설계 .....                                 | 31 |
| 4.2.3 영상데이터 전송 및 전송회로의 설계와 제작 .....                     | 32 |
| 4.2.4 RadEye1™ 영상센서 기반 Readout 회로 구현 .....              | 33 |
| 4.2.5 RadEye2™ 영상센서 기반 Readout 회로 구현 .....              | 35 |
| <br>  |    |
| 제5장 X-선 영상특성 분석 .....                                   | 38 |
| 5.1 몬테카를로 모의실험에 의한 영상특성 분석 .....                        | 38 |
| 5.1.1 신호대잡음비(SNR) .....                                 | 38 |
| 5.1.2 변조전달함수(MTF) .....                                 | 40 |
| 5.1.3 잡음력스펙트럼(NPS) .....                                | 42 |
| 5.1.4 양자검출효율(DQE) .....                                 | 43 |
| 5.2 실험에 의한 영상특성 분석 .....                                | 45 |
| 5.2.1 시스템 응답(system response) 및 선형성(linearity) 평가 ..... | 45 |
| 5.2.2 신호대잡음비(SNR) .....                                 | 47 |
| 5.2.3 변조전달함수(MTF) .....                                 | 48 |
| 5.2.4 잡음력스펙트럼(NPS) .....                                | 51 |
| 5.2.5 양자검출효율(DQE) .....                                 | 52 |
| <br>  |    |
| 제6장 결론 .....  | 54 |

|                |    |
|----------------|----|
| 참고 문헌 .....    | 56 |
| ABSTRACT ..... | 60 |

## 그림 차례

|   |    |
|---|----|
| 그림 1.1 Conventional film/screen 방식 및 Digital radiography의 방법 비교 ..... | 1  |
| 그림 2.1 X-선 튜브의 구조 .....   | 4  |
| 그림 2.2 Conventional film/screen 방식의 X-선 영상 시스템의 원리 .....              | 5  |
| 그림 2.3 직접방식과 간접방식의 비교 .....   | 6  |
| 그림 2.4 직접방식의 검출원리 및 검출기 두께에 대한 특성 .....                               | 7  |
| 그림 2.5 간접방식의 검출원리 및 섬광체 두께에 대한 특성 .....                               | 8  |
| 그림 2.6 신호대 잡음비 측정 .....   | 10 |
| (a) 원형 팬텀 영상  |    |
| (b) 농도 곡선   |    |
| 그림 2.7 ESF 곡선을 획득하기 위한 edge test pattern .....                        | 12 |
| 그림 2.8 X-ray photon fluence 계산을 위한 그래프 .....                          | 16 |
| (a) 단위 조사선량당 fluence 곡선   |    |
| (b) 단위 조사선량당 X-선 스펙트럼 곡선  |    |
| 그림 3.1 몬테카를로 영상모의실험 코드의 알고리즘 .....                                    | 20 |
| 그림 3.2 몬테카를로 모의 X-선 영상 시스템의 구조 .....                                  | 21 |
| 그림 3.3 몬테카를로 영상모의실험 코드의 GUI 환경 .....                                  | 22 |
| 그림 4.1 RadEye1 <sup>TM</sup> Imaging Sensor의 외형 및 크기 .....            | 26 |
| 그림 4.2 RadEye1 <sup>TM</sup> Imaging Sensor 구동을 위한 Readout 회로의 구성도 .. | 27 |
| 그림 4.3 RadEye2 <sup>TM</sup> Sensor Module의 크기 및 외형 .....             | 28 |
| 그림 4.4 RadEye2 <sup>TM</sup> Sensor Module 구동을 위한 Readout 회로의 구성도 ..  | 29 |
| 그림 4.5 RadEye1 <sup>TM</sup> Imaging Sensor의 Timing Diagram .....     | 31 |
| 그림 4.6 AD7671AST의 Timing Diagram .....                                | 32 |
| 그림 4.7 FT245BM의 READ를 위한 Timing Diagram .....                         | 33 |



|  |    |
|--|----|
| 그림 4.8 RadEye1™ Imaging Sensor를 위한 CPU의 시스템 제어 순서도               | 34 |
| 그림 4.9 RadEye1™ Imaging Sensor 제어용 Prototype Board               | 34 |
| 그림 4.10 RadEye2™ Sensor Module 제어용 Prototype Board               | 35 |
| 그림 4.11 RadEye2™ Sensor Module을 위한 CPU의 시스템 제어 순서도               | 36 |
| 그림 4.12 구현된 디지털 X-선 영상 시스템                                       | 37 |
| 그림 5.1 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 SNR 곡선                | 39 |
| 그림 5.2 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 (a) ESF 및 (b) LSF 곡선  | 40 |
| 그림 5.3 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 MTF 곡선                | 41 |
| 그림 5.4 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 1-D normalized NPS 곡선 | 42 |
| 그림 5.5 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 NEQ 곡선                | 43 |
| 그림 5.6 60kVp, 1mA의 실험조건에서 계산된 X-선 조사선량에 따른 DQE 곡선                | 44 |
| 그림 5.7 시스템의 선형성(linearity) 측정 곡선                                 | 45 |
| 그림 5.8 구현된 디지털 X-선 영상시스템에서 획득된 영상의 예                             | 46 |
| (a) 임플란트   |    |
| (b) CPU용 소켓  |    |
| (c) star pattern   |    |
| (d), (e), (f) 손가락 뼈  |    |
| (g) 손목 뼈   |    |
| (h) 전자제품   |    |
| (i) line-pair test pattern                                       |    |

|   |    |
|---|----|
| 그림 5.9 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 SNR 곡선 .....                 | 47 |
| 그림 5.10 ESF 곡선 측정을 위해 획득된 edge pattern 영상 .....                         | 48 |
| 그림 5.11 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 (a) ESF 및 (b) LSF 곡선 .....  | 49 |
| 그림 5.12 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 MTF 곡선 .....                | 50 |
| 그림 5.13 공간해상도 평가를 위한 영상 .....   | 50 |
| (a) line-pair test pattern 영상   |    |
| (b) 확대 영상   |    |
| 그림 5.14 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 1-D normalized NPS 곡선 ..... | 51 |
| 그림 5.15 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 NEQ 곡선 .....                | 52 |
| 그림 5.16 60kVp, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 DQE 곡선 .....                | 53 |

## 표 차례

|  |    |
|--|----|
| 표 1.1 아날로그방식과 디지털 X-선 영상 시스템 방식의 비교 .....  | 2  |
| 표 4.1 CMOS 방식과 CCD 방식의 비교 .....            | 25 |
| 표 6.1 모의실험 및 구현된 시스템에서 획득된 영상의 특성 비교 ..... | 54 |

## 국 문 요 약

### CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선 영상시스템의 구현 및 영상특성 평가에 관한 연구

본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 최적화 설계 및 영상특성을 사전에 평가하기 위하여 몬테카를로 방법을 이용한 영상모의실험용 코드를 비주얼 C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 개발하였으며, 또한 CMOS 영상센서(픽셀크기: 48x48 mm<sup>2</sup>, Radicon사)와 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체(두께: 43.2μm, KODAK(Min-R)) 기반의 디지털 X-선 영상시스템을 구현하였다. 관전압 60kV<sub>p</sub>, 관전류 1mA, 조사시간 1초의 촬영조건에서 모의실험영상과 실험영상을 획득한 후 영상평가의 객관적 지표인 SNR(signal-to-noise ratio), MTF(modulation transfer function), NPS(noise power spectrum), DQE(detective quantum efficiency)를 계산하여 그 화질을 비교 평가하였다. 모의실험을 통하여 획득된 X-선 영상의 특성은 낮은 조사선량에서 높은 신호대잡음비를 보였으며 10% MTF에서 약 9.5 lp/mm로 측정되었다. NPS와 DQE 특성은 공간주파수가 증가할수록 점진적으로 감소하였으며, 또한 X-선 조사선량이 증가할수록 NPS는 감소한 반면 DQE는 증가하였다. 이 때 DQE(0) 값은 1.0, 3.0, 5.0mR 조사선량에서 각각 약 0.8, 0.85, 0.9으로 계산되었다. 구현된 디지털 X-선 영상시스템은 X-선 조사선량에 대해 선형적인 응답을 나타내었으며, 이 때 획득된 영상의 특성은 X-선 조사선량이 증가할수록 신호대잡음비가 증가하다가 70mR에서 포화되었으며, 10% MTF에서 약 6.0 lp/mm로 측정되었다. 또한 NPS와 DQE 특성은 공간주파수와 X-선 조사선량에 대해 모의실험 결과와 비슷한 결과를 나타내었으며, 이 때 DQE(0) 값은 10mR, 26mR, 47mR의 실험조건에

서 각각 약 0.28, 0.59, 0.70로 측정되었다.

본 연구에서 제작된 몬테카를로 모의실험 코드를 이용하여 다양한 디지털 X-선 영상시스템에 대해 여러 설계변수들에 대한 성능을 예측함으로써 영상시스템의 최적설계에 활용될 수 있으며, 저가의 CMOS 영상센서 기반의 디지털 X-선 영상 시스템을 구현하고 획득된 영상의 특성 평가를 통하여 시스템의 물리적 특성 및 영상 특성을 파악할 수 있었다.



**Key words** : 몬테카를로 영상모의실험, CMOS 영상센서, SNR, MTF, NPS, DQE

# 제 1 장 서 론

필름/스크린 방식의 아날로그 X-선 영상촬영법은 우수한 공간해상도와 저렴한 비용으로 인해 아직까지도 전체 의료/산업용 X-선 영상기기의 약 70%를 차지할 만큼 널리 사용되고 있으나, 필름의 보관장소, 현상과정에서 기인할 수 있는 환경 오염, 환자 진료시간의 지연, 영상데이터의 통합관리 및 기존 영상자료의 활용 등에 많은 문제점을 내포하고 있다 [1]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 1980년대 후반부터 지금까지 아날로그 X-선 영상정보를 디지털화하는 X-선 영상센서에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 최근에 의료영상 분야에서 많은 양의 아날로그 영상자료를 데이터베이스화함으로써 영상자료의 관리, 검색 및 전송의 편리함을 도모하고자 하는 병원정보화시스템 (hospital information system; HIS), 의료영상자료의 저장 및 전송 시스템 (picture archiving and

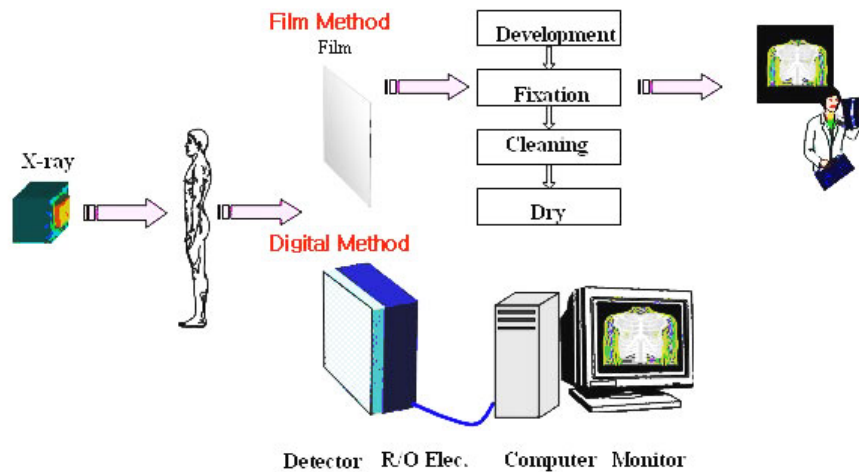


그림 1.1 Conventional Flim/screen 방식 및 Digital Radiography의 방법 비교

communication system; PACS) 등과 같은 의료정보화시스템의 구축과 맞물려 효율적인 디지털 X-선 영상시스템에 대한 개발의 필요성이 점차 높아지고 있다 [2]. 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 민감도로 인해 기존의 필름/스크린 방식에 비해 관용도(latitude)가 넓고 또한 환자의 피폭선량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

| 구분      | 아날로그 방식           | 디지털 방식                             |
|---------|-------------------|------------------------------------|
| 저장성     | 필름 저장 공간 과다소요     | Digital Storage Media (HD, CD, OD) |
| 피폭량     | 30mR              | 5-6mR                              |
| 재촬영여부   | 재촬영 및 실시간 영상처리 불가 | 컴퓨터처리 및 실시간 판독 가능                  |
| 환경문제    | 필름현상에 화공약품 필요     | 필름 불필요 (환경친화적)                     |
| 특징      | 재현성 낮고, 영상 통신 불가능 | 재현성, 영상통신 및 원격진료 가능                |
| 영상 획득시간 | 수분                | 수초 이내                              |
| 네트워크    | 네트워크 연동불가         | PACS 및 DICOM 연동                    |

표 1.1 아날로그방식과 디지털 X-선 영상 시스템 방식의 비교

이러한 디지털 X-선 영상시스템은 X-선 검출방식에 따라 직접방식(direct method)과 간접방식(indirect method)으로 구분할 수 있는데, 전자는 광전도물질(a-Se, HgI<sub>2</sub> 등)을 사용하여 직접 입사 X-선으로부터 생성된 전기적 신호를 검출

하여 X-선 영상을 획득하는 방식이고, 후자는 섬광물질( $Gd_2O_2S(Tb)$ ,  $CsI(Tl)$ ,  $CdWO_4$  등)을 사용해 입사 X-선을 가시광으로 전환시킨 후 수광소자(CDD, CMOS, a-Si:H photodiode array 등)를 사용하여 X-선 영상을 획득하는 방식이다. 본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 최적화설계를 위하여 몬테카를로 영상모의실험 코드를 비주얼 C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 개발하였으며, 또한 CMOS 영상센서 기반의 디지털 X-선 영상시스템을 구현하였다. 개발된 영상모의 실험 코드를 검증하고 평가하기 위하여  $43.2 \mu m$  두께의 Min-R ( $Gd_2O_2S(Tb)$ ,  $31.7 \text{ mg/cm}^2$ , Eastman Kodak Company, Rochester, NY) 섬광체와  $48 \mu m \times 48 \mu m$  픽셀크기의 광센서 어레이로 설계된 디지털 X-선 영상시스템에 대하여 관전압  $60 \text{ kV}_p$  ( $44.8 \text{ keV}_{\text{eff}}$ )와 관전류  $1 \text{ mA}$ 의 실험조건에서 X-선 영상을 획득한 후, 영상센서의 객관적 성능지표인 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR), 변조전달함수(modulation transfer function, MTF), 잡음력스펙트럼(noise power spectrum, NPS), 양자검출효율(detective quantum efficiency, DQE) 등을 계산하여 그 화질을 평가하였다 [3]. 또한 구현된 CMOS 기반 디지털 X-선 영상시스템을 사용하여 모의실험과 동일한 실험조건에서 X-선 영상을 획득한 후 그 화질 특성을 비교 분석하였다.



