J. Biomed. Eng. Res.
Vol. 22, No. 2, 165-169, 2001

Synchrotron X-선을 이용한 Micrometer 공간 분해능 영상시스템

홍진오[1,3] · 정해조[3] · 정하규[1,3] · 제정호[4] · 김은경[2,3] · 유형식[2,3] · 김희중[1,2,3]

[1]연세대학교 BK21의과학사업단, [2]진단방사선과학교실, [3]방사선의과학연구소, [4]포항공과대학교 재료공학과

(2001년 1월 8일 접수, 2001년 3월 17일 채택)

Micrometer Spatial Resolution Imaging System Using Synchrotron X-ray

J.O. Hong[1,3], H.J. Jung[3], H.K. Jeong[1,3], E.K. Kim[2,3], J.H. Je[4], H.S. Yoo[2,3], H.J. Kim[1,2,3]

[1]BK21 Project for Medical Sciences, [2]Department of Diagnostic Radiology,
[3]Research Institute of Radiological Science, Yonsei University College of Medicine
[4]Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

(Received January 8, 2001, Accepted March 17, 2001)

요 약 : 최근 포항 방사광 가속기 연구소에 미세구조 X-선 영상 실험을 위한 5C1 방사광(Synchrtoron Radiation) 빔라인이 건설되었다. 광대역의 에너지 스펙트럼을 가진 방사광 X-선이 물체를 투과한 후 $CdWO_4$ scintillator에 의해 가시광선으로 바뀌고, 그 빛을 CCD 카메라로 받아들여 영상을 획득하게 된다. 방사광 X-선은 일반 의료진단용 X-선에 비하여 위상이 일치하고, 평행하며, 그 양이 풍부한 특성들을 갖고 있다. 방사광 영상시스템과 X-선 유방촬영 시스템에서 영상을 획득하여 영상특성들을 비교, 분석하였다. 고-분해능 X-선 시험 패턴(20 line pairs mm^{-1}), 유방촬영 팬텀, 파라핀에 고정한 인체 유방암조직과 포르말린에 고정한 인체 유방암조직, 그리고 capillary tube내 micro-bubbles등의 방사광 영상은 기존의 X-선 유방촬영시스템에서 얻은 영상보다 분해능이 뛰어나고 영상질도 우수하였다. 방사광 X-선 영상시스템은 micrometer 공간 분해능 영상을 획득할 수 있어 많은 기초분야의 영상연구와 의료영상분야에도 활발하게 활용될 것으로 기대된다.

Abstract : A synchrotron radiation 5C1 beamline at PLS(Pohang Light Source) was recently built for imaging applications. Synchrotron radiation has several advantages including in phase, collimation, and high flux. Synchrotron radiation with broad-band energy spectrum was passed through object and transformed into visible lights by $CdWO_4$ scintillator screen. The light images were detected by using a CCD camera and saved in image acquisition system. Image analyses were conducted in PC by using commercially available image processing software. Synchrotron radiation images of a high resolution X-ray test pattern, a mammographic phantom, human breast cancerous tissues, and micro bubbles in capillary tube showed much higher spatial resolution and better image contrast compared with images of the same samples obtained with conventional X-ray mammography system. Synchrotron radiation can be used for various imaging studies and clinical applications.
Key words : Synchrotron radiation, PLS, X-ray, Mammography

서 론

현재 임상에서 주로 사용되는 일반 X-선과 CT(Computed Tomography)는 수백 마이크로미터 단위의 해상도로 수 마이크로미터단위의 초 미세구조 생체 계의 물리, 화학적 신호들을 인식하는데 한계가 있다. 영상의학 분야에서 일반 X-선을 이용한 영상정보는 주로 물질의 X-선 흡수도 차이에 의해서 나타난다. 반면에 방사광 가속기에서 나오는 빛은 위상이 일치하고 평행한 특성으로 이를 이용하면 기존 CT보다 고해상도 및 고대조도의 영상 획득이 가능하다는 이론을 바탕으로 연구를 시작하였다. 많은 연구에서 monochromatic synchrotron X-선을 이용하여 물질의 X-선 흡수도 차이와 특히 물질과 물질의 경계 부분에서 phase-shift 효과에 의해서 높은 대조의 영상을 얻는 방법이 연구되어 왔다[1,2]. Synchrotron storage ring에서의 bending magnet에서 발생한 white beam(polychromatic or unmonochromatic beam)으로부터 monochroma-

