



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

기술경영학석사학위논문

저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Low-Power Soft
X-Ray Static Electricity Removal Device



2023년 2월

부경대학교 기술경영전문대학원

기술경영학과

손강영

기술경영학석사학위논문

저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Low-Power Soft
X-Ray Static Electricity Removal Device

지도교수 옥 영 석

이 논문을 기술경영학 석사학위논문으로 제출함

2023년 2월

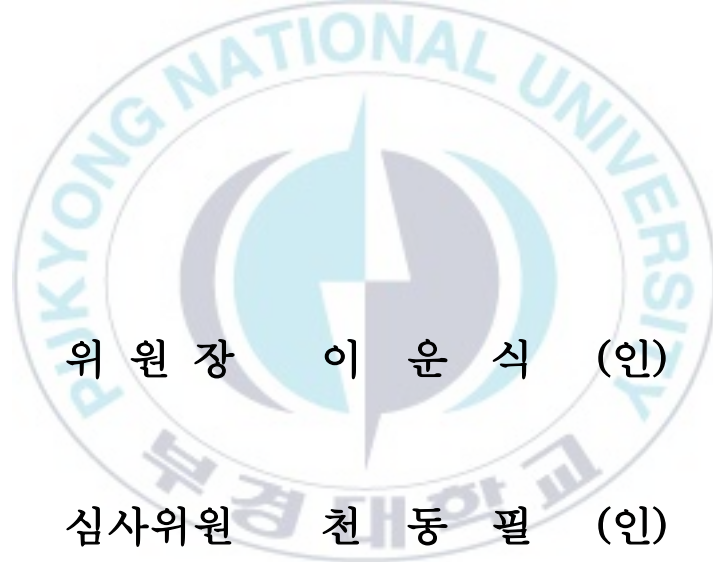
부경대학교 기술경영전문대학원

기 술 경 영 학 과

손 강 영

이 논문을 손강영의 기술경영학석사
학위논문으로 인준함.

2023년 2월 17일



위 원 장 이 윤 식 (인)

심사위원 천 동 필 (인)

심사위원 옥 영 석 (인)

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
Abstract	vii
국문요약	ix
I. 서론	1
1. 기술개발의 배경 및 필요성	1
2. 기술개발의 정의	4
3. 논문의 구성	4
II. 이론적 배경	6
1. 정전기 제거장치의 원리 및 종류	6
2. 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 이론적 고찰	14
3. 전기적 연결형태에 관한 이론적 고찰	21
III. 연구방법	28
1. 실험모형	28
2. 실험장치	36
3. 기술개발의 신뢰성 확보 및 평가	42
4. 사업 타당성 평가	46

IV. 실험결과	51
1. 성능에 대한 실험결과	51
2. 소비전력에 대한 실험결과	60
3. 개발기술에 대한 적용결과와 기술사업화	65
V. 결론	70
1. 기술개발의 요약	70
2. 기술개발의 시사점	71
참고문헌	73
감사의 글	76

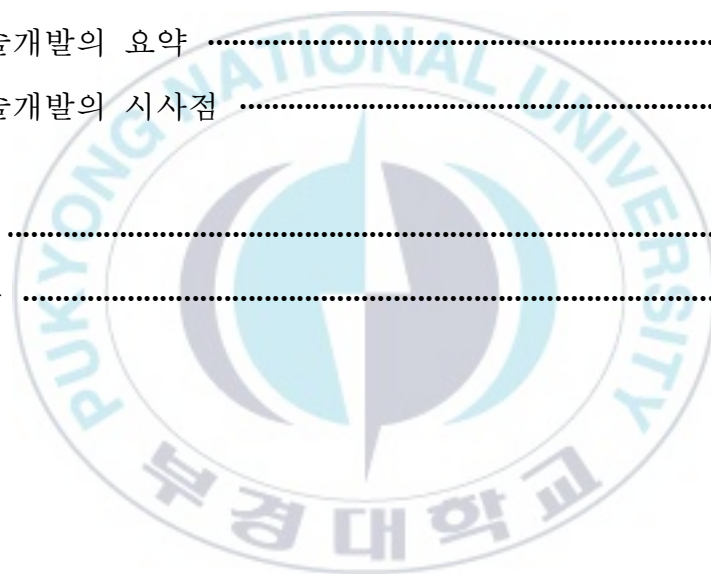


그림 목차

그림 1.1	2021년 국내 주요 수출기업 전력 사용량	2
그림 2.1	연엑스선 정전기 제거장치의 구조	10
그림 2.2	연엑스선 정전기 제거장치 이온생성	11
그림 2.3	진공자외선식 정전기 제거장치 파장 영역	11
그림 2.4	평판디스플레이 세대별 사이즈	16
그림 2.5	완전방호형 정전기 제거장치 제품	21
그림 2.6	연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결 구성	24
그림 3.1	저전력 연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결 구성 ..	29
그림 3.2	연엑스선 정전기 제거장치 1:N 매칭 조건별 특성 측정	31
그림 3.3	연엑스선 정전기 제거장치 관전압 측정	32
그림 3.4	연엑스선 정전기 제거장치 관전류 측정	32
그림 3.5	연엑스선 정전기 제거장치 소비전력 측정	33
그림 3.6	저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품 전개도	34
그림 3.7	연엑스선관 직렬 구성 간략도	35
그림 3.8	연엑스선 발생부 및 고전압 발생부 탈착구조	36
그림 3.9	연엑스선 정전기 제거장치 성능측정을 위한 차폐 챔버	37
그림 3.10	CPM 구성	38
그림 3.11	정전하 감쇠 시간(Decay Time)	39

