

MCNPX 코드를 이용한 방사선조사방식 정전기제거장치에서 최적구조의 방호조건 설계에 관한 연구

정필훈

송실사이버대학교 산업안전공학과

A study on Designing Optimal Structural Protection Conditions for X-ray Ionizer Using MCNPX Code

Phil-Hoon Jeong

Department of Industrial Safety Engineering, Korea Soonsil Cyber University

요 약 OLED 및 반도체 제조 공정에서 정전기 장애로 불량률이 증가하여 제조 수율이 낮아지고 있다. 이러한 정전기 문제를 해결하기 위해 도입된 정전기 제거장치는 전압인가방식과 방사선조사방식의 정전기 제거장치가 사용된다. 전압인가방식 정전기 제거장치는 오염물질 발생, 스패터링 현상, 이온 불균형, 정전유도작용 등의 문제점이 있어 주기적인 관리가 필요하다. 방사선조사방식의 정전기 제거장치는 부유미립자 등의 오염물질이 발생하지 않으며 제전시간이 신속하고, 넓은 제전범위 등 많은 장점이 있어 OLED 및 반도체 제조공정에 적합하지만 방사선 차폐에 대한 대책이 필요하다. 본 연구에서는 방사선조사방식 정전기 제거장치의 문제점인 방사선 누출에 대한 대책으로 방호장치를 설계하였다. 방사선이 발생하는 관로를 1차측, 방사선이 누출되지 않도록 꺾은 관로를 2차측으로 하였다. 이 방호장치를 MCNPX 코드로 시뮬레이션한 결과 1) 1차측 12mm, 2차측 5.5mm인 경우 방사선 누출량은 $0.18\mu\text{Sv/h}$. 2) 1차측 12.5mm, 2차측 13mm인 경우에서 방사선 누출량은 $0.15\mu\text{Sv/h}$. 3) 1차측 20mm, 상부로 향한 2차측 7mm인 경우 방사선 누출량은 $0.11\mu\text{Sv/h}$ 로 나타났다. 이 방호장치를 활용하여 방사선 누출이 없는 방사선조사방식 정전기제거장치를 제조하고자 한다.

Abstract In OLED and semiconductor manufacturing processes, electrostatic interference increases defects and lowers manufacturing yields. A voltage application ionizer and a radiation irradiation ionizer are used to solve electrostatic problems. The voltage application ionizer has problems such as pollutant generation, spattering, ion imbalance, and electrostatic induction, so periodic management is required. The radiation irradiation ionizer has several advantages, so it is used in OLED and semiconductor manufacturing processes, but radiation issues must be resolved. In this study, protective devices are designed to solve radiation leakage problems. The pipe that emits radiation is the primary side, and the pipe that is bent to prevent radiation from leaking is the secondary side. Simulation results with MCNPX code are as follows: 1) primary length, 12mm; secondary length, 5.5mm, for radiation leakage at $0.18\mu\text{Sv/h}$; 2) primary length, 12.5mm; secondary length, 13mm, for radiation leakage at $0.15\mu\text{Sv/h}$; 3) primary length, 20mm; secondary length toward the top, 7mm, for radiation leakage at $0.11\mu\text{Sv/h}$. Applying these results, an attempt is made to manufacture, without radiation exposure, a radiation irradiation ionizer for protective devices.

Keywords : Static Elimination, X-ray Ionizer, MCNPX Code, Radiation Protection Device, Radiation Protection Design

*Corresponding Author : Phil-Hoon Jeong(Korea Soongsil Cyber Univ.)

email: jph@mail.kcu.ac

Received September 20, 2022

Revised October 26, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

디스플레이 시장이 확장하여 OLED(Organic Light Emitting Diodes) 및 반도체 수요가 증가하고 있으나 제조과정에서 정전기로 인한 불량 발생하여 제조수율이 저하되고 있다[1].

OLED 제조공정에서는 기판이 대형화하여 정전용량 및 정전기 인력이 증가한다. 이로 인해 부유미립자가 기판에 흡착되어 불량 발생하거나, 정전기 방전으로 열적 저항이 약화하여 기판의 회로 패턴이 파괴되는 등의 문제가 있다.

반도체 제조공정 중, 노광공정, 현상공정 및 증착공정에서는 수 ~ 수십kV의 정전기가 발생하고, 이 때 발생한 정전기 대전으로 반도체의 웨이퍼 패턴(Wafer pattern)이 용융되기도 한다. 그리고 반도체가 소형화할 경우 반도체의 웨이퍼 패턴이 미세화되어 미량의 정전기로도 불량현상이 발생하여 제조수율이 저하된다[2].

