ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(2), 52-57 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.2.052

Property of Focal Spot of Electron Beam Depending on the Anode Angle of X-ray Tube Using a Finite Element Method

Tae-Young Park, Young-Il Noh, and Sang-Suk Lee*
Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

Rae-Jun Park and Ki-Seon Kim
XL Co. Ltd., Wonju 220-120, Korea

(Received 25 February 2015, Received in final form 15 March 2015, Accepted 18 March 2015)

The focal spot of electron beam depending on the anode angle in the structure and major parts of the X-ray tube was investigated by the OPERA-3D/SCALAR simulation program. The simulation worked on four spaces with with two spaces, including anode and cathode of X-ray tube, by applying the finite element method analysis. The analytical model and dimension for the emission orbit of thermal electrons made from one filament of the focused X-ray cathode is affected to the penumbra of detector for the X-ray depending on any real focal spot size. The model shape of focusing cap and focusing tube with an anode target angle and a cathode filament is analyzed by the current density distribution of thermal electrons. The focusing width of thermal electrons for the X-ray tube depended on the anode angle (θ). The focusing value of electron beams at a region of anode angle having 10°~17° maintained to below value of 70 μm. The minimum focal size of the electron beam was 40 μm at an anode angle of 15°. The focused X-ray tube of many variables depended on the thermionic emission of hot electrons from the target trajectory. The focusing tube will contribute to the real design of X-ray for the development of future diagnosis medical device.

Keywords : method of a finite element, real focal point, filament, distribution of focal spot, anode angle

유한요소법을 이용한 X-선관 양극각도에 의존하는 전자빔 초점 특성 연구

박태영 · 노영일 · 이상석*
상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 우산동, 220-702

박래준 · 김기선
(주)엑스엘, 강원 원주시, 220-120

(2015년 2월 25일 받음, 2015년 3월 15일 최종수정본 받음, 2015년 3월 18일 게재확정)

텅스텐 타겟인 양극의 각도에 의존하는 X-선관 집속관의 전자빔 초점 크기를 오페라-3차원/스칼라(OPERA-3D/SCALAR) 프로그램을 이용하여 구하였다. 시뮬레이션 분석은 X-선관을 음극과 양극 그리고 4영역을 나누어 유한요소법을 적용하였다. X-선 집속관의 필라멘트로부터 방출되는 열전자 궤적은 전자밀도 분포함수에 따라 양극에 도달할 때 실초점으로 집속되고 양극에 부딪쳐서 유효 초점 크기로 X-선을 발생하게 된다. 전자빔 실초점 크기는 X-선 집속관 모양을 결정짓는 폭, 길이, 높이를 조절하여 줄일 수 있었고, 양극각도의 크기에 따라 미세하게 변하였다. 양극각도가 10°~17°에서는 전자빔 실초점 크기를 70 μm 이내로 유지하였고, 가장 최소 초점크기는 15°에서 실초점 크기가 40 μm로 나타났다. 최적화된 X-선 집속관의 변수들로 시뮬레이션하는 열전자의 방출 궤적을 분석하여 얻은 마이크로 크기인 실초점을 활용하는 새로운 의료 영상진단기기 개발이 가능할 것으로 보여진다.

주제어 : 유한요소법, 전자빔, 실초점, 필라멘트, 초점분포, 양극각도

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-33-730-0415,
Fax: +82-33-738-7610, e-mail: sslee@sangji.ac.kr

I. 서 론

진료용 X-선 장치는 X-선을 효과적으로 이용하기 위하여 각종기기를 결합시킨 장치이다. 오래 전부터 사용되어오고 있는 X-선 의료기기는 인체 조직을 진단하는 의료영상정보를 의사와 환자에게 제공한다[1, 2]. 하지만 X-선 피폭으로 인한 인체유해성을 가지고 있기 때문에 인체에 해롭지 않으면서 좋은 영상을 얻기 위한 엑스선 진단장비의 고급 제원이 요구되어 제작 회사간의 기술개발 경쟁이 이루어지고 있다[2, 3]. 좋은 영상을 얻기 위한 방안으로는 X-선 의료기기 성능을 결정짓는 격자구조, 필터(Filter), 제너레이터(Generator), 디텍터(Detector) 등의 기능을 향상시키는 것이다. 일반적으로는, X-선 진단에서 뼈와 기타 조직의 밀도 차이가 다를 경우 X-선 흡수 차이에 의한 대조도로 영상이 구현이 용이하기 때문에 되기 때문에 가속 에너지를 조절하여야 한다[3, 4].