## 제 2 장 X-선 영상시스템

### 2.1 Conventional Film/Screen 방식의 X-선 영상시스템

#### 2.1.1 X-선 발생장치

X-선 발생장치는 고진공도의 경질유리로 된 전자빔관으로, 그림 2.1과 같이 필라멘트 음극(filament cathode)과 양극(anode)으로 구성되어 있다. 음극의 필라멘트를 가열시키면 열전자가 발생하고, 음극과 양극에 인가된 직류 고전압(20~150 kV<sub>p</sub>)에 의해 방출된 열전자는 양극의 저지물(target)에 충돌함으로써 X-선이 발생한다. 이 때 발생하는 X-선은 연속에너지 분포를 갖는 Bremsstrahlung과 단일에너지 특성을 갖는 특성 X-선(characteristic X-ray)으로 구성된다 [4].

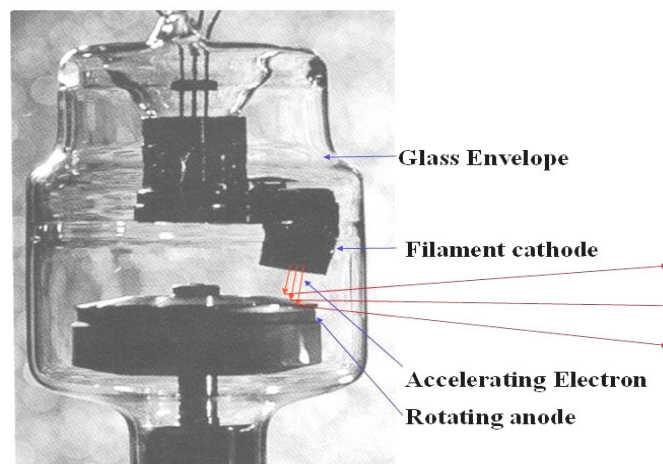


그림 2.1 X-선 튜브의 구조

### 2.1.2 X-선 영상 시스템의 원리

현재 병원의 임상진단분야에서는 phosphor screen을 이용한 X-선 영상시스템이 가장 많이 사용되고 있다. Phosphor screen은 입사 X-선과 반응하여 가시광을 발생시키고, 이때 발생된 빛이 필름에 감광되어 X-선 영상을 이루게 되는데 이러한 방식을 film/screen 방식의 X-선 영상시스템이라 하며 그 구성은 그림 2.2와 같다. X-선 영상은 본질적으로 인체에 대한 음영 투영영상을 말하며 매질에 따라 X-선 감약의 차이에 의해 영상이 표현된다. 이것은 X-선이 인체를 투과하면 인체를 구성하고 있는 물질에 따라 흡수 및 산란이 일어나고, 투과한 X-선이 필름을 감광시켜 영상이 만들어지는 것이다. 이렇게 X-선 영상이 만들어지기 까지 (a) X-선의 발생, (b) X-선속의 제어 (c) 피사체내에서의 상호작용, (d) 필름의 감광, (e) 현상 및 인화의 과정을 거치게 된다 [5].

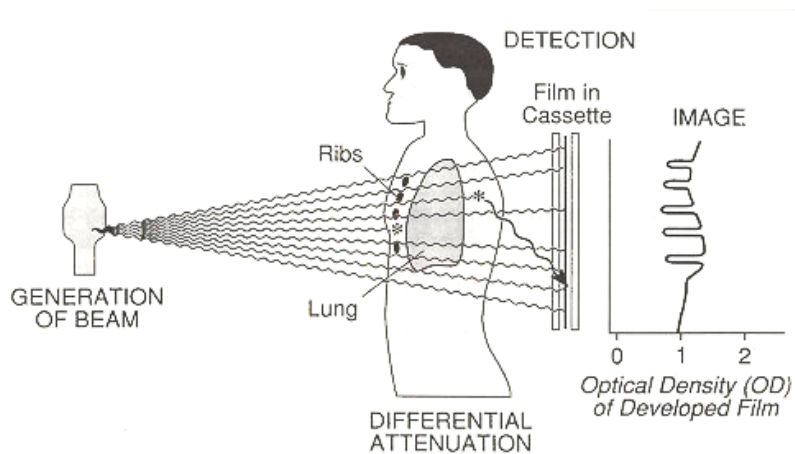


그림 2.2 Conventional film/screen 방식의 X-선 영상 시스템의 원리

## 2.2 디지털 방식의 X-선 영상 시스템

Film/screen 방식의 X-선 영상시스템은 필름의 농도(optical density) 등과 같은 물리적인 요소에 의해 표현되는 아날로그 영상정보를 다룬다. 최근 수년 동안 많은 노력으로 film/screen 방식을 대체할 디지털 방식의 X-선 영상 시스템이 개발되었다. 디지털 X-선 영상이란 X-선의 투과에 대한 행렬의 값을 나타내는 영상정보를 의미하며 디지털 X-선 영상시스템을 구성하는 방식에는 검출방식에 따라 그림 2.3과 같이 직접방식(direct digital radiography)과 간접방식(indirect digital radiography)으로 나뉘게 된다 [6].

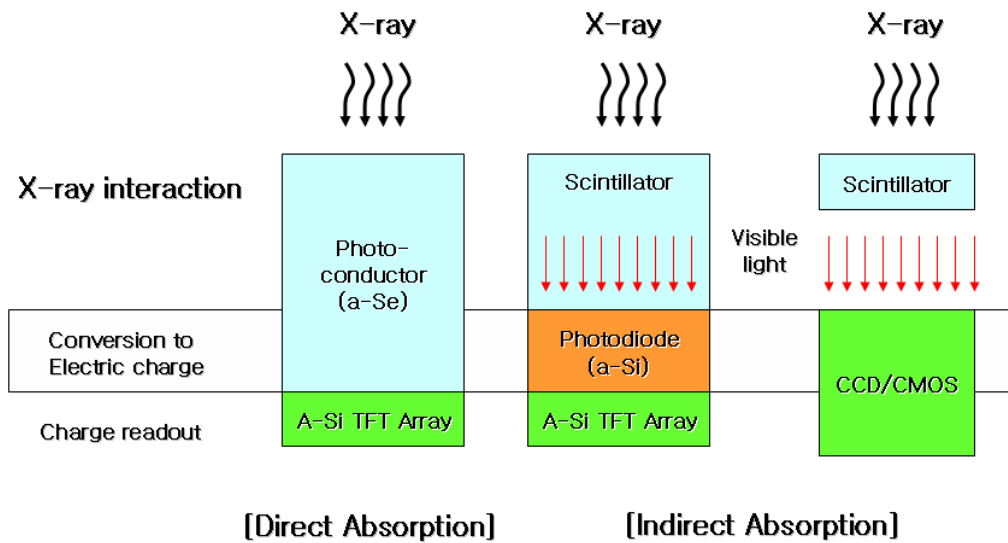


그림 2.3 직접방식과 간접방식의 비교

## 2.2.1 직접방식(Direct Radiography)

직접방식의 디지털 X-선 영상시스템은 광전도물질(a-Se, HgI<sub>2</sub> 등)을 사용하여 직접 입사 X-선으로부터 생성된 전기적 신호를 검출하여 X-선 영상을 획득하는 방식으로 그림 2.4는 직접방식의 신호 검출원리(a) 및 검출기 두께에 대한 특성(b)을 나타낸다.

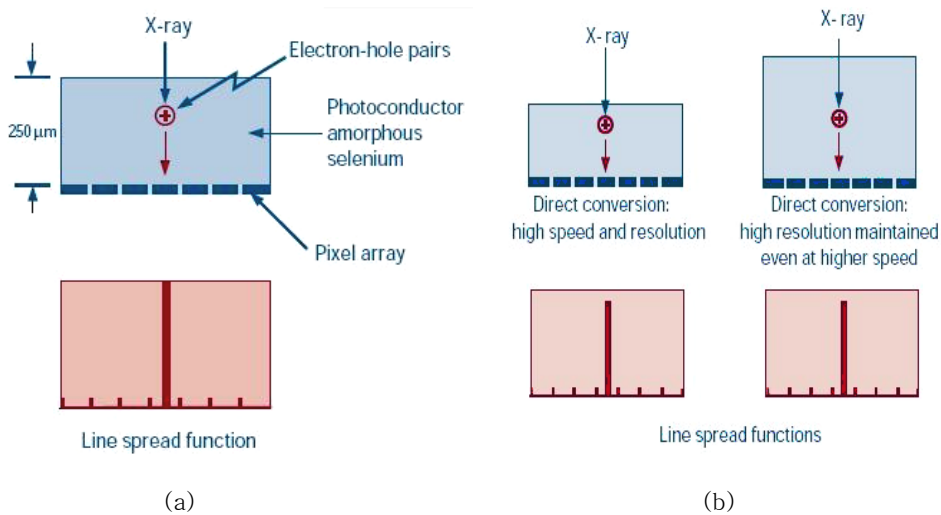


그림 2.4 직접방식의 (a) 검출원리 및 (b) 검출기 두께에 대한 특성

그림 2.4(a)는 a-Se photoconductor가 X-선을 흡수하고, 간접방식에 비해 영상 화질을 감소시키는 중간과정 없이 직접 전기적 신호를 발생하고 외부의 인가 전기장 하에서 전공 (혹은 음전자)이 픽셀 전극을 향해 떨어져 픽셀의 캐패시터에 수집되는 것을 나타낸다. 음전자나 전공이 전기력선을 따라 이동하므로 이온의 측면 움직임이 없고 이 결과로 약 1 μm의 작은 point spread response를 가지게 된다.

그림 2.4(b)는 photoconductor의 두께에 따른 선예도 응답함수를 나타내는 것으로, 광전도 물질의 두께는 공간분해능과 민감도에 큰 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 이것은 대부분의 X-선이 검출기 입사표면에서 거의 흡수되기 때문이다. 하지만 현상액의 침착과 고온에서의 셀레늄의 결정화하는 동안 금속판에 기계적으로 증착하는데 어려움이 있어 신뢰성에 문제가 있다. 이에 Flat-panel 검출기 위에 직접 셀레늄을 증착하여 이 문제를 해소하는 노력을 하고 있다 [7].

### 2.2.2 간접방식(Indirect Radiography)

간접방식의 디지털 X-선 영상시스템은 그림 2.5(a)와 같이 간접변환검출기(indirect-conversion detector)를 이용하며, 이 검출기는 X-선 검출에 두 가지 과정을 거치게 된다.

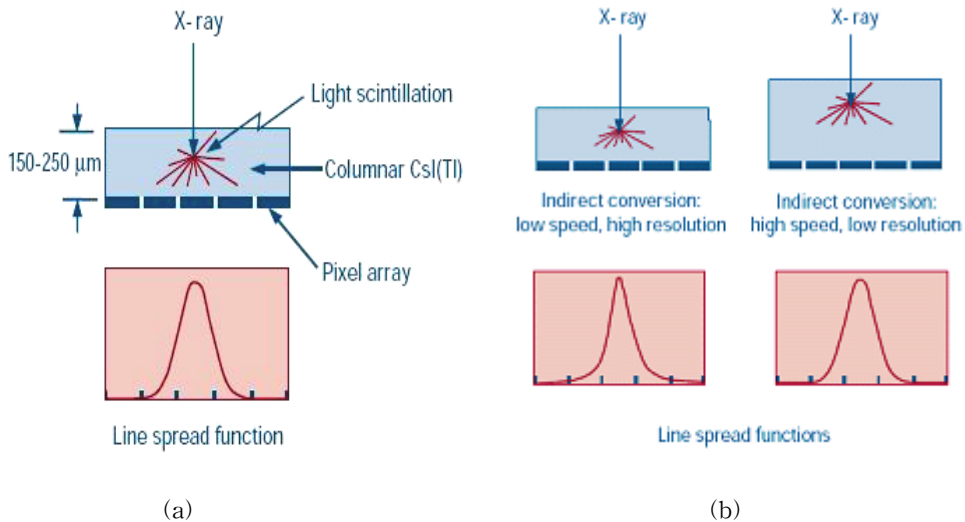


그림 2.5 간접방식의 (a) 검출원리 및 (b) 섬광체 두께에 대한 특성

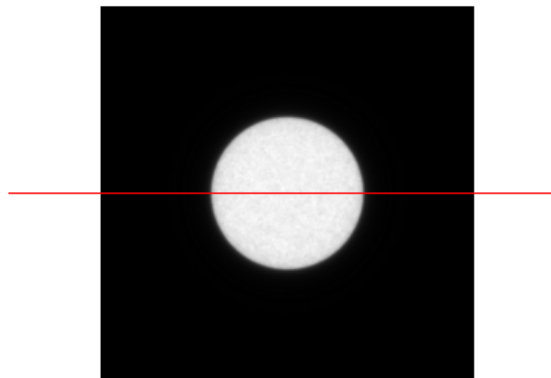
첫 번째 과정은 thallium 불순물이 소량 첨가된 cesium iodide와 같은 섬광체에서 입사된 X-선 에너지를 가시광으로 변환시키는 과정이고, 두 번째 과정은 thin-film 다이오드(TFD)가 가시광을 전기적 신호로 바꾸어 thin-film 트랜지스터(TFT)에 획득하는 과정이다. 어떤 영상시스템은 빛의 수집과 readout 방식을 CCD(charge-coupled device)를 이용하기도 한다. 그림 2.5(b)에서는 섬광체의 두께에 따른 공간분해능과 방사선 민감도를 나타낸다. 낮은 에너지의 X-선이 입사할 경우 섬광체가 두꺼우면 빛의 퍼짐은 증가하여 공간분해능은 감소하지만 감도(speed)는 증가한다. 반대로 높은 에너지의 X-선이 입사할 경우 섬광체의 두께가 두꺼울수록 섬광체와 반응할 확률이 높아지므로 공간분해능은 좋아지게 된다 [8]. 간접방식의 디지털 X-선 영상시스템에서의 빛의 퍼짐 정도는 기존의 film/screen 방식과 유사하다.

## 2.3 영상특성 평가(image quality evaluation)

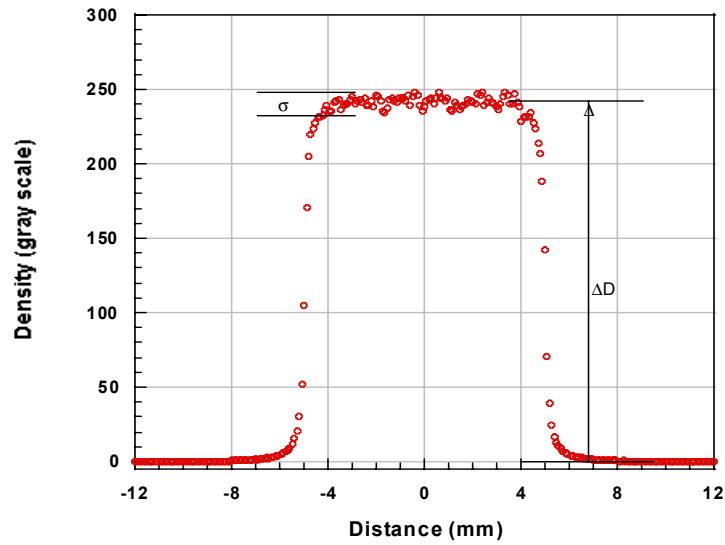
### 2.3.1. 신호대잡음비(signal-to-noise ratio; SNR)

영상의 잡음(noise)은 영상신호에서의 불확정성 또는 부정확성을 의미하며 크게 영상정보를 구성하는 광자수에 기인한 잡음과 영상신호처리 회로에 의한 잡음으로 구분된다. 전자는 영상정보를 구성하는 광자수가 적을 때 그 불확정성의 정도가 증가하며 반면 광자수가 증가하면 영상신호로서 검출될 확률이 높아져 영상신호에 대한 잡음의 영향이 감소한다 [9].

