

# 미소초점엑스선원 개발을 위한 전산모사

김성수<sup>a</sup> · 이연승<sup>b</sup> · 김도윤<sup>c</sup> · 고동섭<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>목원대학교 기술마케팅학과, 대전 302-729

<sup>b</sup>한밭대학교 정보통신공학과, 대전 305-719

<sup>c</sup>(주)브이에스아이, 대전 305-811

(2011년 10월 20일 받음, 2011년 11월 9일 수정, 2011년 11월 9일 확정)

MFx tube를 개발하기 위하여, MFx tube 내에서 전계방출음극으로부터 방출된 전자의 궤적을 SIMION 프로그램을 이용하여 전산모사하였다. 전자의 출발위치와 상관없이 emitter에서 방출된 전자빔을 한곳에 집중시킬 수 있는 optimum extractor voltage  $V_e$ 가 존재한다는 것을 알아내었다. Extractor voltage  $V_e$ 는 source voltage  $V_s$ 에 따라 변하지만, 두 전압의 비율 ( $V_e/V_s$ )는 항상 일정하고, 그 값은 99.4%였다. Source와 extractor에 인가된 전압의 비율( $V_e/V_s$ )이 99.4%일 때, 교차점에서의 빔 직경은 1.2  $\mu\text{m}$ 였다. MFxG의 초점 크기는 교차점에서의 beam diameter보다 작을 수 없기 때문에, 교차점에서의 beam diameter를 작게 할 수 있는 조건을 찾는 것은 중요하다. 따라서 위의 두 결과는 MFx tube의 개발에 있어서 매우 중요한 결과로 판단된다.

**주제어** : 미소초점, 엑스선원, 엠에프엑스, 전계방출음극, 투과양극형, 전산모사

## I. 서 론

미소초점엑스선원(Micro Focus X-ray Generator, MF-XG)은 반도체 및 전자부품 검사장치, 모바일기기부품 검사장치 등 대부분의 산업용 엑스선장치에 사용되고 있는 핵심 부품으로서 시장이 급속히 확대되고 있고, 3차원 영상의 구현과 함께 의료용으로도 발전해 나가고 있기 때문에 수요가 더욱 확대될 것으로 전망된다 [1, 2]. MFxG는 YX-LON International, Fein focus, Hamamatsu, X-Tek, Thermo 등의 기업에서 개발되어 시판되고 있지만, 초점의 크기를 줄이거나 안정성(stability)을 확보하기 위한 연구는 계속되고 있다 [3].

본 연구진은 전계방출음극 [4]을 이용한 투과양극형 MF-XG를 개발 중에 있다. 상용화된 FXG의 초점의 크기는 대기 10  $\mu\text{m}$  또는 5  $\mu\text{m}$ 가 주류이고 1  $\mu\text{m}$ 도 있다. 본 연구진이 목표로 하는 초점의 크기는 3  $\mu\text{m}$ 이다. 전계방출음극은 전자방출면이 평면이기 때문에 전자빔을 집속시켰을 때 빔 직경을 극소화시킬 수 있는 장점이 있다. 또 투과양극형 x-ray tube를 이용하여 MFxG를 개발하면, FOD (Focal spot to Object Distance)를 짧게 할 수 있기 때문에 고배율의 엑

스선 현미경 개발에 유리하다. 본 연구진은 이미 다양한 target의 투과양극형 x-ray tube를 개발하였다 [5-7]. 또한 SIMION 프로그램 [8]을 이용하여, 그리드와 집속렌즈가 일체화된 구조를 가진 MFx tube를 고안한 바 있다 (Fig. 2) [9]. 전계방출음극을 이용한 이 구조에서는, 교차점(COP, cross over point)에서 교차반경(COD, cross over diameter)을 수  $\mu\text{m}$  정도로 집속할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는, 교차점에서 교차반경이 최소가 될 수 있는 최적의 전압배치를 찾아내기 위하여, SIMION 프로그램으로 전자의 궤적을 전산모사하였다.