이러한 제조공정에서 정전기를 제거하기 위해 정전기 제거장치(ionizer)를 이용하며, 전압인가방식과 방사선 조사방식의 정전기제거장치를 주로 사용하고 있다.

전압인가방식은 코로나 방전을 이용하여 공기를 전리시켜 이온을 발생시킨다. 코로나 방전방식이란 방전전극의 끝부분에 전계를 집중하여 공기를 전리시켜 이온을 생성하는 방식이다.

코로나 방전방식은 0.01 μm ~ 0.03 μm 의 미립자가 방전전극에 부착되는 백화현상과, 고전압 방전으로 방전전극이 용융, 비산하는 스패터링(spattering) 현상이 발생한다. 이 현상들로 발생한 미립자가 팬과 압축 공기를 통해 기판과 웨이퍼에 부착하여 오염되기도 하며, 주기적으로 이온의 균형을 조절해야 하는 불편함 및 공정에 근접하여 설치할 경우 정전유도작용으로 OLED 기판과 반도체 웨이퍼가 파괴되는 등 여러 가지 문제점이 있다.

방사선조사방식은 방사선으로 공기와 가스분자를 전리시켜 이온을 생성하는 방식이다. 이 방식은 미립자 등의 오염원이 발생하지 않고, 이온의 균형을 조절하는 불편함이 없으며 정전유도작용이 발생하지 않아 공정에 근접하여 설치할 수 있다. 그리고, 정전기를 제거하는 범위가 넓고, 정전기 제거시간이 빠르며, 효과도 우수하여 OLED 제조와 반도체 제조에 적합한 장치라고 할 수 있다.

하지만 방사선이 발생하여 방사선 차폐 및 안전사고에 대한 대책이 필요하다[3].

본 연구는 방사선조사방식 정전기제거장치의 문제점인 방사선 누출을 막는 방호장치를 설계하고 MCNPX(Monte

Carlo N - Particle Extended) 코드를 이용하여 최적의 구조를 가지는 방호조건을 설계하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 X선의 구분

투과성에 따라서 X선을 구분할 때 투과성이 낮은 것은 연X선(soft X-ray), 투과성이 높은 것은 경X선(Hard X-ray)으로 나눈다. 연X선의 파장길이는 약 1Å이며, 10KeV 정도의 광자에너지를 가진다.

경X선은 파장길이가 0.01 ~ 1Å 정도로 연X선에 비해 짧고, 광자에너지도 10 ~ 100KeV 정도로 수 ~ 수십 배로 투과성이 높으므로 인체에 위험한 영향을 미친다.

연X선은 분석용으로 쓰이고, 경X선은 의료용, 산업용 등으로 사용하고 있다[4,5].

본 연구의 방사선조사식 정전기제거장치는 경X선보다 투과성이 낮아 상대적으로 안전한 연X선을 사용하는 정전기제거방식을 적용하였다.

2.2 MCNPX의 기능

MCNPX 코드는 몬테카를로 방식을 적용하여 방사선 이송에 대한 추정과 정보수집이 가능한 소프트웨어로 신뢰성이 매우 높다[4-6].

중성자, 광자, 전자 등 입자의 움직임과 설정한 물질의 상호작용을 계산하여 방사선의 이송범위와 누출량을 예측할 수 있게 한다.

본 연구는 방사선 조사식 정전기제거장치에서 방출되는 입자의 종류, 입자간의 충돌과 진행방향 및 상호작용하는 물질 등의 정보를 MCNPX 코드에 설정하여 최적의 방호조건을 설계하였다. Fig. 1은 MCNPX 코드의 시뮬레이션 알고리즘을 나타낸 것이다.

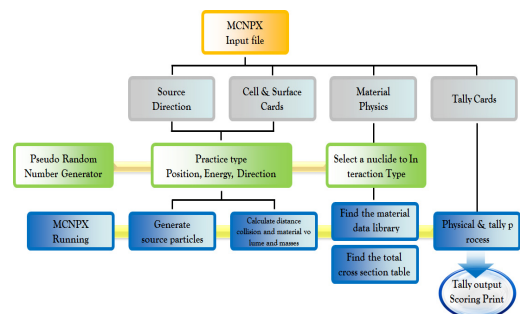


Fig. 1. MCNPX Code Simulation Algorithm

3. 시뮬레이션 장치 및 방호구조 설계

3.1 연X선 발생 원리 및 장치 설계

연X선은 진공상태가 약 10^{-7} torr인 고진공관내의 필라멘트에서 전자를 발생시켜 만들어진다. 발생된 전자는 진공관 내부의 음극(Cathode)을 통과하면서 전자가 가열되고, 이때 방출된 열전자는 양극(Anode)의 고전압에 의해 전자의 운동이 가속된다. 가속된 전자는 양극에 충돌하게 되는데, 이때 발생된 전자의 운동에너지 중에서 1% 정도의 에너지만이 연X선을 발생시키고, 나머지는 열에너지로 변환하게 된다. 다음 Eq. (1)은 연X선의 에너지효율을 나타낸 식이다[7].

