

디지털 엑스선 기술과 응용

Digital X-Ray Technology and Applications

| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| 정진우 (J.-W. Jeong, jinu@etri.re.kr) | 신소자연구실 책임연구원 |
| 강준태 (J.-T. Kang, notation@etri.re.kr) | 신소자연구실 선임연구원 |
| 김재우 (J.-W. Kim, jwkim0515@etri.re.kr) | 신소자연구실 선임연구원 |
| 박소라 (S. Park, ssoll@etri.re.kr) | 신소자연구실 선임연구원 |
| 이명래 (M.-L. Lee, mllee@etri.re.kr) | 신소자연구실 책임연구원/실장 |
| 송윤호 (Y.-H. Song, yhsong@etri.re.kr) | 소재부품원천연구본부 책임연구원/본부장 |

ABSTRACT

In modern times, X-ray imaging has become a necessary tool for early diagnosis, quality control, nondestructive testing, and security screening. X-ray imaging equipment generally comprises an X-ray generator and an image sensor. Most commercially available X-ray generators employ filament-thermionic electron-based X-ray tubes, thus demonstrating typical analog behavior, such as slow response and large stray X-rays. Furthermore, digital X-ray sources, which have been studied extensively using field electron emitters manufactured from nanometer-scale materials, provide fast and accurately controlled ultra-shot X-rays. This could usher in a new era of X-ray imaging in medical diagnosis and nondestructive inspections. Specifically, digital X-ray sources, with reduced X-ray dose, can significantly improve the temporal and spatial resolution of fluoroscopy and computed tomography. Recently, digital X-ray tube technologies based on carbon nanotubes, developed by Electronics and Telecommunications Research Institute, have been transferred to several companies and commercialized for dental imaging for the first time.

KEYWORDS 엑스선, 디지털, 전계방출, 영상장치

I. 서론

1. 전자와 전자기파

고대 그리스인들은 호박(琥珀, amber)을 양모로

문지르면 작은 물체를 끌어당긴다는 사실을 발견하였다. 이는 번개와 함께 전기에 관한 인간의 최초 경험에 대한 기록으로 여겨진다. 물체 외부로 튀어나온 전자의 흐름인 음극선(陰極線, Cathode

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340501>

* 이 연구는 과학기술정보통신부, 산업통상자원부 지원으로 나노융합2020사업(R201802310), 한국연구재단의 바이오의료기술개발사업(2015M3A9E2066999)과 원자력연구개발사업(2017M2A2A6A02070521), 산업기술평가관리원의 나노융합산업핵심기술개발사업(20000935), ETRI의 연구운영비지원사업(19ZB1200), 중소벤처기업부의 기술개발사업(S2482672)의 일환으로 수행되었음.



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2019 한국전자통신연구원

ray)은 1850년대 서양의 물리학자들에 의해 관찰되기 시작했지만 1890년대에 와서야 영국의 물리학자 톰슨에 의해 그 본질이 질량을 가지는 고유한 입자임이 밝혀졌다. 이후 현대 양자역학에 의해 빛을 포함해 전자도 입자와 파동의 두 가지 성질을 모두 가지는 것이 밝혀졌고 음(-)의 전하를 가지는 전자는 여러 가지 물리화학적 현상을 일으키는 중요한 입자임을 알게 되었다.

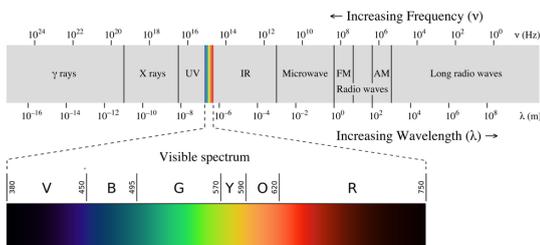
전자기파는 전자기적으로 복사되는 에너지의 흐름인데, 눈에 보이는 가시광선을 포함하여 눈에 보이지 않는 전파, 적외선, 자외선, 엑스선 등도 전자기파에 속한다. 이러한 전자기파의 분류는 진동수가 작은 라디오파에서 진동수가 큰 감마선까지 진동수의 크기대로 전자기파 스펙트럼을 형성한다(그림 1). 물리학 법칙에 의하면 진동수가 클수록 큰 에너지를 가지므로 가시광선보다 엑스선이 더 큰 에너지를 전달할 수 있다. 전자기파는 전하를 가지는 입자가 가속(혹은 감속)될 때 발생되는데, 전자에 의해 발생된 전자기파는 빛 입자인 광자가 된다. 예를 들어, 전하를 가지는 입자인 전자가 움직이는 속력이 변하거나 이동 방향이 바뀔 때 전자기파가 발생된다. 빠르게 움직이는 전자가 양극에 부딪혀 급하게 감속될 때 엑스선이 발생하는 것은 전자의 속력이 바뀌어서 일어나는 현상이고, 방사광 가속기에서 전자빔이 원형으로 회전할 때 감마

선이 발생하는 것은 전자의 이동방향이 바뀌기 때문이다.

현대의 여러 기술 분야에서 전자의 가속을 통해 여러 가지 전자기파를 발생시키고 이용하는데, 반도체 발전기와 안테나를 이용하여 라디오파를, 진동하는 전자와 형광체를 이용한 가시광 램프, 고에너지로 가속된 전자빔과 금속 타겟(Target)으로 만든 엑스선, 방사광 가속기에서 만들어진 감마선 등을 예로 들 수 있다.

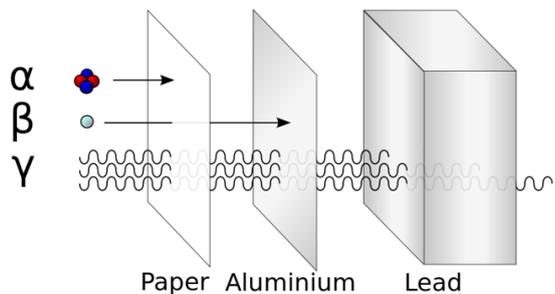
2. 방사선과 엑스선

최근 들어 일본 후쿠시마 원전 사고나 라돈이 검출되는 침대의 판매 등으로 방사선(放射線, Radiation) 혹은 방사능(放射能, Radioactivity)에 대한 일반인들의 관심이 높아지고 있다. 여기서 방사선이란 에너지의 흐름을 의미하며, 에너지가 헬륨핵(α -선)이나 전자(β -선)와 같은 입자의 형태로 흐르면 ‘입자방사선’, 마이크로파, 자외선, γ -선과 같은 전자기파의 형태이면 ‘전파방사선’이라고 한다. 방사선은 물체와 작용하는 정도에 따라 엑스선, 감마선과 같은 ‘전리방사선’과 라디오파, 적외선, 자외선, 가시광선과 같은 ‘비전리방사선’으로 나눌 수 있다.