X-선 영상시스템의 신호대잡음비를 평가하기 위해 중심부분을 제거한 납 팬텀을 사용하여 영상을 획득하며 그림 2.6(a)와 같이 지시선을 따라 측정된 획득영상의 gray-scale 값을 이용한다. 영상신호는 주변의 납 팬텀과 중심의 원형 영역에서의 gray-scale 값의 차( $\Delta D$ )를 그리고 영상잡음은 획득영상의 gray-scale 값의 표준편차( $s$ )를 의미하는데, 이들의 비( $\Delta D/s$ )가 신호대잡음비로 정의 된다 [10].



(a)



(b)

그림 2.6 신호대잡음비를 측정하기 위한 (a) 원형 팬텀 영상 및 (b) 농도 그래프

### 2.3.2 변조전달함수 (modulation transfer function; MTF)

변조전달함수란 어떤 영상시스템의 주파수응답을 나타내는 것으로써 피사체대조도(subject contrast)에 대한 영상대조도(image contrast)의 비로 정의 된다 [11]. 변조전달함수의 측정방법에는 해상력 chart를 이용하는 방법, 10 μm 폭의 slit을 이용하는 방법, edge 테스트 팬텀을 이용하는 방법 등이 있는데, 본 연구에서는 실험을 하기에 유용한 edge 테스트 팬텀을 이용한 MTF 측정법을 선택하였다



[12].



그림 2.7 ESF 곡선을 획득하기 위한 edge test pattern

그림 2.7과 같이 1 mm 두께의 아크릴판에 두께 250  $\mu\text{m}$ 의 납 테이프를 이용하여 ESF곡선을 얻기 위한 테스트 팬텀을 제작하였다. 이 팬텀을 확대에 의한 불선예도 요소를 없애기 위해 센서 정면에 밀착하여 영상을 획득하였다 [13]. MTF 곡선은 영상을 획득한 후 농도 값을 읽어 ESF(edge spread function) 곡선을 구한 다음, 식 (1)과 같이 미분하여 Fourier 변환을 취하면 구해진다.

$$MTF(f) = FT \left[ \frac{d}{dx} [ESF(x)] \right] \quad (1)$$

본 연구에서는 높은 공간주파수 영역에서의 잡음왜곡(noise-aliasing) 현상을 피하기 위하여 edge 테스트 팬텀을 입사 X-선 방향에 대해  $0.2^\circ$  경사지게 하여 고의적으로 샘플링수를 늘렸으며, 영상을 획득한 후 이로부터 ESF 및 LSF(line

spread function) 곡선을 구하여 식 (2)와 같은 1차원 Gaussian 곡선으로 근사시킨 후 Fourier 변환을 취하여 영상시스템의 MTF 곡선을 계산하였다.

$$I = I_{\min} + I_{\max} \cdot e^{-\frac{(x - x_{\text{cen}})^2}{s^2}} \quad (2)$$

여기서  $I_{\min}$ 과  $I_{\max}$ 는 각각 입력데이터의 최소값 및 최대값을 나타내며,  $x_{\text{cen}}$ 와  $s$ 는 각각 최대값의 위치 및 픽셀크기를 고려한 획득영상의 표준편차를 나타낸다. 또한  $\text{sinc}(bf)$  함수로 표현되는 광센서 어레이의 픽셀크기에 의한 MTF로 나누어 주면 영상시스템의 *presampled* MTF를 계산할 수 있다. 이때  $b$ 는 픽셀크기이며  $f$ 는 공간주파수를 나타낸다.

### 2.3.3. 잡음력스펙트럼(noise power spectrum; NPS)

잡음력스펙트럼이란 잡음의 분산값의 분포를 공간주파수 상에 표현한 것으로 영상에서 픽셀간의 변동요인인 잡음의 공간주파수에 대한 의존도를 나타낸다 [14]. 영상신호에서의 픽셀 간 신호크기의 변동은 입사된 X-선 양에 의한 양자화잡음이나 신호변환 단계에서의 이득변화, 그리고 외부잡음에 의해 발생할 수 있다. 본 실험에서는 각 실험조건에서 2차원 NPS를 측정하여 수직축 혹은 수평축에서 각 축 상에서의 값은 배제하고 이웃한 열 혹은 행 값들을 각각 평균하여 1차원 NPS를 계산하였다. 각각의 조사선량에서 획득된 white 영상의 ROI(region of interest)를 각각 128x128 크기의 4개 구역으로 나눈 뒤 각 분할영상을 식(3)과 (4)를 이용하

여  $NPS_{raw}(u,v)$  및  $NPS_{normalized}(u,v)$ 를 획득하였다 [15].

$$NPS_{raw}(u, v) = \frac{\langle |FT(u, v)|^2 \rangle}{N_x N_y} \Delta x \Delta y \quad (3)$$

$$NPS_{normalized}(u, v) = \frac{NPS_{raw}(u, v)}{(Mean\ signal\ of\ 256 \times 256\ ROI)^2} \quad (4)$$

이때  $\langle |FT(u, v)|^2 \rangle$ 는 모든 ROI 영상에서의 Fourier 변환값의 제곱평균을 나타내며,  $N_x$ 와  $N_y$ 는 이산 Fourier 변환의 요소수, 그리고  $\Delta x, \Delta y$ 는 x-, y-축의 픽셀크기를 각각 나타낸다.

#### 2.3.4. 양자검출효율 (detective quantum efficiency; DQE)

디지털 X-선 영상시스템에서의 양자검출효율은 입력 SNR에 대한 출력 SNR비의 제곱으로 정의되며, 식 (5)과 같이 계산된다 [16].

$$DQE(f) = \frac{G \times MTF^2(f)}{q \times X \times NPS_{normalized}(f)} \quad (5)$$

여기서  $X$ 는 조사선량(mR)을 나타내고,  $G$ 는 gain factor로서 여기서는 정규화된 NPS를 이용하기 때문에 1과 같으며,  $q$ 값은 식 (7)과 같이 표현된다 [17].

$$C(E) = \frac{5.34 \times 10^{-5}}{E \left( \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_{air}} \quad (6)$$

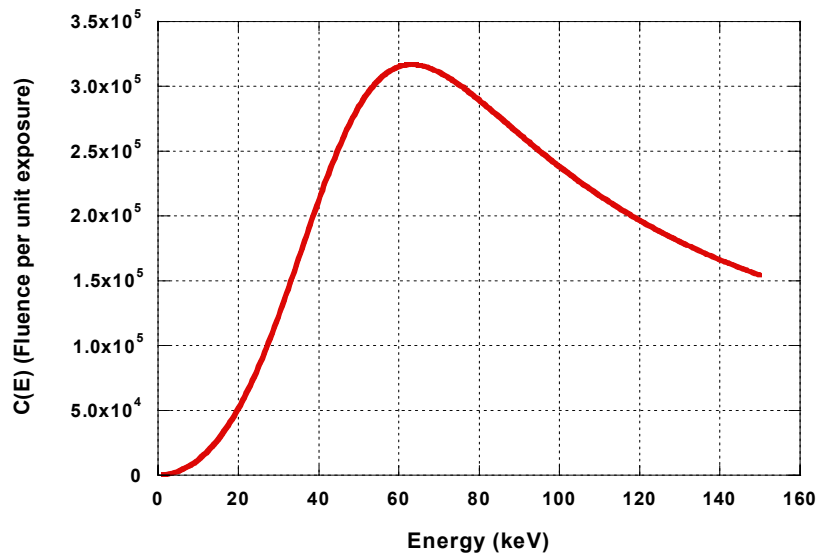
$$\begin{aligned} q &= \left( \frac{Signal}{Noise} \right)^2 = X \cdot C \\ &= X \cdot \frac{\left( \int_0^{kVp} C(E) \cdot \Psi(E) dE \right)}{\int_0^{kVp} \Psi(E) dE} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 E는 광자에너지를 의미하고, C(E)와 Ψ(E)는 단위조사선량당 Fluence와 X-선 스펙트럼을 나타낸다. 본 논문에서는 q값을 계산하기 위해서 SRS-78 시뮬레이션 코드를 사용하였다. C(E)의 값은 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 웹사이트의 자료[18]를 이용하였으며 각각의 DQE 값은 식 (8)을 사용하여 계산하였다 [15].

$$DQE(f) = \frac{MTF^2(f)}{NPS_{normalized}(f) \cdot q \times X} = \frac{NEQ(f)}{q \times X} \quad (8)$$

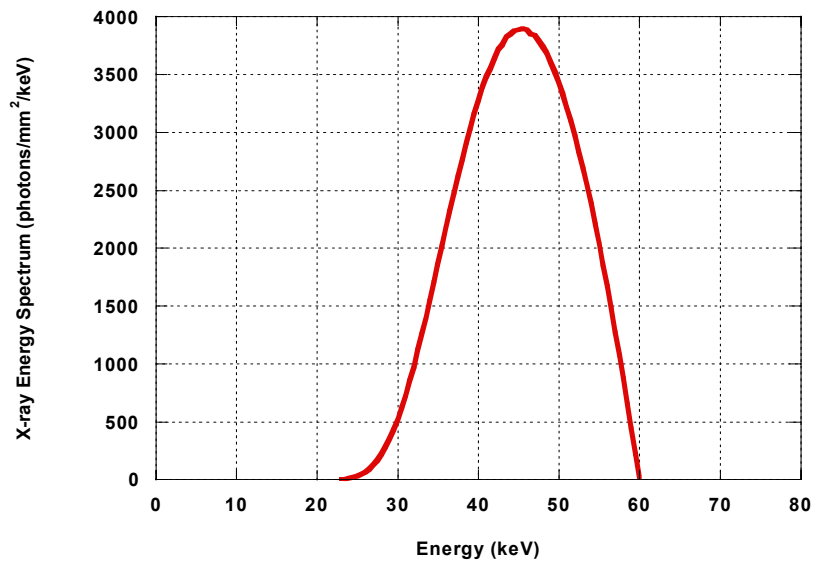
$$NEQ(f) = \frac{MTF^2(f)}{NPS_{normalized}(f)} \quad (9)$$

여기서 NEQ(f)는 디지털 X-선 영상시스템의 noise-equivalent quanta를 나타낸다.  
계산된  $C(E)$ 와  $\Psi(E)$ 의 에너지에 대한 곡선은 그림 2.8(a), (b)와 같다.



(a)

그림 2.8(a) 단위조사선량당 Fluence



(b)

그림 2.8(b) 단위조사선량당 X-선 스펙트럼 곡선

## 제 3 장 몬테카를로 X-선 영상모의실험 코드

본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템의 성능을 사전에 평가하고 실제 획득된 X-선 영상과 그 화질을 비교분석하기 위해서 몬테카를로 모의실험 코드를 비주얼 C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 작성하였다.

### 3.1 X-선 모의실험 코드의 알고리즘

입사 X-선과 피사체와의 상호작용 발생빈도는 X-선 에너지와 피사체의 원자번호( $Z$  number)에 의해 좌우되며 광전흡수(photoelectric absorption), 콤프턴산란(compton scattering), 전자쌍생성(electron pair production)으로 구분된다. 광전흡수는 피사체에 조사된 X-선이 피사체를 구성하는 원자의 궤도전자(주로 K-각전자)와 상호작용 할 때 자신은 사라지고 궤도전자를 이온화하는 과정이다. 콤프턴산란은 피사체에 조사된 X-선이 피사체를 구성하는 원자의 궤도전자(주로 최외각전자)와 상호작용할 때 궤도전자를 이온화하고 자신은 입사방향과 다른 방향으로 산란되는 현상이다. 전자쌍생성은 피사체에 조사된 1.022 MeV 이상의 광자가 피사체를 구성하는 원자의 원자핵 근처에서 자신은 사라지고 대신 음전자와 양전자로 변환되는 현상을 말한다. 본 모의실험 코드에서 사용된 X-선은 단일에너지 스펙트럼을 가지고 실험조건(filteration: 2.5Al+15Al (mmAl), HVL: 4.93 (mmAl), kV<sub>p</sub>: 60)에서 계산된 평균에너지( $E_{ave}$ : 44.8 (keV))를 사용하였으며, 이 때 해당되는 X-선의 fluence는 약  $2.4 \times 10^5$  photons/mm<sup>2</sup>으로 계산되었다. 조사 X-선은 250  $\mu$ m 두께의 납 팬텀에 수직으로 입사된다고 가정하였으며, 일반적인 라디오그래피

영역의 에너지 구간에서는 전자쌍생성(pair production) 반응을 무시할 수 있으므로 납 팬텀과의 상호작용은 광전흡수와 콤프턴산란으로 제한하였다 [19]. 그림 3.1은 본 영상모의실험 코드의 간략화된 알고리즘을 나타낸다.