$$\epsilon = 1.1 \times 10^{-9} ZV \quad (1)$$

여기서 Z는 양극의 원자번호, V는 전자의 가속전압을 나타낸다. 연X선의 발생효율은 가속전압과 원자번호에 비례하여 증가한다.

본 연구에서는 연X선 발생장치(X-ray tube)의 양극 물질로 텅스텐(Tungsten)을 설정하였고, 관전압은 5keV로 설정하였다. 텅스텐은 양극물질을 발생하는 효율이 가장 우수하다[8].

5keV로 관전압을 설정한 이유는 '방사선 발생장치에서 제외되는 용도' [9]에 해당하여 안전성을 높이기 위해 설정하였다.

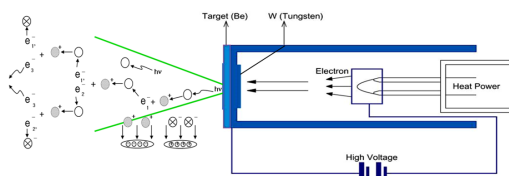


Fig. 2. Generate tube of Soft X-ray.

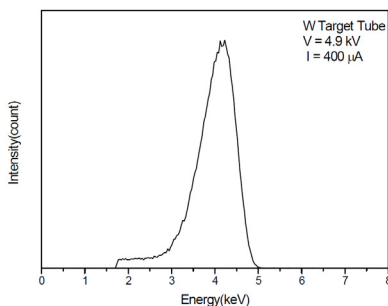


Fig. 3. Radiation dose simulation energy spectrum results at 5keV

Fig. 2는 고진공관을 이용한 연X선 발생장치의 구조를 나타낸 것이고, Fig. 3은 연X선 발생장치의 관전압이 5keV에서 방사선량을 시뮬레이션한 에너지 스펙트럼을 측정한 것이다.

3.2 방사선식 정전기제거장치의 방호구조 설계

압축건조공기(Compressed dry air)가 X선 발생장치와 이온화 공간(Ionization space)에서 마주 보도록 하여 이온화된 공기가 측면으로 나오는 구조로 방호장치를 설계하였다. 압축건조공기의 관로직경은 $\phi 4$, 압력과 유량은 0.1MPa과 90 l/min로 실제로 사용 중인 값으로 설정하였다.

이온화된 공기를 측면으로 배출한 것은 방사선은 빛의 성질을 가지므로 방사선의 영향을 줄이기 위해 직접 조사하지 않고 간접 조사되는 구조가 유리할 것이라고 예상하여 설계하였다.

Fig. 4는 MCNPX로 방호장치의 구조를 설계한 것이다.

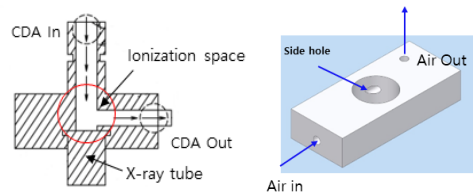
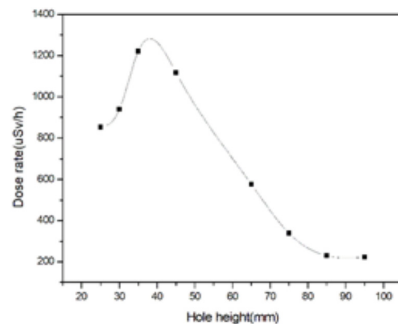


Fig. 4. Protection device design of soft X-ray ionizer using MCNPX code

다음으로 방호장치의 공기 배출구의 높이를 구분하여 방사선 누출량을 시뮬레이션 하였다.

방사선 발생부와 가까운 35mm 높이에서 누출량이 가장 높았고, 방사선 발생부와 먼 95mm 높이에서의 누출량이 가장 낮아서 공기 배출구의 높이는 95mm로 설계하였다.



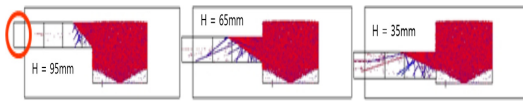


Fig. 5. Energy spectrum results by air hole height and radiation dose simulation results

Fig. 5는 관로 높이별 에너지 스펙트럼과 방사선량을 시뮬레이션한 결과이다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 관로 위치별 방사선 누출량 시뮬레이션 결과

관로의 위치에 따라 누출되는 방사선량의 시뮬레이션 값을 분석하였다. Fig. 6는 이를 시뮬레이션한 결과이다.

