

Monte Carlo N-Particle Extended Code를 이용한 연 X선 정전기제거장치의 최적제작에 관한 연구(II)

정필훈 · 이동훈*

부산경상대학교 소방안전 · 전기전자계열 · *부경대학교 안전공학과
(2017. 9. 14. 접수 / 2017. 10. 21. 수정 / 2017. 10. 24. 채택)

A Study on the Optimal Make of X-ray Ionizer using the Monte Carlo N-Particle Extended Code(II)

Phil Hoon Jeong · Dong Hoon Lee**

Division of Fire Protection & Safety Engineering, Electrical & Electronics Engineering, Busan Kyungsang College

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received September 14, 2017 / Revised October 21, 2017 / Accepted October 24, 2017)

Abstract : In order to solve this sort of electrostatic failure in Display and Semiconductor process, Soft X-ray ionizer is mainly used. Soft X-ray Ionizer does not only generate electrical noise and minute particle but also is efficient to remove electrostatic as it has a wide range of ionization. There exist variable factors such as type of tungsten thickness deposited on target, Anode voltage etc., and it takes a lot of time and financial resource to find optimal performance by manufacturing with actual X-ray tube source. Here, MCNPX (Monte Carlo N-Particle Extended) is used for simulation to solve this kind of problem, and optimum efficiency of X-ray generation is anticipated. In this study, X-ray generation efficiency was compared according to target material thickness using MCNPX and actual X-ray tube source under the conditions that tube voltage is 5 keV, 10 keV, 15 keV and the target Material is Tungsten(W). At the result, In Tube voltage 5 keV and distance 100 mm, optimal target thickness is 0.05 μm and fastest decay time appears + decay time 0.28 sec. - decay time 0.30 sec. In Tube voltage 10keV and distance 100 mm, optimal target Thickness is 0.16 μm and fastest decay time appears + decay time 0.13 sec. - decay time 0.12 sec. In the tube voltage 15 keV and distance 100 mm, optimal target Thickness is 0.28 μm and fastest decay time appears + decay time 0.04 sec. - decay time 0.05 sec.

Key Words : decay time, ion balance, target material, soft x-ray ionizer, monte carlo N-particle extended, x-ray generation

1. 서론

평판디스플레이(FPD, Flat Panel Display) 및 반도체의 고해상도, 고집적화에 따라 제조공정에서 정전기방지기술은 평판디스플레이와 반도체 제조수율의 신뢰성에 영향을 미치는 핵심기술 중 하나이다^{1,2)}.

평판디스플레이 및 반도체 제조공정에서 온·습도, 기중 미립자농도, 미세한 진동 및 정전기대전 등은 제조공정 내에서 제어되어야 될 불안정 요소이다. 특히 평판디스플레이의 경우 정전기대전은 유리기관의 대형화(가로×세로, 2×3 m)에 따라 정전기대전은 면적에 비례하여 증가하기 때문에 미립자흡착에 의한 오염과

정전기방전(Electrostatic Discharge)에 의한 회로부품 소자의 파괴 등 정전기로 인한 장애가 증가하고 있어 정전기 제어대책은 부유미립자 제어와 제품의 제조수율에 가장 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다.

정전기로 인한 문제를 해결하기 위해 코로나방전을 이용한 정전기제거장치를 이전부터 사용하여 왔다. 그러나 고전압 및 고주파로 인한 전자노이즈, 오존(O₃) 발생 그리고 방전침 전극의 용융으로 인한 금속분진 발생 등과 같은 결점이 있다. 이러한 코로나방전형 정전기제거장치의 단점을 해결하기 위하여 방사선(연X선, 1.2Å 파장)을 이용한 연X선식 정전기제거장치를 최근에는 많이 사용하고 있는 추세이다³⁾.

* Corresponding Author : Dong Hoon Lee Tel : +82-51-629-6466, E-mail : lhoon@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

연X선식 정전기제거장치는 연X선의 기증전리능력을 이용하고 있다. 기증전리능력의 최적값은 연X선관(Soft X-ray Tube)내의 전자가속전압(Anode Voltage)과 타겟(Target, Be) 표면 위에 증착되는 물질인 텅스텐(W) 증착 두께에 의해 결정된다.