출처 Philip Ronan, Gringer, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png

그림 1 전자기파 스펙트럼



출처 Alfa_beta_gamma_radiation.svg: User: Stanneredderivative work: Ehamberg, CC BY 2.5, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg

그림 2 전리방사선의 특징

라돈 침대가 위험한 것은 기체 형태인 라돈이 호흡으로 몸에 흡수되었을 때 인체 내부에서 지속적으로 전리방사선을 방출하면서 붕괴하기 때문에 폐에 치명적일 수 있다는 점이다. 라돈은 지구상에 흔한 우라늄, 토륨에 의해서 발생하므로 공기순환이 잘 안 되는 콘크리트 건물 내부에서도 라돈이 축적될 수 있으므로 주기적인 환기가 필요하다(그림 2).

방사선에 의한 인체의 피해, 즉 방사선 피폭은 방사선이 인체 외부에서 영향을 주는지 아니면 인체 내부에서 영향을 주는지에 따라 ‘외부피폭’, ‘내부피폭’으로 분류한다. 예를 들어 사고가 난 원자로 내부에 들어간 작업자가 원자로 노심에서 나오는 방사선에 의해 피해를 입는 것은 외부피폭으로, 사고가 난 원자로에서 방출되는 가스를 흡입해서 몸속에서 방사선이 방출되어 인체에 피해를 입는다면 내부피폭으로 이해될 수 있다. 일반인들에게 내부피폭이 더 우려스러운 이유는 사고가 난 원자로에서 멀리 떨어져 있더라도 공기 중으로 전달된 방사능 가스를 호흡하거나 생선, 채소 등에 흡수된 방사능 물질을 섭취할 수 있기 때문이다.

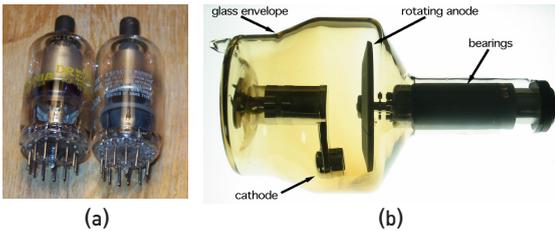
과도한 방사선 피폭은 인체에 유해할 수 있으나 적당하게 사용된다면 암 치료에도 이용될 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 우리가 유익하게 이용하고 있는 방사선 중 투과 영상장치에 유용한 것은 발생이 비교적 용이하고 물체 투과성이 좋은 엑스선이다. 엑스선은 특정 주파수 영역의 전자기파 혹은 광자를 의미하며, 자외선보다 크고 감마선보다 작은 주파수를 가진다. 지금으로부터 약 125년 전에 독일의 물리학자 뢰트겐이 물질을 통과하는 성질을 가지지만 원인을 규명할 수 없는 빛을 발견하고 이를 ‘X-선’이라 명명하였고, 이 발견으로 그는 최초의 노벨 물리학상을 수상하였다.

가속 전자빔에 의한 엑스선은 발생 방법에 따라 제동복사(制動輻射, Bremsstrahlung)에 의한 연속 엑

스선과 원자의 전자 궤도 사이의 에너지 차에 의한 특성 엑스선(Characteristic X-ray)으로 크게 나눌 수 있다. 제동복사의 경우 가속된 전자빔이 타겟 물질의 원자들 사이로 입사될 때 원자와 다양한 형태로 상호작용하면서 그 에너지를 잃을 때 다양한 에너지의 엑스선이 발생되므로 엑스선의 에너지 스펙트럼은 연속적인 형태를 가진다. 특성 엑스선은 타겟 물질 원자의 궤도전자가 가속 전자빔에 의해 튕겨져 나갈 경우 그곳에 빈자리가 생기고 외곽의 높은 에너지 궤도의 전자가 그 빈자리로 천이할 때 그 에너지 차이만큼 엑스선이 발생하므로 특정한 값의 엑스선이 발생된다. 엑스선은 투과 영상 목적 이외에도 원자 격자와의 상호작용 성질을 이용한 물질 분석의 용도로도 사용된다.

II. 엑스선 영상장치

물체를 투과하는 특성을 가지는 감마선, 엑스선은 의학 및 산업 분야에 널리 이용되고 있는데, 질병의 조기 검진, 치료, 생산품의 품질관리, 비파괴 검사 및 보안검색 등에 필요한 도구가 되었다. 인체 내부에서 발생한 질병의 진단 및 파손이 없는 물체 내부 검사를 위한 엑스선 영상장치는 엑스선이 물질에 따라 흡수되는 특성이 다르기 때문에 가능하다. 엑스선을 물체에 조사한 후 반대편에서 그림자 영상을 얻으면 물질의 내부 조직 형태가 반영된 투사 영상이 얻어진다. 이와 같이 2D 그림자 영상을 얻거나 다양한 방향에서 조사한 여러 장의 2D 그림자 영상을 컴퓨터로 재구성하여 3D 영상을 얻는 엑스선 영상장치가 여러 분야에 적합하도록 개발되고 있다. 엑스선 영상장치는 일반적으로 엑스선 발생장치와 영상센서로 구성되며, 이 절에서는 엑스선 영상장치의 원리 및 특징에 대해서 간단하게 살펴본다.