그림 3.12	연엑스선 정전기 제거장치와 CPM 연결 구성	40
그림 3.13	수평 사용시의 대전판 모니터의 측정위치	42
그림 3.14	수직 사용시의 대전판 모니터의 측정위치	43
그림 3.15	성능평가를 위한 방사선 차폐 챔버	44
그림 4.1	저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품	52
그림 4.2	시제품 관전압 및 관전류 출력 테스트	53
그림 4.3	300mm 이격 거리에서 측정한 (+)Decay Time	54
그림 4.4	300mm 이격 거리에서 측정한 (-)Decay Time	54
그림 4.5	600mm 이격 거리에서 측정한 (+)Decay Time	55
그림 4.6	600mm 이격 거리에서 측정한 (-)Decay Time	56
그림 4.7	900mm 이격 거리에서 측정한 (+)Decay Time	57
그림 4.8	900mm 이격 거리에서 측정한 (-)Decay Time	57
그림 4.9	300mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance	58
그림 4.10	600mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance	59
그림 4.11	900mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance	60
그림 4.12	매칭 조건별 소비전력 변화	61
그림 4.13	매칭 조건별 300mm 이격 (+)Decay Time	62
그림 4.14	매칭 조건별 300mm 이격 (-)Decay Time	62
그림 4.15	매칭 조건별 300mm 이격 Ion Balance	63
그림 4.16	300mm 이격 Ion Balance 산포	64
그림 4.17	장기 수명평가 결과	66
그림 4.18	저전력 연엑스선 정전기 제거장치 사업성 평가결과 ..	68
그림 4.19	핀타입 연엑스선 정전기 제거장치 디자인	69

표 목차

표 2.1	기술발전에 따른 정전기 제거장치 세대별 분류	8
표 2.2	코로나 방전식 정전기 제거장치의 구분	9
표 2.3	진공자외선식 정전기 제거장치	12
표 2.4	1:1 연결 구성의 연엑스선 정전기 제거장치	15
표 2.5	Bar Type 연엑스선 정전기 제거장치	16
표 2.6	글라스 세대별 연엑스선 정전기 제거장치의 적용	18
표 2.7	연엑스선 정전기 제거장치 형태별 전기적 연결 구성	23
표 2.8	연엑스선 정전기 제거장치 1:N 매칭 구성 특허검색 결과	26
표 2.9	탄소나노튜브 연엑스선 발생장치 1:N 매칭 구성 특허검색 결과	27
표 3.1	기타 실험장치	41
표 3.2	IEC 규격에 의한 시험평가 항목 및 조건	45
표 3.3	사업 타당성 평가표	46
표 3.4	제품출시 5년 후의 추정시장 규모	47
표 3.5	매출액 영업이익률	47
표 3.6	시장 진입 후 5년간 평균 시장 성장률	47
표 3.7	추정 시장 점유율	48
표 3.8	선발기업과 예상 진입기업의 대응력 강도	48
표 3.9	특허 및 상품에 의한 방어 가능성	48

표 3.10 위험 분산도 평가	49
표 3.11 업계 재구축 가능성 평가	49
표 3.12 특별한 사회적 상황	49
표 3.13 자사적합도 평가 항목	50
표 4.1 사업타당성 평가 결과	67



A Study on the Development of a Low-Power Soft X-Ray Static Electricity Removal Device

Son Kang-young

Department of Technology Management,
Graduate School of Technology Management,
Pukyong National University

Directed by Professor Youngseok Ok

Abstract

The static electricity removal device is essential to control static electricity and fine dust in the process of the FPD (Flat panel display) industry, semiconductor industry, and high-end film industry. This study aims to reduce the power consumption of the soft X-ray static electricity removal device.

As a result of prior patent research, there are some papers on reducing the power consumption of similar medical equipment technologies. However, there needs to be papers on reducing the power consumption of static electricity removal devices.

This study analyzes the level of related technology through patent analysis. Based on this, a soft X-ray static electricity removal device is proposed to connect a high-voltage generator and two soft X-ray tubes in series and multiple high voltages. This

study evaluates the quantitative performance of the prototype by measuring electrostatic charge decay time and ion balance according to the international standard (IEC 61340-5). The demonstration data shows that the performance and functionality outperform the current static electricity removal device.

The result shows that the developed product operates with less power than the current static electricity removal device.

keywords : static eliminator, series multiplex, high voltage connection, low power, fine dust



국문요약

저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발에 관한 연구

손 강 영

정전기 제거 장치는 FPD(Flat Panel Display) 산업, 반도체 산업, 고급 필름 산업 공정에서 정전기와 미세먼지를 제어하기 위해 필수적이다. 본 연구는 연X선 정전기 제거장치의 소비전력을 줄이는 것을 목적으로 한다.