## II. 전산모사

### 1. 전산모사 조건

Fig. 1은 SIMION program으로 전자의 궤적을 전산모사하기 위해 그린 potential array로써,  $V_s = -130 \text{ kV}$ ,  $V_e = -130 \text{ kV}$ 일 때 전자의 궤적을 보인 것이다. 전계방출음극에서 방출된 전자빔은 교차점에서 교차된 후 발산하고,

\* [전자우편] dsko@mokwon.ac.kr

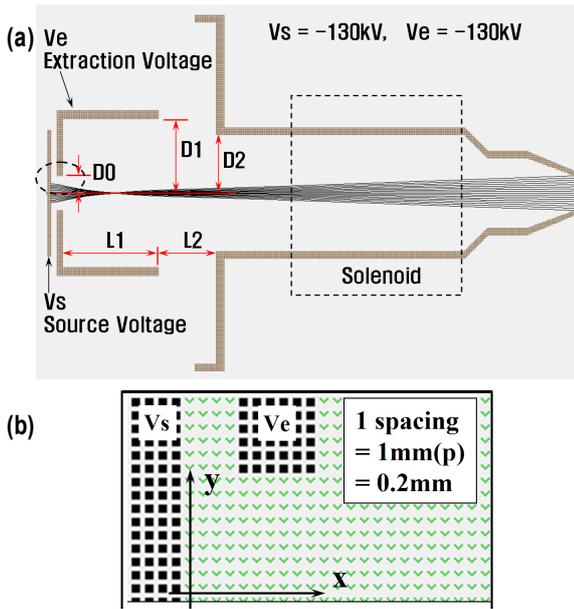


Figure 1. (a) Geometric structure of MFX tube to simulate trajectories of electrons using SIMION program, and trajectories of electrons when  $V_s=V_e=-130$  kV. (b) Enlargement of circular area marked with dotted lines. Shown the coordinates of the point which the electrons is starting. 1 spacing = 1 mm (p)=0.2 mm.

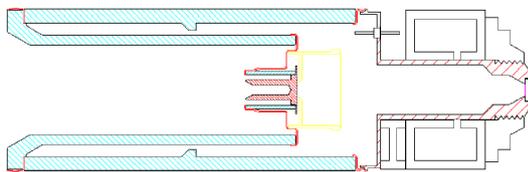


Figure 2. Schematic diagram of MFX tube.

발산되는 전자빔은 솔레노이드 자기장에 의해 재집속된다 (Fig. 1에서 재집속되는 전자궤적은 표시하지 않았다.). 재집속된 전자빔이 target에 충돌하면 target에서 x-ray가 발생하는 구조로 되어 있다. 따라서 target에 도달하는 전자빔의 크기가 곧 엑스선원의 초점 크기가 된다. 재집속된 전자빔의 크기는 교차점에서의 COD보다 작게 할 수는 없기 때문에, 엑스선원의 초점을 작게 하기 위해서는 교차점에서의 COD를 최소화시킬 수 있는 구조를 찾는 것이 매우 중요하다.

Fig. 1에서, 전자의 궤적은 extractor의 반경 D1 또는 D2, 그리고 L1, L2 등 기하학적인 구조에 따라 달라지고,

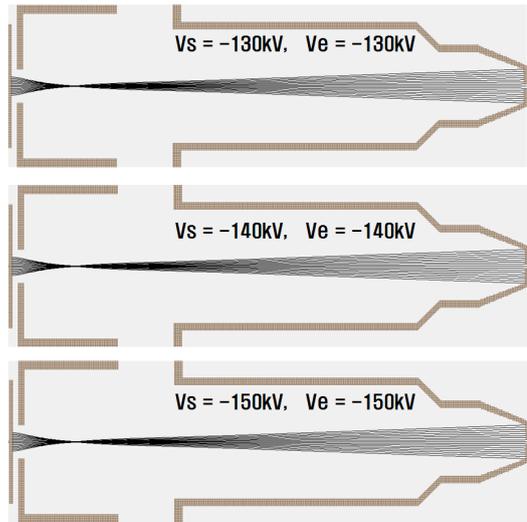


Figure 3. Trajectories of electrons according to  $V_s$  when  $V_s=V_e$ .

