

Design of Soft X-ray Tube and Simulation of Electron Beam by Using an Electromagnetic Finite Element Method for Elimination of Static Electric Field

Tae-Young Park and Sang-Suk Lee*

Department of Oriental Biomedical Engineering Sangji University, Wonju 220-702, Korea

Rae-Jun Park

XL Co. Ltd., Wonju 220-120, Korea

(Received 2 April 2014, Received in final form 15 April 2014, Accepted 16 April 2014)

The spreading tube of X-ray cathode tube displayed with an electromagnetic finite element method was designed. To analyze a feature design and the concrete coordinate performance of soft X-ray tube modeling, the orbit of electron beam was simulated by OPERA-3D SW program. The fixed conditions were the applied voltage, the temperature, the work function of thermal electron between cathode and anode of tungsten. Through the analysis of distribution of electron beam and the variation of dividing region, the design of soft X-ray spreading tube equipped with two cross filaments was optimized.

Keywords : Electromagnetic finite element, Soft X-ray, Static electric field, Electron beam, Thermal electron, Spreading tube

전자기 유한요소법 전자빔 시뮬레이션을 이용한 정전기장 제거용 연한 X-선관 설계 특성 연구

박태영 · 이상석*

상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 우산동, 220-702

박래준

(주)엑스엘, 강원 원주시 태장동, 220-120

(2014년 4월 2일 받음, 2014년 4월 15일 최종수정본 받음, 2014년 4월 16일 게재확정)

유한요소법으로 분할 표시한 연한 X-선 퍼집관을 설계하였다. 연한 X-선관의 모양설계 및 구체적인 좌표를 설정하고 전자빔 궤적을 OPERA-3D SW 프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였다. 음극과 양극인 텅스텐 필라멘트와 타겟에 인가한 전압, 온도, 열 전자 일함수 등을 고정하였다. 필라멘트 십자형 모양을 구비한 퍼집관의 구조에 따른 전자빔의 분포와 초점변화를 분석하여 반도체 공정상의 정전기장 제거용 연한 X-선 퍼집관 설계를 최적화하였다.

주제어 : 전자기 유한요소, 연한 X-선, 정전기장, 전자빔, 열전자, 퍼집관

I. 서 론

반도체 제조공정에 있어서 정전기장 제어 대책은 부유 미립자 오염제와 더불어 중요한 문제로 대두 되고 있다. 또한, 반도체 공정시 자성을 띠고 있는 금속 표면에서 정자기장 발생으로 인해 흡착된 자성 미립자들의 존재가 오염물질을 유

발시킬 수 있다. 정자기장으로 인한 미립자 오염과 정전기 방전에 의한 회로 소자 파괴 등 정자기장과 정전기장이 커질수록 생산 효율을 저하시키고 기술개발에 영향을 미쳐 자기장과 전기장 제어에 대한 중요성이 점차 심화되고 있다.

정전기 문제를 해결하기 위하여 현재 코로나 방전에 의해 생성된 이온을 압축 공기와 팬을 이용하여 중화 시키는 방법이 널리 사용되고 있다[1, 2]. 그러나 이와 같은 방법은 고전압의 정전기력에 의해 방전 극단에 수 μm 단위의 미립자가 흡착된다. 따라서 정전기에 의한 오염을 방지시키는 장치가

오히려 먼지 발생원으로 작용하게 된다. 또한 이러한 흡착 미립자는 방전전극으로 부터의 발진을 가져와 후에는 정전기의 발생량이 오히려 더 커지는 현상이 발생한다.

코로나 방전식 정전기 제거 장치의 단점을 보완하기 위하여 연한(soft) X-선(ray)의 전리 작용을 이용하여 주위의 가스 분자 및 원자를 이온화해서 대전 대상물체의 정전기를 중화시키는 방법이 개발되었다. 연한 X-선을 이용한 정전기제거 장치는 장치로부터 미세먼지가 전혀 발생하지 않고, 별도의 공기로 대류 시킬 필요도 없기 때문에 반도체 제조공정에는 아주 적합한 장치로 사용된다[3, 4].