X-선 피폭을 줄이는 한 방법으로 진단 CT(Computer Tomography) 장비에 마이크로 포커스(micro focus) 엑스선관을 적용하는 것이 활발히 진행되어 디지털 진단장비의 고급화가 이루어질 전망이다[5, 6]. X-선 방사선원은 의료 분야뿐만 아니라 재료, 환경, 소재, 비파괴 분야 등에도 다양하게 활용된다. 한편 고성능 의료용 X-선 촬영 진단장비 외에 구난 및 재난 현장 및 동물농장 현장 실시간 영상 판독을 위한 소형 경량화 및 고출력 특성을 띠는 디지털 진단기기가 개발되고 있다. 해상도와 출력은 상충관계에 있어서 초점을 줄여 해상도를 향상시키려면 출력이 감소되는 것을 감수해야 되기 때문에 고감도 디텍터가 실용화됨으로써 마이크로 초점 X-선관 개발의 한계를 극복할 수 있다.

건강 유지를 위해 진단검사 증가는 필요 이상으로 X-선 검사의 빈도를 높이게 하여 방사선 피폭 량이 점차 증가할 뿐만 아니라 누적 피폭량도 증가하게 된다. 인체의 방사선의 피폭선량만 줄이게 되면 잡음(Noise)의 증가로 인한 영상 질에 영향을 주게 되어 영상 질이 저하되지 않는 범위 내에서의 피폭선량의 조절이 필요하다. 방사선 피폭선량이 X선 촬영에 비하여 많은 CT나 유방촬영술인 맘모그래피(Mammography)에 대해서는 피폭선량을 줄이기 위해 최적화된 촬영조건으로 초점크기 변화에 대한 방사선 피폭과 영상의 해상도 등의 상관관계 연구가 현재까지 이루어져 왔다[7].

특히 맘모그래피 X-선관은 0.1 mm = 100 μm 이하의 마이크로 초점크기를 갖는 전자빔이 요구된다. 현재 국내의 X-선관 제조 기술력 부족으로 인하여 전량 수입에 의존되고 있는 실정이다[5, 6]. 마이크로 초점 X-선관의 제조 기술력 확보를 위한 연구는 우선적으로 관내 진공배기 및 제작에 따른 집속관 설계를 위한 전자빔 시뮬레이션 기술이 실제로 요구된다. X-선관 디자인 수정의 실제 모델 제작 및 보완은 시뮬레이션을 통한 해석으로 초기 집속관 디자인이 가능하므로 모델링 각 물질의 특성에 따른 공간분할을 적용한 유한요소 분할 해석이 필요하다[8, 9].

X-선관 내의 집속관은 필라멘트에서 발생하는 열전자를 모아주는 역할을 하며 집속관 형상에 따라 타겟에서 열전자 초점분포도가 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 공간 상에서 전기장과 자기장을 유한요소법으로 해석하는 오페라 3차원 스칼라(OPERA-3D/SCALAR) 프로그램을 이용하였다[10, 11]. X-선관 집속관의 초점 형상을 50 μm 이내 크기를 얻는 것을 최종 목표로 하여 X-선 타겟 양극각도를 조절하여 집속관 설계 및 열전자의 분포를 시뮬레이션하였다.

II. 실험방법 및 모델링

X-선관 장치(Assembly)는 절연유, 유자기구, 양극 회전용 전자기 모터를 X-선관 용기에 한꺼번에 봉입한 것으로서 X-선 발생이나 X-선 영상 형성에 기여하는 기본장치이다. Fig. 1처럼 진공관 내에 양극(타겟), 음극(필라멘트), 집속관으로 구성되어있다[1-4]. 회전양극 X-선관 도식도인 Fig. 1(a)과 고정양극 X-선관 실제 모양을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 집속관의 필라멘트에 전류를 흘려서 2000 K~4000 K의 고온을 만들 때 필라멘트에 열전자가 만들어진다. 음극과 양극에 인가한 전압차에 전하 운반자로 가속되는 열전자의 에너지는 위치에너지 장벽인 일 함수(Work function)를 넘어 음극 표면에서 방출된다[4, 12]. 생성된 열전자들은 높은 전압에 이끌려 대전된 양극으로 향하고, 인가된 전압에 비례하는 에너지를 갖고 양극 타겟에 도달한다. 고 에너지를 갖는 열전자는 타겟에 부딪쳐 전자를 빼 내게 되고, 전자가 나간 자리를 채우는 과정