선행 특허 연구 결과, 유사한 의료기기 기술의 전력소모 절감에 관한 논문이 일부 있다. 그러나 정전기 제거 장치의 전력 소모를 줄이는 것에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 특허 분석을 통해 관련 기술의 수준을 분석한다. 이를 바탕으로 고전압 발생장치와 2개의 연X선관을 직렬로 연결하여 다중 고전압을 인가하는 연X선 정전기 제거장치를 제안한다. 본 연구는 국제표준(IEC 61340-5)에 따라 정전기 전하 감쇠시간과 이온 밸런스를 측정하여 프로토타입의 정량적 성능을 평가하였다. 실증 데이터는 성능과 기능이 현재의 정전기 제거 장치보다 우수함을 보여준다. 그 결과 개발된 제품이 기존 정전기 제거 장치보다 적은 전력으로 동작함을 알 수 있다.

keywords : 정전기 제거장치, 직렬 다중, 고전압 연결, 저전력, 미세먼지

I. 서론

산업의 발전에 따라 연엑스선 정전기 제거장치(Soft X-ray Ionizer)의 사용량과 비중은 증가하고 있다. 특히 연엑스선 정전기 제거장치는 전력 사용량이 높은 디스플레이 산업과 반도체 산업에 집중되어 있어서 소비전력을 감소시켜 에너지를 절감할 수 있는 제품을 제공하기 위한 연구와 기술개발이 필요하다.

1. 기술개발의 배경 및 필요성

(1) 기술개발 배경

2021년 국내 주요수출기업 전력 사용량의 상당한 부분은 디스플레이 산업과 반도체 산업이 차지하고 있으며, 디스플레이 크기의 대형화와 반도체 회로의 고집적화 기술발전과 함께 생산량의 증가로 인해 매년 전력소비량은 증가하고 있는 추세이다.



<그림 1.1> 2021년 국내 주요 수출기업 전력 사용량

<그림 1.1>은 2021년 국내 주요 수출기업의 전력 사용량을 조사한 결과로 삼성전자, SK하이닉스, LG디스플레이 3개 수출기업의 전력 사용량이 조사대상 기업의 전체 전력 사용량 119.65TWh 중 65.68TWh로 54.89%를 차지 한다.

에너지 관련 세계적인 추세는 탄소중립 정책을 통해 탄소배출을 최소화하기 위한 노력을 강화하고 있으며, 모든 산업 분야에서 대체 에너지 개발 및 에너지 효율 향상을 추진하고 있다. 문재인 정부에서 선언한 2050탄소중립 관련 정책 발표를 시작으로 탄소중립 정책에 대한 기업의 적극적인 참여와 실천을 요구 받고 있다.

국내 전력소비의 상당한 부분을 차지하는 산업현장에서는 제품의 품질과 생산성에 크게 영향을 주는 정전기 문제 해결을 위해 정전기 제거장치(Ionizer, 이온나이저)를 적용하고 있다. 산업현장에서 발생하는 정전기의 제거 및 제어를 위해 필수적으로 적용되는 정전기 제거 장치 수요가 가장 많은 산업 분야는 디스플레이 산업과 반도체 산업이며, 매년 수요가 꾸준히 증가하고 있다.

(2) 기술개발 필요성

2021년 9월 10일 과기정통부 탄소중립 기술혁신 추진전략에 포함된 『탄소중립 10대 핵심기술 개발방향』 보고서에 따르면 산업에서 배출되는 불소계 온실가스의 감축 목표 향상 및 산업부분 에너지 효율 향상 추진을 요구하고 있다. 이러한 정부의 정책을 산업현장에 반영하기 위해 산업현장에서 필수적으로 사용되는 정전기 제거장치의 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 제품에 대한 연구와 기술개발이 절실히 필요하다.

사용 수량이 증가하고 있는 연엑스선 정전기 제거장치의 에너지 효율을 극대화하기 위한 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발의 필요성은 크게 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 소비전력을 현저히 낮출 수 있도록 설계 함으로서 산업 부분 에너지 효율향상 추진 정책에 적합하도록 개발할 필요가 있다.

둘째, 제한된 자원을 절감할 수 있도록 기능 및 성능을 동등수준 이상으로 유지하면서도 제품 구성에 필요한 핵심 부품을 일부 제외할 수 있도록 설계가 필요하다.

셋째, 이를 통해 정전기 제거장치 국내 제조사의 글로벌 경쟁력을 강화시킬 수 있도록 기술사업화를 뒷받침하기 위해 기술개발이 필요하다.