본 연구는 한국안전학회지(Vol. 32, No.2, pp. 34-37, 2017, Phil Hoon Jeong, Dong Hoon Lee)에 게재된 ‘Monte Carlo N-particle Extended Code를 이용한 연X선 정전기제거장치의 최적설계에 관한 연구⁴⁾에 계속된 연구로서 최적화된 값을 기준으로 실제로 연X선관을 제작하여 전자가속전압 및 텅스텐 증착두께의 변화에 따른 정전기제거성능(정전기대전완화시간, 이온 밸런스)을 실험하였다. 따라서 본 연구는 몬테카를로 코드를 이용하여 최적의 에너지 값을 갖는 기준에 따라 설계·제작하고, 정전기제거성능을 측정하여 최적의 X선관을 제작하는 기본 자료를 제공하고자 하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

에너지스펙트럼은 X선관의 특성을 평가하기 위한 가장 중요한 요소 중 하나이다⁵⁾. 증착물질로서 금(Au), 텅스텐(W) 및 은(Ag)을 적용하여 몬테카를로 코드로 전산모사를 실시하여 에너지 스펙트럼을 분석한 결과 금(Au)이 가장 우수하였으나, 가격대비 가성비에서 텅스텐을 증착물질로 선정하였고, 연X선관을 제작하여 실험하였다.

본 연구에서 제작된 연X선관은 고진공(10^{-7} torr) 유리관 내에 열전자발생장치와 타겟(양극)으로 구성되어져 있다. 필라멘트에서 발생된 전자는 타겟에 인가된 고전압(5~15 KeV, DC)에 의해 가속되어 타겟(Tungsten, W)에 충돌하여 흡수된 에너지 중 99%는 열로 소비되지만, 나머지 1% 만이 특성X선을 발생한다⁶⁾. 충돌할 때의 전자의 운동에너지 E_k 는 다음의 식(1)과 같이 표시된다.

$$E_k = e V = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

여기서, e : 전자전기량($-1.602 \times 10^{-19} C$), m : 전자질량($9.109 \times 10^{-31} kg$), V : 가속전압이다.

식(2)는 X선의 발생효율을 나타낸 것이다.

$$\varepsilon = 1.1 \times 10^{-9} ZV \quad (2)$$

여기서 Z 는 타겟물질의 원자번호, V 는 가속전압을 나타낸다^{7,9)}.

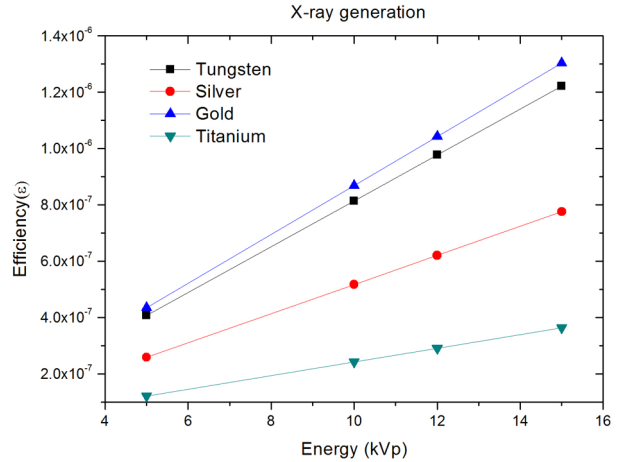


Fig. 1. X-ray generation efficiency according to the specific target material applied voltage.

식(2)에서 알 수 있듯이 X선의 발생효율은 원자번호 및 가속전압이 증가할수록 비례하여 증가한다. Fig. 1은 타겟물질의 가속전압에 따른 발생효율을 나타낸 것이다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 동일한 가속전압일 경우 발생효율은 금, 텅스텐, 은 및 티타늄 순으로 되어있다. 따라서 본 실험에서는 가격이 저렴하면서도 발생효율이 비교적 높은 텅스텐을 선정하여 실험하였다. Fig. 2은 제작된 X선관의 실물사진이다. 첫번째 변수로는 타겟물질의 증착두께를 변화시켰고, 두번째 변수로는 X선관의 가속전압을 5, 10 및 15 kV로 설정하여 실험하였다. 이 때 이격거리는 100 mm, 300 mm, 500 mm로 설정하였다. Table 1은 X선관의 사양을 나타낸 것이다.