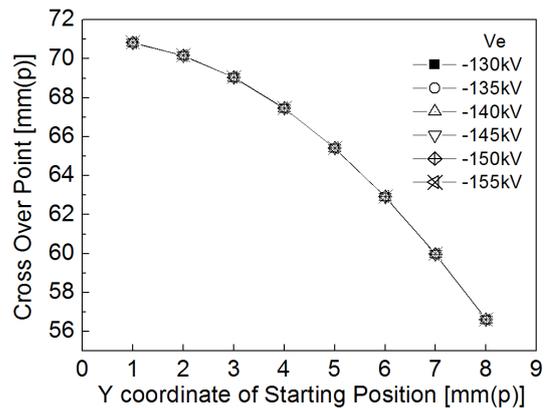


Figure 4. X-coordinate of cross-over-point according to the starting point of electron, when  $V_e=V_s$ .

source와 extractor에 인가된 전압  $V_s$ ,  $V_e$ 에 의해서도 민감하게 변한다. 구조에 따른 전자궤적의 전산모사는 이전 연구에서 완료하였고 [9], 그 결과를 바탕으로 설계한 것이 Fig. 2의 MFX tube이다. 그러므로 본 전산모사에서는, 이전 연구에서 밝힌 MFX tube의 구조를 바탕으로, 교차점에서의 COD를 최소화할 수 있는 최적 전압  $V_s$ ,  $V_e$ 를 찾아내는 것으로 제한한다.

MFX tube에서 사용할 전자의 에너지영역은 130~150 keV이기 때문에,  $V_s$ 와  $V_e$ 의 전압도 -130~-150 kV 영역에서 전산모사하였다. Fig. 1의 (b)는 (a)의 원형 점선부분을 확대한 것으로, 그림 1과 같이 좌표를 정의하였다. 프로

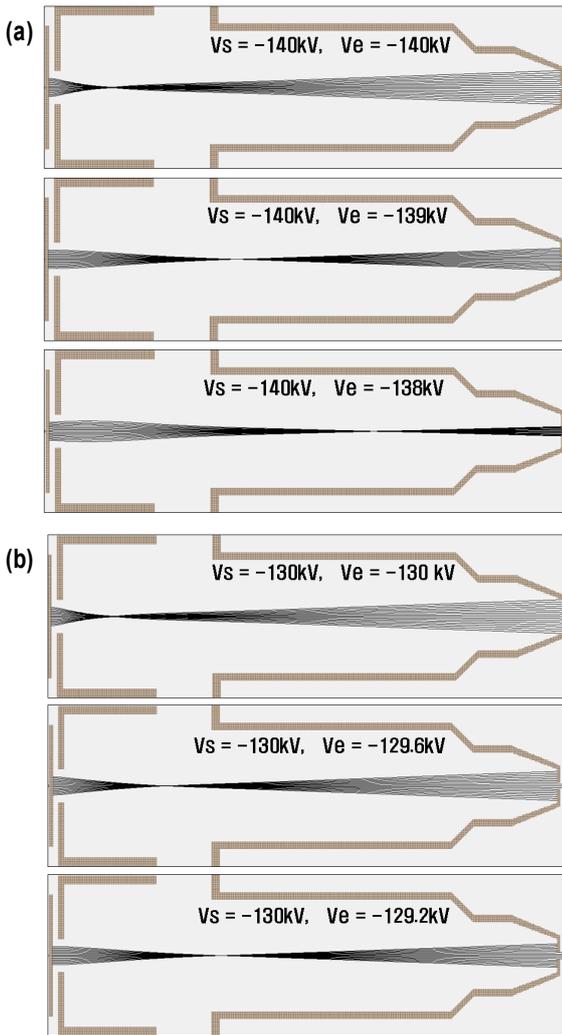


Figure 5. (a) Trajectories of electrons according to extraction voltage when  $V_s=-140$  kV. (b) Trajectories of electrons according to extraction voltage when  $V_s=-130$  kV.

그림상에서 눈금 한 개의 간격은 1 mm (p)이고, 1 mm (p)의 실제크기는 0.2 mm이다. 여기서 1 mm (p)는 프로그램 상에서 표시되는 1 mm를 의미한다. 전자 출발점의 x-좌표는 0으로 고정시키고, y-좌표는 1~8 mm (p)까지 변화시켰다.