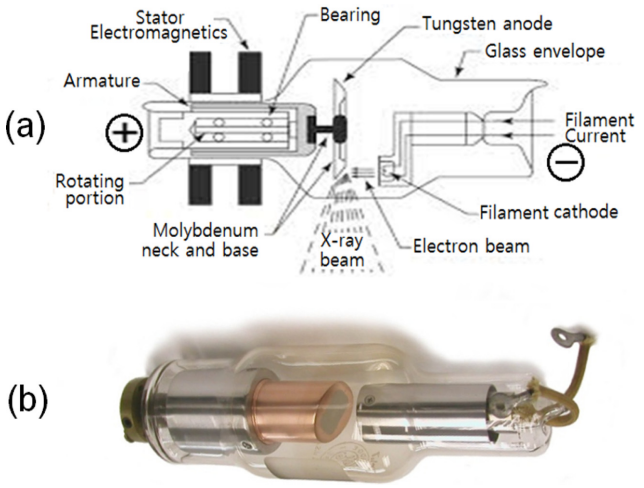

Fig. 1. (Color online) (a) Schematic structure and major parts of internal model of a rotating anode X-ray tube. (b) A photograph of one real fixed anode X-ray tube.

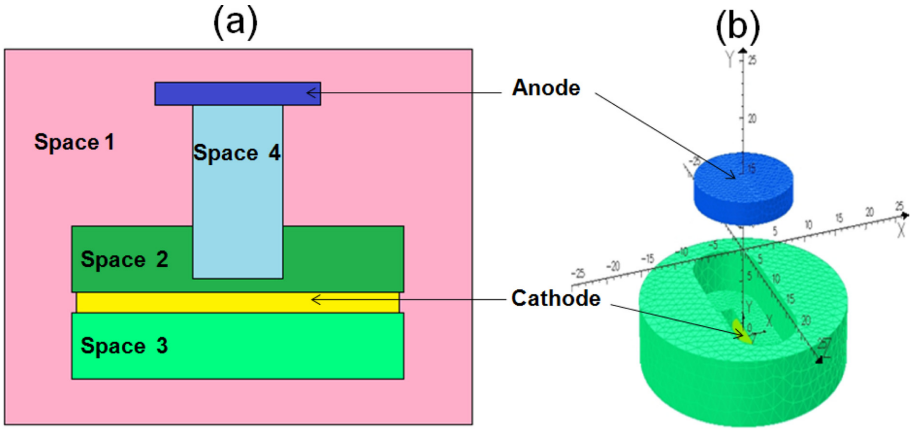

Fig. 2. (Color online) (a) The definition for four neighbor spaces except of anode and cathode of X-ray tube applying for the finite element analysis. (b) The analytical model and dimension for the emission orbit of thermal electrons from one filament of the focused X-ray cathode.

으로 전자가 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 떨어진다. 이에 따라 두 개의 에너지 준위차와 동일한 에너지에 해당하는 X-선을 방출한다. 열전자가 타겟을 맞추어 생기는 초점 크기에 따라 발생하는 X-선 선질과 영상에서 해상도가 다르게 나타난다[5, 6].

전자빔 소프트웨어 프로그램인 OPERA-3D/SCALAR를 이용한 집속관 모델링을 보다 신속하고 효율적으로 하였다. 집속관의 구조 필라멘트의 구조, 두께 재질 등 물리적 특성 값에 관한 입력을 자동화한 명령 스크립트를 작성하였다[13, 14]. 집속관 모델을 위한 스크립트 언어는 다양한 집속관의 변수에 대하여 약간의 수정으로 재사용이 가능함으로 여러 변수들의 변화에 대하여 다양한 열전자 초점 분포를 쉽게 알 수 있었다[14, 15].