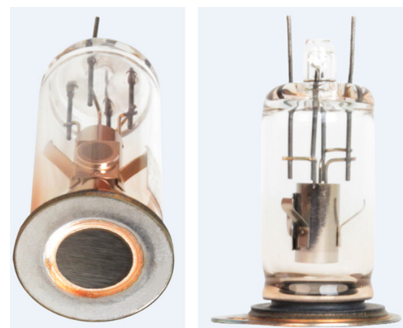


Fig. 2. X-ray source tube.

Table 1. Specifications of X-ray tube manufactured

	Classification	Type
1	Tube material	Glass
2	High voltage	5 ~ 15 kV
3	Target material	Tungsten (W)
4	Window material	Beryllium (Be)

3. 실험결과 및 고찰

실험결과는 신뢰성을 확보하기 위해 모든 실험은 5 회 이상 실시하였으며, 그 평균값을 구하여 데이터를 확보하였다. Fig. 3은 연X선을 적용한 정전기제거장치의 실험구조를 나타낸 것이다. Table 2는 가속전압을 5 kV로 고정하고, 타겟물질의 두께를 0.02 μm , 0.05 μm 및 0.08 μm 로 변화시켰을 때, 이격거리 100 mm, 300 mm, 500 mm에서의 전하완화시간(Charge Decay Time) 및 이온밸런스(Ion Balance)를 측정된 표이다. 가속전압이 5 kV 일 경우, MCNPX로 시뮬레이션한 결과 타겟물질의 최적의 증착두께는 0.05 μm , 0.08 μm 및 0.02 μm 순으로 나타났다.

본 연구에서는 시뮬레이션결과를 기준으로 제작하여 정전기제거성능을 측정하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 가속전압이 5 kV인 경우 최적에너지 값은 0.05 μm , 0.08 μm , 0.02 μm 순으로 시뮬레이션의 결과와 일치하였다. 제작된 정전기제거장치에서 전하완화시간을 측정된 결과 거리 100 mm, 표적두께가 0.05 μm 에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.28 sec, \ominus 측 전하완화시간은 0.30 sec로 측정되어 최적의 에너지효율을 보였다. 이온밸런스는 디스플레이 및 반도체 제조공정에서의 관리기준인 1 Volt 이하로 측정되었다.

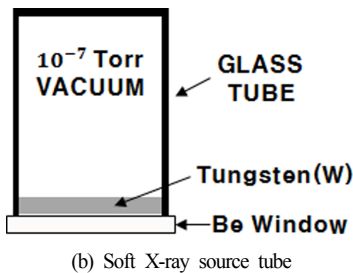
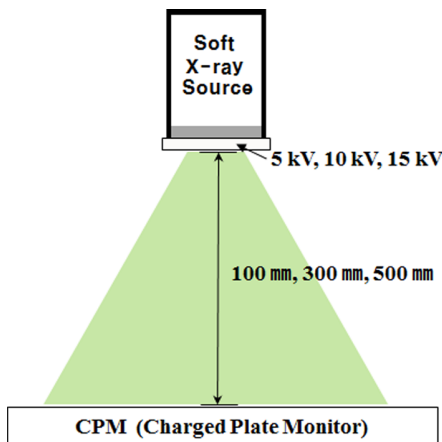


Fig. 3. Experiment system.

