

신개념 X-ray 광원 개발 및 의료 응용 연구 - 탄소나노튜브 (Carbon Nanotube)의 전계방출원리 이용 -

한국전기연구원 융합기술연구단
차세대X-선의료기기연구그룹
김종욱 박사

탄소나노튜브 (Carbon Nanotube)는 일본의 Ijima 교수에 의해 처음으로 발견된 나노(10^{-9} m) 크기의 물질로서 양자 역학적인 전계방출원리(field emission principle)에 의해 전자를 방출하는 구조를 가지고 있다. 탄소나노튜브는 구동전압이 낮으며 고침예화 (high aspect ratio)를 가지고 있어서 고전류 밀도를 얻을 수 있다. 특히, 전계방출 특성의 안정성이 다른 재료에 비해 우수하며, 전기전도성이 좋고 기계적으로 강한 특성을 보유하고 있어서 최근에 전자방출원(electron emitter)으로의 응용에 큰 관심을 모으고 있다. 그림 1에 나타난 바와 같이 탄소나노튜브는 밀리는 방향에 따라 지그잭(zig-zag), 카이랄(chiral) 혹은 암체어(armchair)로 불리며 이에 따라 금속, 반도체 혹은 반도체의 특성을 갖게 된다. 또한 탄소나노튜브를 이루고 있는 튜브의 개수에 따라 특별한 이름으

로 불리는데, 가령 1겹으로 이루어졌을 때는 단일벽나노튜브(single-wall carbon nanotube: SWNT)로 불리며 2겹으로 이루어졌을 때는 이중벽나노튜브(multi-wall carbon nanotube: MWNT)로 불린다.

탄소나노튜브는 다양한 방법으로 합성 및 성장이 가능하며 일반적으로 PECVD, Thermal CVD, Catalytic CVD, Laser ablation, Arc discharge, HiPCO 등의 방법이 사용된다. 그림 2는 Thermal CVD 및 PECVD에 의해 기판에 수직으로 성장된 탄소나노튜브의 SEM 이미지이다. CVD방법은 다양한 패턴형성, 수직 정렬된 다중벽나노튜브(MWNT) 성장이 가능하며, 단일벽나노튜브(SWNT)는 Catalytic CVD, Laser ablation, Arc discharge, HiPCO 등의 방법에 의해 얻어진다.

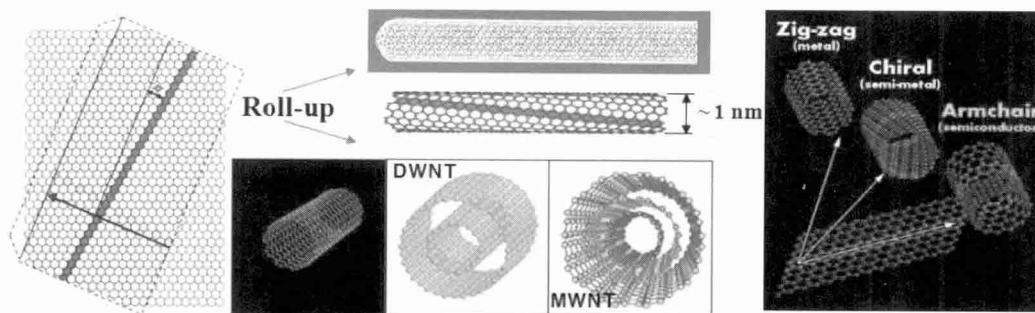


그림 1. 탄소나노튜브의 이론적인 모양 및 구조에 따른 이름 설명
출처: 한국전기연구원 세미나 자료(이내성 교수, 세종대학교 나노신소재공학부)

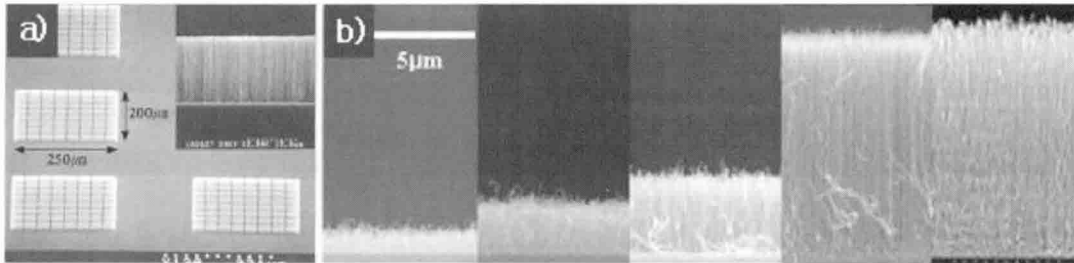


그림 2. (a) 패턴 성장된 탄소나노튜브 (b) 길이 조절된 탄소나노튜브
출처: D. H. Kim et al., NANO LETTERS Vol. 3, 863(2003); CARBON Vol. 42 1807(2004)

SWNT 및 MWNT는 전계방출소자 응용 시 각각 장단점을 가지고 있어 세밀한 비교 평가 연구를 통해 각 전계방출 소자 분야에 응용되어져야 할 것이다. 탄소나노튜브의 전계방출 소자 응용 시 가장 중요한 특성은 대표적으로 전류밀도와 총 방출 전류량이다. 물론, 각 응용분야들 내에서도 용도에 따라 필요한 전류량의 차이가 있지만 탄소나노튜브의 전자방출원으로 응용 가능한 분야 및 그 요구 조건을 그림 3 과 그림 4에 정리 하였다.