2. 기술개발의 정의

(1) 기술개발 개요

정전기 제거장치는 다양한 산업분야의 공정에서 발생하는 정전기를 제어하고 미세먼지 흡착을 방지하기 위해 필수적으로 사용되는 산업용 제품이다. 디스플레이 산업과 반도체 산업을 중심으로 그 사용 수량이 해마다 증가하고 있으며, 연엑스선 정전기 제거장치는 코로나 방전 원리를 이용한 정전기제 거장치에 비해 유지보수가 용이하고, CDA(Clean Dry Air)를 사용할 필요가 없으며 미세먼지 발생이 없다는 장점으로 인해 적용 수량이 증가하고 있다.

본 연구에서는 연엑스선 정전기 제거장치 제품의 핵심 구성이 고전압 발생장치(High Voltage)와 연엑스선관으로 1:1 매칭 되어 있는 전기적 연결을 1개의 고전압 발생장치에 2개 이상의 연엑스선관을 직렬로 연결하여 사용할 수 있는 방안을 제시 하고자 한다.

(2) 기술개발 목적

본 연구의 목적은 종래의 연엑스선 정전기 제거장치의 성능과 기능은 그대로 유지하면서 소비전력을 낮춰 에너지 효율을 향상시키고 투입 자재를 절감할 수 있는 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발에 대한 연구에 있으며, 2050탄소중립 전략에 적합한 제품을 개발하고 사업화 하는데 있다.

3. 논문의 구성

본 논문의 구성은 서론, 이론적 배경, 연구방법, 연구결과, 결론으

로 구성되어 있으며, 서론에서는 디스플레이 산업과 반도체 산업에서 소모되는 전력량과 저에너지 기술의 시장요구에 대해 서술하였고, 이론적 배경에서는 정전기 제거장치와 변화에 대해 알아보고 연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결 구성에 대한 선행연구와 선행특허를 조사한 결과를 기록하였다. 연구방법 및 연구결과에서는 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발을 위한 연구목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 방법과 결과를 포함하였다. 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품을 제작하여 비교제품과 성능 및 기능이 동등 수준 이상으로 유지함을 확인하였다. 그리고 소비전력이 감소하는지에 대해 검증하였으며, 연구결과에는 제작된 시료의 제전성능과 신뢰성 평가까지 포함하여 검증하였다. 기술사업화 추진을 위해 BMO 이론에 따라 사업성 평가를 진행하였으며, 마지막 결론에서는 연구결과를 다시 요약하고 연구 과정에서 기술사업화가 가능한 응용할 수 있는 제품에 대한 구상 및 제안을 포함하였다.

II. 이론적 배경

본 장에서는 정전기 제거장치에 대한 종류와 특징에 대해 살펴보고 연구의 대상이 되는 연엑스선 정전기 제거장치의 원리와 함께 산업 발전에 따라 연엑스선 정전기 제거장치에 대해 어떤 연구가 이루어지고 있는지를 알아보고, 전기적인 연결구성에 대한 이론적 배경을 같이 고찰하고자 한다.

1. 정전기 제거장치의 원리 및 종류

(1) 정전기 제거장치 구동원리

1) 정전기 제거장치

정전기 제거장치는 (+)이온과 (-)이온을 생성시켜 정전기가 발생한 대상까지 생성된 이온을 이송시켜서 (+)이온은 (-), (-)이온은 (+)와 서로 결합시켜 발생한 정전기를 중화(제거) 시키는 장치이다. 정전기 제거장치의 성능평가방법 개발(전지훈, 2011)에서는 전하 발생을 억제하기 위한 목적으로 만들어진 것이 이오나이저(Ionizer)이며 전하를 중화하는 데 필요한 극성의 전하를 생성하며 대전 물에 공급하는 기능을 가진 장치의 총칭으로 정의하고 있다. 정전기 제거장치는 이온 생성 방식과 형태에 따라 다양하게 연구 및 개발되고 있으며, 산업 현장에서 요구되는 성능과 기능을 반영하여 연구되고 있다.

2) 구동원리

정전기 제거장치의 기본 구성은, 고전압을 발생시키는 고전압 발생부와 전달된 고전압을 뿔죽한 침 끝단부에 전달해서 공기를 전리시키는 방식으로 이온을 생성시키기도 하고, 연엑스선관을 이용하여 연엑스선을 방출시켜 이온을 생성시키는 구동원리를 가지고 있다.

공기 중의 원자에 강한 에너지를 전달하게 되면 공기를 이온화(Ionization, 전리) 시킬 수 있는데 안정된 상태의 분자 또는 원자가 에너지를 받게 되면 전자를 방출하게 되고 방출된 전자의 이동이 발생하게 된다. 이때, 전자를 방출한 분자 또는 원자는 양전하로 대전되어 (+)이온이 되고 방출된 전자를 얻게 된 분자 또는 원자는 음전하로 대전되어 (-)이온이 된다.

(2) 정전기 제거장치의 종류

산업현장에서 발생하는 복잡한 정전기 문제를 해결하기 위해 다양한 형태로 적용되고 있다. 특히, 평판디스플레이 및 반도체의 고해상도, 고집적화에 따라 제조공정에서 정전기방지기술은 평판디스플레이와 반도체 제조수율의 신뢰성에 영향을 미치는 핵심기술 중 하나이다(정필훈 · 이동훈, 2017).