통신저자 : 김희중, (120-752) 서울특별시 서대문구 신촌동 134
연세대학교 의과대학 진단방사선과
Tel. 02-361-5753, Fax. 02-313-1039
E-mail. hjkim@yumc.yonsei.ac.kr

tized beam을 얻기 위해서는 고가의 정밀한 silicon monochromator를 사용하여야 하고, 이러한 장치를 사용하면 beam의 *intensity*가 크게 감소하여 같은 영상의 질을 얻기 위해서 exposure time을 증가시켜야 하며 이는 real time imaging과 같은 방법에 제한을 받게 되기 때문에, 본 실험에서는 최근에 새로 설치한 빔라인을 이용하여 경제적이면서 간편한 영상획득 장치를 구현하여 phase-contrast 효과를 극대화함으로써 monochromatized beam에서 얻는 영상과 버금가는 질과 특성의 영상을 얻고 real time imaging의 가능성을 보이는 것을 목적으로 하였다[3]. 본 연구에서는, 광주과기원, 포항공과대학, 연세의료원의 공동 연구팀에 의하여 PLS(Pohang Light Source)에 synchrotron 5C1 beamline 을 건설한 후 unmonochromatized synchrotron X-선을 이용한 고-분해능과 고-대조도의 영상을 획득하는 간단하면서도 경제적인 synchrotron X-선 영상시스템을 구축하였다[4]. 고-분해능 X-선 시험 패턴(20 line pairs mm^{-1}), 유방촬영 팬텀(Mammographic Accreditation Phantom Model 156), 파라핀에 고정한 인체 유방암조직과 포르말린에 고정한 인체 유방암조직, 그리고 capillary tube내의 micro bubbles등의 영상을 synchrotron X-선 영상시스템과 일반 X-선 유방촬영시스템을 사용하여 획득한 후 영상의 분해능, 대조도의 특성과 차이를 비교하였다.