출처 (a) No machine-readable author provided. Raziel~commonswiki assumed (based on copyright claims). [Public domain] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hvtubes.jpg>. (b) Daniel W. Rickey, CC BY-SA 3.0 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotating_anode_x-ray_tube_\(labeled\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotating_anode_x-ray_tube_(labeled).jpg)

그림 3 아노드(양극) 종류에 따른 엑스선 튜브:
(a) 고정형 (b) 회전형

1. 엑스선 발생장치

앞서 언급한 대로 엑스선은 가속된 전자빔을 양극 타겟에 부딪혀서 발생시킬 수 있는데, 이러한 원리로 엑스선을 발생시킬 수 있는 장치를 엑스선 발생장치라고 총칭하겠다. 엑스선 발생장치는 전자빔을 만들 수 있는 전자원(電子源, Electron source), 가속된 전자빔을 급격히 감속시킬 수 있는 타겟, 전자빔이 움직이는 공간인 진공용기(眞空容器)로 구성된 엑스선 튜브와 구동을 위한 전원 및 제어장치로 구성된다(그림 3). 전자는 음의 전하를 가지므로 전자원은 음극(陰極, Cathode)에, 타겟은 양극(陽極, Anode)에 위치시킨다. 음극에서 방출된 전자빔은 양극과 음극 사이의 전압, 즉 관전압에 의해 가속되어 에너지를 얻게 되고 최종적으로 발생하는 엑스선의 에너지를 결정한다. 발생한 엑스선의 에너지가 클수록 투과 능력도 커지므로 높은 전압으로 가속된 전자빔에 의해 발생한 엑스선이 상대적으로 더 높은 투과 능력을 가진다. 예를 들어, 치아 엑스선 촬영 장비보다 전신 CT 장비에 사용되는 엑스선 발생장치가 더 높은 관전압을 가진다. 이러한 엑스선 발생장치는 가속된 전자빔이 없으면 엑스선이 발생되지 않으므로 양극에 전압

을 공급하는 전원장치의 스위치를 끄면 엑스선이 바로 차단된다. 따라서 전원이 꺼진 엑스선 발생장치 주위에는 외부피폭을 유발하는 엑스선뿐만 아니라 내부피폭을 유발하는 방사능 물질도 존재하지 않으므로 방사선 피폭의 우려는 없다.

양극에 사용되는 엑스선 타겟은 일반적으로 고에너지 전자빔에 의해 발생하는 열을 견딜 수 있도록 텅스텐(Tungsten), 몰리브덴(Molybdenum)과 같이 녹는점이 높은 물질이 사용되며, 특정한 파장의 엑스선을 만드는 용도로 구리와 같은 물질도 사용된다. 전자빔이 가진 에너지의 1~2%만 엑스선으로 변환되고 나머지는 대부분 열로 손실되므로 양극 타겟이 전자빔에 지속적으로 노출될 경우 발생하는 열이 상당하여 녹는점이 3,400℃ 이상인 텅스텐의 표면이 녹을 정도이다. 고효율 엑스선 튜브의 경우는 대부분 이런 문제를 극복하기 위해 동일한 위치에 전자빔이 지속적으로 노출되지 않도록 양극 타겟이 회전하는 구조를 가진다.

엑스선 튜브는 음극에서 방출된 전자빔이 양극으로 진행되는 동안 가능한 한 기체분자와의 반응이 없어야 하므로 반드시 진공 분위기의 용기 구조로 제작된다. 엑스선 튜브의 내부 진공이 용기 외부에 설치된 진공 펌프로 유지될 경우 개방형(open-type), 진공 펌프 없이 밀봉된 구조로 유지될 경우 폐쇄형(closed-type) 튜브로 구분된다. 주기적인 전자원 및 타겟 교체가 필요한 산업용 비파괴 검사 장치에 적용되는 엑스선 튜브는 진공 펌프가 달린 개방형으로 제작되기도 하나 의료 진단 및 일반 비파괴 검사에 사용되는 대부분의 엑스선 튜브는 폐쇄형 밀봉튜브 형태로 제작된다.

음극에 장착되는 전자원은 외부 자극을 통해 지속적으로 음극에서 전자를 방출할 수 있게 한다. 널리 알려진 전자 방출을 위한 외부 자극은 열, 빛 혹은 전기장 등이 있다. 상용화된 엑스선 튜브에는

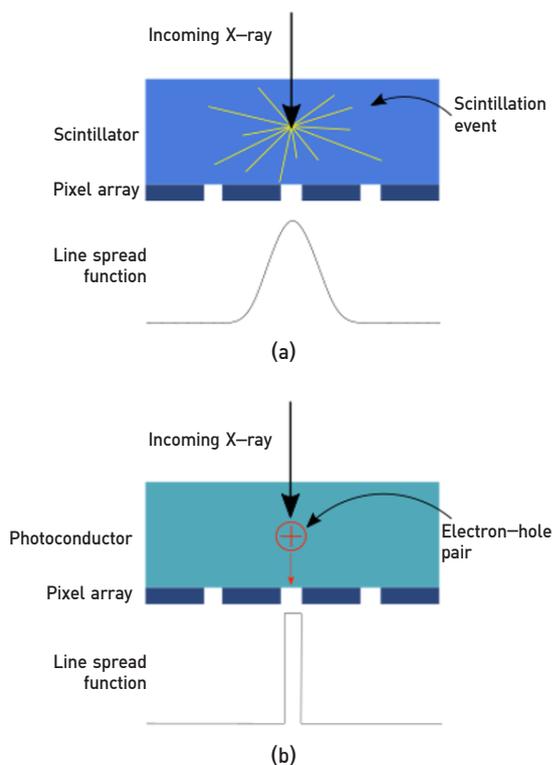
안정적인 전자 방출 능력이 필수적으로 요구되며 현재까지 그 요구를 고려하여 가장 많이 적용되고 있는 전자원은 열 자극에 의한 전자원, 즉 열전자원이 대부분이다. 여기서 안정적이라는 것은 제어 가능하게 지속적으로 전자가 방출되어야 함을 의미한다. 빛이나 전기장에 의한 방법은 일반적으로 방출되는 전자의 양이 적거나 지속적인 방출이 어려워 특정 용도에만 사용되고 대부분의 상업용 엑스선 튜브는 열전자원이 사용된다. 그러나 열전자원은 안정적인 수명을 보장하는 강력한 장점이 있지만, 열전자의 특성상 빠른 속도로 전자빔을 켜고 끄는 것이 불가능하고 열전자원 개개의 전자 방출 특성이 다를 수 있다는 단점이 존재한다.