## 2. $V_s$ 의 변화에 따른 전자의 궤적

Fig. 3은  $V_s$ 와  $V_e$ 를 동일하게 인가한 상태에서,  $V_s$  변화에 따른 전자의 궤적을 보인 것이다.  $V_s=V_e$ 인 상태에서는 전압이 변하더라도 교차점의 위치가 거의 변하지 않음

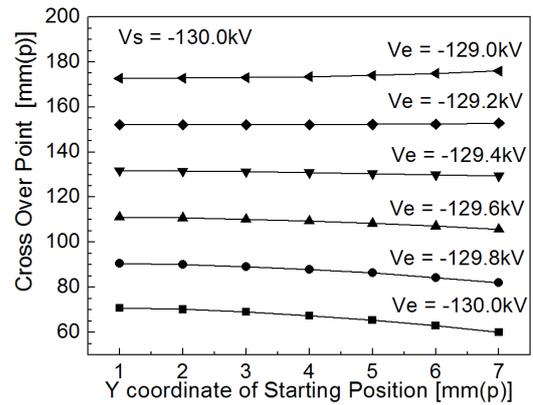


Figure 6. Cross-over-point according to Y coordinate of electron which is emitted from emitter when  $V_s=-130$  kV.

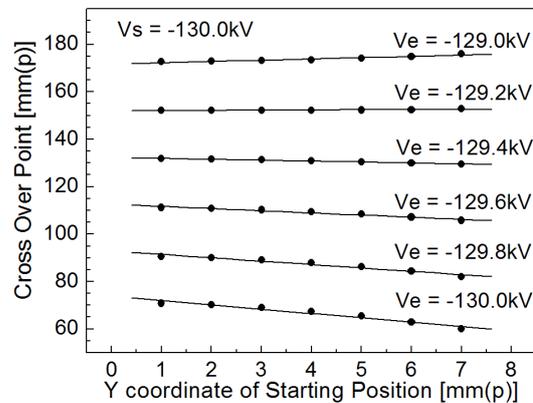


Figure 7. The result which fit each graph shown in Fig. 6 using linear function.

을 볼 수 있다. 좀 더 상세하게 확인하기 위하여, 전자 출발점의 y-좌표를 변화시키면서 교차점의 x-좌표를 그린 것이 Fig. 4이다. 전자 출발점의 y-좌표가 1~8 mm (p)까지 변하는 동안 교차점의 위치는 56~71 mm (p)까지 변하지만,  $V_e$ 가 변하더라도 교차점의 위치는 변하지 않음을 볼 수 있다.

## 3. $V_e$ 의 변화에 따른 전자의 궤적

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는  $V_s$ 가 각각 -140 kV와 -130 kV 일 때,  $V_e$  변화에 따른 전자궤적을 보인 것이다.  $V_e$ 가 증가할수록 focal point의 위치는 emitter로부터 멀어짐을 확인할 수 있다.

전자의 궤적을 좀 더 자세히 추적하기 위하여, Fig. 4에

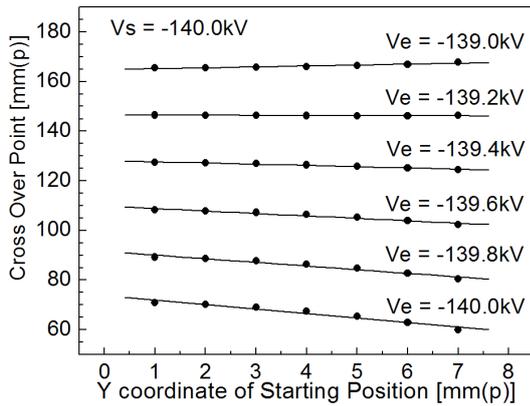


Figure 8. The result of evaluating as the same way shown in Fig. 7 when Vs=-140 kV.

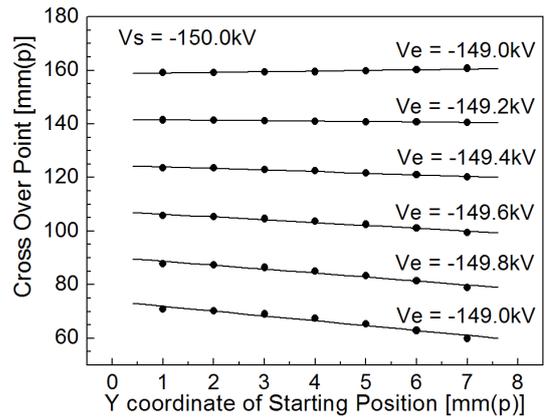


Figure 9. The result of evaluating as the same way shown in Fig. 7 when Vs=-150 kV.