대상 및 방법

포항 방사광 가속기 연구소에 있는 제 3세대 방사광가속기 PLS(*Pohang Light Source*)는 전자총에서 나온 전자들이 총 길이 150m의 선형가속기에 의해서 2.0 GeV의 에너지로 가속되어 원형에 가까운 총 둘레 280m 궤도의 저장 링에 보내지고, 평균적으로 2-2.5 GeV 전자 에너지와 250mA 전류로 회전하게 된다. 방사광은 저장링 내의 각 빔-라인의 시작부분에 설치된 휨자석(Bending Magnet)에 의하여 가속된 전자빔이 방향을 바꿀 때 제동복사 형태로 방출되는 저-에너지 적외선 영역부터 고 에너지 X-선 영역까지의 연속적인 에너지 분포를 갖는 매우 강력한 백색광(white beam)을 의미한다(그림 1). 방사광을 이용하여 영상을 획득하는 방법은 크게 두 가지로 분류되는데, 입사된 white beam(polychromatized or unmonochromatized beam)을 단지 silicon wafer attenuator를 사용하여 energy spectrum을 조절하는 방법과 white beam을 silicon wafer 표면에서(monochromator) Bragg diffraction에 의한 monochromatized beam을 사용하는 방법으로 나눌 수 있다. 본 실험은 unmonochromatized beam을 사용한 방법으로, 영상분야 연구목적의 Synchrotron X-선 영상시스템을 5C1 빔-라인 Hutch 내부에 그림 2와 같이 설치한 후, 빔의 세기를 두께 0.5mm silicon wafer attenuator들을 이용해 5~50keV의 X-선 에너지 분포를 갖게 조절하였고, 빔의 크기는 scintillatior 크기에 적합하도록 slit을 사용하여 12×6mm로 맞추었다. 물체를 투과한 X-선들은 얇은 $CdWO_4$(10×10×0.1 mm, Bicron Co., USA) scintillator와 반응하여 가시광선을 발생한다. 이러한 가시광선의 영상정보는 금도금된 거울에 의하여 90°로 반사되어 5배율 광학 렌즈로 확대된 후 CCD camera에 도달한다. 본 실험에서 *CCD* camera(KODAK™ MEGAPLUS Model ES 4.0/8bit)의 노출시간은 25ms, 유효시야는 4.5mm×3mm이었으며 디지털 영상정보들은 CCD camera와 연결된 PC에 설치된 영상 처리 프로그램(Image-Pro® Plus, Media Cybernetics, L.P. Baltimore, Maryland)을 사용하여 분석하였다. 실험에 사용된 이미지 획득 시스템은 그림 2와 같이 구성하였고, 그림 3은 시스템 구성도를 보여준다. 일반 X-선 유방촬영시스템에서 획득한 필름영상은 Epson™ Perfection 1200s scanner를 사용하여 1200dpi의 해상도로 스캔한 후 디지털화 한 영상이고, synchrotron X-선 영상시스템의 영상은 실험 *object*가 *CCD camera*의 유효시야보다 크기 때문에 CCD camera에서 획득한 2,000×1,312pixels의 디지털 영상을 실험 object의 크기에 맞추어 여러 작은 영상을 patch 한 것이다. Synchrotron X-선 영상시스템에서 고-분해능 X-선 시험 패턴(Nuclear Associates NY), 유방촬영 팬텀(Mammographic Accreditation Phantom Model 156, Gammex RMI), 파라핀에 고정한 인체 유방암조직, 그리고 포르말린에 정착시킨 인체 유방암조직 영상들을 획득하고, 일반 X-선 유방촬영시스템(GE Senographe DMR)에서 20~25kVp, 16~83 mAs 조건하에 동일한 대상에 대한 영상을 얻은 후 시각적으로 공간 분해능 및 영상 대조도의 특성을 비교 분석하였다. 실