본 연구에서 적용한 유한요소법 해석 대상으로 Fig. 2(a)처럼 X-선관의 음극과 양극을 제외한 4개 영역으로 분할하여 각 영역을 대표하였다. 접점을 지배하는 연립 1차 방정식을 근사적으로 푸는 방법을 적용하였다. 실제 모델에서 생각할 수 있는 공간은 무한대 이지만, 시뮬레이션 시 해석할 공간 영역을 정의 하여 불필요한 부분의 해석을 하지 않았다. Fig. 2(a)에 대응하여 Fig. 2(b)에서 보여 주듯이 색깔로 구분된 각 영역처럼 분할 시 중요도에 따라 공간을 부분적으로 나누어 계산 하였다[12]. 본 연구에서는 무한대인 공간을 정의하기 위하여 모델 크기에 3배의 크기를 유한 한 공간으로 정의하였다. 필라멘트 위치와 텅스텐 타겟 각도를 변화시켜 많은 수의 요소분활을 적용하여 조사하였다[15].

III. 실험결과 및 토의

X-선관 초점이 점(point)이 아닌 어떤 크기를 가지는 경우, Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)처럼 디텍터 필름 위에 나타나는 음영에서 X-선관 초점으로부터 X-선 빔이 일부 도달하는 부분인 반음영(Penumbra)이 생기게 된다[2, 3]. 반음영 현상을 없애기 위해서는 초점이 작은 것을 사용하는 것이 바람직하다. 점초점에 해당하는 X-선 빔을 얻기 위해서는 X-선관 전자빔 자체가 마이크로 초점 크기를 가져야 한다. Fig. 2(b)에서 보인 발생원인 음극 필라멘트에서 양극 타겟을 때리는 전자빔이 마이크로 초점 크기를 설계하기 위해 전자기 유한요소 해석 및 분석법인 OPERA-3D/SCALAR 시뮬레이션을 이용한다[10, 11].

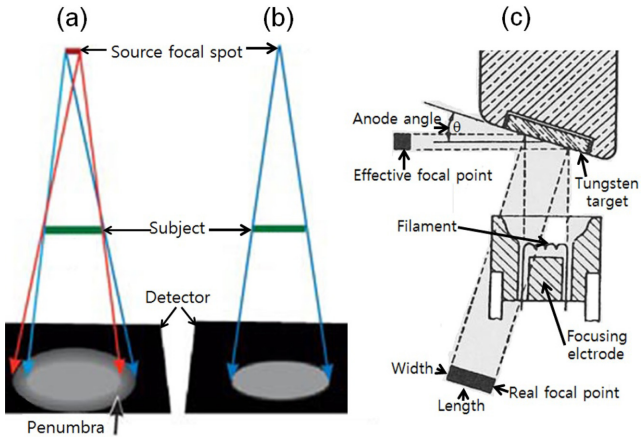

Fig. 3. (Color online) Two effects with (a) penumbra and (b) non-penumbra of detector for X-ray depending on any focal spot size and one point of electron beam, respectively. (a) Definitions of the anode angle, the effective focal point, and the real focal point by determined X-ray focusing tube assembly.

Fig. 3(c)에서 보인 음극 필라멘트에서 발생한 전자를 집속하기 위해 X-선 집속관 속에 내장한 열전자 발생용 직선형 텅스텐 필라멘트와 열전자를 한곳에 모아 고정하는 지지대로 구성되어 있다. 필라멘트를 포함한 집속관 모양은 Fig. 3(c)처럼 양극에 모아지는 전자빔 실초점 크기를 결정하며, 텅스텐