현재, 한국전기연구원에서의 생체 및 인체의 의료진단, 암(cancer)등의 치료에 적용하기 위한 목적으로 위에서

설명한 탄소나노튜브를 소재로 신개념 X-선 광원을 개발하고 있다. 의료진단 및 암 등의 치료기기로 사용되는 X-선 응용시스템에서 X-선 광원을 발생하는 X-선관은 시스템의 핵심부이며 고난도 기술의 집약체로서 적용대상에 따라 에너지, 초점의 크기, X-선 강도가 다양하게 적용될 수 있으며, 현재 우리나라의 경우 일부 X-선 응용 장비는 국내제작을 하고 있으나 X-선관은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한, 의료진단에 필수적인 고도의 해상도(resolution)와 대조도(contrast)로 좋은 영상을 얻기 위해서는 X-선 광원의 선질과 초점 크기에 직접 관련이 있으며 또한 암 치료 등에 적용하기 위해서 요

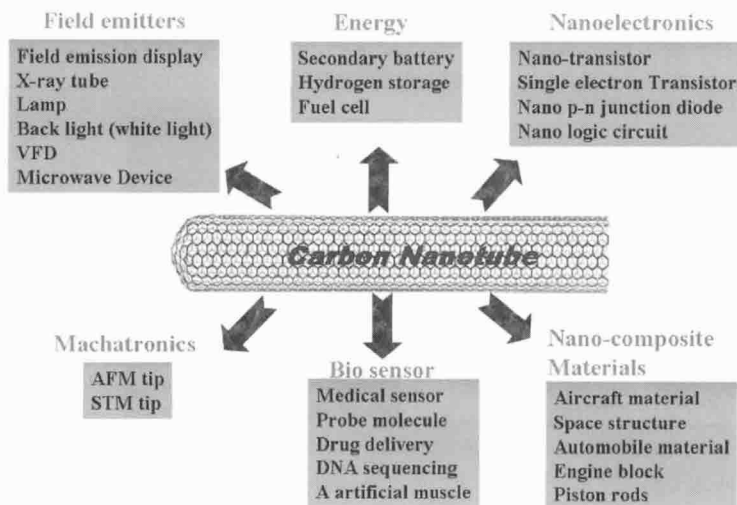


그림 3. 탄소나노튜브의 다양한 응용분야
출처: 산자부지역중점사업 "신개념을 이용한 CNT 기반의 고휘도, 고효율 콤팩트 엑스선 광원개발," 2단계 사업계획서(IH-13-52(경남))

구되는 고선량(high dose rate)을 얻기 위해서는 X-선 광원의 출력과 직접적인 관련이 있기 때문에 X-선 광원의 성능 향상을 위한 효과적인 전자방출원의 발굴 및 최적의 X-선관 구조 설계 등이 필수적이라 할 수 있다.

일반적인 X-선관은 고진공으로 밀봉된 벌브내부에 음극부와 양극부로 구성되어 있고, 음극부에서 발생된 전자가 음극부와 양극부 사이에 인가된 고압전원에 의해 가속되어 양극부의 타깃에 충돌하면서 X-선 광원이 발생된다. 음극부에서 전자를 발생시키는 방법으로서 기존의 X-선관에서는 텅스텐 필라멘트를 가열하여 전자를 발생시키는 열전자방출 음극구조를 가지고 있다. 열전자방출 음극구조를 갖는 X-선관에서의 단점은 열전자를 방출시키기 위해 필라멘트를 가열시킬 때에 발생하는 탈가스(out gas)로 인해 진공도가 저하되거나 혹은 필라멘트 표면에서 텅스텐이 증발되어 그 외경이 점차 줄어들면서 열전자방출특성이 변하게 되고, 이때 증발된 텅스텐은 유리벌브 내벽에 증착되어 고압절연을 저하시키고 투과 X-선량이

줄어드는 문제점에 노출된다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 본 연구에서 제시된 방법이 전계방출원리를 이용한 탄소나노튜브 기반의 신개념 X-선관이다. 탄소나노튜브 기반의 신개념 X-선관은 기존의 전자방출원인 텅스텐 필라멘트 음극 대신에 고효율의 전자방출원인 탄소나노튜브를 음극으로 사용한 것으로서, 전자빔 집속이 용이하고 X-선관을 구동하기 위한 전력이 기존 방식과 비교하여 낮다는 장점을 가지고 있다 그림 5는 본 연구에서 개발된 탄소나노튜브 전자방출원과 기존 텅스텐 필라멘트 전자방출원의 구조 및 전자방출시의 영상을 획득하여 비교한 것이다.