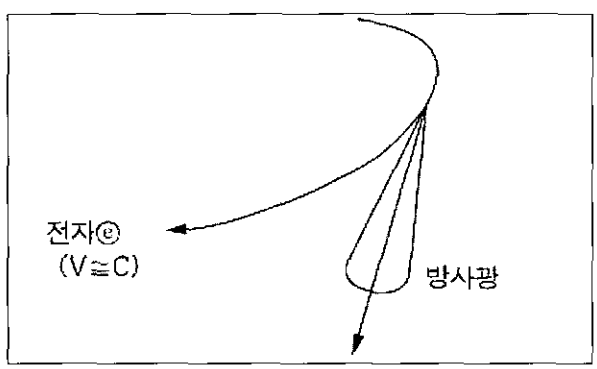

그림 1. 광속에 가까운 속도로 가속된 전자가 커브를 틀 때 그 접선 방향으로 방출되는 좁은 퍼짐의 광인 방사광

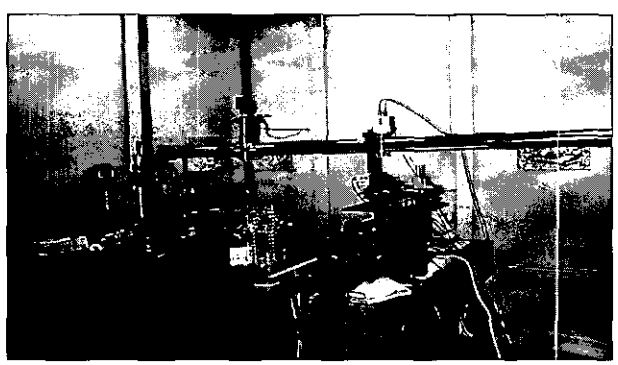

그림 2. Synchrotron X-선 영상시스템 구성 사진

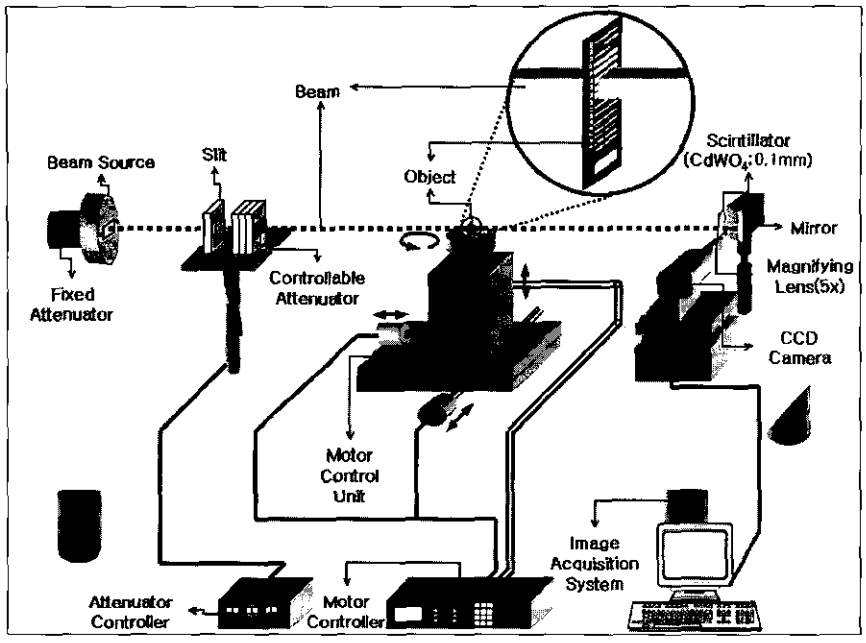

그림 3. Synchrotron X-선 영상시스템 구성도

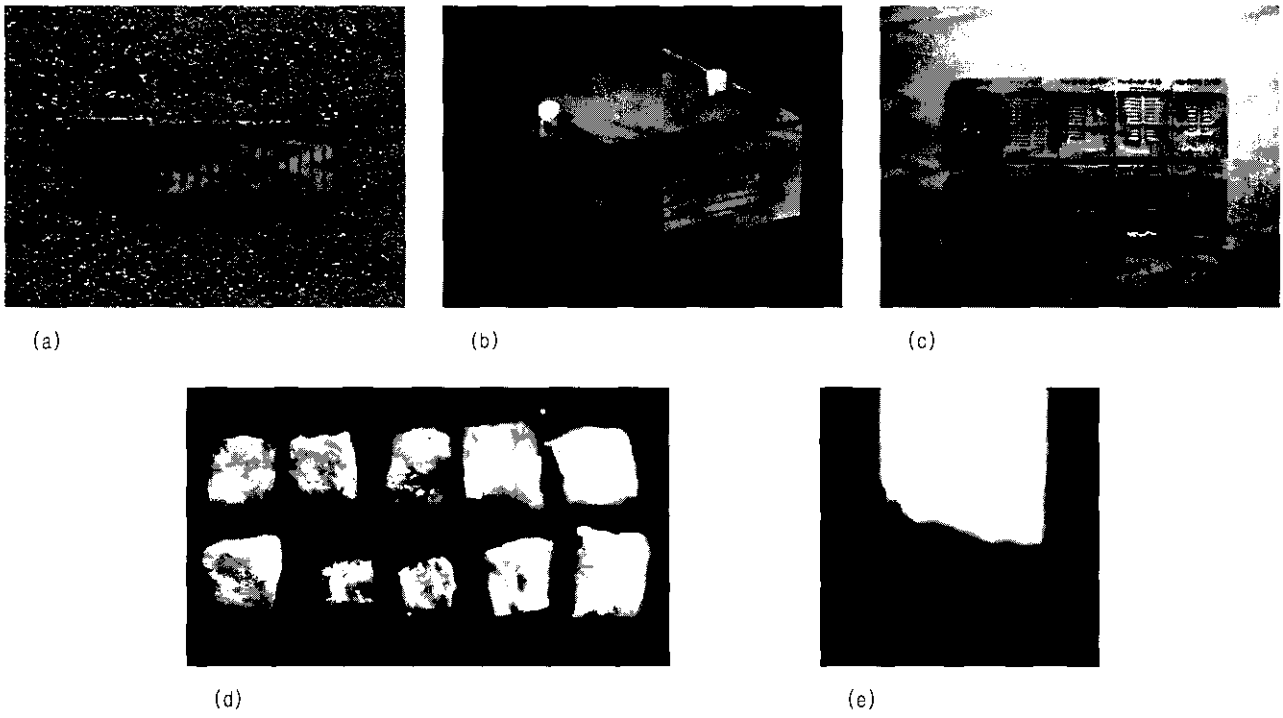

그림 4. 실험대상: (a) 고-분해능 X-선 시험 패턴(20line pairs mm^{-1}), (b) Mammographic Accreditation Phantom Model 156, (c) 파라핀에 고정한 인체 유방암조직, (d) 포르말린에 정착시킨 인체 유방암 조직들, (e) Micro bubbles in capillary tube

험 object와 scintillator사이의 거리에 따른 object경계부분의 phase-contrast효과[5,6,7]를 실험하기 위해 capillary tube안의 micro bubbles를 