Table 2. The charge decay time and ion balance voltage as function of target thickness and distance(Target material : tungsten, anode voltage : 5 kV)

Target thickness	Tube voltage	Distance	Decay time [sec]		Ion balance [V]
			\oplus ion	\ominus ion	
0.02 μm	5 kV	100 mm	0.36	0.39	0.2
		300 mm	2.63	3.15	0.3
		500 mm	15.97	20.15	0.2
0.05 μm	5 kV	100 mm	0.28	0.30	0
		300 mm	2.02	2.42	0
		500 mm	11.41	14.39	0
0.08 μm	5 kV	100 mm	0.31	0.33	0.1
		300 mm	2.22	2.66	0
		500 mm	12.33	15.83	0.1

Table 3은 가속전압을 10 kV로 고정하고, 타겟물질의 두께를 0.09 μm , 0.16 μm 및 0.20 μm 로 변화시켰을 때, 이격거리 100 mm, 300 mm, 500 mm에서의 전하완화시간 및 이온밸런스를 측정된 표이다. 가속전압이 10 kV 일 경우, MCNPX로 시뮬레이션한 결과 타겟물질의 최적의 증착두께는 0.16 μm , 0.20 μm 및 0.09 μm 순으로 나타났다. 본 연구에서는 시뮬레이션결과를 기준으로 제작하여 정전기제거성능을 측정하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 가속전압이 10 kV인 경우 최적에너지 값은 0.16 μm , 0.20 μm , 0.09 μm 순으로 시뮬레이션의 결과와 일치하였다. 제작된 정전기제거장치에서 전하완화시간을 측정된 결과 거리 100 mm, 표적두께가 0.16 μm 에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.13 sec, \ominus 측 전하완화시간은 0.12 sec로 측정되어 최적의 에너지효율을 보였다. 이온밸런스 역시 디스플레이 및 반도체 제조공정에서의 관리기준인 1 volt 이하로 측정되었다.

Table 3. The charge decay time and ion balance voltage as function of target thickness and distance(Target material : tungsten, anode voltage : 10 kV)

Target thickness	Tube voltage	Distance	Decay time [sec]		Ion balance [V]
			\oplus ion	\ominus ion	
0.09 μm	10 kV	100 mm	0.17	0.16	0.2
		300 mm	0.57	0.63	0
		500 mm	1.53	1.71	0.1
0.16 μm	10 kV	100 mm	0.13	0.12	0
		300 mm	0.44	0.49	0
		500 mm	1.09	1.22	0
0.20 μm	10 kV	100 mm	0.14	0.13	0.1
		300 mm	0.48	0.54	0
		500 mm	1.21	1.34	0

Table 4는 가속전압을 15 kV로 고정하고, 타겟물질의 두께를 0.21 μm , 0.28 μm 및 0.35 μm 로 변화시켰을 때, 이격거리 100 mm, 300 mm, 500 mm에서의 전하완화시간 및 이온밸런스를 측정한 표이다. 가속전압이 15 kV 일 경우, MCNPX로 시뮬레이션한 결과 타겟물질의 최적의 증착두께는 0.28 μm , 0.35 μm 및 0.21 μm 순으로 나타났다.

본 연구에서는 시뮬레이션결과를 기준으로 제작하여 정전기제거성능을 측정하였다. Table 4에서 알 수 있듯이 가속전압이 15 kV인 경우 최적에너지 값은 0.28 μm , 0.35 μm , 0.21 μm 순으로 시뮬레이션의 결과와 일치하였다. 제작된 정전기제거장치에서 전하완화시간을 측정한 결과 이격거리 100 mm, 표적두께가 0.28 μm 에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.04초, \ominus 측 전하완화시간은 0.05초로 측정되어 최적의 에너지 효율을 보였다. 이온밸런스 역시 디스플레이 및 반도체 제조공정에서의 관리기준인 1 volt 이하로 측정되었다.

3가지 조건의 실험을 통하여 MCNPX 코드를 이용하여 가속전압 5, 10 및 15 kV에서 타겟물질의 최적두께를 검증할 수 있었다. 이는 투과형 X선관(Transmission Type X-ray tube)의 경우, 일반적으로 타겟물질의 두께가 증가할수록 X선 발생량이 증가한다. 그러나 타겟물질의 두께가 너무 증가하면 X선이 타겟물질에 자기흡수(Self absorption) 현상이 발생하여 오히려 X선 발생량이 감소하고, 타겟물질의 두께가 너무 얇아지면 가속전자와 타겟물질 상호간에 충분한 상호작용이 발생하지 못하여 X선 발생량이 감소한다고 생각된다. 가속전압은 증가할수록 가속전자가 타겟물질 내부로 침투하는 깊이가 다르기 때문에 X선 발생량은 증가한다고 생각된다. 따라서 가속전압별 X선 발생효율이 최대가

되는 타겟물질의 두께를 설정하는 것이 매우 중요하다고 생각된다.