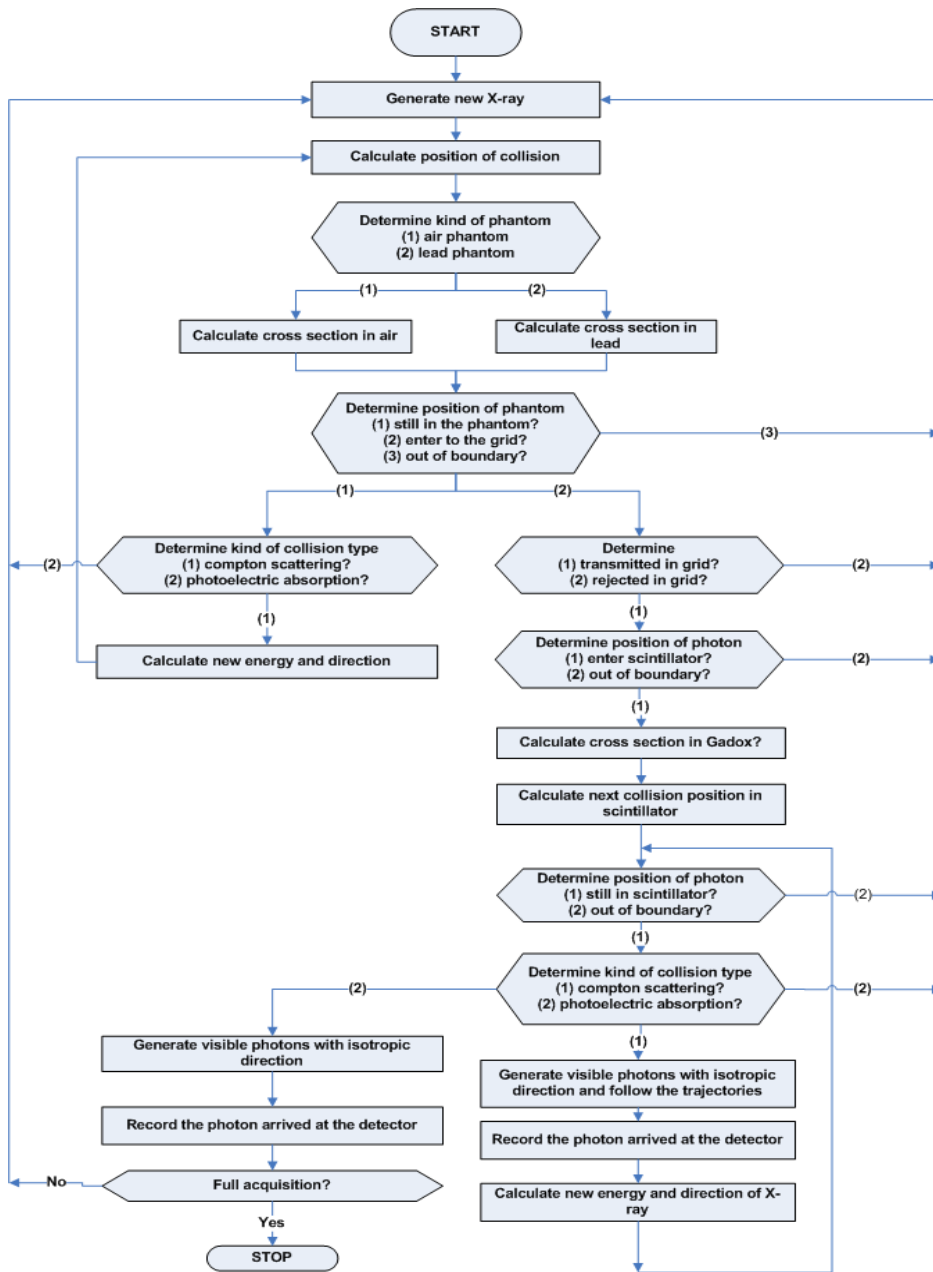


그림 3.1 몬테카를로 영상모의실험 코드의 알고리즘

### 3.2 X-선 모의실험 영상시스템의 구조

본 모의실험 코드에서는 납 팬텀을 투과하면서 발생한 산란 X-선을 제거하기 위해 2차원 평행구조를 가진 상용 그리드(연박간격: 1.40 (mm), 연박두께: 0.25 (mm), 연박높이: 25.20 (mm))를 사용하였고, 그리드를 통과한 X-선이 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체 내에서 상호작용할 때 생성되는 가시광은 등방향적(isotropic)으로 발산하며 이 때 생성되는 가시광의 평균수는  $2.24 \times 10^4 E_x$  [photons/MeV]로 가정하였다 [5]. 여기서  $E_x$ 는 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체 내에 흡수된 입사 X-선의 에너지를 MeV 단위로 표시한 것이다. 광센서 어레이의 전체 실효면적 및 픽셀크기는 각각  $1.23 \times 1.23 \text{ cm}^2$ ,  $48 \times 48 \text{ }\mu\text{m}^2$ 이며, 따라서 영상의 공간적 샘플링 포맷은  $256 \times 256$ 이다. 이때 광센서 어레이의 양자효율(quantum efficiency)은 70%로 가정하였으며 [20], 획득한 영상데이터는 최종적으로 8 bit grayscale로 양자화하였다. 그림 3.2는 본 영상모의실험 코드의 영상시스템의 구조를 나타내며, 그림 3.3은 본 코드의 GUI 환경을 보여준다.

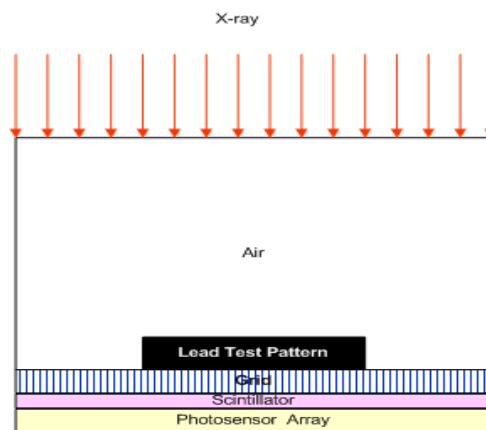


그림 3.2 몬테카를로 모의 X-선 영상 시스템의 구조

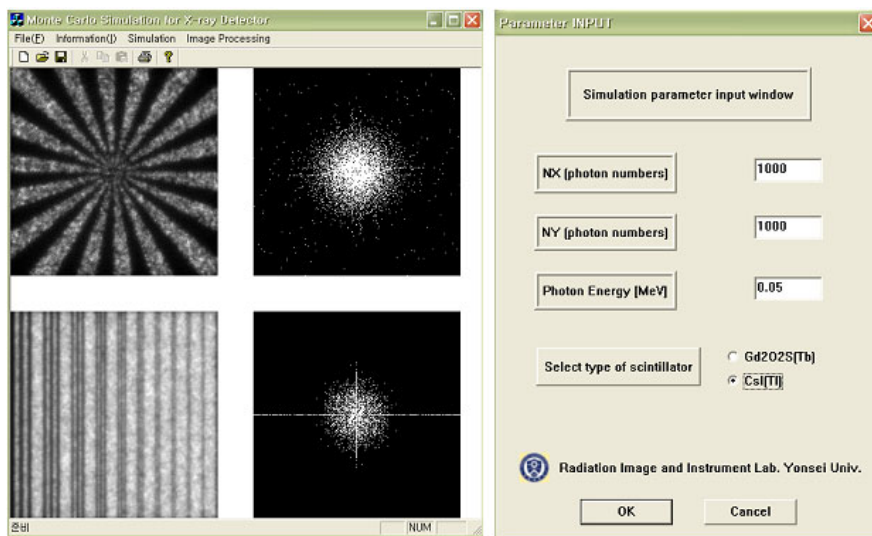


그림 3.3 몬테카를로 영상모의실험 코드의 GUI 환경

## 제 4 장 CMOS 영상센서 기반 디지털 X-선 영상시스템의 구현

### 4.1 CMOS 영상센서 기반의 디지털 X-선 영상시스템 구조 설계

#### 4.1.1 CMOS 영상센서의 특성

CMOS는 최근 대부분의 컴퓨터 마이크로칩 내에 집적되어 있는 트랜지스터들에 사용된 반도체 기술이다. 반도체는 실리콘과 게르마늄과 같은 반도체성 물질로 만들어진다. 불순물을 소량 첨가함으로써 처리된 이러한 재질부위는 음전기로 충전된 여분의 전자들(N형 트랜지스터) 또는 양전기로 충전된 캐리어(P형 트랜지스터) 둘 중 하나의 전도체가 된다. CMOS 기술에서는 두 종류의 트랜지스터들이 효과적인 전기제어의 방법인 전류게이트를 이루기 위해 상호 보완적인 방법으로 사용된다. CMOS 트랜지스터들은 사용되지 않을 때에는 전력을 거의 소모하지 않으나 전류의 방향이 더 빨리 바뀌기 때문에 트랜지스터들이 뜨거워지며, 이러한 특성은 마이크로프로세서들이 동작될 수 있는 속도를 제한하는 경향이 있다.

CMOS 영상센서는 vertical driver, timing generator, CDS/AGC/ADC, MICOM 및 EEPROM, digital signal processor등을 one-chip화 시킬 수 있다. 현재 전 세계 기술력은 digital signal processor를 동시에 one-chip화 할 경우 발생하는 문제점을 확실히 제거를 하지 못하고 있는 실정이므로 일반적인 CMOS 영상센서의

chip solution 은 2-chip solution으로 제공되고 있다. CMOS 방식은 반도체에 아날로그 신호와 디지털 신호처리 회로를 한 곳에 집적한 것으로, 전하를 저장하는데 상당한 양의 전력이 필요한 CCD 방식에 비해 전력 소비가 1/10 정도에 불과하며, 전체적으로 필요한 부분이 한 개의 칩으로 구성되어있기 때문에 보다 소형 제품의 제작이 가능하다. 특히 생산공정이 상대적으로 간단하므로 CCD 방식에 비해 저렴하게 판매되고 있는 제품으로 단순한 화상채팅용의 PC카메라에 많이 사용되는 방식이다. 사용 전력이 매우 작기 때문에 대부분의 제품이 별도의 전원 연결 장치를 필요로 하지 않는 자체 전원 방식의 USB 접속 방식을 채택하고 있다. 이 밖에 CMOS센서의 장점으로 특히 주목되는 점은 소형화와 관련해 주변회로와의 원칩화 가능성이다. CCD센서는 특수 고전압을 필요로 하기 때문에 촬영한 영상의 처리 기능을 맡고 있는 주변 칩과 같은 실리콘 웨이퍼 상에 부착할 수 없다. 반면 일반 반도체와 같은 수준의 전압만 사용하는 CMOS센서는 주변의 신호처리회로와 함께 한 장의 실리콘 웨이퍼 상에 놓을 수 있다. 예를 들면, CMOS센서로 촬영한 영상데이터를 디지털신호로 변환하는 회로, 데이터를 넣어두는 메모리, 데이터의 출력이나 기기 전체를 제어하는 초소형 연산처리장치 등을 모두 한 개의 칩으로 집약할 수 있다. 이를 통해 칩의 소형화와 비용절감을 동시에 달성할 수 있다. 그러나 CMOS 영상센서는 화소마다 변조기를 부착하기 때문에 실리콘 웨이퍼 부착이 균등하지 않을 경우 촬영한 영상에 얼룩이 생길 수 있으며 이는 특히 고화질을 요하는 용도에서는 CCD 영상센서보다는 떨어지는 단점이 있다 [21].

|                           | Charge Coupled Device(CCD)     | CMOS Image Sensor(CIS)             |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Power Consumption         | 300 mW                         | 30 ~ 100 mW                        |
| Voltage Power Supply Mode | 15V / 5 V -9V                  | Single Voltage                     |
| System Integration        | Min. 3 Chips                   | System on a Chip                   |
| System 집적도                | Bad                            | Good                               |
| Image Quality             | GOOD                           | Improving                          |
| Noise                     | Very Good                      | Bad                                |
| Sensitivity               | $> 25 \text{ uV/e}^-$          | CCD > CMOS                         |
| 장점                        | 화질 우수하고 감도가 높음<br>섬세한 색상 구분 가능 | 적은 전력 소모<br>주변회로와의 원칩화 가능          |
| 단점                        | 많은 전력 소모<br>주변회로와의 원칩화 불가능     | 화질의 균등성이 좋지 않음<br>마이크로프로세서의 동작속도제한 |

표 4.1 CMOS 방식과 CCD 방식의 비교

#### 4.1.2 RadEye1™ CMOS 영상센서

본 연구에서 사용된 CMOS 방식의 영상센서(RadEye1™ Imaging Sensor)는 그림 4.1과 같다. 센서의 유효면적은 2.5 cm x 5 cm 이며 524,288개의 픽셀로 구성되어 있다. 센서에 의해 표현될 수 있는 공간해상도(ideal MTF)는 10 lp/mm 이고, dynamic range는 14 bit이상 가능하다. 또한 센서로부터 데이터를 출력시키는 비율은 최대 2.5 MHz이며 frame rate은 0.01에서 4.5 frame/sec 이다. 이 센서를 동작시키기 위한 조건은 외부 clock과 start 신호를 제공해야 하며 센서의 기준전압(reference voltage)인 VD 전압을 3.8V로 공급해야 한다. 이 조건에 의해 센서로부터의 출력은 음신호 2.0(dark)에서 1.3V, 양신호 2.0(dark)에서 2.7V의 출력신호를 동시에 가지며 이 소신호의 차를 영상신호 정보로 사용한다 [22].

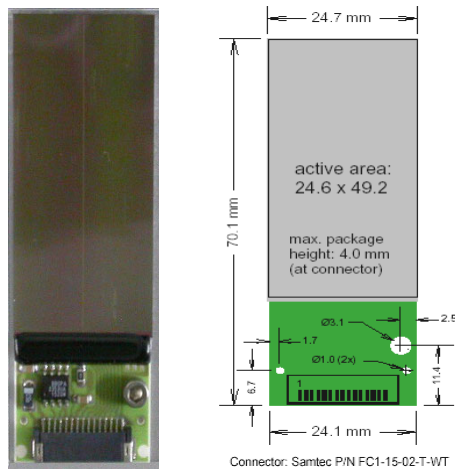


그림 4.1 RadEye1 센서의 외형 및 크기

본 연구에서 사용한 단일 센서의 구동을 위한 회로의 구성은 그림 4.2와 같다.

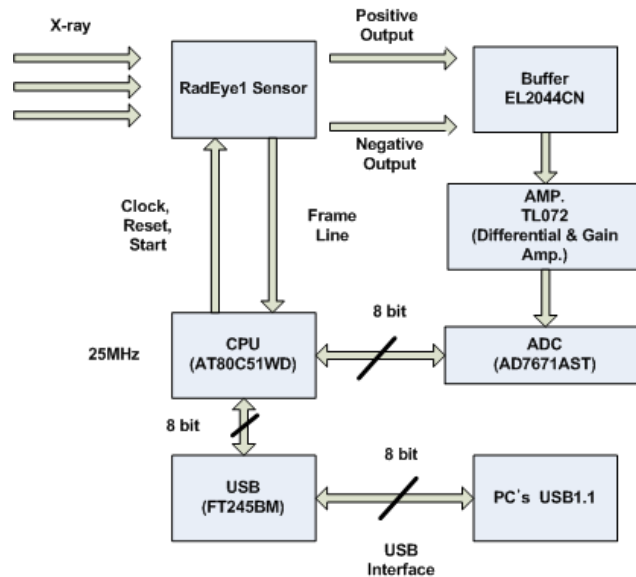


그림 4.2 RadEye1 Imaging sensor 구동을 위한 readout 회로의 구성도

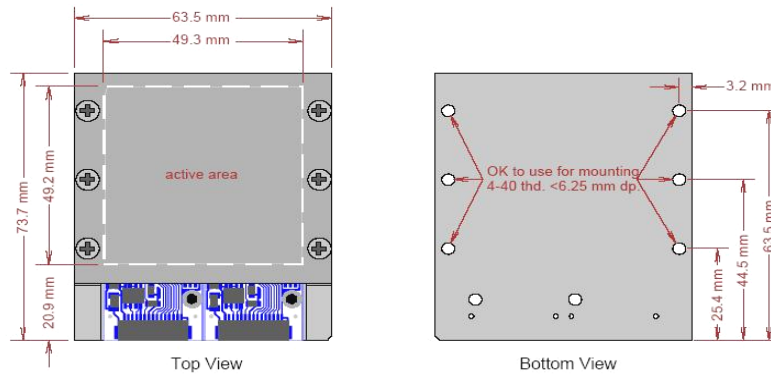
### 4.1.3 RadEye2™ CMOS 영상센서

RadEye2™ sensor module은 두 개의 RadEye1™ imaging sensor 결합된 형태로 센서의 유효면적이 5cm x 5cm이고 센서의 규격은 RadEye1™ imaging sensor와 동일하다. 본 연구에서는 두 개의 영상센서를 구동하기 위해 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째는 센서의 영상정보를 두 개의 증폭단과 ADC부를 사용하여 CPU에서 차례로 받아들이는 방법과 두 번째는 MUX를 이용하여 단일 증폭단과 단일 ADC부를 사용하고 MUX를 스위칭하여 영상정보를 획득하는 방식이다. 전자

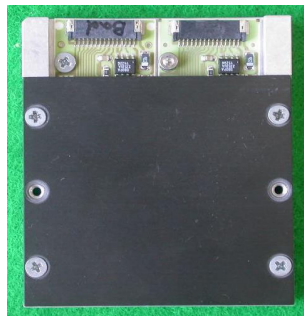


보다 후자에 사용되는 칩이나 영상획득에 필요한 소요시간이 줄어드는 장점이 있어 후자를 선택하였다. 그리고 단일 센서에 사용한 AT89C55WD(ATMEL Co.) CPU의 처리 속도가 느려(25MHz) 영상획득 시간이 오래 걸리는 단점이 있어 90 MHz의 처리속도를 갖는 C8051F120 (Silicon Lab. Co.)를 이용하여 센서의 영상획득 속도를 증가시켰다.