scintillator로부터 35mm, 50mm, 100mm, 200mm, 250mm, 300mm, 그리고 470mm로 옮기면서 synchrotron 영상을 획득하였다(Photometrics CH250, CCD camera 사용). 여기 사용된 CCD camera의 노출시간은 1000ms, 유효시야는 5.51mm×5.51mm이며 획득된 영상은 511×511pixels로 이루어진 8 bit 256 Gray Level이다. 그림 4는 영상획득에 사용된 대상 물체들의 외관 사진들이다.

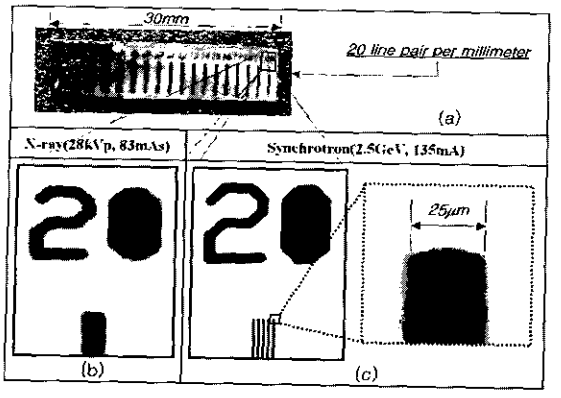

그림 5. 고-분해능 X-선 시험 패턴 20line pairs mm-1; (a)시험 패턴, (b) 일반 X-선 유방촬영시스템에서 획득한 영상, (c) Synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상

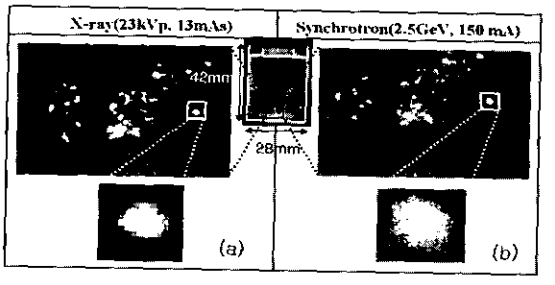

그림 7. 파라핀에 고정한 인체 유방암조직; (a) 일반 X-선 유방촬영시스템에서 얻은 영상, (b) Synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상