정전기 제거장치의 종류는 이온의 생성방식에 따라, 1) 코로나 방전식 정전기 제거장치, 2) 연엑스선 조사식 정전기 제거장치, 3) 자외선식 정전기 제거장치로 구분한다. 정전기 제거장치의 기술적인 발전 단계와 산업의 발전에 따라 적용 시기를 기준으로 세대별로 분류하면 <표 2.1> 과 같이 요약할 수 있으며, 세대별로 적용되는 정전기 제거장치의 종류는 요구되는 성능과 기능에 따라 적용되고 있다.

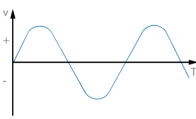
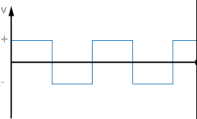
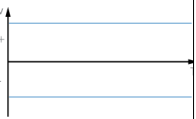
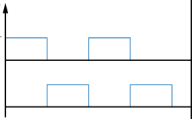
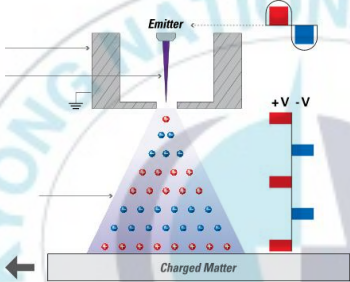
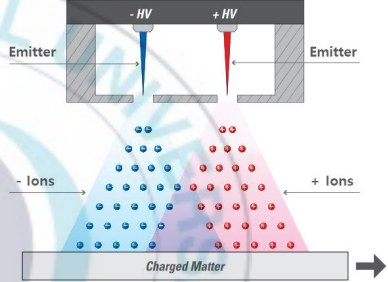
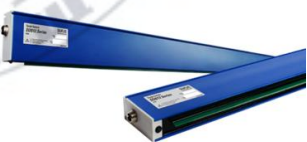
〈표 2.1〉 기술발전에 따른 정전기 제거장치 세대별 분류

구분		1세대	2세대	3세대
종류		코로나 방전식	연엑스선 조사식	진공 자외선식
방식		코로나 방전 (전계에너지)	광자 흡수	광자 흡수
이온전달 수단		팬 또는 압축공기	불필요	불필요
사용 환경	대기	적용가능	적용가능	×
	불활성 가스	×	적용가능	적용가능 (진공상태)
	진공	×	×	적용가능

1) 코로나 방전식 정전기 제거장치

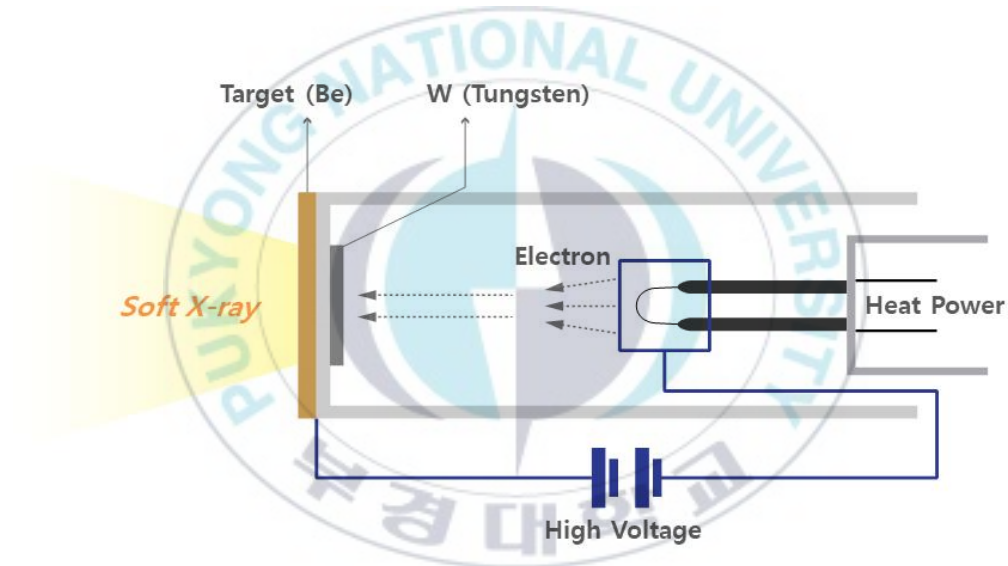
높은 전압을 발생시켜 뾰족한 바늘 형태의 침 끝단부에 인가하게 되면 침 끝단부에 에너지(전계)가 집중되고 코로나 방전이 발생하게 된다. 이때 공기는 절연이 파괴되고 (+)이온과 (-)이온으로 분리되어 (+), (-)이온이 생성된다. 고전압을 발생 시켜서 뾰족한 침까지 고전압을 전달하는 방식에 따라 〈표 2.2〉와 같이 코로나 방전식 정전기 제거장치는, 1) 교류방식, 2) 직류방식, 3) 펄스(직류 또는 교류)방식으로 구분할 수 있다.