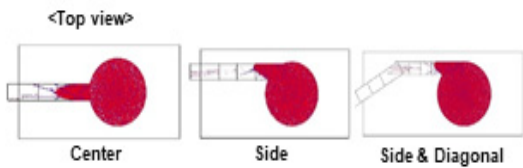


Fig. 6. X-ray movement result by air hole structure of soft X-ray ionizer protection device using MCNPX code

방사선이 방호장치의 외부로 직접 조사 되게 관로를 중심부에 위치하여 시뮬레이션한 방사선량은 $577\mu\text{Sv/h}$ 가 누출되는 것으로 나타났다. 이는 방사선 누출량 안전 기준인 $1\mu\text{Sv/h}$ 를 훨씬 초과하는 것으로 관로를 방사선 발생장치 중심부에 설계하는 것은 적합하지 않다.

방사선량을 감쇄하기 위해 관로를 측면에 위치하여 시뮬레이션한 결과 방사선량이 중심부에서보다 약 75%가 감소한 $139\mu\text{Sv/h}$ 로 나타났다. 이를 통해 방사선을 직접 조사하지 않는 것이 방사선 누출량을 감소한다는 것을 확인하였다.

누출 방사선량을 더욱 감소시키기 위해 측면에 위치한 관로를 사선으로 굴절시킨 구조는 방사선량이 $0.04\mu\text{Sv/h}$ 가 누출되는 것으로 나타났다.

이 결과로 굴절구조로 설계하는 것이 방사선 누출량의 안전기준인 $1\mu\text{Sv/h}$ 이하를 충족한다는 점을 알 수 있었다. Table 1은 관로의 위치별 방사선의 누출량을 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다.

Table 1. Radiation dose leakage due to air hole structure of Soft X-ray ionizer protection device using MCNPX code

Hole Pos.	Air Hole direction	Does rate ($\mu\text{Sv/h}$)	Decay rate
Center	Straight	577	-
Side	Straight	139	75%
Side	Straight & Diagonal	0.04	100%

4.2 관로 구조별 방사선 누출량 시뮬레이션 결과

연X선발생부에서 굴절전까지를 1차측, 굴절부에서 외부로 2차측으로 설계하였다. Fig. 7은 관로의 굴절구조에 따라 방사선의 이동범위를 시뮬레이션한 결과이다.

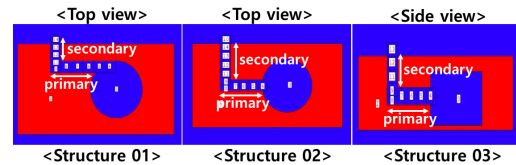


Fig. 7. Results of X-ray movement by breaking the air hole of the protection device of the soft X-ray ionizer using MCNPX code

구조 1은 관로의 굴절구조가 1차측이 측면에 위치하여 2차측의 길이가 5.5mm 일 때, 1차측 길이 변화에 따른 시뮬레이션 값을 분석하였다.

구조 2는 관로의 굴절구조가 1차측이 중심부에 위치하여 2차측의 길이가 13mm 일 때, 1차측 길이 변화에 따른 시뮬레이션 값을 분석하였다.

구조 3은 관로의 굴절구조가 1차측이 중심부에 위치하고 2차측을 측면이 아닌 방향으로 굴절시켰으며 이 경우의 2차측의 길이는 7mm 이고, 1차측의 길이 변화에 따른 시뮬레이션 값을 분석하였다.

구조 1에서 가장 적합한 방호구조는 1차측의 길이는 12mm , 2차측의 길이는 5.5mm 로 관로 전체 길이가 17.5mm 인 경우이며, 방사선 누출량도 $0.18\mu\text{Sv/h}$ 로 적합하였다.

구조 2에서 가장 적합한 방호구조는 1차측의 길이는 12.5mm , 2차측의 길이는 13mm 로 관로 전체 길이가 25.5mm 인 경우이며, 방사선 누출량도 $0.15\mu\text{Sv/h}$ 로 적합하였다.

구조 3에서 가장 적합한 방호구조는 1차측의 길이는 12.5mm , 2차측의 길이는 7mm 로 관로 전체 길이가 19.5mm 인 경우이며, 방사선 누출량도 $0.54\mu\text{Sv/h}$ 로 적합하였다.