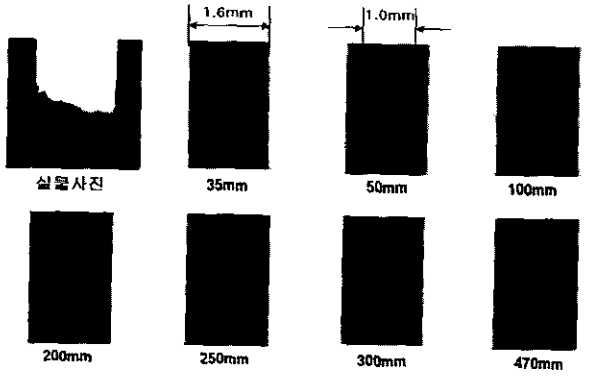

그림 9. Synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 capillary tube 내의 micro bubbles의 이미지들(각 그림 아래의 수치는 scitillator와 capillary tube간의 거리이다)

결과 및 고찰

PLS 5C1 synchrotron X-선 영상시스템이 성공적으로 설치되어 각 실험 object들의 방사광영상을 디지털 데이터로 얻었다. 일반 X-선 유방촬영시스템에서 28kVp-83mAs X-선량 조건으로 촬영한 고-분해능 X-선 시험 패턴(20 line pairs mm^{-1})은 최대 14line pairs mm^{-1}(약 35μm)의 분해능을 확인

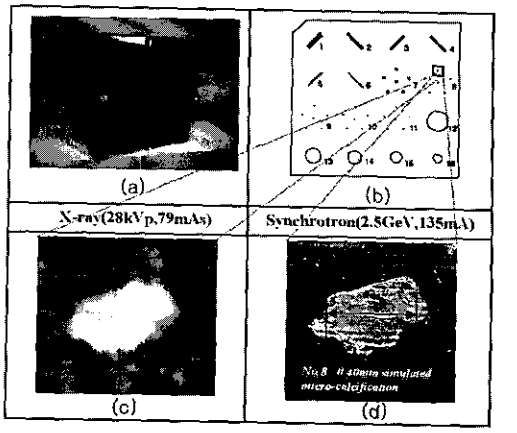

그림 6. Mammographic Accreditation Phantom Model-156: (a) Phantom, (b)Schematic view,(c) 일반 X-선 유방촬영시스템에서 얻은 영상, (d) Synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상

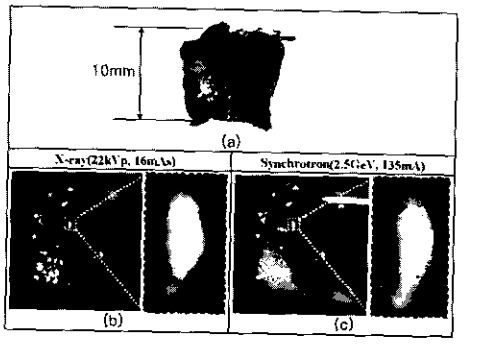

그림 8. 인체 유방암조직; (a) 일반 X-선 유방촬영시스템에서 얻은 영상,(b) Synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상

할 수 있다. 2.5GeV-135mA의 고 에너지 sychrotron X-선 영상시스템으로 얻은 영상의 공간분해능은 그림 5에서와 같이 최대 시험패턴 단위인 20line pairs mm^{-1}(25μm)를 뚜렷이 확인 할 수 있었으며, 또한 유방촬영시스템에 비하여 높은 대조도의 영상을 보여주었다. 28 kVp-79mAs X-선량 조건에서 촬영한 일반 X-선 유방촬영시스템의 정도관리(Quality Control)로 사용되는 팬텀(Mammographic Accreditation Phantom Model 156)내부 영상의 0.40mm 크기를 나타내는 calcification까지만 유무를 확인 할 수 있었으나, 그림 6에서 보듯이 synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상은 calcification의 경계선 형태까지도 뚜렷이 보여주는 고해상도의 영상 획득이 가능하였다. 인체 유방암조직을 파라핀으로 고정한 object도 일반 X-선 유방촬영시스템에서는 23kVp-13mAs의 조건하에 calcification이 부분적으로 보이는데 synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상에서는 명확한 *micro calcification*의 형태를 확인할 수 있었다(그림 7). 가로×세로 길이가 각각 10mm, 두께 2mm정도로 채취하여 포르말린 용액에 정착시킨 인체 유방암조직 또한 22kVp-16mAs의 일반 X-선 유방촬영시스템에서는 *calcification*과 조직의 경계가 모호했으나 synchrotron X-선 영상시스템에서 얻은 영상에서는 calcification