그림 4.3과 4.4는 RadEye2™ Sensor module과 그의 readout 구동회로 구성도를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 4.3 RadEye2™ Sensor module (a) 크기 및 (b) 외형

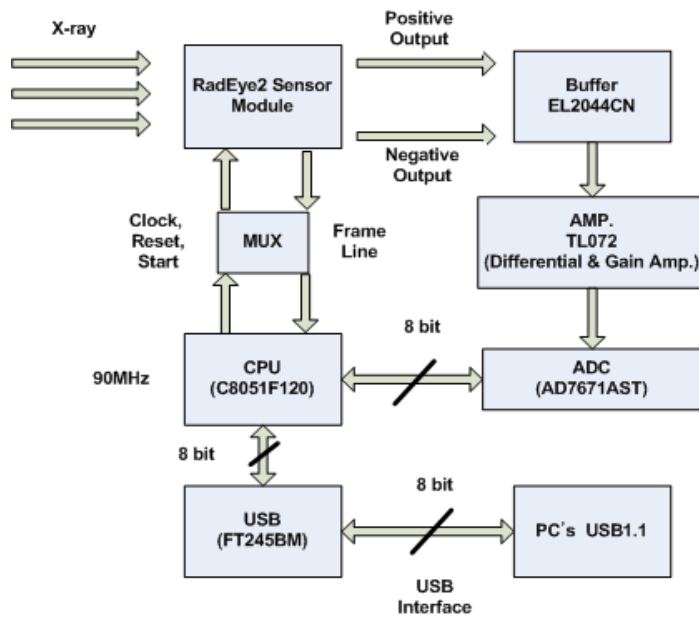


그림 4.4 RadEye2™ Sensor module 구동을 위한 readout 회로 구성도

## 4.2 CMOS 영상센서 기반의 디지털 X-선 영상시스템의 구성

RadEye1 영상센서를 이용한 미세 영상신호 readout 회로를 설계하였다. 본 회로는 센서 픽셀 어레이에서 나오는 출력신호를 증폭하는 high-speed video 증폭기와 AD converter, CPU를 이용한 readout 회로를 포함한다. 그리고 PC와의 interface를 위해 USB 1.1 프로토콜을 사용하였다.

### 4.2.1 영상센서와의 인터페이스 회로 설계

센서가 구동하고 reference 전압을 공급해주는 전원부, 그리고 센서를 제어하기 위해 CPU에서 만들어진 신호를 연결하는 제어부, 미세신호를 증폭하기 위한 증폭부로 구성되어 있다. 전원부에서는 센서가 구동하기 위해 필요한 5V 전원과, reference 전원인 3.8V를 제공하기 위해 전압분배 회로를 이용하여 구성되어 있다. 제어부에서는 센서의 동작제어를 위해 필요한 제어신호인 clock, reset, start신호를 CPU에서 받아 센서로 제공해 준다. 이는 그림 4.5와 같이 Rad-ikon Imaging Corp.에서 제공하는 센서 timing diagram을 기초로 하여 제작되었다 [23].

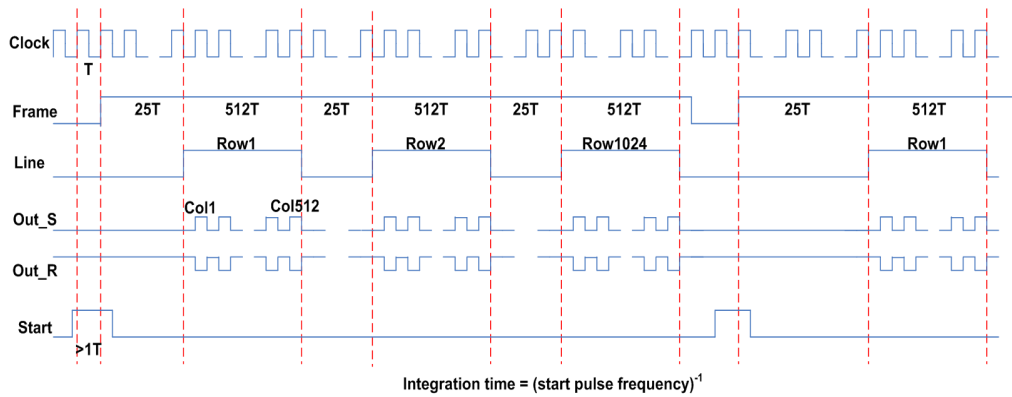


그림 4.5 RadEye1 영상 센서의 타이밍도

마지막으로 증폭부는 센서와 readout 회로 사이의 임피던스 매칭을 위한 buffer와 미세신호를 차동증폭하고 gain 증폭하는 부분으로 나뉘어져 있다. 이때 gain 증폭을 여러 단계로 수행하기 위해 가변저항을 이용하여 증폭비를 조절할 수 있게 설계 및 제작되었다.

#### 4.2.2 AD 컨버터 회로설계

본 회로에서 AD 변환을 위해 AD7661 AST AD converter(Analog device 사)를 사용하였다. 이 칩의 특징은 16 bit 분해능의 no missing code를 가지며 parallel interface가 가능하고 pipe line delay가 없다. 또한 570 KSPS(kilo sampling per second)의 속도로 AD 변환을 하며 같은 사양의 AD7671 AST 칩을 이용하여 AD 변환속도를 1MSPS 까지 향상시킬 수 있었다.

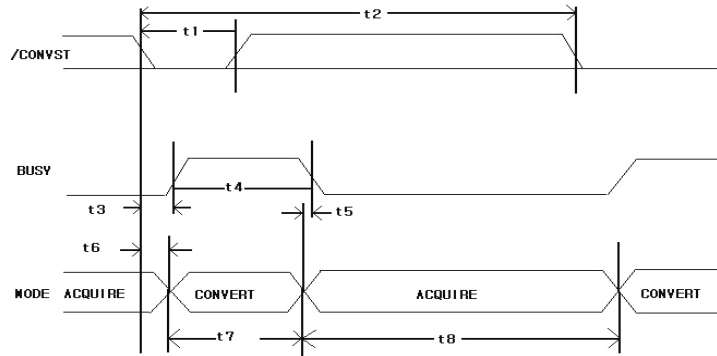


그림 4.6 AD7671AST의 타이밍도

그림 4.6은 회로에 사용된 converter의 converting timing이다. Conversion time  $t_c$ 는 제작된 회로에선 15~35  $\mu\text{sec}$  정도의 값을 가지며, 사용된 AD converter의 최소 conversion time은 1.75  $\mu\text{sec}$ 이다. 따라서 CPU의 사양에 따라 conversion time을 최소화하여 고속의 AD 변환을 구현할 수 있게 된다. 그리고 본 회로에서의 AD converter는 8bit no missing code를 가지고 있다.

#### 4.2.3 영상 전송 및 전송 회로의 설계와 제작

AD converter를 통해서 들어온 8 bit 영상 data를 AT89C55WD CPU에서 처리한 후 USB 칩인 FT245BM (FTDI Corp.)으로 전송하는 부분이다.

그림 4.7은 FT245BM 칩을 제어하기 위한 timing diagram의 일부분이다. 이 칩의 특징은 parallel FIFO 방식으로 양방향 data 전송이 가능하며 초당 1M byte의 data 전송속도를 가진다.

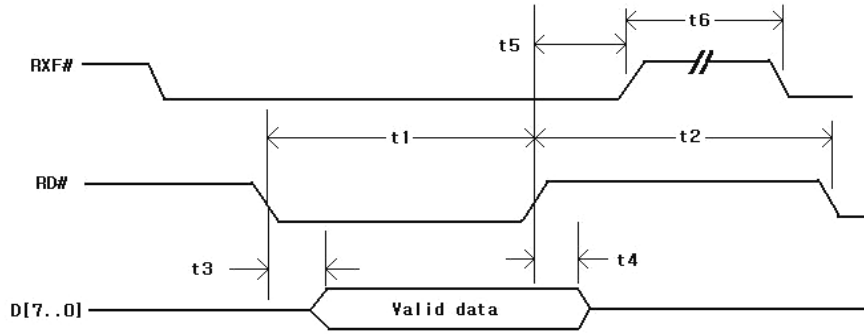


그림 4.7 FT245BM의 READ를 위한 타이밍도

본 회로는 USB 전송모드 중 BULK 모드를 이용하였으며 차후 USB 2.0 프로토콜을 사용할 수 있는 회로로의 향상도 기대할 수 있다.

#### 4.2.4 RadEye1<sup>TM</sup> 영상센서 기반 Readout 회로 구현

구현된 RadEye1 영상센서 구동을 위한 하드웨어의 CPU 알고리즘과 그림은 4.8과 4.9와 같다. Prototype으로 만들어진 영상처리 회로는 고용량의 데이터를 처리해야 하며, 영상데이터는 그 특성상 고주파 영역에서 다루어지고, 노이즈나 회로의 미세한 특성에 민감하므로 회로의 구성이 쉽지 않다. 본 연구에서는 이러한 고용량의 영상데이터를 처리하는데 8 bit CPU인 AT89C55WD CPU를 이용하였다. 하지만 AT89C55WD CPU의 외부 clock이 25 MHz로 제한적이기 때문에 보다 빠른 속도로 센서를 제어하여 영상신호를 획득할 수 없었다. 이로 인해 영상의 획득 시간이 느려지고 이미지 처리를 하는데 시간이 지연되는 단점이 있다. 따라서 명령어 처리속도가 빠른 CPU나 FPGA를 이용하여 영상획득 속도를 향상시킬 필요가 있다.

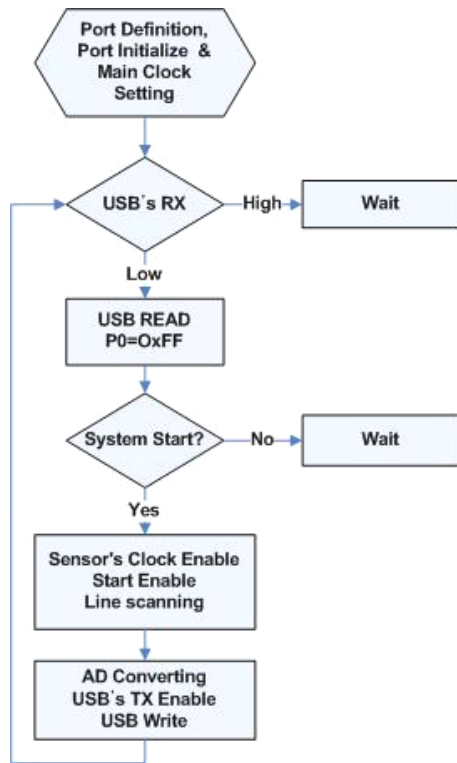


그림 4.8 RadEye1™ Image Sensor를 위한 CPU의 시스템 제어 순서도



그림 4.9 RadEye1™ Imaging Sensor 제어용 prototype board

#### 4.2.5 RadEye2™ 영상센서 기반 Readout 회로 구현

RadEye2™ module을 위한 readout 회로는 그림 4.10과 같다. 초당 1M byte의 데이터를 처리하기 위해 고속의 clock을 지원하는 C8051F120 CPU를 사용하였으며, 두 장의 센서로부터 영상데이터를 처리하기 위해 switching MUX를 센서 출력단에 첨가하여 센서의 출력신호를 순차적으로 받아 USB1.1 통신방식으로 제어용 PC로 전송하였다. 이 시스템의 영상 획득시간은 약 1.3초이고 8비트의 1,024 × 1,024의 영상을 BMP 포맷으로 저장할 수 있게 하였다. 그림 4.11은 RadEye2™ module 제어를 위한 CPU 제어 순서도를 나타낸다.

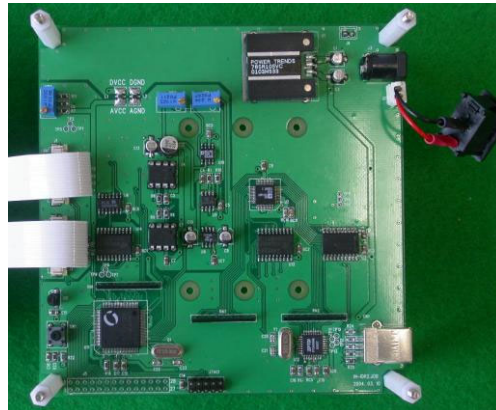


그림 4.10 RadEye2™ Sensor module 제어용 prototype board



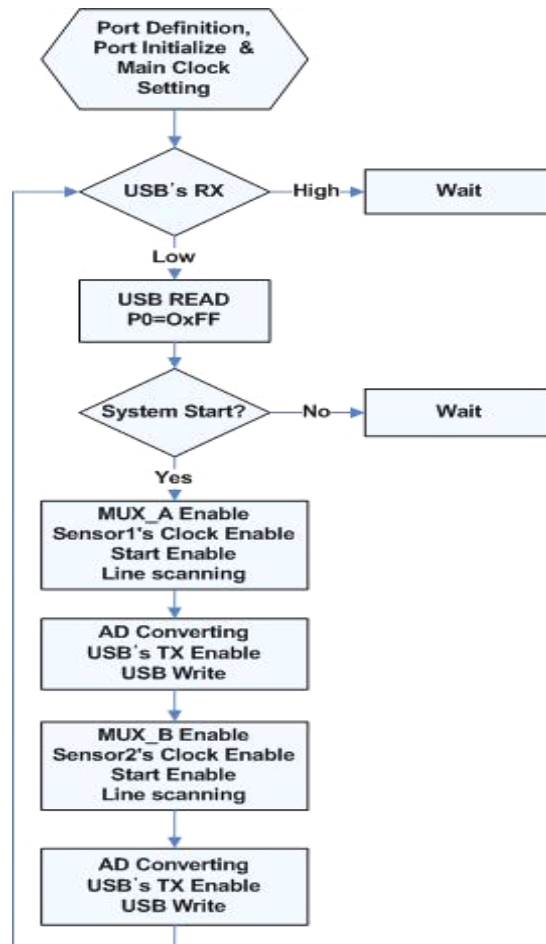


그림 4.11 RadEye2™ Sensor module을 위한 CPU의 시스템 제어 순서도

그림 4.12는 제작된 prototype PCB와 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 배터리 구동형 X-선 발생장치, 그리고 노트북을 이용하여 구현된 디지털 X-선 영상시스템을 나타내며, 영상 획득 및 특성평가 실험을 위해 60kV<sub>p</sub>(44.8keV), 1mAs의 실험조건을 고정하였다.