본 연구에서는 전리 작용을 이용하여 주위의 가스 분자 및 원자를 이온화해서 대전된 대상물체의 정전기를 중화시키는 파장이 0.1 nm~0.2 nm의 연한 X-선을 발생시키는 X-선관을 설계하였다. 연한 X-선관은 의료용 엑스선관과는 달리 양극에서의 전자빔의 초점밀도가 넓게 퍼져야 한다. 따라서 전자빔의 폭이 보다 넓은 X-선 피집관을 설계하기 위하여 모델을 디자인 및 시뮬레이션 하였다. 해석 프로그램으로는 영국의 CONSOL 회사 제품인 OPERA-3D 프로그램을 사용하였으며 유한요소 해석법을 통하여 해석하였다[5]. 연한 X-선의 발생을 위하여 X-선관 타겟에 형성되는 전자밀도의 초점을 더 고르고 넓게 분포하게 설계하였다. 전자밀도의 초점에 따라 집속관의 폭, 넓이, 길이 등과 필라멘트의 개수, 필라멘트간의 거리 등을 바꾸어 가며 전자밀도의 초점을 확인하여 설계하였다.

II. 전자기 해석

Fig. 1과 같이 노출형 고정양극 X-선관은 X-선선을 발생시

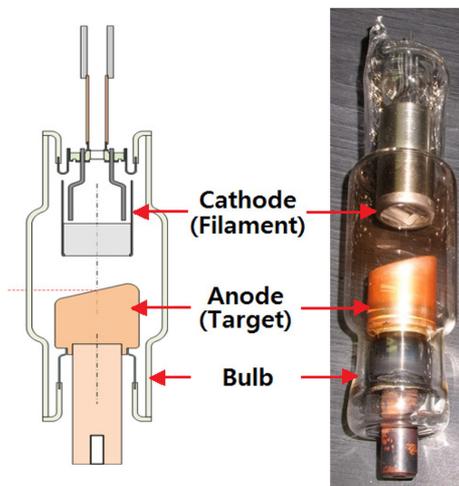


Fig. 1. (Color online) The design and real feature of one typically fixed anode X-ray tube included of filament (cathode), target (anode), and bulb.

키는 진공관으로써 크게 음극(필라멘트), 양극(타겟), 별브로 구성되어있다[5, 6]. 음극은 필라멘트, 전극빔이 넓게 분포되는 피집관, 필라멘트 전극지지대, 전극지지대 절연세라믹, 전극 지지봉(feedthrough)으로 구성되어 있다. 필라멘트는 가열되었을 때 전자방출기능이 있고, 피집관은 필라멘트에서 방출된 전자빔이 의도한 넓은 초점이 형성되도록 한다. 음극에 2000 K~4000 K의 고온을 가해주었을 때, 필라멘트에서는 열전자가 방출된다. 방출된 전자들은 높은 전압으로 대전된 양극으로 향한다. 전자들이 양극에 도달하여 베릴륨 타겟을 때리면 타겟의 에너지 준위가 낮아지게 되면서 X-선을 방출한다. 이때, 타겟에 충돌하게 되는 열전자의 분포, 즉 초점에 따라 방출되는 엑스선의 선질이나 해상도가 다르며 초점을 퍼지게 함으로써 전리 작용을 이용하여 주위의 가스 분자 및 원자를 이온화해서 대전대상물체의 정전기를 중화시키는 파장이 0.1 nm~0.2 nm의 연한 X-선을 얻을 수 있다.

전극배선은 스팟(spot) 전기저항용접을 이용하여 수행한다. 의도하는 전자빔 궤적 및 넓은 피집을 형성하기 위해서는 집속관의 구조가 중요하며 X-선관내의 정전기장에서 그 궤적을 계산하여 의도한 초점사이즈가 양극의 타겟에 형성되도록 Fig. 2(a)와 같이 십자형 필라멘트를 갖는 음극의 피집관 구조를 설계한다. 정전기장에서 전자빔 궤적을 계산하는 S/W는 전자방출 및 방출전자의 운동과 관련된 모델과 전기장에서의 유한요소법(finite element method; FEM)을 적용하여 정전기장에서의 공간전하 효과를 해석하여 전자빔 궤적을 계산한다. 진공공입 후 엑스선관내의 진공유지를 위해 음극부에 확산케터를 장착하고 비확산케터는 양극 또는 음극의 피집관에 장착한다.