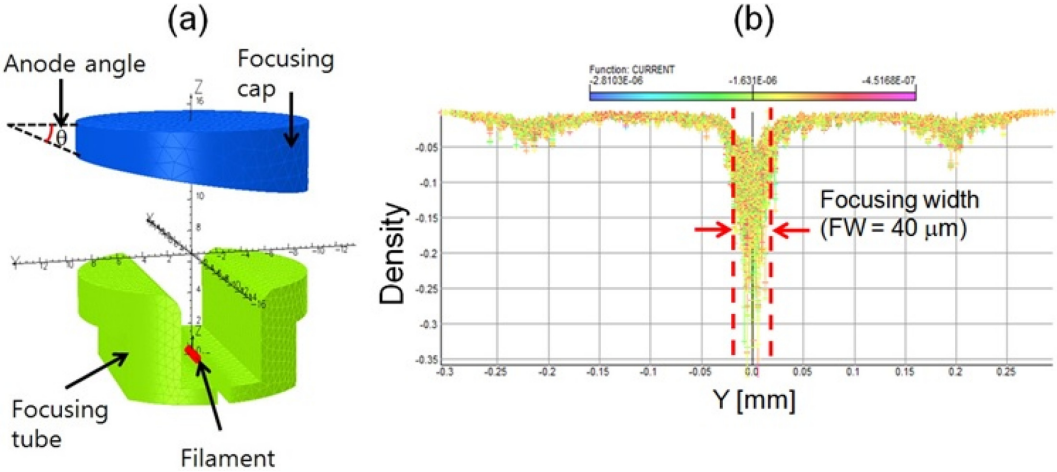

Fig. 4. (Color online) (a) The model shape of focusing cap and focusing tube with an anode angle and a cathode filament. (b) The current density distribution of thermal electrons for the focusing cap and tube applied by one simulation program of OPERA-3D/SCALAR. Each color of the current density distribution corresponds to each value of current. The focusing width (FW) having a full width at the half-maximum (FWHM) of electron beams decreases to 40 μm.

타겟의 각도에 따라 방사되는 X-선의 실효초점의 형태에 영향을 준다[6, 15]. 본 연구 목표인 타겟으로 집속되는 전자빔이 마이크로 초점크기를 얻는다면 약 1/3 정도로 줄어든 X-선 실효초점 크기로 형성될 수 있게 된다. 따라서 집속관 초점 성능과 더불어 양극각도인 θ의 크기가 전형적인 각도 범위인 10°~17°를 유지하는 것이 중요하며, 경우에 따라 각도 최적화가 요구되므로 추후 이것에 대해 실험결과를 논의할 것이다.

X-선관 음극에서 발생하는 열전자 방출 궤적과 텅스텐 타겟에서 초점 변화는 시뮬레이션 수치해석을 위한 집속관과 필라멘트 음극과 타겟 양극 형상 모델을 사용하여 분석하였다. X-선관는 집속관 실제 모델에 음극과 양극간 전압 40 kV, 텅스텐 필라멘트 일함수(Work function) 4.5 eV, 열전자 발생 온도 2000 K 조건으로 하는 고정된 변수들을 유지하였다. 그리고 방출 전자 전류밀도 J_e는 Eq. (1)와 같이 계산되는 집속관 형태 변화에 따른 열전자 궤적과 초점을 비교 분석하였다[13, 14].

$$J_e = 6.2\times10^2\left(\frac{E_f}{\phi_w}\right)^{1/2}\frac{F^2}{E_f+\phi_w}\exp\left(\frac{-6.83\times10^7\phi_w^{3/2}}{F}\right) \quad (1)$$

Eq. (1)의 E_f는 금속(Metal)의 페르미 에너지(Fermi energy), ϕ_w는 일함수, F는 전자가 방출될 경우 맥스웰 속도분포(Maxwell velocity distribution)이다.

OPERA-3D/SCALAR를 이용한 해석모델에는 필라멘트 하나가 들어갔으며 집속관은 필라멘트에서 방출하는 열전자가 타겟에서 도달할 때 초점이 50 μm 이하를 만드는 것을 목표로 집속관을 설계하였다. 집속관 모델 형상은 Fig. 4(a)에 나타내었으며, Fig. 4(b)는 집속관 폭의 길이, 깊이, 너비 등 매개변수들 값에 의존하여 계산된 3차원 전자빔 분포 중에서 Y축에 대한 전류밀도(Current density) 함수를 그래프로 나타내었다. 집속관 아래쪽 부분인 필라멘트 음극에 방출한 열전자들은 집속관 위쪽부분인 타겟 양극에 도달하는 전류밀도 분포는 OPERA-3D/SCALAR 프로그램을 적용한 것이다[11, 15].