의 위치와 형태를 고해상도로 명확히 구분 할 수 있었다(그림 8). 그림 9에서 보여지듯 capillary tube안의 micro bubbles 영상들은 실험거리범위(35~470mm)안에서 object가 scintillator로부터 가장 먼 거리인 470mm로 떨어져 있을 때 가장 좋은 분해능과 대조도를 보였다. 이것은 방사광이 object를 투과할 때 scintillator로부터 멀어질수록 phase-contrast 효과에 의해 micro bubbles의 경계부분에서 뚜렷한 상을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 본 실험 거리범위에서 최적의 phase-contrast 효과는 찾을 수 없었다.

결 론

Unmonochromatized synchrotron X-선을 이용하는 간단하고 경제적인 영상시스템을 PLS 5C1 빔-라인에 구축하여 고-분해능 X-선 시험 패턴, 유방촬영 팬텀(Mammographic Accreditation Phantom Model 156), 파라핀에 고정한 인체 유방암조직과 포르말린에 고정한 인체 유방암조직, 그리고 capillary tube내 micro-bubbles 영상들을 효과적으로 얻을 수 있었다. 방사광 영상들은 일반 X-선 유방촬영시스템과 비교하여 매우 우수한 분해능 및 높은 대조도를 보여주었다. Synchrotron X-선 영상시스템은 여러 기초 X-선 영상 분야 및 영상의학 분야에 효과적으로 응용할 수 있을 것이고, 앞으로 최적의 영상획득 조건을 확립하고 이미지 획득 자동화 시스템을 개발할 필요가 있으며, micro-CT 등의 연구가 계속된다면 synchrotron X-선 영상시스템은 새로운 영상장치로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. D. Champman, W. Thomlinson, R.E. Johnston, D. Washburn, E. Pisano, N. Gmur, Z. Zhong, R. Menk, F. Arfelli, and D. Sayers, "*Diffraction enhanced X-rayImaging*", Phys. Med. Biol. Vol.42, pp. 2015-2025, 1997
2. T.J. Davis, D. Gao, T.E. Gureyev, A.W. Stevenson, and W. Wilkins, "*Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays*", Nature, Vol. 373, pp. 595-598, 1995
3. S.W. Wilkins, T.E. Gureyev, D. Gao, A. Pogany, and A.W. Stevension, "*Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays*", Nature, Vol.384, pp. 335-338. 1996.
4. Kim H-J, Hong J-O, Lee K-H, Jung H-J, Kim E-K, Je J H, Kim I W, Hwu Y, Tsai W-L, Seong J-K, Lee S-W, and Yoo H S, "*Phantom and animal imaging studies using PLS synchrotron X-rays*" Proceedings of IEEE Trans. Nucl. Sci. in press
5. Y. Hwu, H.H. Hsieh, M.J. Lu, W.L. Tsai, H.M. Lin, W.C. Goh, B. Lai, J.H. Je, C, K. Kim, D.Y. Noh, H.S. Youn, G. Tromba, and G. Margaritondo, "*Coherence-enhanced synchrotron radiation:refraction versus diffraction mechanisms*" J. of Appl. Phys. Vol.86, pp. 4613-4618. 1999
6. A. Snigirev, I Snigireva, V. Kohn, S. Kuznetsov, and I. Schelokov, "*On the possibillites of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation*" Rev. Sci. Instrum. Vol.66. pp. 5486-5492. 1995
7. K. Umetani, N. Yagi, Y. Suzuki, K. Yoshiki, and K. Yamasaki, "*X-ray refraction-contrast imaging using synchrotron radiation at Spring-8*" Medical Imaging 1999 Physics of Medical Imaging, Proceedings of SPIE. Vol. 3659. pp.560-571. 1999