유한요소법 해석은 구조 해석, 열 해석, 자기장 해석 등에서 가장 널리 보급된 수치 해석 방법이다[5, 6]. 해석 대상을 유한 개의 영역(요소)으로 분할하여 이 영역을 대표하는 접점을 정한 다음, 이 접점의 지배 방정식을 연립1차 방정식에 근사시켜 풀이하는 방법이다[6]. 본 연구에 사용한 공간의 요

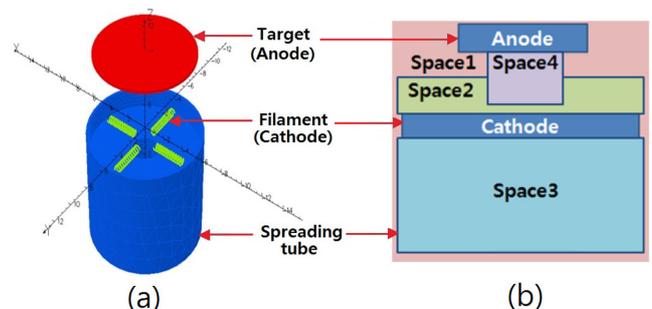


Fig. 2. (Color online) (a) The design for a spreading electron beam of X-ray tube with cross four filaments. (b) The definition for neighbor spaces of X-ray tube applying for the finite element method analysis.

소분할에 따른 요소 수 증가로 인한 계산량을 줄이고자 Fig. 2(a)에서 보여주듯이 모델을 4개의 영역으로 분할하여 계산하였다. 공간1은 전자빔이 존재하지 않는 공간으로 무한대인 해석범위를 유한대로 줄였다. 공간2는 음극(Cathode) 윗부분의 공간으로 필라멘트와 빔이 발생하는 부분을 분할하였다. 공간 3은 음극 아랫부분, 공간4는 베릴륨 창과 양극(Anode)컵 부분으로 분할하였다[7].

III. 전자기 해석 결과 및 토의

타겟에서 열전자의 퍼짐 분포는 퍼짐관의 형태, 양극에 대전되는 전압, 필라멘트의 온도, 필라멘트의 관 전류 등 다양한 요소에 영향을 받는다. 열전자 방출은 텅스텐 필라멘트를 가열하여 그 열에너지에 의해 전자가 방출되는 현상이며 금속표면에서의 전자의 열방출 현상은 일함수 이상의 에너지를 받은 전자가 방출될 경우 맥스웰 속도분포(Maxwell Velocity Distribution; MVD) 모델에 따라 특정속도를 갖는 전자의 전류밀도 공식(1)로 표현된다.

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{q_e \Phi_0}{kT}} \quad (1)$$

여기서 Φ_0 는 일함수, q_e 는 전자의 전하 량, k 는 볼츠만 상수, T 는 금속(필라멘트)의 절대온도이다[8, 9].

1차원 공간에서 가속되는 하전 입자의 빔으로 인해 형성되는 최대 전류밀도를 계산하는 모델을 다음과 같은 공식(2)로부터 만들어졌다.

$$j_e = \frac{4\epsilon_0}{0} \sqrt{\frac{2Z_q V_0^3}{m_0 d^2}} \quad (2)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간의 유전율, Z_q 는 하전입자의 전하량, m_0 하전입자의 정지질량, V_0 는 음극(필라멘트)에서 가속거리 d 만큼 떨어진 곳에서의 가속전압이다.

전자기 유한요소 해석 및 분석방법을 이용하여 X-선관의 베릴륨 타겟에서 생성되는 열전자의 방출 궤적과 집속관에서 필라멘트의 위치와 개수를 변화시켜 이에 따른 초점 변화를 시뮬레이션한 해석모델을 이용하였다[7]. 전자기 유한요소 해석 및 분석방법을 이용하여 X-선관의 필라멘트에서 발생하는 열전자의 방출 궤적과 텅스텐 양극에서의 퍼짐관의 모형을 두 가지 형태로 변화시켜 이에 따른 초점 변화를 시뮬레이션 해석모델은 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 음극과 양극, 필라멘트의 크기와 위치를 나타낸 것이다. 필라멘트의 재질은 텅스텐으로 하였고 일함수는 4.5 eV, 온도는 2000 K, 음극에 걸리는 전압은 -40 kV로 정하였다. 전자기 유한요소 해석 프로그램인 OPREA-3D SW 프로그램을 통해 얻은 데이터는 일정