엑스선 발생장치를 특징짓는 중요한 요소 중 하나는 전자빔이 타겟에 얼마나 작게 집중되는가를 나타내는 초점크기(Focal spot size)이다. 일반적인 광학 원리로 엑스선이 발생하는 지점인 초점크기가 작을수록 피사체의 그림자 영상의 해상도가 높아진다. 엑스선 튜브는 용도에 따라 초점크기를 크게는 1mm 이상, 작게는 1 μ m 이하의 크기까지 집중되도록 튜브의 전자빔 광학 구조를 설계, 제작하게 된다. 비파괴 검사에 필요한 전압, 전류 조건에서 1mm 내외의 초점크기는 정전렌즈(Electrostatic lens)로 전자빔을 집중시킬 수 있으나 1 μ m 이하의 집중빔을 만들기 위해서는 자기렌즈(Magnetic lens)가 사용되기도 한다.

2. 엑스선 영상 센서

뢴트겐이 엑스선을 발견할 당시 촬영한 아내의 손 사진이 최초의 인체 엑스선 사진이었는데, 이때 사용된 것은 사진건판(寫眞乾板)이었다. 뢰트겐의 엑스선 발견 이후 현대의 디지털 센서가 개발되기까지 오랫동안 엑스선 영상의 획득은 이 사

진건판과 동일한 원리의 사진필름으로 이루어졌다. 엑스선 영상 센서는 크게 3가지로 분류할 수 있는데, 현상 과정이 필요한 필름 스크린을 사용하는 AR(Analog Radiography), 형광물질이 도포된 판과 스캔장치를 이용하여 현상과정이 필요 없는 CR(Computed Radiography), 마지막으로 디지털 픽셀 어레이 구조의 DR(Digital Radiography)이다. 전통적인 아날로그 방식의 AR은 엑스선 촬영 후 현상을 위해 사람의 손이 필요하고 판독을 위해 다시 그 필름이 의사의 손에 넘겨져야 한다. 현재에도 많이 쓰이고 있는 CR은 아날로그 필름 대신 엑스선을 흡수해서 에너지의 형태로 저장하는 형광물질이 도포된 이미지 플레이트(Image plate)를 사용한다. 이미지 플레이트에 촬영, 저장된 영상은



출처 Beevil CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resolution_in_direct_and_indirect_x-ray_detectors.svg

그림 4 (a) 간접방식과 (b) 직접방식 디텍터

스캔장치를 통해 디지털 영상으로 획득될 수 있고, 이미지 플레이트에 저장된 영상은 제거할 수 있기 때문에 AR의 필름과 달리 반복 사용 가능하고 디지털 영상 획득이 가능하다는 장점이 있다.

DR은 CR과 달리 스캔 과정 없이 엑스선 영상을 바로 디지털 영상으로 획득할 수 있는 현대의 디지털 센서를 의미하며, 영상 획득 방식에 따라 간접변환방식과 직접변환방식으로 나눌 수 있다(그림 4). 전자는 매개물질을 통해 입사되는 엑스선을 가시광선으로 변환한 후 전기적인 신호로 변환하는 방식이고, 후자는 별도의 가시광선으로 변환하는 과정 없이 바로 전기적인 신호로 변환하는 방식이다. 매개물질로 섬광체(Scintillator)를 사용하는 간접방식은 변환효율이 높고 안정적이며 가격이 저렴한 장점이 있지만, 매개물질에서 발생한 빛이 모든 방향으로 퍼지기 때문에 공간 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 반면 직접변환방식은 엑스선을 바로 전기적인 신호로 변환하는 물질인 광도전체(Photo-conductor)를 사용하여 전자-홀 쌍을 발생시켜 직접 전기적인 신호를 검출하므로 공간분해능이 우수하여 영상 품질이 좋지만, 생산 수율이 낮고 가격이 비싼 단점이 있다. 직접 혹은 간접방식 모두 전기적인 신호를 디지털 신호로 변환하는 역할은 TFT(Thin-Film Transistor) 혹은 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 어레이가 사용된다.

III. 엑스선 영상장치의 응용

엑스선 영상장치는 현대사회에 없어서는 안 될 장비로 이미 자리매김한 상태이다. 의료진단 분야의 경우 자기공명영상(MRI), 초음파 등의 영상 기술이 있지만, 영상품질 및 가격 면에서 엑스선을 대체하기 어렵다. 또한, 산업 및 보안검색 분

야에서도 현재까지 엑스선 비파괴 검사를 대신할 만한 기술이 개발되지 않고 있다. 이 절에서는 의료, 산업 및 보안 분야에서 쓰이고 있는 대표적인 엑스선 영상장치들의 특징에 관해 간단히 알아보고자 한다. 엑스선 영상장치는 그 목적에 따라 엑스선의 에너지 및 선량(線量, dose)을 달리 설정하여 제작된다. 높은 투과도를 요구하는 장비의 경우 높은 관전압을 가지는 튜브가 적용되고 높은 선량이 요구되는 장비의 경우 높은 관전류의 튜브가 적용된다. 엑스선 튜브에서 방출되는 선량은 관전압이 동일할 때 관전류와 방출 시간의 곱으로 결정된다.

1. 의료 분야

가. 치과 영상

엑스선 의료 영상장비 중 치과에서 사용되는 엑스선 튜브가 비교적 관전압과 관전류가 낮은 편이다. 환자가 진료의자에 앉은 상태에서 치아 엑스선을 촬영할 수 있도록 제작된 handheld형 엑스선 발생장치는 배터리로 동작되고 관전압이 약 70kV, 관전류가 약 3mA, 초점크기 0.5mm의 특성을 가진다. 반면 파노라마 영상 및 CT 영상을 촬영할 수 있는 장비에는 관전압이 약 90kV, 관전류가



출처 Timpo [Public domain], https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PAN_TEETH.jpg

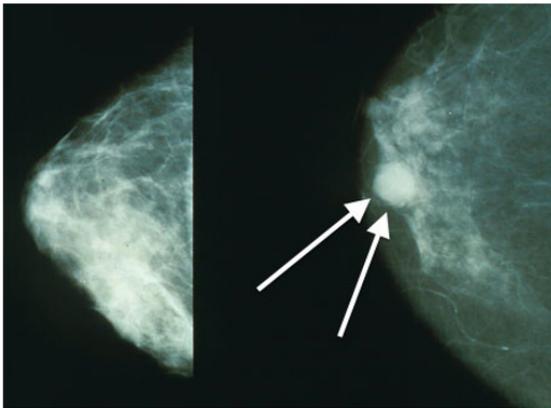
그림 5 치과 파노라마 엑스선 영상

10mA 이상이 요구되지만 비교적 전력이 낮아 고정형 아노드 튜브의 적용이 가능하다(그림 5).