Table 1. Slopes according to extraction voltage Ve, (a) when Vs=-130kV, (b) when Vs=-140kV and (c) when Vs=-150kV.

(a) Vs=-130 kV		(b) Vs=-140 kV		(c) Vs=-150 kV	
Ve (kV)	Slopes	Ve (kV)	Slopes	Ve (kV)	Slopes
-130.0	-1.8094	-140.0	-1.8099	-150.0	-1.8105
-129.8	-1.4273	-139.8	-1.4719	-149.8	-1.4805
-129.6	-0.9088	-139.6	-0.9861	-149.6	-1.0537
-129.4	-0.3856	-139.4	-0.4954	-149.4	-0.5987
-129.2	0.0897	-139.2	0.0780	-149.2	0.0354
-129.0	0.5295	-139.0	0.3762	-149.0	0.2401

서와 같은 방법으로 전자 출발점의 y-좌표를 변화시키면서 교차점의 변화를 관찰한 것이 Fig. 6이다. Ve=-130 kV 일 때 출발점의 y-좌표가 증가함에 따라 교차점의 위치가 점점 짧아짐을 볼 수 있다. 이러한 추세는 Ve-129.4 kV까지 이어지다가, Ve=-129.2 kV 근처에서는 교차점의 위치 변화가 거의 없고, Ve=-129.0 kV일 때는 교차점의 위치가 오히려 길어짐을 볼 수 있다. 이것은 전자 출발점의 y-좌표와 무관하게 동일한 교차점을 갖는 emitter 전압 Ve가 존재한다는 것을 의미한다. Emitter에서 방출되는 전자가 방출위치에 무관하게 교차점이 동일하다는 것은, 교차점의 빔 반경을 극소화시킬 수 있다는 것을 의미하기 때문에, 이것은 매우 중요한 결과이다.

Fig. 6의 각 그래프를 선형함수로 fitting하여 기울기를 계산한 다음, 기울기가 0일 때의 Ve 값을 구하면, 그때의 Ve가 바로 전자의 Y 좌표와 무관하게 교차점을 한 곳에 모을 수 있는 전압이 된다. Fig. 7은 Fig. 6의 data를 1차함수로 fitting하여 다시 그린 것이고, Fig. 8과 Fig. 9는 각

각 Vs=-140 kV일 때와 Vs=-150 kV일 때, Fig. 7과 동일한 방법으로 1차 함수 fitting한 결과이다.

### III. 결과 및 고찰

Table 1은 Fig. 7~9에서 fitting한 결과로부터 찾아낸 기울기를 정리한 것이다. Table 1의 (a), (b), (c)를 다시 일차함수로 fitting하면 기울기가 0인 전압 Ve를 알 수 있고, 그 결과를 정리한 것이 Table 2이다. Table 2로부터 매우 흥미있는 결과를 알아낼 수 있다. 즉, MFX tube에 인가되는 source 전압이 -130~-150 kV인 영역에서, Ve/Vs 비율은 Vs와 무관하게 약 99.4%로서 일정하다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 고정비율의 존재는, 장비개발에 있어서의 편의성, 장비의 안정성(stability) 측면에서 유리하기 때문에 매우 의미있는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 10은 Ve/Vs 비율이 99.4%일 때 교차점에서 빔직경

Table 2.  $V_e/V_s$  ratio which can obtain the minimum beam-radius in the vicinity of cross-over-point.

$V_s$ (kV)	$V_e$ (kV)	$V_e/V_s$ (%)
-130	-129.2276	99.405
-140	-139.1874	99.419
-150	-149.1433	99.428

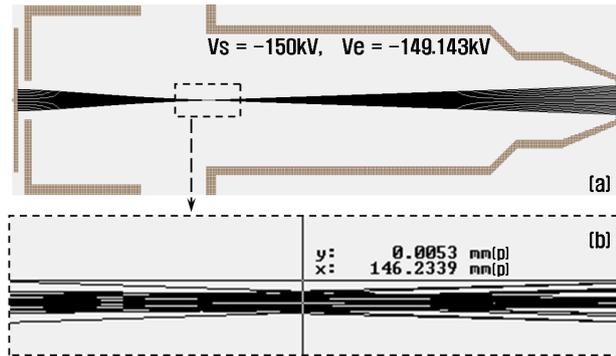


Figure 10. (a) Trajectories of electrons when  $V_s = -150$  kV and  $V_e = -149.14$  kV ( $V_e/V_s = 0.9942$ ). (b) Enlargement of rectangular area marked with dotted lines.