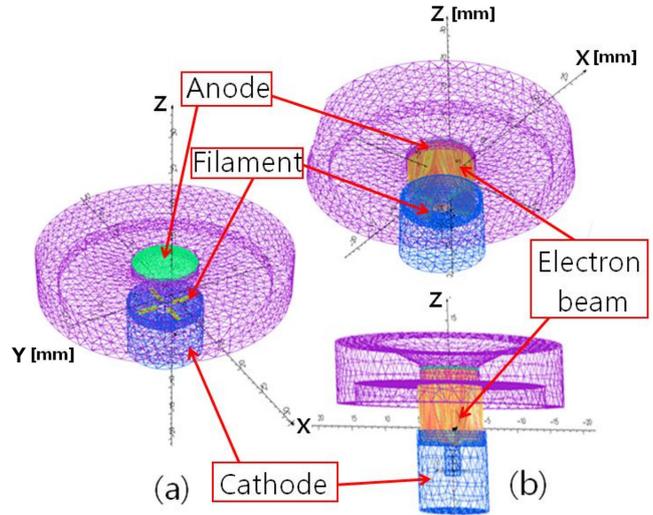


Fig. 3. (Color online) (a) The analytical model and dimension for the emission orbit of thermal electrons from two crossed filaments of the spreaded X-ray cathode. (b) The feature of electron beam produced from cathode and filament to anode by using OPERA-3D.

한 전압과 관전류에서 집속관 형태를 변화시켜 텅스텐 타겟에서 전자의 초점변화를 비교 분석하는데 사용하였다.

한 개의 해석 모델에는 중앙에 한 개의 필라멘트가 들어갔으며 한쪽 필라멘트는 초점의 퍼짐 현상을 5 mm~6 mm를 목표로 설계하였다. 첫 번째 한 개의 필라멘트를 일직선으로 하여 시뮬레이션을 한 결과 X축의 초점 양 끝부분에서 미세전류

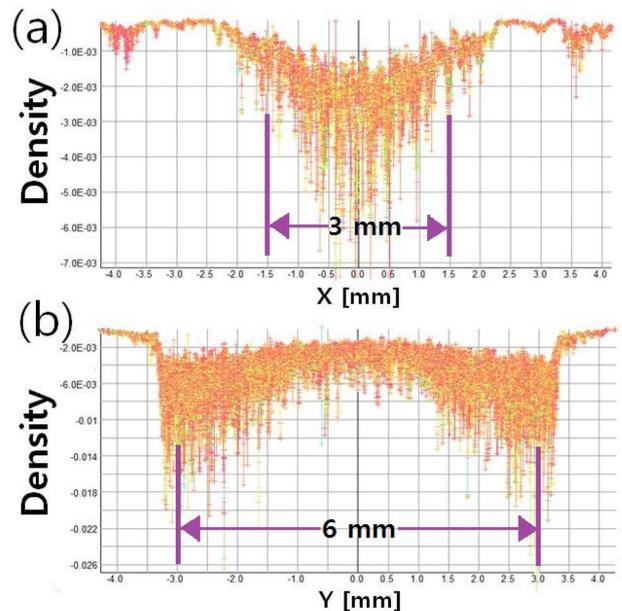


Fig. 4. (Color online) The current density distribution of thermal electrons for the main spread beam with one linear filament. The spreading values of electron beams are 3.0 mm and 6.0 mm according to (a) X-axis and (b) Y-axis, respectively.

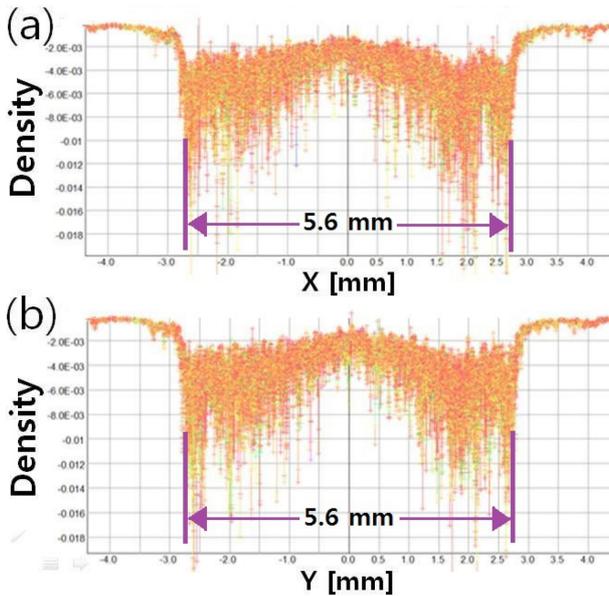


Fig. 5. (Color online) The current density distribution of thermal electrons for the main spread beam with two cross filaments. The spreading values of electron beams are 5.6 mm and 5.6 mm according to (a) X-axis and (b) Y-axis, respectively.