그림 4.12 구현된 디지털 X-선 영상 시스템

## 제 5 장 영상 특성 분석

### 5.1 몬테카를로 모의실험에 의한 영상 특성분석

#### 5.1.1 신호대잡음비(SNR)

본 연구에서 작성한 몬테카를로 모의실험 코드를 이용하여 관전압 60kV<sub>p</sub>, 관전류 1mA의 조건에서 X-선 조사선량을 0.1mR에서 7mR까지 변화시켜 신호대잡음비를 계산하였고 그림 5.1은 그 결과를 나타낸다. 그림 5.1에서 나타난 바와 같이 입사 X-선의 수가 많아질수록 영상신호에 대한 잡음의 영향이 감소하였으며, 본 연구에서 설계된 디지털 X-선 영상시스템은 약 2mR 이상의 노출조건에서 잡음의 영향이 최소화됨을 알 수 있다. 따라서 디지털 X-선 영상시스템의 X-선 조사선량에 대한 반응 특성이 거의 선형적이므로 영상의 대조도를 저하시키지 않고서 신호대잡음비를 최적화 할 수 있는 최소노출조건은 약 2mR임을 알 수 있었다.

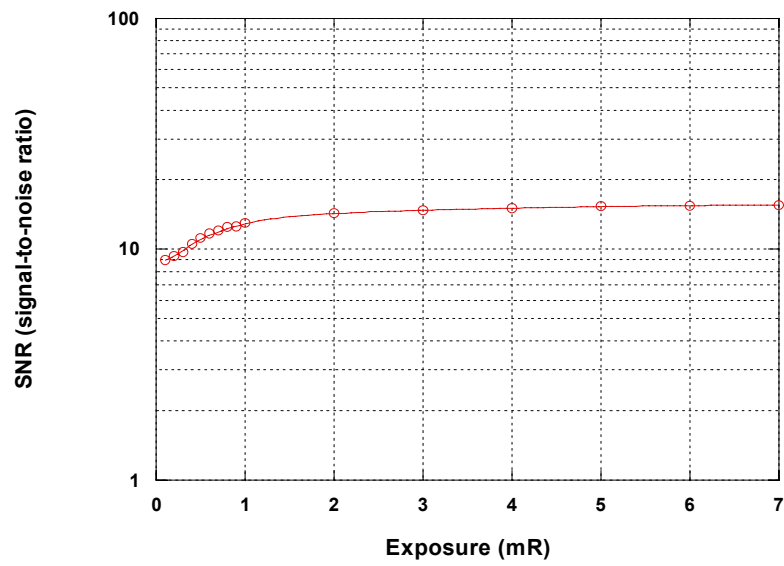
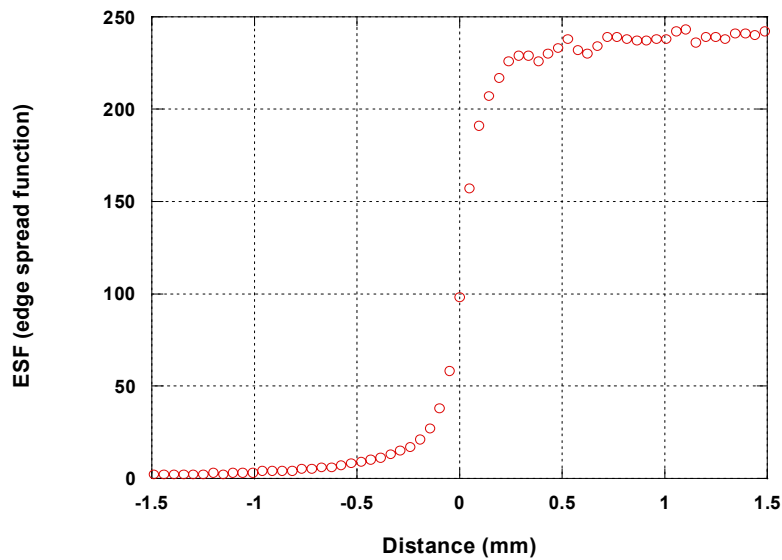


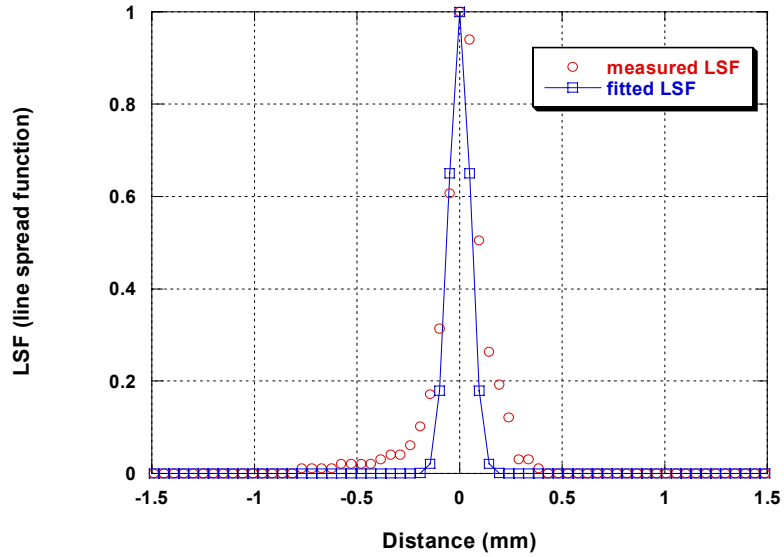
그림 5.1 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험조건에서 계산한 X-선 조사선량에 따른 SNR 곡선

### 5.1.2 변조전달함수(MTF)

본 연구에서 작성된 모의실험 코드를 이용한 획득영상의 공간해상도(spatial resolution)을 계산하기 위하여 edge test pattern의 한 선을 읽어 그림 5.2 (a)와 같이 ESF 곡선을 구한다. 구해진 ESF를 미분 및 정규화하고, 그 곡선의 FWHM (full-width half maximum)을 계산하여 Gaussian fitting을 하여 그림 5.2(b)와 같은 LSF곡선을 계산하였다. 계산된 LSF 곡선 데이터를 Fourier 변환을 취하여 구하고  $\text{sinc}(bf)$  함수로 표현되는 광센서 어레이 자체의 MTF(즉, ideal MTF)로 나누게 되면 presampled MTF를 구할 수 있게 된다. 그림 5.3은 획득된 모의 영상의 MTF 곡선을 나타내며 10% MTF의 공간주파수는 약 9.5 lp/mm 로 평가되었다.



(a)



(b)

그림 5.2 60kVp, 1mA의 실험 조건에서 측정된 (a) ESF 및 (b) LSF 곡선

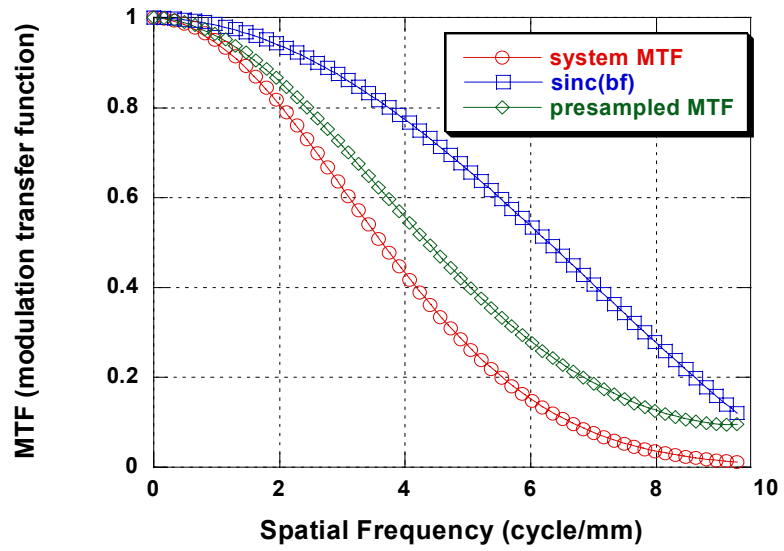


그림 5.3 60kVp, 1mA의 실험 조건에서 측정된 MTF 곡선

### 5.1.3 잡음력스펙트럼(NPS)

본 연구에서 사용된 몬테카를로 모의 영상시스템의 잡음력스펙트럼 평가를 위해 1mR, 3mR, 5mR의 각 조사선량 조건의 백색영상(white image)을 획득하고 이를 Fourier 변환하여 2차원 NPS를 구한다. 각 실험조건에서 구해진 2차원 NPS를 수직축 혹은 수평축에서 각 축상에서의 값은 배제하고 이웃한 열 혹은 행 값들을 각각 평균하여 1차원 NPS를 계산하였다. 그림 5.4는 X-선 조사선량에 따른 정규화된 1차원 NPS 곡선을 나타내며, NPS 곡선은 공간주파수가 증가할수록 점진적으로 감소하였으며 또한 X-선 조사선량이 증가할수록 영상신호에 대한 잡음의 영향이 감소됨을 알 수 있었다.

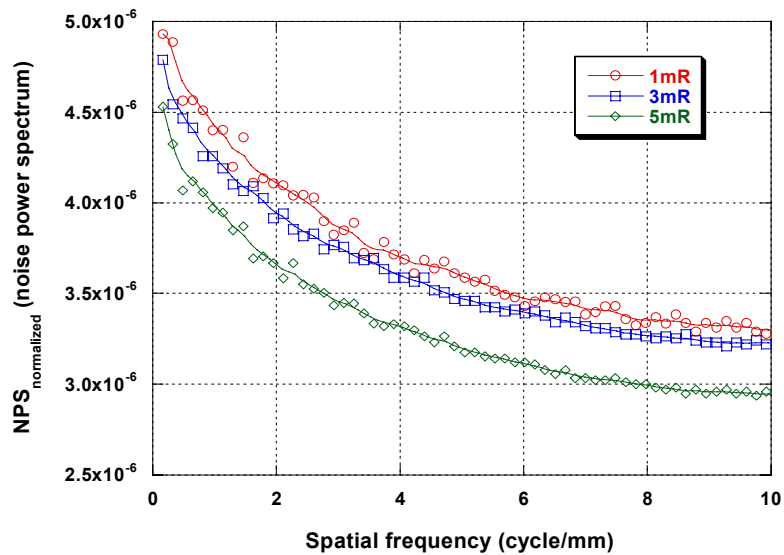


그림 5.4 60kVp, 1mA의 실험 조건에서 측정된 1D normalized NPS 곡선

### 5.1.4 양자검출효율(DQE)

본 연구에서 사용된 몬테카를로 모의 영상시스템의 실험조건에서의 양자화검출효율을 계산하기 위하여 1차원 NPS를 백색영상의 평균값으로 정규화하고 NEQ (noise-quantum equivalent)곡선을 구한 다음, SRS-78 프로그램을 사용하여 계산된 X-선 fluence(photons/mm<sup>2</sup>)로 나누어 주어 DQE를 계산하였다. 그림 5.5와 그림 5.6은 각각의 조사선량에 대한 NEQ(f)와 DQE(f)를 나타낸다. 그림 5.6에서 나타낸 바와 같이 공간주파수가 증가함에 따라 DQE가 감소하였으며, 이때 DQE(0)값은 1mR, 3mR, 5mR 조사선량에 대해 각각 약 0.8, 0.85, 0.9로 계산되었다. 또한 조사선량이 증가할수록 DQE값은 증가하였으며 이는 X-선 조사선량이 증가할수록 센서의 광자검출 효율이 증가함을 나타낸다.

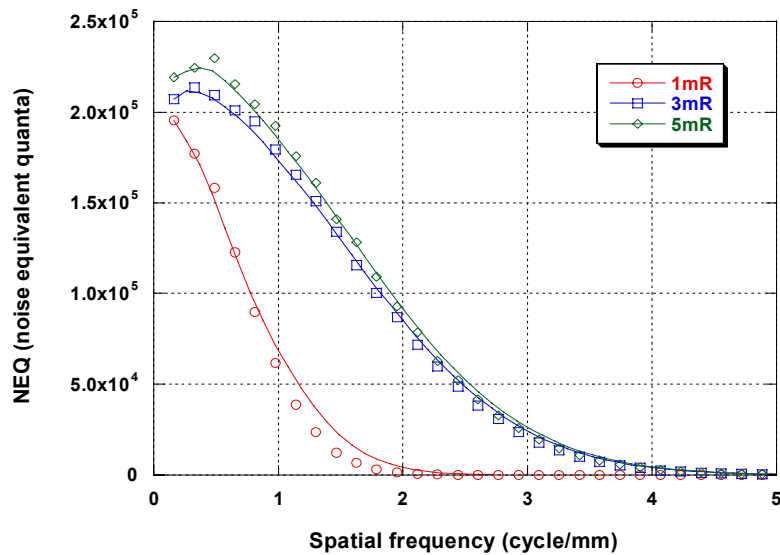


그림 5.5 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 NEQ 곡선



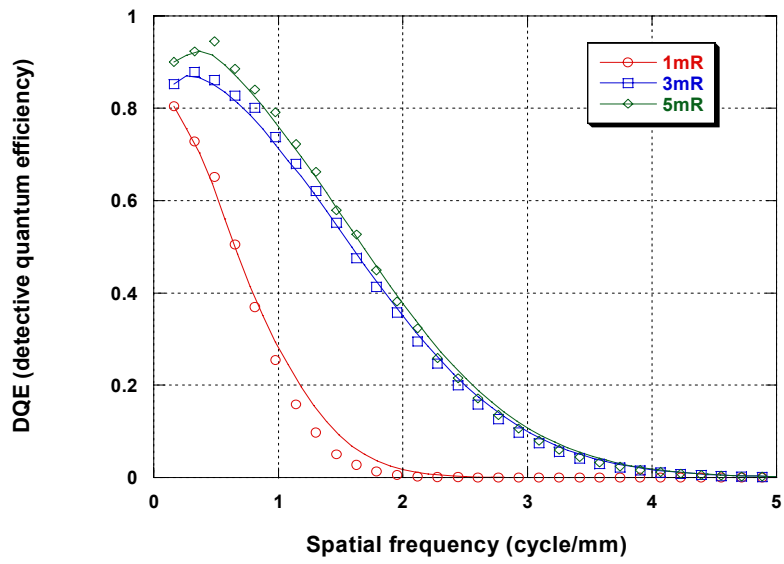


그림 5.6 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 DQE 곡선

## 5.2 실험에 의한 영상특성 분석

### 5.2.1 시스템 응답(system response) 및 선형성(linearity) 평가

본 연구에서 제작된 prototype board에서 측정된 디지털 특성곡선은 그림 5.7과 같다. 시스템의 선형성을 위한 데이터는 여러 단계의 조사선량 범위에서 측정되었으며 각 데이터는 각 실험 조건에서 획득된 영상의 전체영역의 80% 값으로 평균하였다. 그림 5.7에서와 같이 시스템은 X-선 조사선량에 대해 선형적인 특성을 나타내었고, 이것은 영상데이터의 픽셀 값과 조사선량에 대한 선형적인 관계를 이용하여 선형시스템 분석의 중요한 조건으로 사용되었다 [24]. 또한 그림 5.8은 구현된 디지털 영상시스템에서 획득한 영상의 예이다.