마이크로 크기를 갖는 열전자 초점을 얻기 위한 최적화된 집속관 모양인 Fig. 4(a)에서 얻어지는 Y-축에 대한 전류밀도 분포를 나타내었다. Fig. 4(b)를 볼 때, 최대치의 반값전폭 값인 FWHM(Full width at the half-maximum)는 초점폭인 FW(Focusing width)로 정의되며 그 값이 40 μm로 줄어 들었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(a)에 색깔에 따라 전자밀도 최소값과 최대값은 Fig. 4(a) 안에 표시한 보라색과 파란색으로 각각 4.5168×10^{-7} A/m^{2}와 2.8103×10^{-6} A/m^{2}이었다.

OPERA-3D/SCALAR 프로그램을 사용한 전자빔 시뮬레이션을 통해 Fig. 4(a)에서 보여준 집속관 너비가 길수록 초점이 작게 형성되는 것을 발견하였고, 집속관 폭 길이와 깊이를 다르게 하여 40 μm 초점크기를 형성하는 변수들의 값을 Table I과 같이 도출되었다. 따라서 본 연구의 목표인 마이크로 초점크기를 갖는 집속관 형상 최적화 조건은 필라멘트가 있는 집속관 음극의 직경과 너비 높이가 각각 17 mm, 9 m, 6 mm이고, 전자빔 타겟인 양극 직경과 중심에서 높이 그리고 양극 각도는 각각 17 mm, 15 mm, 15°로 나타났다. 또한 집속관을 이루는 음극 상부 표면에서 양극 타겟 중심 하부표면까지 길이는 7 mm가 최적조건임을 알 수 있다.

필라멘트 음극에서 발생한 열전자를 고속으로 물질에 충돌시키면서 X-선이 발생하게 된다. 열전자가 집중적으로 충돌하는 부분이 텅스텐 타겟으로 바로 X-선을 발생시키는 양극이 된다. Fig. 3(c)에서 나타내었듯이 집속된 열전자 접속점을 실

Table I. Dimensions of optimized parameters for the micro focusing X-ray tube having a size of 40 μm as a focusing width (FW) with a full width at the half-maximum (FWHM) of electron beams.

Parameter of focusing X-ray tube		Dimension
Focusing tube (Cathode)		
	Diameter	17 mm
	Width	9 mm
	Height	6 mm
Focusing cap (Anode)		
	Diameter	17 mm
	Height (at center)	15 mm
	Angle	15°
Between top of cathode and bottom of anode	Distance	7 mm

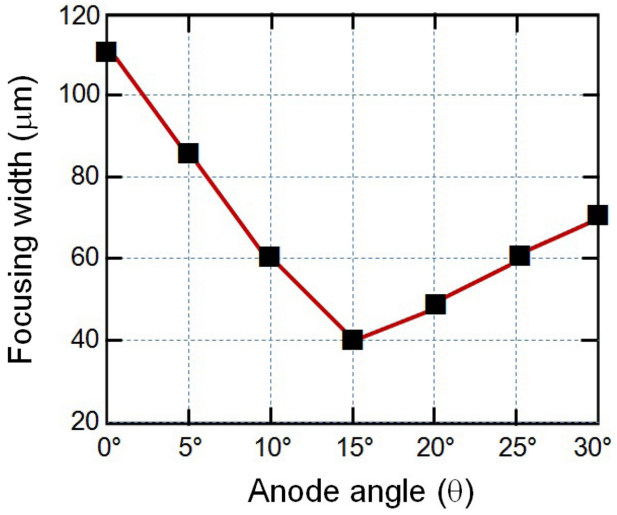

Fig. 5. (Color online) The focusing width (FW) of thermal electrons depending the anode angle (θ) for the focusing tube calculated by OPERA-3D/SCALAR simulation program. The focusing value of electron beams at a region of anode angle (10°~17°) maintained to below a value of 70 μm. The minimum focal size of the electron beam is 40 μm at an anode angle of 15°.