4. 결론

최대의 X선 발생효율을 구하기 위하여 몬테카를로 코드를 이용한 시뮬레이션 결과와 실제로 제작된 연X선식 정전기제거장치를 이용한 것과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가속전압 5 kV에서 X선 발생효율이 최대인 타겟물질의 두께는 0.05 μm 이고, 거리 100 mm에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.28 sec., \ominus 측 전하완화시간은 0.30 sec.로 측정되었다.
- 2) 가속전압 10 kV에서 X선 발생효율이 최대인 타겟물질의 두께는 0.16 μm 이고, 거리 100 mm에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.13 sec., \ominus 측 전하완화시간은 0.12 sec.로 측정되었다.
- 3) 가속전압 15 kV에서 X선 발생효율이 최대인 타겟물질의 두께는 0.28 μm 이고, 거리 100 mm에서 \oplus 측 전하완화시간은 0.04 sec., \ominus 측 전하완화시간은 0.05 sec.로 측정되었다.

X선관의 특성을 파악하기 위해서는 매우 다양한 변수가 존재한다. 이런 다양한 변수의 통제를 실제제작을 통해 특성을 측정하는 것은 현실적으로 많은 제작시간과 높은 비용 등이 필요하다. 그러나 몬테카를로 코드를 이용하여 전산모사를 통한 결과를 토대로 적용한 결과 최적의 제전성능을 갖는 X선관을 제작할 수 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 부경대학교의 자율창의학술연구비(2017)에 의하여 연구되었음.

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2017).

References

- 1) Masanori Suzuki, "Clean Technology", pp. 2-31, 1992.
- 2) Ministry of commerce Industry and Energy, Korean Agency for Technology and Standards, "The Standard Study for Ionizer Evaluation Method", pp.224-236, 2005.
- 3) D. H. Lee, P. H. Jeong, S. H. Lee, S. H. Kim, "Development of the Most Optimized Ionizer for Reduction in the Atmospheric Pressure and Inert Gas Area" J. Korean Soc. Saf.,

Table 4. The charge decay time and ion balance voltage as function of target thickness and distance(Target material : tungsten, anode voltage : 15 kV)

Target thickness	Tube voltage	Distance	Decay time [sec]		Ion balance [V]
			\oplus ion	\ominus ion	
0.21 μm	15 kV	100 mm	0.06	0.07	0.1
		300 mm	0.26	0.30	0.1
		500 mm	0.67	0.77	0.2
0.28 μm	15 kV	100 mm	0.04	0.05	0
		300 mm	0.20	0.23	0
		500 mm	0.47	0.55	0
0.35 μm	15 kV	100 mm	0.05	0.06	0
		300 mm	0.24	0.28	0.1
		500 mm	0.52	0.61	0

- Vol. 31, No. 3, pp. 42-46, 2016.
- 4) M. J. Berge, J. W. Motz, "X-rays from Thick Tungsten Targets Irradiated by 500-50 keV Electrons", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Vol. 226, pp. 327-344, 2004.
 - 5) P. H. Jeong and D. H. Lee "A Study on the Optimal Design of Soft X-ray Ionizer using the Monte Carlo N-Particle Extended Code", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 2, pp. 34-37, 2017.
 - 6) H. S. Hong and K. S. Joo, "A Study on Comparison of Resolution according to Filter Material and Calculation of the Radiation Dose of X-ray Generator using MCNPX Code", Master's Thesis of Myongji Univ, pp. 2-16, 2015.
 - 7) S. Y. Kwon and D. H. Lee, "A Study on Characteristics of Electrostatic Eliminator used Corona Discharge and Soft X-ray", Doctor's Thesis of Pukyong Nat'l Univ, pp. 21-25 2010.
 - 8) M. Oki, "High Voltage Engineering", pp.22-77, 1989.
 - 9) P. J. Duke and A.G. Michette, "Modern Microscopies, Techniques and Applications", Plenum Press New york, pp. 41-45, 1990.