나. 유방암 진단

유선(乳腺)구조가 복잡하게 얽혀 있는 유방 조직에 발생한 암조직은 주위 정상조직과 밀도가 크게 다르지 않아 유방암을 조기에 발견하는 것은 매우 어려운 일이다. 높은 에너지의 엑스선은 부드러운 유방 조직을 대부분 통과하기 때문에 유방암 검사를 위한 영상장치는 비교적 낮은 관전압의 엑스선 튜브를 이용하고 영상 대조비 향상을 위해 높은 관전류를 필요로 한다. 유방암 검사용 영상장치는 단순 2D 영상을 제공하는 mammography 장비로부터 현재는 제한된 3D 영상을 제공하는 DBT(Digital Breast Tomosynthesis) 장비로 전환되는 추세이다. DBT 기술은 기존 2D mammography 장비에 옵션의 성격으로 제공되기 시작하였으나 최근에는 보급률이 폭발적으로 증가하고 있고 지금까지는 북미 지역에 시장이 집중되어 있었으나 유럽, 아시아로 확대되고 있는 추세이다(그림 6).

DBT는 회전 갠트리에 단일 열전자 엑스선 튜브



출처 akerstmd, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mammo_breast_cancer_wArrows.jpg

그림 6 Mammography에 의한 유방암 진단

가 탑재되어 특정한 각도(15°~50°)로 회전하면서 여러 장의 2D 영상을 획득한 후 3D 영상으로 재구성된다. 여기에 적용되는 엑스선 튜브는 일반적으로 관전압 20~50kV, 관전류 20~100mA, 초점크기 0.1, 0.3mm의 특성을 가진다.

Mammography나 DBT 장비는 영상 촬영을 위해 유방을 강하게 압착, 고정하는 과정이 필요하다. 이런 환자의 불편함을 해소하기 위해 최근에는 압착 과정 없이 온전한 3차원 영상을 제공하는 BCT(Breast Computed Tomography) 장비가 개발되어 일부 업체에서 시제품 출시를 시작하고 있다.

다. 엑스선 형광 투시 촬영

엑스선 형광 투시 촬영(Fluoroscopy) 장비는 엑스선을 연속적으로 조사하고 투시 영상을 연속적으로 디지털화하여 모니터에 출력, 저장할 수 있게 한다(그림 7). 각종 수술실, 응급실 등에서 뼈, 관절, 혈관 및 신경을 실시간으로 관찰해야 하는 경우에 사용된다. 실시간 진단과 시술이 가능하기 때문에 진료시간을 단축할 수 있을 뿐 아니라 외



출처 Yarkob, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluoroscopy.jpg>

그림 7 외과수술 Fluoroscopy 영상

과적 수술 시 절개부위를 최소화할 수 있다. 하지만 장시간 엑스선 노출에 의한 환자의 피폭이 우려되므로 선량 관리 및 의료진의 보호구 착용이 필요하다. Fluoroscopy 가이드 시술에 사용되는 영상장비는 엑스선 튜브와 영상 센서가 “C” 형태의 구조물에 고정된 C-arm이 대표적이다. 시술 시 C-arm은 환자 주위로 자유롭게 이동, 회전하면서 관심 부위의 투사영상을 의사에게 효과적으로 제공할 수 있도록 한다. 고정형 아노드 튜브를 쓸 경우 관전압은 일반적으로 40~120kV, 관전류는 최대 75mA이며 초점크기는 0.3, 0.6mm가 일반적이다. 회전형 아노드를 적용할 경우 전류를 200mA 이상 올릴 수 있고 C-arm 회전을 통한 3D-CT 기능도 가능하다.

라. 일반방사선 촬영

일반 방사선 촬영(General radiography) 장비는 의료 진단 분야에서 가장 일반적인 엑스선 영상장비이다. 신체의 거의 모든 부위를 검사할 수 있어 영상의학과, 검진내과, 정형외과, 소아과 등 거의 모든 병원에서 사용되고 있다. 환자가 누울 수 있는 침대와 위치를 임의로 조절할 수 있는 엑스선 발생장치 및 영상 센서로 구성되며 관전압은 일반적으로 40~150kV, 관전류는 10~1,000mA까지 가변된다.

마. 엑스선 컴퓨터 단층 촬영

엑스선 컴퓨터 단층 촬영(CT: Computed Tomography)은 인체 주위로 회전하는 엑스선 튜브와 영상 센서가 획득하는 2D 영상을 컴퓨터 재구성 방법으로 3D 영상을 만들 수 있는 장비이다. 인체 전체를 스캔할 수 있는 고출력 전신 CT와 머리, 팔 및 다리 등의 인체 일부를 스캔할 수 있는 소출력 부분 CT가 있다. CT는 고출력 엑스선을 비교

적 장시간 구동해야 하므로 회전형 아노드 엑스선 튜브가 채용된다. 사용되는 엑스선 튜브의 관전압은 70~150kV, 출력은 100kW 이상이 일반적이다.

2. 산업, 보안 분야

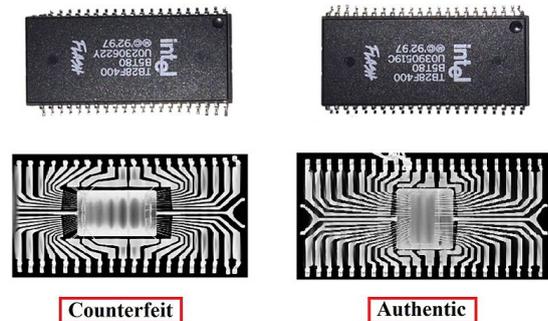
가. 생산품 품질 검사

공장에서 컨베이어 벨트를 통해 빠른 속도로 생산되는 제품은 비파괴 검사를 통한 품질의 이상 유무 점검이 필요하다. 식품의 경우 내부에 금속과 같은 이물질이 포함되어 있는지 엑스선 영상으로 실시간 검사가 가능하다. 특히 전자회로 납땜의 불량 유무나 반도체 칩의 이상 유무는 제품을 파괴하지 않고 확인하기 어려운데 2D, 3D 엑스선 영상장치를 통해 미세 크기의 불량 요소까지 쉽게 확인이 가능하다(그림 8).