초점으로서 양극각도(Anode angle)인 θ의 크기에 따라 X-선 실효초점이 영향을 받게 된다. 이것을 확인하기 위해 양극각도를 변화시켜 OPREA-3D/SCALAR로 시뮬레이션하였다. 양극각도와 전자빔 크기 변화를 조사한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4(b)와 Table 1에서 언급한 X-선관 마이크로 초점 크기에 의존하는 집속관 주요 변수들 중 최적화된 양극각도는 15°이었다.

Fig. 5에서 양극각도 θ가 0°인 수평면을 갖는 타겟의 경우 전자빔 실초점 크기는 110 μm에서 θ = 10°일 때, 60 μm로 줄었다. θ = 15°일 때, 최저값인 40 μm이고 θ = 20°, 25°, 30°일 때, 각각 50 μm, 60 μm, 70 μm로 증가하는 현상을 보였다. 이것은 일반적으로 전형적인 X-선관 양극각도 θ 크기가 10°~17° 범위에서 전자빔 실초점 크기가 약 70 μm을 유지하였다.

IV. 결 론

X-선 집속관 주요 구성품인 텅스텐 타겟 양극각도에 의존하는 전자빔 초점 크기를 OPERA-3D/SCALAR 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계산하였다. 시뮬레이션은 X-선관을 음극과 양극 그리고 4영역을 나누어 유한요소법 분석을 이용하였다. X-선 집속관 필라멘트로부터 방출되는 열전자 궤적은 전자밀도 분포함수에 따라 양극에 도달할 때 실초점으로 집속되어 양극에 부딪쳐 더 작은 유효 초점 크기로 X-선을 발생하게 된다. 이때 X-선 집속관 성능을 결정짓는 양극각도는 전자빔 실초점 크기를 줄이게 하여 양극각도 10°~17°에서 70 μm 이내로 유지하였다. OPERA-3D/SCALAR 시뮬레이션를 활용하여 집속관 형태 변화에 따른 열전자 방출 궤적과 타겟에서 열전자 초점을 비교한 결과, 최소 초점 크기 40 μm를 구현하기 위해서는 집속관 음극 폭의 충분한 길이뿐만 아니라 최적화가 필요로 한다. 이는 전자빔 초점을 더욱더 미세화하여 타겟에 충돌시킬 때 저 에너지영역 산란 엑스선을 줄이고 해상도 향상에 기여할 것으로 보여진다.

감사의 글

이 논문은 2014년 강원광역경제권 선도산업 R&D 사업(제목: 마이크로포커스 회전양극 엑스선관 개발)와 한국산업단지공단 현장맞춤형 기술개발 생산기술사업화 지원사업(제목: 소형 고출력 마이크로포커스 회전양극 엑스선관 개발)으로 수행된 연구결과 이다.

References

[1] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, IEEE Computer Society Press, 2nd Ed., Wiley (2008).
[2] B. D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, 3rd Ed., Pearson Education (2013).
[3] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 8th Ed., Wiley (2004).
[4] Y. Koo and N. Kim, X-ray Science and Applications, 1st ed., Ajin (2005).
[5] J. P. Moy, Med. Phys. **27**, 86 (2000).
[6] E. C. Floyd, Jr. R. J. Warp, J. T. Dobbins, H. G. Chotas, A. H. Baydush, R. Vargas-Voracek, and C. E. Ravin, Radiology **218**, 683 (2001).
[7] B. R. Park and D. W. Sung, J. Korean Soc. Radiol. **62**, 131 (2010).
[8] K. H. Shin, J. Korean Magn. Soc. **23**, 89 (2013).

[9] S. S. Jung, N. K. Kim, D. H. Kim, M. H. Noh, and K. S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **22**, 91 (2012).
[10] Cobham technical services, Opera-3d User Guide, Version 15 (2011).
[11] Cobham technical services, Opera-3d Reference Manual, www.lepp.cornell.edu/~critten/opera/ref-3d.pdf, Version 10 (2004).
[12] T. Y. Park, S. S. Lee, and R. J. Park, New Physics: Sae Mulli **63**, 10 (2013).
[13] C. S. Jang, R. J. Park, and S. S. Lee, New Physics: Sae Mulli **63**, 113 (2013).
[14] T. Y. Park and S. S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **24**, 90 (2014).
[15] T. Y. Park, S. S. Lee, and R. J. Park, New Physics: Sae Mulli **64**, 1023 (2014).