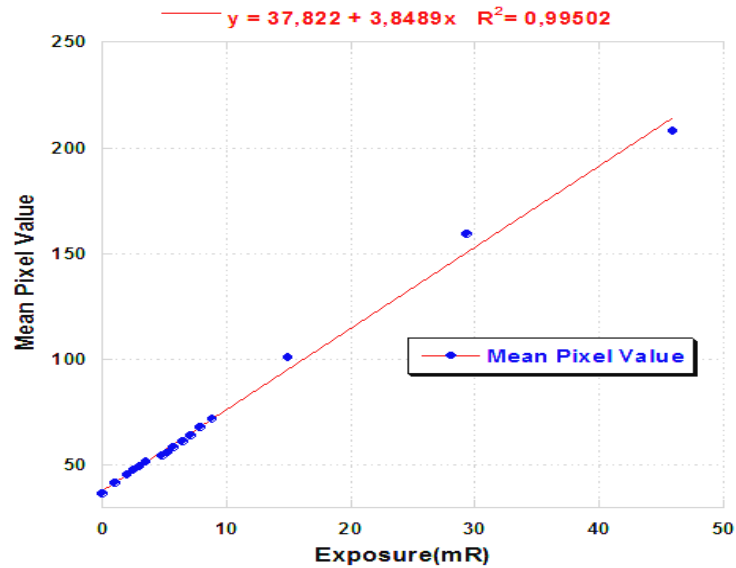


그림 5.7 시스템의 선형성(linearity) 측정 곡선

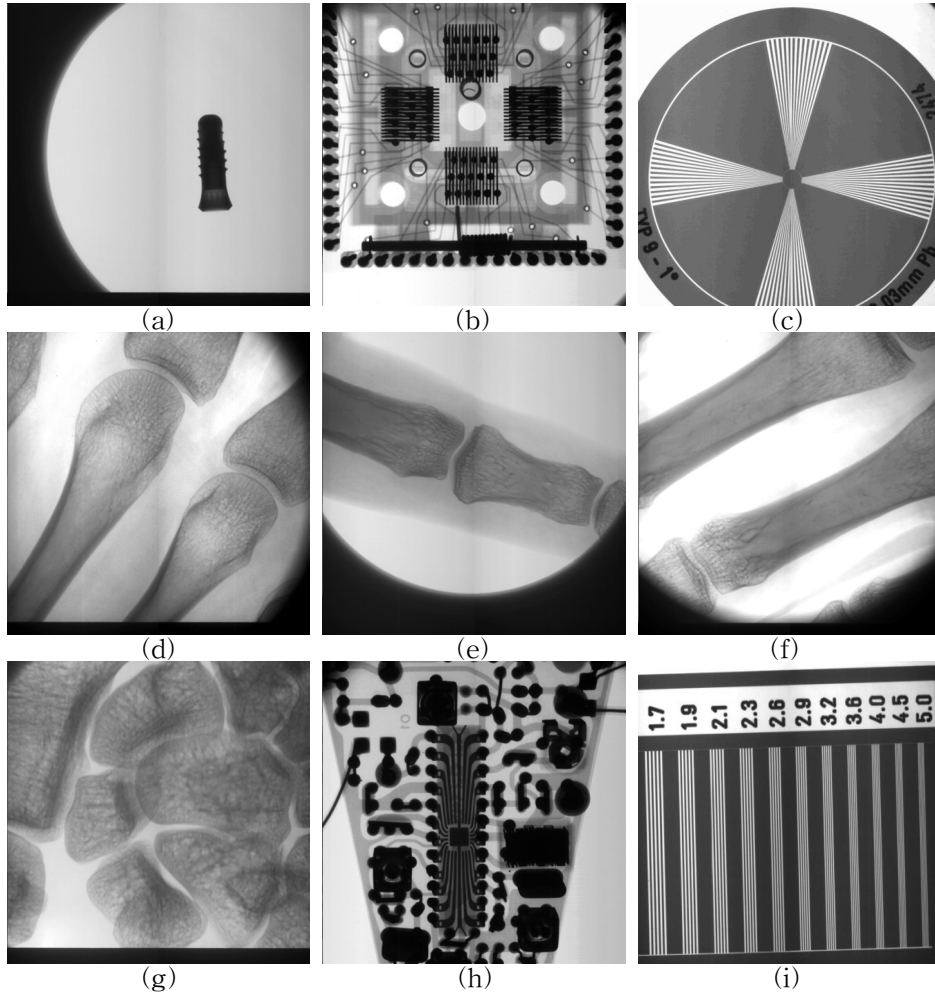


그림 5.8 구현된 디지털 X-선 영상시스템에서 획득된 영상의 예 (a) 임플란트, (b) CPU용 소켓, (c) star pattern, (d),(e),(f) 손가락뼈, (g) 손목뼈, (h) 전자부품, (i) line-pair test pattern

## 5.2.2 신호대잡음비(SNR)

본 연구에서 구현된 디지털 영상시스템의 신호대잡음비를 측정하기 위하여 관전압 60kV<sub>p</sub>, 1mAs의 조건에서 X-선 조사선량을 변화시키며 두께 250 μm의 원형납 팬텀을 이용하였다. 실험에서 X-선 조사선량을 측정하기 위해 NERO<sup>TM</sup> 8000 장비(VICTOREAN, USA)를 사용하였으며 측정된 신호대잡음비의 곡선은 그림 5.9와 같다.

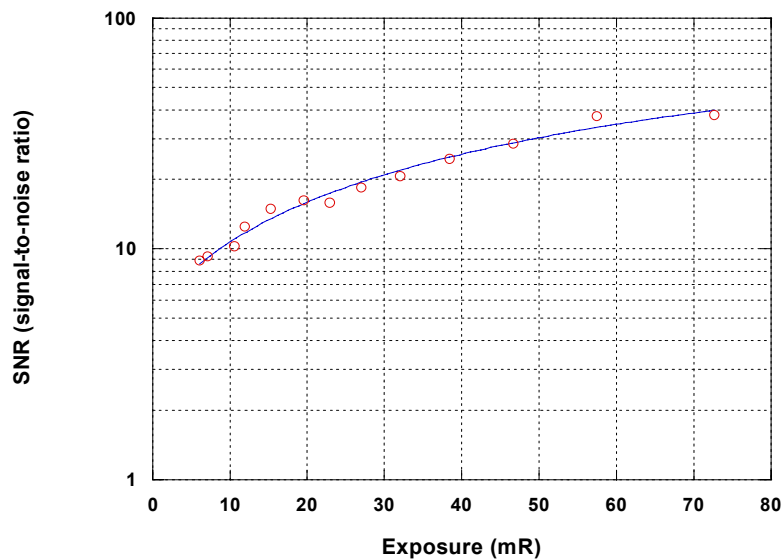


그림 5.9 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험조건에서 측정된 X-선 조사선량에 따른 SNR 곡선

그림 5.9에서 나타난 바와 같이 조사선량이 증가할수록 신호대잡음비가 증가하였으며 약 70mR 이후부터 포화됨을 알 수 있다. 이는 영상신호를 형성하는 X-선 양자수가 증가할수록 신호대잡음비가 커지고 70mR 이후에서는 그 값이 일정함을

나타낸다.

### 5.2.3 변조전달함수(MTF)

본 연구에서 구현된 디지털 영상시스템의 공간해상도 평가를 위하여 250  $\mu\text{m}$  두께의 납을 아크릴에 부착하여 edge test pattern을 제작하고, 관전압 60kV<sub>p</sub>과 1mAs의 실험조건에서 촬영한 edge test pattern의 영상은 그림 5.10과 같다.

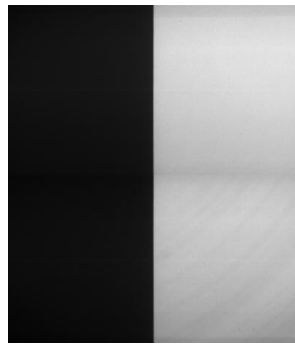
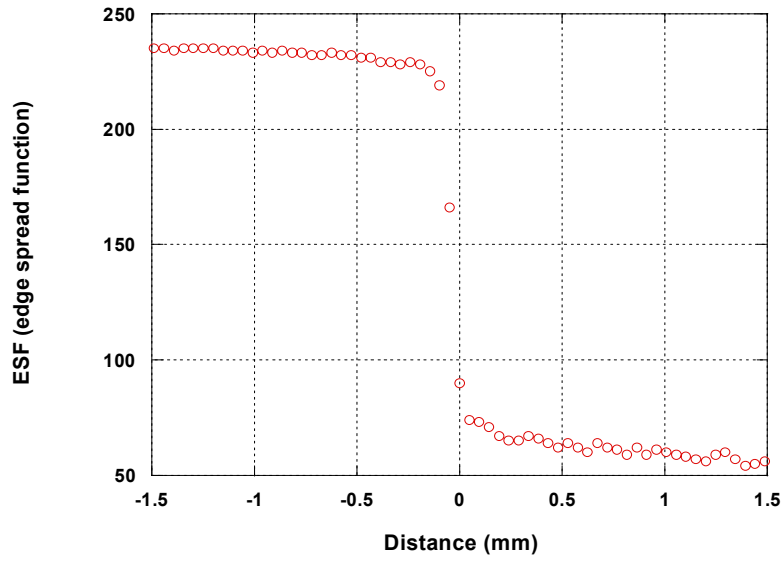
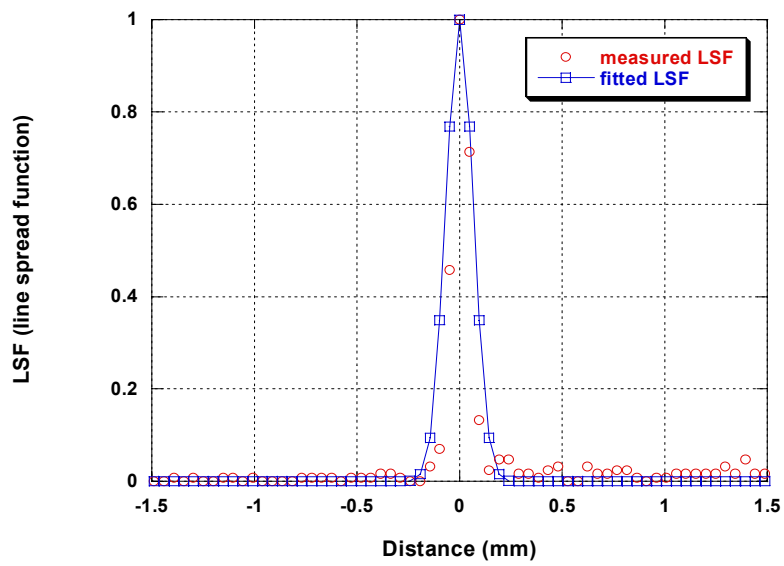


그림 5.10 ESF 곡선 측정을 위한 edge pattern 영상

획득된 edge 영상에서 수평축으로 한 줄을 읽어 ESF 곡선을 구하고 이를 미분하여 LSF 곡선을 구한 후, FWHM(full-width half maximum)을 측정하고 Gaussian fitting을 하여 그림 5.11(a)와 (b)와 같이 나타내었다. 그림 5.12는 계산된 LSF 곡선을 Fourier 변환하여 구해진 MTF 곡선을 나타내며, 측정된 10% MTF에서의 공간분해능(spatial frequency)은 약 6.0 lp/mm로 측정되었다. 그림 5.13은 이 결과를 비교하기 위하여 line test pattern을 촬영한 영상과 그 확대영상을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 5.11 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 (a) ESF 및 (b) LSF 곡선

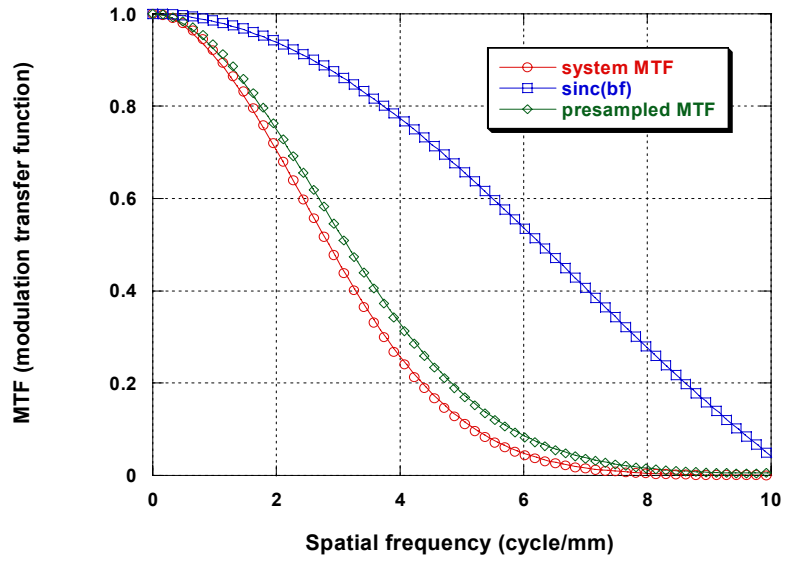


그림 5.12 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 MTF 곡선

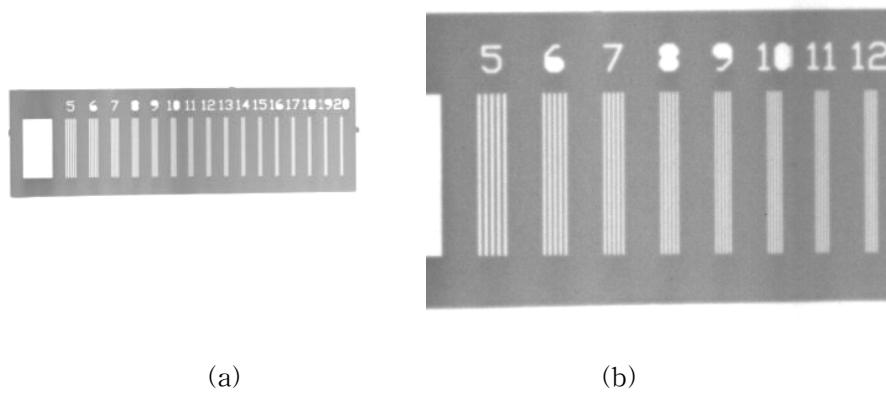


그림 5.13 공간해상도 평가를 위한 (a) line-pair test pattern 및 (b) 확대 영상

## 5.2.4 잡음력스펙트럼(NPS)

본 연구에서 구현된 디지털 영상시스템의 잡음력스펙트럼을 측정하기 위하여 10mR, 26mR, 47mR의 X-선 조사선량 조건에서 백색영상을 획득한 후 그림 5.14와 같이 정규화된 1차원 NPS 곡선을 측정하였다.