아직은 3D CT 장비의 경우 검사 속도가 생산 속도를 따라가지 못하므로 생산 현장에는 적용이 어렵고 특정 제품의 선별 검사 목적으로 사용되고 있다.

나. X-Ray Lithography(XRL)

반도체 공정에서 시간과 비용이 가장 많이 소모되는 노광공정(Photo-lithography)은 설계 도면이



출처 SarahLaserEng, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Using_X-ray_for_authentication_and_quality_control_in_electronics_industry.jpg

그림 8 엑스선을 이용한 반도체칩의 비파괴 검사

그러진 마스크 패턴(Reticle)으로부터 웨이퍼에 도포된 감광액(PR: Photo-Resist)으로 사진기와 같은 원리로 패턴을 전사하는 과정이다. 노광공정에서는 사용하는 빛의 파장이 짧을수록 회절현상이 줄어들어 미세한 선폭(DR: Design Rule)을 얻을 수 있다. 무어의 법칙으로 표현되는 반도체 집적도의 역사는 빛의 파장을 줄이고 그에 반응하는 소재, 공정, 장비 개발로 선폭을 줄여 온 과정이었다고도 볼 수 있다. 노광장비로는 현재까지 액침 ArF(193nm)가 주력이었으나 10nm 이하의 미세선폭 노광 한계에 이르러 차세대 극자외선(EUV: Extreme Ultra-Violet)을 사용하는 EUV(13.5nm) 장비가 상용화되어 국내 대기업에서도 라인을 구축하는 상황이다. EUV 광의 특성은 물질 흡수가 매우 크며, EUV 광원, 고진공 환경, 반사형 광학계, 반사형 마스크, 고온 내구성 펄리클, 감광제 등이 기존과 완전히 달라졌고, 해결해야 할 문제들이 여전히 존재하고 있지만, 차세대 주력 양산장비로 예상된다.

한편, 빛의 파장이 10nm 이하가 되는 영역은 Soft X-ray 대역으로 물질에 대한 투과 특성이 급격히 증가한다. 높은 직진 특성을 활용한 X-ray 리소그래피의 연구는 1970년대 초부터 시작되어왔다. 물질에서 흡수가 매우 높은 EUV와는 달리, 높은 투과성 때문에 불순물 등에 영향이 적고, 초점심도(DoF: Depth of Focus)가 높다는 장점이 있지만, 1대1 마스크를 사용한다는 단점도 있다. 파장이 달라졌으므로 공정에 사용되는 마스크, 감광제 등이 새로 개발되어야 할 것이다. 한국전자통신연구원(ETRI)에서는 디지털 엑스선 튜브 기술 등을 활용한 XRL 기술에 대한 논의가 진행 중이다.

다. 보안검사

비파괴 검사는 전 세계적인 테러 위협의 급증으로 인해 공항, 항만, 지하철 등 사람이 많이 출입

하는 공공장소의 수하물 검사 목적으로 필요하게 되었다. 공항 보안검색대에서 흔히 볼 수 있는 2D 엑스선 영상장비는 이중에너지를 이용하여 가방 내부 여러 물건의 형태뿐만 아니라 구성 물질의 종류도 동시에 판별할 수 있어 폭탄 등과 같은 위험물의 탐색에 널리 쓰이고 있다. 다만 2D 이미지의 경우 중첩된 영상으로 인해 판독이 어려운 경우가 발생하므로 3D CT 영상장비의 도입이 요구되고 있으나 가격 및 검색 속도 등의 문제로 널리 활용되지 못하고 일부 수하물 선별 검사에 사용되고 있다.

3. 디지털 엑스선 튜브 및 응용

현재는 일반적으로 디지털 센서를 사용하는 엑스선 영상촬영을 디지털 엑스선 촬영(DR)이라 부르지만, 일반적으로 사용되는 엑스선 발생장치의 기본 원리가 원트겐이 사용한 아날로그 엑스선 튜브와 크게 다르지 않기 때문에 아직은 반쪽 디지털 엑스선에 불과하다. 온전한 디지털 엑스선 기술이 완성되기 위해서는 영상 센서뿐만 아니라 엑스선 발생장치 또한 디지털화가 되어야 한다. 앞서 언급했듯이, 기존의 엑스선 튜브는 대부분 열전자원을 사용하므로 엑스선을 빠른 속도로 끄고 켜는 것이 어렵다. 이런 특징은 움직이는 물체의 촬영 시 영상의 동적 흐림(Motion blurring)의 단점으로 나타나는데, 이를 극복하기 위해 그리드(Grid) 전극을 채용하거나 관전압을 빠르게 올렸다 내리는 방식을 채택한다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 일반적인 경우 열전자 엑스선의 최소 펄스폭을 8ms 이하로 만들기 어렵다고 알려진다.

이러한 열전자원과 달리 전계방출 전자원을 엑스선 튜브에 적용할 경우 매우 빠르게 스위칭되는 엑스선 펄스 발생이 가능한데, 이는 전계방출원에 인가되는 전계의 변화에 따라 방출되는 전자빔이



그림 9 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발된 탄소나노튜브 기반 디지털 엑스선 튜브

빠르게 스위칭되기 때문이다. 열에 의한 반응과 비교하여 월등히 빠른 응답속도를 갖는 전계방출원의 특성을 고려했을 때, 원하는 시간에 엑스선을 정확히 켜고 끌 수 있는 전계방출 엑스선 튜브를 사용하면 진정한 의미의 디지털 엑스선 발생장치를 만들 수 있다. 최근에 ETRI에서 개발된 탄소나노튜브 전계방출원 기반의 디지털 엑스선 튜브 기술이 국내업체에 이전되어 세계 최초로 시장에 출시되고 있다[1,2]. 그림 9와 같이 개발된 엑스선 튜브는 탄소나노튜브 전자원을 가지고 진공 밀봉된 3극형 엑스선 튜브이다. 3극형 엑스선 튜브는 관전압과 관전류를 독립적으로 제어할 수 있으므로 상용 튜브에 필요한 구조이며, 필요에 따라 전자빔 집속전극이 추가될 수 있다[2].