〈표 2.2〉 코로나 방전식 정전기 제거장치의 구분

구분	교류방식 (AC Type)	펄스방식 (AC Type)	직류방식 (DC Type)	펄스방식 (DC Type)
전압 인가 방식				
이온 생성				
제품 형태				

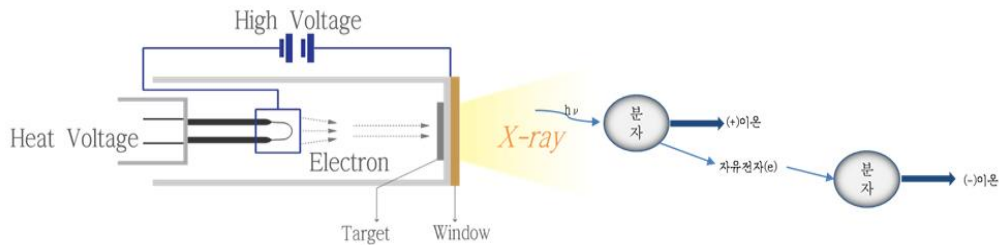
2) 연엑스선 정전기 제거장치

코로나 방전식 정전기 제거장치와 같이 연엑스선 정전기 제거장치에서도 <그림 2.1>과 같이 고전압을 발생시킨 다음 X선을 발생시키는 연엑스선관으로 전압과 전류를 전달하게 되면, 연엑스선관 내부 필라멘트 저항에 의해 열전자가 발생하게 된다. 발생한 열전자를 고전압의 세기만큼 열에너지를 가속시켜 베릴륨(Be) 재질의 창(Window)에 충돌 시킨다. 이때 대부분의 열에너지는 소멸되지만 일부 에너지가 창을 통과하면서 X선을 생성시키게 된다.



<그림 2.1> 연엑스선 정전기 제거장치의 구조

이때, <그림 2.2>와 같이 베릴륨 창을 통과하면서 광자가 공기 분자와 충돌하게 되고 공기 분자는 (-)전자 1개를 잃게 되어 (+)양이온이 되고 떨어져 나간 (-)전자를 얻게 된 공기 분자는 (-)음이온이 된다.

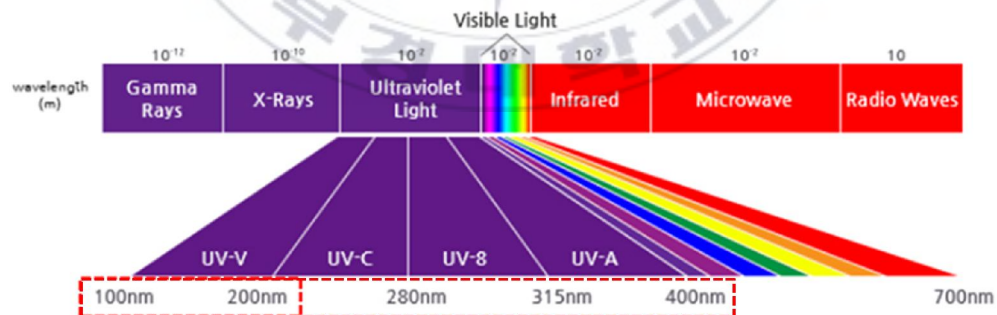


〈그림 2.2〉 연엑스선 정전기 제거장치 이온생성

3) 자외선식 정전기 제거장치

대기압 환경과 달리 감압(진공상태) 및 불활성 가스 환경에서는 코로나 방전식 정전기 제거장치와 연엑스선 정전기 제거장치의 사용은 제한되는데 비해, 진공자외선(Vacuum Ultraviolet)을 이용한 정전기 제거장치는 정전기를 제거할 수 있다.

〈그림 2.3〉과 같이 진공자외선식 정전기 제거장치는 자외선 영역 중 100nm~400nm 단파장 영역을 이용하여 이온을 생성시켜 정전기를 제거한다.



〈그림 2.3〉 진공자외선식 정전기 제거장치 파장 영역

진공자외선식 정전기 제거장치는 <표 2.3>과 같으며, 평판디스플레이 산업이 LCD에서 OLED로 전환되고 진공환경으로 구성된 공정설

비가 많아지면서 적용 수량이 증가하고 있고, 반도체 공정에서도 다양한 진공환경에 적용을 추진하고 있는 추세이다.

〈표 2.3〉 진공자외선식 정전기 제거장치

제조사	(주)선재_국내	H社_일본	비고
모델			

(3) 연엑스선 정전기 제거장치의 장단점

1) 장점

코로나 방전식은 백화현상, 오염원 방출, 이온불규형 제어, 오존 조절, 정전유도현상 제어 등의 문제점이 있어 이를 해결하기 위해 연엑스선의 공기전리 작용을 사용하여 주위 공기 및 가스분자를 이온화시켜 제전대상물의 정전기를 중화시키거나 완화시키는 방법이 사용되고 있다(정필훈, 2018). 연엑스선 정전기제거장의 장점은 일부 특별한 사용환경을 제외하면, 1) 미세먼지 발생이 없고, 2) 사용수명까지 별도 유지보수가 필요하지 않으며, 3) 생성된 (+),(-) 이온의 균형(Ion Balance)이 안정적이고, 4) 오존(O₃) 발생이 없다.