본 연구를 통하여 한국전기연구원에서 개발한 X-선관은 전자방출원으로 탄소나노튜브(Carbon Nanotube: CNT)를 이용, 분해 능력이 우수한 영상을 획득할 수 있고 고장시에는 음극으로 사용하는 CNT만 간단히 교체할 수 있어서 반영구적인 사용이 가능하다. 따라서 기존 장치에 비해 가격 경쟁력이 높고 소형화, 저 전력화를 동반해 기존 X-선관 시장을 대체하는 것은 물론, 새로운 의료

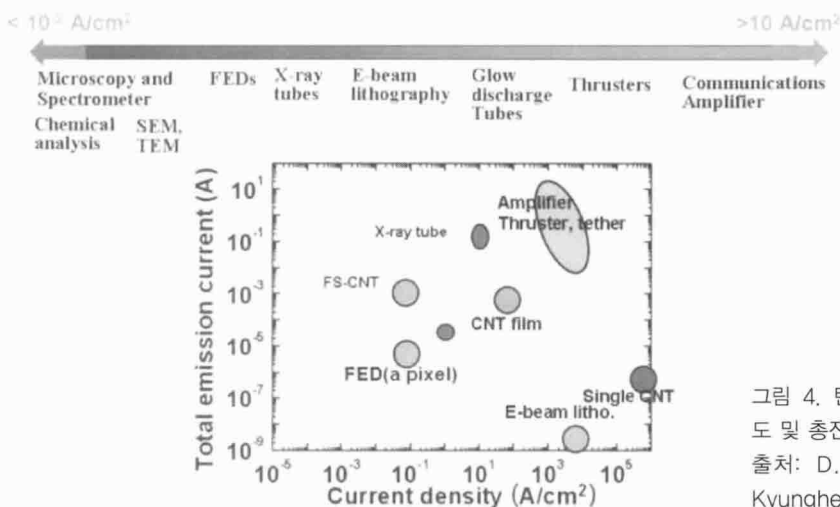


그림 4. 탄소나노튜브 전계방출 응용분야별 전류밀도 및 총전류량에 대한 분류표
출처: D. H. Kim, Ecole Polytechnique-Kyunghee Univ. Joint seminar, April 28, 2004

진단 및 암 치료 분야의 시장 확보가 가능할 것으로 판단된다. 현재 미국의 X-intek Inc. 에서도 CNT를 이용한 밀봉형 X-선관을 개발하고 있지만, 전자방출원인 CNT 음극의 고장 시 고가의 X-선관 전체를 사용하지 못하는 단점이 있는 반면에 본 연구를 통하여 개발한 X-선관은 CNT 음극의 고장 시, 작동하고 있는 X-선관에서 손쉽게 CNT 음극만 교체해 1-2분 내에 재사용이 가능하므로 X-선관의 반영구적 사용이 가능한 것으로서 세계최고 기술이라 할 수 있다. 본 연구에서 개발한 CNT 기반의 X-선관 광원을 이용하여 획득한 다양한 영상을 그림 6에 나타내었다.

향후, 본 연구개발의 결과를 더욱 발전시켜 마이크로 형태의 소형 CNT X-선관을 개발, 체내 삽입이 가능한 근접치료기(brachytherapy)를 구현하여 유방암, 위암 등의 질병치료에 활용할 예정이다. 특히, 유방암은 모든 나라에서 여성에게 발생하는 암 중 1,2위를 차지하고 있으며, 진단기술 및 조기 진단이 점차 증가하고 있고, 완치율이 다른 암에 비하여 상당히 높은 특성을 가지고 있다. 특히, 유방암의 경우 유방전체를 절제하는 치료법에서 종양 부위만 절제하는 유방보존수술 후 방사선 치료가 표준 치료법으로 자리 잡아 여성의 삶의 질 향상에 크게 기여하고 있다. 현재 유방암 치료를 위한 근접치료기에서 가장 많이 사용되는 임상용 방사선 물질로 Ir-192를 사용하고