디지털 엑스선 튜브의 대표적인 특징은 짧은 펄스 엑스선 발생이 가능하여 움직이는 물체의 영상을 선명하게 얻을 수 있다는 것이다[3]. 그림 10에 나타난 것처럼 빠르게 회전하는 금속선은 5ms의 펄스폭으로 조사되는 엑스선으로 얻은 영상에서 흐려져 구분이 어려우나 펄스폭을 0.1ms로 짧게

할 경우 선명하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이때 동일한 선량을 얻기 위해 전류를 증가시켜 관전류와 펄스폭의 곱을 동일하게 설정하였다.

이러한 우수한 특성을 갖는 디지털 엑스선 튜브는 앞서 나열한 다양한 분야의 사용목적에 따라 구조 및 구동 조건에 최적화하여 개발이 가능하다.

치과진단용 포터블 엑스선 튜브는 고접착성 CNT 전계 방출 에미터와 진공밀봉 기술을 이용하여 외경 15mm급으로 개발되었다. 포터블 엑스

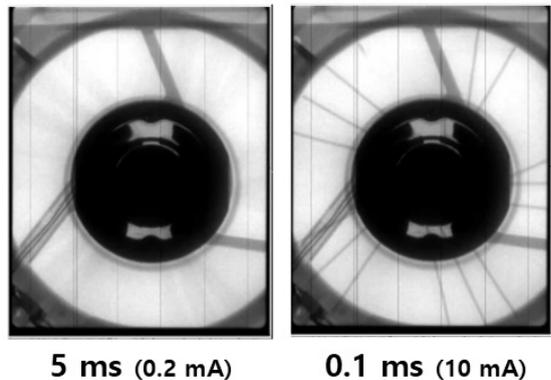
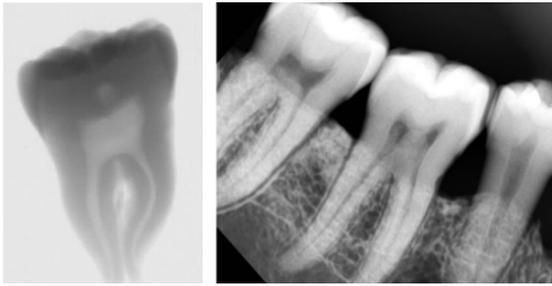


그림 10 엑스선 펄스폭에 따른 회전하는 물체의 엑스선 영상 비교



출처 송윤호, "전계방출 디지털 엑스선 소스 기술 동향 및 전망," 인포메이션 디스플레이, 제17권, 제4호, 2016, pp. 1-10.

그림 11 포터블 엑스선 튜브로 촬영한 치아영상

선 튜브의 외형적인 장점을 극대화하기 위해 ETRI에서는 전자빔 인출 게이트 전극과 전자빔 집속 전극이 합쳐진 형태인 집속 기능 게이트(Focusing functional gate) 전극을 이용하여 새로운 삼극형 구조로 튜브를 개발하였다. 튜브 성능은 치과 검진에 필요한 엑스선 성능인 관전압 65kV, 관전류 3mA, 초점크기는 0.5mm 조건을 충족하면서도 일반적인 열전자용 엑스선 튜브(Toshiba D-045)에 비해 외경은 50%, 길이는 70% 수준이다. 그림 11은 치과 진단용 포터블 엑스선 튜브로 얻은 치아 영상이다. 열전자용 엑스선 튜브가 글라스 기반인 것과 다르게 세라믹 기반으로 제작되어 무게 또한 1/3 수준으로 매우 가벼울 뿐만 아니라 전계 방출 특성상 매우 빠른 고속 구동이 가능하다. 포터블용 디지털 엑스선 튜브는 전자빔을 발생시킬 때 열전자 튜브와는 다르게 캐소드에 직접적인 가열이 필요 없기 때문에 엑스선 튜브의 온도가 심하게 상승하지 않는다. 따라서 전기적 절연을 절연유 이외의 다양한 재료로 구현할 수 있고, 이는 소형화와 경량화에 유리한 장점으로 작용할 수 있다.

엑스선 튜브의 소형화, 경량화는 제한된 공간 내에서 다수의 엑스선 소스 배치의 극대화를 가능하게 한다. 최근 유방암 검진에 도입되기 시작한 DBT 시스템에 디지털 엑스선 튜브를 적용할 경

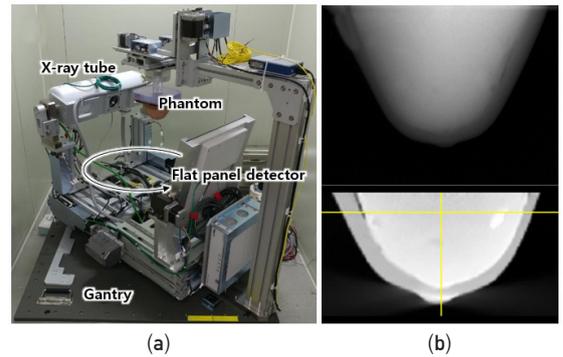


그림 12 (a) 탄소나노튜브 디지털 엑스선 튜브를 적용한 BCT 시스템 프로토타입과 (b) 유방 2D 투사영상 및 3D 재구성 영상

우, 다수의 엑스선 소스를 주어진 범위 내에 일정한 간격으로 배치하고 순차적으로 어드레싱(Ad-dressing)하면서 투사 영상을 얻을 수 있다. 고정된 갠트리 적용으로 회전 갠트리에 의한 영상 흐림이 없기에 기존 DBT에 비해 매우 선명한 영상을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 진단 시간을 크게 단축할 수 있는 장점을 가진다[4].

그림 12와 같이 신기술인 무압박 BCT 시스템에 탄소나노튜브 엑스선 튜브를 적용하여 2D 투사영상과 3D 재구성 영상을 획득하였다. 전자빔 집속 기술을 통해 CT의 공간 해상도를 높임과 동시에 디지털 고속 구동 특성을 활용하여 CT의 엑스선 선량을 디지털적으로 제어할 수 있고, CT의 회전에 의한 동적 흐림을 최소화하여 석회화 병변과 같은 매우 작은 미세 조직의 구분도 가능할 것으로 기대한다.