이러한 연엑스선 정전기 제거장치의 장점으로 인해 국내 FPD 산업의 공정에서 발생하는 정전기를 제어하기 위해 연엑스선 정전기 제거장치를 기본으로 채택하고 있다. 그리고 반도체 산업에서도 코로나 방전식 정전기 제거장치 채택에서 벗어나 연엑스선 정전기 제거장치로 전환을 가속화 하고 있다. 향후 반도체 제조공정에서 중요성이 높아질 것으로 예상되는 산화막의 형성, 불순물 등으로 웨이퍼의 표면을 오염시키는 문제를 극복하기 위해 고순도 질소가스로 밀폐된 제조시스템을 도입하여 웨이퍼를 처리하는 방식으로 변화할 것이다(박병태, 2016).

2) 단점

진공상태 및 불활성 가스를 취급하는 특수한 환경에서는 연엑스선으로 공기를 전리시킬 수 없어서 (+),(-) 이온을 생성시킬 수 없고 정전기를 제거할 수 없다. 그리고 연엑스선 정전기 제거장치의 사용을 위해서는 원자력안전법에 의해 반드시 차폐를 하도록 규정하고 있다. 따라서 장비 및 설비의 운용을 위해서는 차폐를 통해서 작업자에게 방사선 피폭이 되지 않도록 안전관리를 해야 하는 등 연엑스선 정전기 제거장치를 사용하기 위한 비용이 증가하는 단점이 있다.

2. 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 이론적 고찰

(1) 연엑스선 정전기 제거장치의 원리 및 형태

1) 연엑스선을 이용한 정전기 제거장치

연엑스선을 이용한 정전기 제거장치는, 창 의 재질로서 베릴륨 박막에 텅스텐을 증착시킨 것을 사용하는 이온생성관인 연엑스선관으로 에너지가 높은 1.2용스트론 이상 1.5용스트론 이하의 파장을 갖는 연엑스선을 발생시켜 정전기 제거 대상물체의 정전기를 중화 및 약화시키며(대한민국특허청, 10-2016-0111928), 연엑스선을 발생시키는 헤드부와 전압을 공급하는 고전압 발생장치를 포함하는 전원제어부가 전기적으로 연결되어 있다.

2) 연엑스선 정전기 제거장치 형태

연엑스선 정전기 제거장치의 형태는 연엑스선 발생부와 전압을 공급하는 전원제어부가 <표 2.4>와 같이 1:1로 연결된 형태를 기본 구조로 구성되며 설비 및 장비에 장착되는 형태와 용도에 따라 다양한 형태로 사용된다.

〈표 2.4〉 1:1 연결 구성의 연엑스선 정전기 제거장치

구분	1:1 전기적 연결구성	비고
기본 구성		
응용 구성		

〈표 2.4〉와 같이 1:1 전기적 연결형태와 달리 1:1 연결구성을 하나의 모듈로 만들어 그 모듈을 길게 연결하여 막대 형태로 제작하기도 한다. 이러한 막대형 연결 기본 구성을 응용하여 〈표 2.5〉와 같이 CDA를 사용해서 이온화된 (+),(-) 이온을 더 빨리 정전기를 제거할 대상물체까지 이송시키는 형태도 있고 방수 및 방진의 형태를 갖추는 제품도 있다.

〈표 2.5〉 Bar Type 연엑스선 정전기 제거장치

구분	막대형 연결구성
기본 구성	
응용 구성	

(2) 연엑스선 정전기 제거장치 개발 및 연구동향

1) 평판 디스플레이

FPD 산업에서 사용되는 원장 글라스는 사이즈에 따라 〈그림 2.4〉와 같이 세대별로 나눈다.



(출처: LG Display Newsroom, 2021년 12월 14일)

〈그림 2.4〉 평판디스플레이 세대별 사이즈

FPD산업 초기에는 비교적 작은 사이즈를 양산하면서 연엑스선 정전기 제거장치의 형태는 고전압 발생부 1개와 연엑스선 조사부 1개로 제품이 구성되었다. 이러한 형태는 비교적 좁은 면적의 정전기를 제거할 목적으로 사용되었기 때문에 성능을 만족시킬 수 있었다. 그러나 LCD를 중심으로 8세대 글라스(8G Glass, 가로 2200mm × 세로 2500mm) 양산이 본격화 되고 점점 대형화되면서 넓은 면적 또는 긴 구간에 대해 효과적으로 정전기를 제거하기 위해 긴 막대형태에 여러 개의 고전압 발생부와 연엑스선관을 모듈화 하여 전기적으로 연결하는 형태로 발전하였다.

〈표 2.6〉은 국내 및 해외 정전기 제거장치 제조사 중 코로나 정전기 제거장치, 연엑스선 정전기 제거장치, 진공자외선 정전기 제거장치 3가지 기술원천을 모두 보유하고 있는 (주)선재하이테크의 정전기 제거장치 라인업으로 디스플레이 산업에서 글라스 사이즈의 크기 변화에 따른 제품의 형태가 어떻게 변화해 왔는지를 확인할 수 있다. 코로나 정전기 제거장치의 제품 형태는 크게 변화가 없지만 연엑스선 정전기 제거장치의 형태는 글라스 사이즈가 커지면서 길다란 막대형태로 발전되고 있다는 것을 확인할 수 있다.