그림 5. 탄소나노튜브 전자방출원과 기존 텅스텐 필라멘트 전자방출원 비교

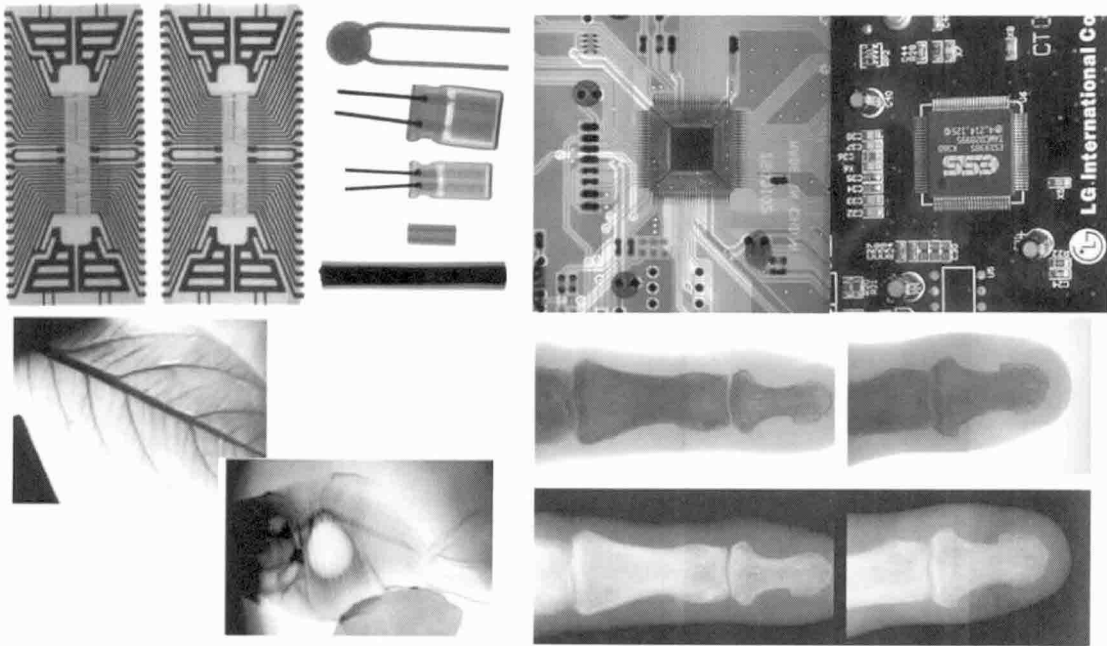


그림 6. 한국전기연구원에서 개발된 CNT 기반 마이크로포커스 엑스선 광원을 이용하여 획득된 영상의 예

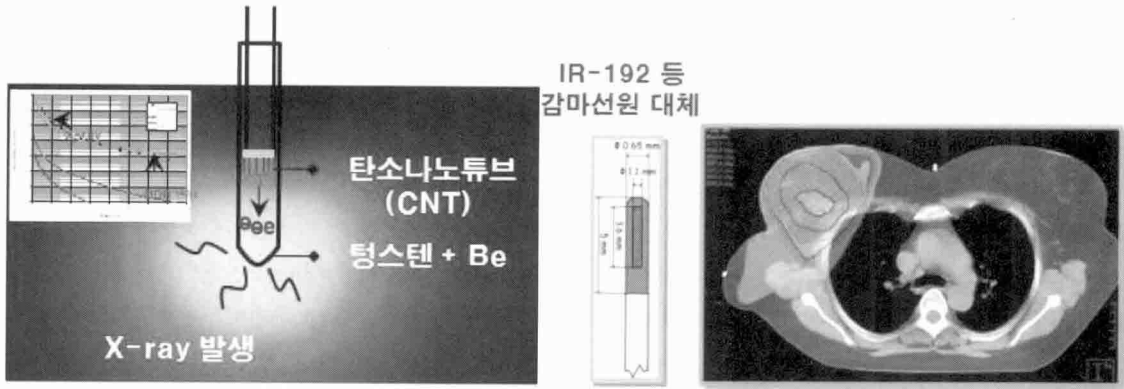


그림 7. 근접치료기 엑스선 광원의 개념도 및 선량분포 계산
출처: 미래융합파이오니아 사업계획서(한국전기연구원, 2008)

있는데 방사선 피폭량이 많아 환자나 의사가 사용하는데 많은 불편함을 초래하고 있다. 이외는 달리, 본 연구에서 개발하려는 CNT 기반의 근접치료기는 치료 시에만 전원을 공급하여 X-선 광원이 발생되는 효과를 가지기 때문에 환자나 의사에게 과도한 방사선 피폭의 우려를 없애고 안전하게 사용할 수 있는 장점이 있으며, 더욱이 환부에

삽입하여 근접치료(brachytherapy)를 할 수 있기 때문에 치료효율이 우수하다. 그림 7은 향후, 본 연구를 통하여 개발하려는 소형 CNT 기반의 X-선 근접치료기 광원과 환부(유방부위)의 치료 시 계산된 방사선 선량을 보여 준다.

문의: E-mail: jukim@keri.re.kr