구조 2와 구조 3에서 방사선량이 갑자기 증가한 것은

관로의 위치가 방사선 발생장치의 중심부이고, 굴절부에서 누출된 방사선량이 한꺼번에 누출하여 급격히 증가하였을 것으로 예상된다. 각 방호장치를 MCNPX 코드로 시뮬레이션한 결과 '방사선 발생기기 중 완전방호형의 구조기준'인 $1\mu\text{Sv/h}$ 이하 [10] 로 최적구조의 방호조건을 설계할 수 있었다.

Fig. 8은 관로의 구조별 방사선의 누출량의 변화를 나타낸 것이다.

Table 2은 관로의 구조별 방사선의 누출량에 대해 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다.

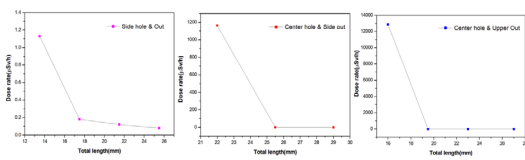


Fig. 8. Changes in the amount of radiation leaked by air hole structure

Table 2. Air hole structure of protection device of soft X-ray ionizer using MCNPX code and radiation leakage by length

Structure	Air Hole Length (mm)			Does rate ($\mu\text{Sv/h}$)
	Prim	Second	Total	
Side Hole & Side Out	20	5.5	25.5	0.08
	16	5.5	21.5	0.12
	12	5.5	17.5	0.18
	8	5.5	13.5	1.13
Center Hole & Side Out	16	13	29	0.08
	12.5	13	25.5	0.15
	9	13	22	1.162
Center Hole & Upper Out	20	7	27	0.11
	16	7	23	0.32
	12.5	7	19.5	0.54
	9	7	16	12.868

5. 결론

방사선의 특성을 실제 모델로 제작하여 분석하는 것은 시간과 비용이 많이 소요된다.

MCNPX 코드는 방사선의 수송 및 해석에 사용되는 시뮬레이션으로 신뢰성이 매우 높은 소프트웨어이다. 본 연구에서는 MCNPX 코드를 사용하여 시뮬레이션한 결과 최적구조의 방호조건을 설계하였다.

향후 본 연구에서 설계한 방호장치를 실제 제작하여 이를 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 분석하겠다.

References

- [1] Ministry of Commerce Industry and Energy, Korean Agency for Technology and Standards, "The Standard Study for Ionizer Evaluation Method", pp.224-236, 2005.
- [2] 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", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. 3, pp. 42-46, June 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.3.42>
- [3] P.H. Jeong, "The Analysis on Optimal Design and Characteristics of Soft X-ray Ionizer using the Monte Carlo N-Particle Extended Code", Doctor's Thesis of Pukyong National University, pp. 9-16, 2018.
- [4] J.D. Kim, S.J. Ahn, Y.D. Lee, C.J. Park, "Design Optimization of Radiation Shielding Structure for Lead Slowing Down Spectrometer System", Nuclear Engineering and Thechnology, Vol. 47, issue 3, pp. 380-387, April 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.01.004>
- [5] S.H. Lee, S.S. Heo, E.J. Lee, C.K. Kim, G.S. Cho, "Calculation of Concrete Shielding Wall Thickness for 450 kVp X-ray Tube with MCNP Simulation and Result Comparison with Half Value Layer Method Calculation", Korean Society of Radiation Industry, Vol.10, no.1, pp. 29-35, March 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.23042/radin.2016.10.1.29>
- [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] P. J Duke and A.G. Michette, "Modern Microscopies, Techniques and Applications", Plenum Press New York, pp. 41-45, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1002/sca.4950140411>
- [8] P.H. Jeong · D.H. Lee, "A Study on the Optimal Design of Soft X-ray Ionizer using the Monte Carlo N-Particle Extended Code", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 2, pp. 34-37, April 2017. DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.2.34>
- [9] Nuclear Safety and Security Commission notification No. 2017-42, Regulations on applications and capacities excluded from radiation generators, Article 1(Usage and capacity) Paragraph 1.
- [10] Nuclear Safety and Security Commission notification No.2021-3, Radiation Equipment Design Approval and Inspection Criteria, Article 16(Full protection), Paragraph 5.

정 필 훈(Phil-Hoon Jeong)

[정회원]



- 2007년 2월 : 부경대학교 일반대학원 안전공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 부경대학교 일반대학원 안전공학과 (공학박사)
- 2017년 2월 ~ 2021년 2월 : 부산경상대학교 소방안전과 전임교수
- 2021년 3월 ~ 현재 : 송실사이버대학교 산업안전공학과 전임교수

〈관심분야〉

산업안전, 연구실안전, 소방안전