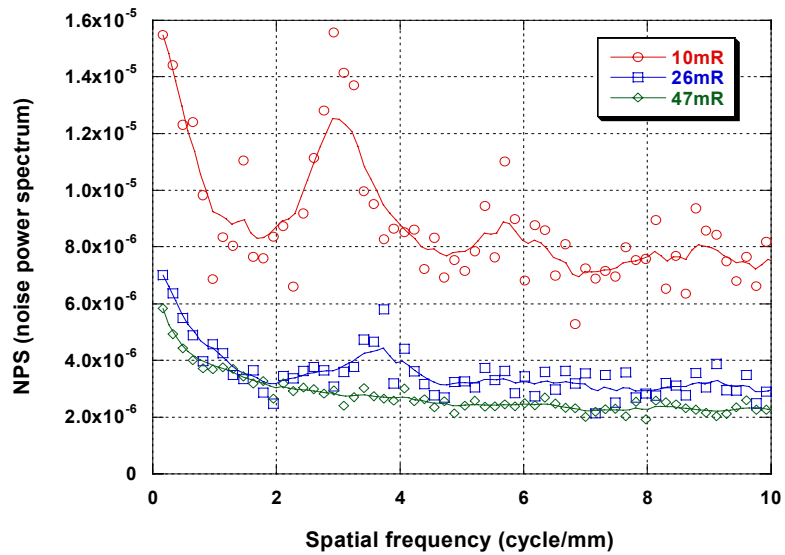


그림 5.14 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 normalized NPS 곡선

그림 5.14에서 나타낸바와 같이 X-선 조사선량이 감소할수록 영상시스템에 대한 잡음의 영향이 증가하고 또한 공간주파수가 증가할수록 잡음의 영향이 감소됨을 알 수 있다.



### 5.2.5 양자검출효율(DQE)

본 연구에서 구현된 디지털 영상시스템의 양자검출효율을 측정하기 위하여 먼저 그림 5.15와 같이 NEQ(f)를 측정하고 SRS-78 프로그램으로 계산된 X-선 fluence (photons/mm<sup>2</sup>)로 나누어 그림 5.16과 같이 DQE(f)를 측정하였다.

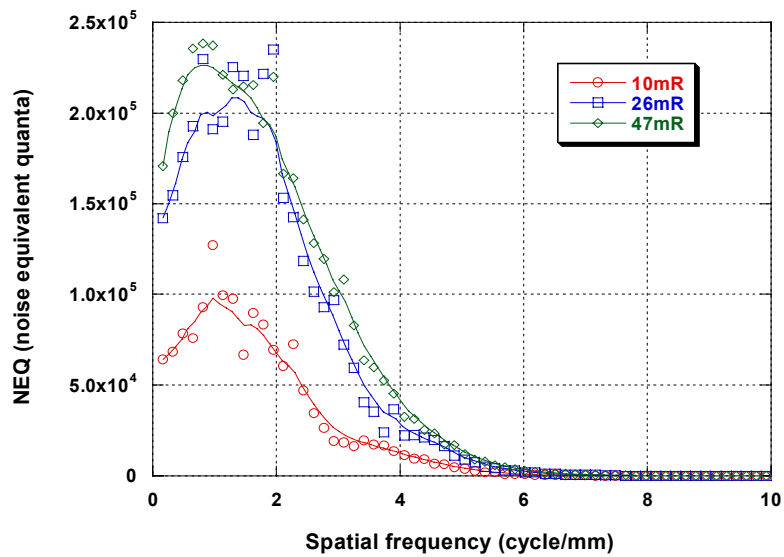


그림 5.15 60kVp, 1mA의 실험 조건에서 측정한 NEQ 곡선

그림 5.16은 X-선 조사선량이 증가함에 따라 영상시스템의 검출효율이 증가함을 보여준다. 본 연구에서 구현된 디지털 X-선 영상시스템의 DQE(0)의 값은 10mR, 26mR, 47mR의 실험조건에서 각각 약 0.28, 0.59, 0.70로 측정되었다.

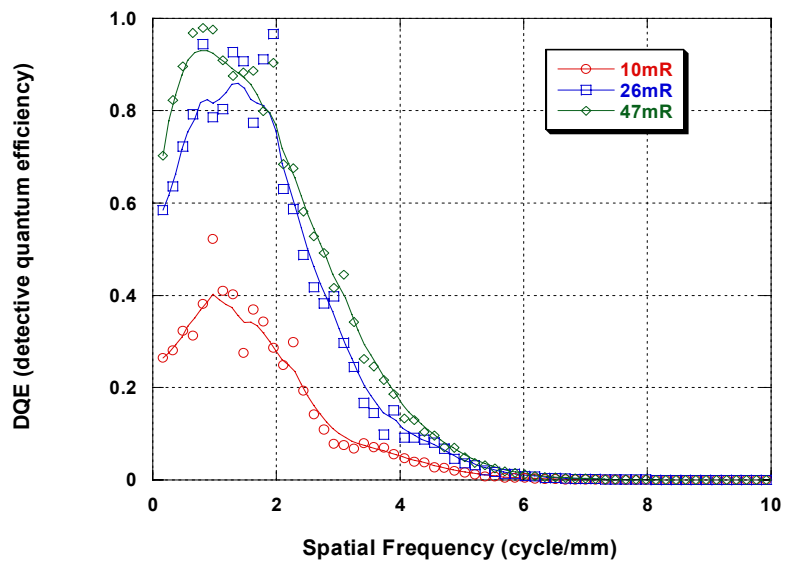


그림 5.16 60kV<sub>p</sub>, 1mA의 실험 조건에서 측정된 DQE 곡선

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 디지털 X-선 영상시스템에서 획득된 영상의 특성을 사전에 평가하기 위하여 몬테카를로 방법을 이용한 영상모의실험용 코드를 비주얼 C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 개발하였고, CMOS 영상센서와 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체 기반의 디지털 X-선 영상시스템을 구현하였다. 그리고 관전압 60kV<sub>p</sub>, 관전류 1mA, 1초의 조사시간, Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체(Min-R, thickness : 43.2 μm, KODAK, USA)의 실험조건에서 획득한 모의 영상과 실험영상특성을 비교 평가하였다. 표 6.1은 모의실험과 실험을 통해 획득된 영상특성을 비교하여 나타내었다.

| 시스템     | 모의 실험        |          | 구현된 영상시스템   |          |
|---------|--------------|----------|-------------|----------|
| SNR     | 낮은 조사선량에서 포화 |          | 조사선량에 따라 증가 |          |
| 10% MTF | 9.5 lp/mm    |          | 6.0 lp/mm   |          |
| NPS     | 공간주파수        | 증가할수록 작음 | 공간주파수       | 증가할수록 작음 |
|         | 조사선량         | 증가할수록 낮음 | 조사선량        | 증가할수록 낮음 |
| DQE     | 공간주파수        | 증가할수록 나쁨 | 공간주파수       | 증가할수록 나쁨 |
|         | 조사선량         | 증가할수록 좋음 | 조사선량        | 증가할수록 좋음 |
| DQE(0)  | 1mR          | 0.8      | 10mR        | 0.28     |
|         | 3mR          | 0.85     | 26mR        | 0.59     |
|         | 5mR          | 0.9      | 47mR        | 0.70     |

표 6.1 모의실험 및 구현된 시스템에서 획득된 영상의 특성 비교

모의실험을 통해 획득된 영상의 특성은 낮은 선량으로 높은 신호대잡음비를 가지며 10% MTF가 9.5 lp/mm로 측정되었으며, 공간주파수가 증가할수록 NPS와 DQE 특성은 점진적으로 감소하였으며 X-선 조사선량이 증가할수록 NPS는 감소

하고 DQE는 증가하였다. 이 때 DQE(0) 값은 1.0, 3.0, 5.0mR 조사선량에서 각각 약 0.8, 0.85, 0.9로 계산되었다. 실험 영상의 특성은 X-선 조사선량에 선형적인 응답을 나타내고 신호대잡음비가 조사선량이 증가할수록 증가하다가 70mR에서 포화되었으며, 10% MTF가 약 6.0 lp/mm로 측정되었다. 또한 NPS와 DQE는 공간 주파수와 X-선 조사선량에 대해 모의 실험결과와 비슷한 결과를 나타내었으며, 이 때 DQE(0) 값은 10mR, 26mR, 47mR의 실험조건에서 각각 약 0.28, 0.59, 0.70으로 측정되었다. 본 연구에서 모의실험 영상과 구현된 디지털 영상시스템의 영상의 특성결과가 차이를 보이는 이유는 모의실험에서 연속스펙트럼이 아닌 단일 X-선 에너지를 사용하였기 때문이며, 구현된 시스템에서 readout 회로의 전기적인 잡음과 gain 특성을 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 모의실험 결과가 SNR, MTF, NPS, 그리고 DQE가 더 좋게 나온 것이다. 본 영상모의실험 코드는 다양한 디지털 X-선 영상시스템에 대해 여러 설계변수들에 대한 성능을 예측함으로써 영상시스템의 최적설계에 활용될 수 있으나, 에너지 스펙트럼을 가지는 X-선을 사용하고 평행 빔이 아닌 썬기형의 빔 발생을 고려한 코드로 개선해야 한다. 그리고 구현된 디지털 X-선 영상시스템의 경우, 8비트의 1,024x1,024 영상을 얻는데 약 1.3초의 시간이 소요되어 보다 빠른 속도의 영상획득을 위해 고속의 clock을 지원하는 CPU를 사용하고, USB 2.0 통신방식을 지원하도록 개선해야 할 것이다. 특히 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) 섬광체를 대신하여 침단형 CsI (Tl)과 같은 섬광체를 이용하여 공간해상도를 증가시키는 연구도 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 김영일 외 18인, Analog and Digital 의료영상정보학, 대학서림, 2001.
- [2] H.J. Kim, " Analysis of an a-Si:H P-I-N Diode for The Flat Panel Detector: Leakage Current and Radiation Damage", KAIST 박사학위 논문, Sep. 2002.
- [3] Kenneth A. Fetterly and Nicholas J. Hangiandreou "Image quality evaluation of a desktop computed radiography system", Med. Phys., Vol. 27, pp. 2669-2679, Dec. 2000.
- [4] 박수성 외 6인, 진단방사선원리, 대학서림, 2000.
- [5] Anthony Brinton Wolbrast, Physics of Radiology, Prentice-Hall International, Inc., 1993.
- [6] K. Kump, P. Granfors, F. Pla, P. Gobert, "Digital X-ray detector technology", Elsevier paper, pp. 221-226, Oct. 1998.
- [7] Andrew Smith, Fundamentals of Digital Mammography: Physics, Technology and Practical considerations, Direct Ray Technology Co., Sep./Oct. 2003.
- [8] L.E. Antonuk, J.H. Siewerdsen, J. Yorkston, W. Huang, "Radiation Response of Amorphous Silicon Imaging Array at Diagnostic Energy", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 41, no. 4, pp. 1500-1505, Aug. 1994.

- [9] Jean-Pierre Moy, "Signal-to-noise ratio and spatial resolution in x-ray electronic imagers: Is the MTF a relevant parameter?", *Med. Phys.*, Vol. 27, pp. 86-93, Jan. 2000.
- [10] Bruce H. Hasegawa, *Medical X-ray Imaging*, Med. Phys. Publishing Co., 1991.
- [11] 김종호 외5인, "디지털 X-선 촬영시스템의 영상 및 물리적 특성 분석", 전자공학회논문지, 제26권, 제7호, pp. 1064-1076, 7월 1989.
- [12] Ehsan Samei and Michael J. Flynn, "A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device" *Med. Phys.*, Vol. 25, pp. 102-113, Jan. 1998.
- [13] Ehsan Samei and Michael J. Flynn, "An experimental comparison of detector performance for computed radiography systems", *Med. Phys.*, Vol. 29, pp. 447-459, April 2002.
- [14] Carla D. Bradford and Walter W. Pepler, "Performance characteristics of a Kodak computed radiography system", *Med. Phys.*, Vol. 26, pp. 27-37, Jan. 1999.
- [15] James T. Dobbins III, David L. Ergun, Lois Rutz, Dean A. Hinshaw, Hartwig Blume, Dwayne C. Clark, "DQE(f) of four generations of computed radiography acquisition devices", *Med. Phys.*, Vol. 22, pp. 1581-1593, Oct. 1995.

- [16] Ehsan Samei, Michael J. Flynn, Harrell G. Chotas, James T. Dobbins III, "DQE of direct and indirect digital radiography systems", Proceedings of SPIE Vol. 4320, pp. 189-197, 2001.
- [17] Paul R. Granfors and Richard Aufrichtig, "Performance of a 41x41-cm<sup>2</sup> amorphous silicon flat panel x-ray detector for radiographic imaging applications", Med. Phys., Vol. 27, pp. 1324-1331, June 2000.
- [18] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html>
- [19] C. Frójdh, H.E. Nilsson, P. Nelvig, C.S. Peterson, "Simulation of X-ray Response of Scintillator Coated Silicon CCDs", IEEE Trans. Nuclear Science, Vol. 45, No. 3, June 1998.
- [20] H.K. Lee, K.S. Shinn, T.S. Shu, B.Y. Choe, "Monte Carlo studies on the amorphous silicon based digital X-ray imagers", IEEE Nuclear Science Symposium, Vol. 2, pp. 1288-1262, Nov. 1997.
- [21] Scott T. Smith, Daniel R. Bednarek, Darold C. Wobschall, Myoungki Jeong, Hyunkeun Kim, Stephen Rudin, "Evaluation of a CMOS Image Detector For Low cost and Power Medical X-ray Imaging Applications", Conference of SPIE, Vol. 3659, pp. 952-961, 1999.
- [22] Thorsten Graeve and Gene P. Weckler, "High-resolution CMOS imaging detector", Physics of Medical Imaging, SPIE, Vol. 4320, 2001.
- [23] <http://www.rad-icon.com>

- [24] Hiroshi Fujita, Kunio Doi, and Maryellen Lissak Giger, "Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6. MTFs of II-TV digital imaging systems", Med. Phys. Vol. 12, pp. 713-720, Nov./Dec. 1985.



## ABSTRACT

### A Study for the Realization of a Digital Radiography System Based on CMOS Image Sensor and Its Image Quality Evaluation

Jeong, Man Hee

Dept. of Medical Engineering

The Graduate School

Yonsei University

In this study, we developed a Monte Carlo image simulation code written with visual C++ programming language to evaluate image qualities of the designed digital radiography system based on CMOS image sensor and Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) scintillator. Under test conditions of 60 kV<sub>p</sub> tube voltage, 1 mA tube current, 1 second exposure time, and Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S(Tb) scintillator (Min-R, thickness: 43.2 μm, KODAK, USA), we obtained X-ray images both from the simulation code and from experiments, and evaluated their image qualities through the SNR (signal-to-noise ratio), MTF (modulation-transfer function), NPS (noise-power spectrum), and DQE (detective quantum efficiency). For the given test conditions, the simulated X-ray images showed a good response with X-ray exposure and about 9.5 lp/mm measured at 10% MTF, and NPS

and DQE decreased gradually with spatial frequency. In addition, NPS decreased with X-ray exposure, but DQE increased; DQE(0) value was calculated as about 0.80, 0.85, 0.90 for X-ray exposures of 1.0, 3.0, and 5.0 mR, respectively. For experimental images, the SNR increased with X-ray exposure and was saturated over 70 mR. The spatial frequency was measured as about 6.0 lp/mm at 10% MTF, and the DQE(0) value about 0.28, 0.59, 0.70 for X-ray exposures of 10, 26, and 47 mR, respectively.

The image simulation code developed in the study can be applied for a variety of digital X-ray imaging systems, and will be used for the design optimization of an X-ray imaging system by estimating its performance on various design parameters.



**Key words** : Monte Carlo simulation, Digital X-ray imaging system, SNR, MTF, NPS, DQE