이 얼마나 되는지를 확인하기 위하여 전자의 궤적을 전산 모사한 것이다. Fig. 10(b)에서 알 수 있는 바와 같이, 교차점부근에서 빔반경은 약 0.003 mm (p)이고, 1 mm (p) = 0.2 mm이므로 실제 beam radius는 약 0.0006 mm이다. 이상의 결과로부터, 교차점에서의 빔 직경은 약 1.2  $\mu\text{m}$ 까지 집중이 가능함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

이상의 결과로부터 다음과 같은 중요한 결과를 얻을 수 있었다. 우선 emitter에서 방출되는 전자의 위치와 상관없이 교차점을 한곳에 집중시킬 수 있는 optimum extractor voltage  $V_e$ 가 존재한다는 것을 알아내었다.  $V_e$ 는 source voltage  $V_s$ 에 따라 변하지만, 두 전압의 비율( $V_e/V_s$ )은 항

상 일정하고, 그 값은 99.4%이다.  $V_e/V_s$  비율이 일정하다는 것은, 장비개발에 있어서의 편의성 또는 장비의 안정성 (stability) 측면에서 유리하기 때문에 매우 의미있는 결과이다.  $V_e/V_s$  비율이 99.4%일 때 교차점에서의 빔 직경은 1.2  $\mu\text{m}$ 였다. MFXG 선원의 초점 크기를 교차점의 빔직경보다 작게 할 수는 없기 때문에, MFX tube 내에서 교차점의 빔반경을 작게 할 수 있는 조건을 찾는 것은 중요하다. 따라서 위의 두 결과는 MFX tube의 개발에 있어서 매우 중요한 결과로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년 지식경제부 지역연계기술개발사업에 의하여 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] S. Lee, Journal of Korean Institute of Information Technology **3**, 40 (2005).
- [2] S. Lee and K. S. Choi, Journal of Korean Institute of Information Technology **4**, 46 (2006).
- [3] S. H. Heo, A. Ihsan, and S. O. Cho, Applied Physics Letters **90**, 183109 (2007).
- [4] Korea Patent 05-118181.
- [5] S. S. Kim and D. Y. Kim, J. Korean Vacuum Soc. **17**, 234 (2008).
- [6] S. S. Kim and D. Y. Kim, J. Korean Vacuum Soc. **17**, 240 (2008).
- [7] S. S. Kim and D. Y. Kim, J. Korean Vacuum Soc. **17**, 247 (2008).
- [8] <http://www.sisweb.com/simion.htm>.
- [9] Korea Patent pending.

## Computer Simulation for Development of Micro-Focus X-ray Generator

Sung Soo Kim<sup>a</sup>, Youn Seoung Lee<sup>b</sup>, Do Yun Kim<sup>c</sup>, and Dong-Seob Ko<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*Department of Techno-marketing, Mokwon University, Daejeon 302-729*

<sup>b</sup>*Department of Information Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719*

<sup>c</sup>*VSI Co. LTD., Daejeon 305-811*

(Received September 16, 2011, Revised November 9, 2011, Accepted November 9, 2011)

To develop the MFX (Micro-Focus X-ray) tube, the trajectories of electrons emitted from the field emission cathode was simulated using SIMION program. Regardless of starting position of the electron in emitter, we found out the fact that there is the optimum extractor voltage  $V_e$ , which can focus the electron beam on one place. Extractor voltage  $V_e$  varies depending on the source voltage  $V_s$ , but the ratio of two voltages ( $V_e/V_s$ ) is always constant, its value was 99.4%. When the ratio of two voltages ( $V_e/V_s$ ) was 99.4%, the beam diameter in the cross-over point was 1.2  $\mu\text{m}$ . Because the focal spot size in MFXG (Micro-Focus X-ray Generator) can not be less than the cross-over diameter within MFX tube, it is important to find out the conditions that can make a smaller beam diameter. Therefore, the above results is considered to be a very important ones in the development of the MFXG.

Keywords : Micro focus, X-ray generator, Micro-focus x-ray, Field emission cathode, Transmission- anode type, Computer simulation

\* [E-mail] dsko@mokwon.ac.kr