탄소나노튜브 기반의 디지털 엑스선 튜브는 앞서 언급한 산업 분야의 생산품 품질 검사 시스템에도 적용할 수 있다. 전자회로나 반도체 칩의 미세 결함 분석을 위해서는 수 마이크로미터(μm) 이하의 해상도 특성이 확보된 나노포커스 엑스선 소스 기반의 CT 시스템을 이용한다. 기존의 나노포커스 엑스선 소스의 경우 미세 크기의 전자

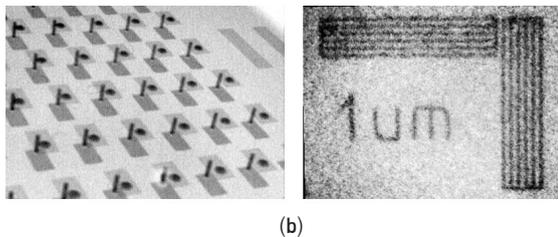
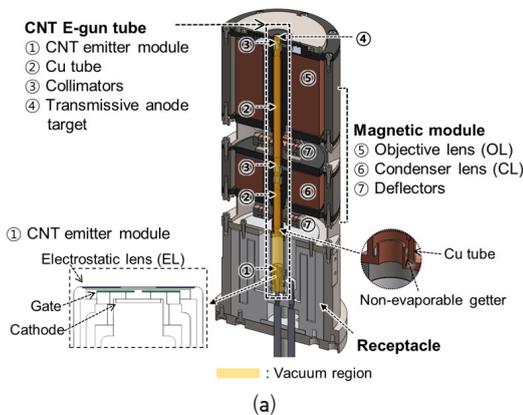
빔 획득을 위해 점광원의 열전자원을 활용하며, 열전자원의 전류 안정성을 확보하고 교체를 용이하게 하기 위해 진공 펌프가 장착된 개방형 엑스선 튜브를 사용한다. 이때, 펌프의 진동에 의한 영상 흐림이 발생하기 때문에 이를 억제하기 위해 무진동 장치가 별도로 필요하여 시스템이 복잡하고 비대하다. 이러한 기존 시스템의 단점을 디지털 엑스선 튜브 도입을 통해 획기적인 개선이 가능하다. 그림 9의 탄소나노튜브 전자원 기반의 밀봉 튜브와 2단 자기렌즈의 전자빔을 집속 모듈을 사용하여 그림 13(a)와 같이 완전 진공 밀봉형 전계방출 나노포커스 엑스선 소스를 개발하였다[5]. 고해상도를 위한 미세 전자빔 집속을 위해 전자 광학 시뮬레이션 수행으로 엑스선 소스

의 구조를 최적화할 수 있다.

개발된 시스템은 별도의 펌프와 진동 억제 장치가 필요 없어 이러한 시스템의 복잡성을 획기적으로 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 수명이 다할 경우 손쉽게 튜브 교체가 가능한 이점이 있다. 그림 13(b)는 나노포커스 엑스선 소스로 얻은 반도체 칩과 라인페어 게이지(Line-pair gauge) 영상으로 수백 나노미터(nm)급의 초점 특성을 나타낸다.

IV. 결론

윈트겐의 엑스선 발견 이래 현재까지 기본 동작 원리가 거의 변하지 않은 엑스선 튜브는 전자원의 교체를 통한 디지털화라는 과도기를 맞이하고 있다고 여겨진다. 대부분 수입에 의존하고 있는 기존 열전자원 엑스선 튜브를 대체할 수 있는 디지털 엑스선 기술이 세계 최초로 개발되고 국내에서 상용화가 진행되고 있는 점은 기쁜 일이다. 지금은 기존 열전자원 엑스선 튜브와의 경쟁에서 이겨나가기 위해 고전력 튜브의 개발과 상용 수준의 안정성과 신뢰성을 확보하여 디지털 엑스선 튜브의 장점을 살릴 수 있는 응용 분야에 성공적으로 안착하는 것이 무엇보다 중요하다.



출처 S. Park et al., "A Fully Closed Nano-Focus X-Ray Source With Carbon Nanotube Field Emitters," IEEE Electron Device Lett., vol. 39, no. 12, 2018, pp. 1936-1939.

그림 13 (a) 탄소나노튜브 전계방출 기반 완전 밀봉형 디지털 나노포커스 엑스선 소스와 (b) 획득한 고해상도 엑스선 영상

용어해설

- 방사능** 원자핵이 방사선을 방출하여 다른 원자핵종으로 변하는 능력
- 전리방사선** 에너지가 커서 물질에 입사될 때 물질을 구성하는 원자의 전자를 분리시켜 이온을 만드는 방사선
- 비전리방사선** 전리방사선 이외의 방사선
- Mammography** 유방암을 진단하기 위한 유방 전용 엑스선 촬영
- 동적흐림(motion blurring)** 빠르게 움직이는 피사체를 느린 영상장비로 촬영할 경우 영상의 늘어짐이 발생하는 현상
- 라인페어 게이지(line-pair gauge)** 영상 해상도 측정을 위해 만들어진 피사체로 일정한 간격으로 반복되는 패턴으로 제작됨

약어 정리

| | |
|------|--|
| AR | Analog Radiography |
| BCT | Breast Computed Tomography |
| CR | Computed Radiography |
| CT | Computed Tomography |
| DBT | Digital Breast Tomosynthesis |
| DR | Digital Radiography |
| ETRI | Electronics and Telecommunications Research Institute |

참고문헌

- [1] J.-W. Jeong et al., "A vacuum-sealed compact x-ray tube based on focused carbon nanotube field-emission electrons," *Nanotechnol.*, vol. 24, no. 8, 2013, pp. 085201:1-8.
- [2] J.-W. Kim et al., "Highly reliable field electron emitters produced from reproducible damage-free carbon nanotube composite pastes with optimal inorganic fillers," *Nanotechnol.*, vol. 25, no. 6, 2014, pp. 065201:1-10.
- [3] J.-T. Kang et al., "Fast and Stable Operation of Carbon Nanotube Field-Emission X-Ray Tubes Achieved Using an Advanced Active-Current Control," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 36, no. 11, 2015, pp. 1209-1211.
- [4] 송윤호, "전계방출 디지털 엑스선 소스 기술 동향 및 전망," 인포메이션 디스플레이, 제17권, 제4호, 2016, pp. 1-10.
- [5] S. Park et al., "A Fully Closed Nano-Focus X-Ray Source With Carbon Nanotube Field Emitters," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, no. 12, 2018, pp. 1936-1939.