가 새어나가는 것을 발견할 수 있었다. 따라서 첫 번째의 한 개의 일직선 필라멘트를 사용한 결과는 Fig. 4처럼 나타났다.

모델1에서는 한 개의 필라멘트가 모델2에서는 4개의 필라멘트가 들어갔으며 베릴륨 타겟에 고루 열전자가 도달하는 것을 목표로 설계하였다. 모델1의 시뮬레이션 결과 퍼짐분포가 Fig. 4(a) X축으로 퍼짐 길이는 불균일한 전자빔 분포를 갖는 3 mm로 Fig. 4(b) Y축으로 전자빔 퍼짐은 비교적 균일한 분포를 띠며 6 mm로 길게 나타났다. 또한 필라멘트의 터널링 현상으로 인해 Fig. 3(b)의 원주 끝과 같이 Y축 끝에 열전자가 밀집되는 현상이 발견되었다. 이와 같은 현상을 보완하기 위해 Fig. 3(a) 처럼 퍼짐관에 열십자 모양의 4개의 필라멘트를 적용하여 모델2를 설계하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 모델2의 시뮬레이션 결과 전자빔 퍼짐 분포는 Fig. 5(a) X축으로는 5.6 mm, Fig. 5(b) Y축으로는 5.6 mm로 Fig. 3(a)의 X축과 Y축 퍼짐 분포의 길이가 비슷하게 나타났으며 초점이 퍼지는 전자 밀도가 X축과 Y축이 고르게 분포되어 나타났다. 따라서 필라멘트의 개수와 위치에 의거하여 X축과 Y축의 열전자의 밀도차이가 적게 나타났으며 비교적 균일하게 열전자가 타겟에 맞아 연한 X-선이 발생함을 확인 할 수 있었다.

III. 결 론

반도체공정에서 정전기 제거용으로 사용되는 연한 X-선 튜브를 설계하기 위해 양극에서의 열전자의 초점과 필라멘트에서의 전자의 방출궤적을 전자기 수치해석을 통하여 분석하였다. 분석 시에 3차원 전자기 유한요소 분석 프로그램인 OPERA-3D를 이용하여 해석하였으며 맥스웰의 속도분포 방정식과 각 영역별로 공간을 나누어 메쉬의 분할도를 다르게 하여 분석하였다. 분석결과 필라멘트의 위치와 개수에 따라 양극에서의 열전자의 초점의 퍼짐현상이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 열전자가 베릴륨 타겟에 보다 넓고 균일한 밀도로 맞게 하기 위하여 X-선관의 필라멘트를 4개로 늘리고 필라멘트의 위치를 변화시킴으로써 보다 균일한 밀도의 열전자 초점을 형성할 수 있었다. 이 실험 결과는 정전기 제거용으로 사용되는 연한 X-선 튜브를 설계 및 제작하는데 있어 도움을 줄 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년-2014년 2단계 강원광역경제권선도산업 육성사업 전자의료기기 프로젝트(제목 : 마이크로포커스 회전 양극 엑스선관 개발)로 수행된 연구결과이다.

References

- [1] J. P. Moy, Med. Phys. **27**, 86 (2000).
- [2] D. H. Kim and S. Y. Kim, J. Kor. Soc. Safety **14**, 69 (1999).
- [3] S. Y. Kwon, D. H. Lee, J. W. Choi, and M. S. Seo, J. Kor. Soc. Safety **25**, 27 (2010).
- [4] C. E. Floyd, J. R. Warp, J. T. Dobbins, H. G. Chotas, A. H. Baydush, R. V. Voracek, and C. E. Ravin, Med. Phys. **218**, 683 (2001).
- [5] T. Y. Park, S. S. Lee, H. C. Kang, C. S. Jang, and R. J. Park, New Physics: Sae Mulli **63**, 1185 (2013).
- [6] Cobham technical services, Opera-3d User Guide, Version 15 (2011).
- [7] Y. P. Kim, M. W. Cheon, and Y. P. Park, J. KIEEME **24**, 36 (2011).
- [8] J. P. Moy, Med. Phys. **27**, 86 (2000).
- [9] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7th Ed, John Wiley & Sons, New York (1996) pp. 67-382.