〈표 2.6〉 글라스 세대별 연엑스선 정전기 제거장치의 적용

구분	5G ~ 7G	8G ~ 10.5G
코로나		
연엑스선		

2) 반도체 산업

반도체 산업에서는 코로나 방전식 정전기 제거장치를 중심으로 적용해 왔지만 반도체 집적기술이 발전함에 따라 정전기 관리 기준이 계속 강화되면서 코로나 방전식 정전기 제거장치로 모든 정전기 방전(Electro Static Discharge, ESD) 문제를 해결할 수 없게 되었다. 특히, 반도체 공정은 작고 가벼운 소자를 제조하는 공정으로 무풍(Non Air) 조건에서 공정을 진행하는 경우가 일반적이다. 그러나 코로나 정전기 제거장치와 같이 CDA 또는 팬으로 생성된 이온을 이송시키는 원리의 정전기 제거장치에서 발생하는 기류는 공정에 영향을 줄

수 있으며, 그 영향을 최소화할 필요성이 증가하고 있다.

이러한 공정조건을 만족시키고 효과적인 정전기 관리 및 제어를 위해 반도체 공정에서의 정전기 제거장치 적용 설계는 코로나 방전식 정전기 제거장치에서 연엑스선 정전기 제거장치로 전환되고 있다.

3) 자동화 및 무인화 공정

4차산업혁명을 대표하는 자동화 및 무인화 공정의 완성도를 높이기 위해서는 모든 설비와 구성품의 유지보수를 최소화하는 것이 핵심이다. 정전기 제거장치 중 코로나 방전에 의한 정전기 제거장치는 작업자에 의한 주기적인 유지보수를 필요로 하지만 연엑스선 정전기 제거장치는 수명이 도래하기 이전까지는 별도의 유지보수를 필요로 하지 않는다. 따라서 자동화 및 무인화된 공정의 운영을 위한 산업현장의 요구사항 중 에너지 절감과 함께 유지보수를 최소화할 수 있는 연엑스선 정전기 제거장치 사용은 필수적으로 요구되고 있다.

(3) 에너지 절감 연엑스선 정전기 제거장치 개발 및 연구동향

1) 성능 및 기능의 향상

2000년부터 국내 IT 산업의 발전과 함께 LCD 공정을 중심으로 연엑스선 정전기 제거장치의 적용 수량은 꾸준히 증가했다. 그리고 원장 글라스 크기가 커지게 되면서 적용 수량이 더욱 증가하게 되었다. 이런 산업환경의 변화에 따라 연엑스선 정전기 제거장치의 개발방향은 성능을 향상시켜서 최대한 넓고 먼 거리에서도 충분한 정전기 제거가 가능하도록 요구 되었다. 성능을 극대화 시키거나 효율적인 공정관리를 위한 사용자의 편의를 반영하기 위해 기능을 추가하

는데 중점을 두고 연구 및 개발이 이루어져 왔다. 사용자 편의를 위해 개발된 연엑스선 정전기 제거장치의 가장 큰 변화는 성능의 향상과 함께 고전압 발생부와 연엑스선 발생부를 분리시켜 수명이 다하거나 고장발생 시 쉽게 교환이 가능하도록 해서 손실을 최소화하거나 비용을 절감하기 위해 기능을 추가하는 방향으로 연구 및 개발되었다.

지금까지의 연X-선식 정전기 제거장치는 1개의 연X-선 튜브(Mono Type)를 사용하기 때문에 8세대 이상의 디스플레이 제조공정에서는 유리기관의 크기(가로×세로, 2m×3m)가 커서 기존의 모노 타입으로는 확장된 제전대상면적에 부족하였다. 이를 개선하기 위하여 다수(3개 이상)의 연엑스선 튜브를 갖는 멀티형(Multi Type)을 개발하여 연엑스선량 증첩에 의한 정전기 제거성능을 향상시켜 제전 대상면적을 임의로 확장할 수 있을 것으로 판단된다(이수환·이동훈, 2018).

2) 방사선 누설이 없는 연엑스선 정전기 제거장치

연엑스선 정전기 제거장치의 가장 큰 단점은 방사선 발생으로 인체에 유해하다는 점이다. 이러한 연엑스선 정전기 제거장치의 단점을 보완하고 장점을 최대한 활용하여 인체에 유해한 엑스선은 누설되지 않고 이온화된 공기만 외부로 토출되도록 개발된 정전기 제거장치가 완전방호형 정전기 제거장치이다.



〈그림 2.5〉 완전방호형 정전기 제거장치 제품

종래기술은 헤드부가 외부 공기와 직접 맞닿는 방식으로 노출되어 있는 까닭에 헤드부에서 방사되는 X선에 인체가 노출될 위험성이 있었다. 이러한 이유로 인하여 전술한 종래의 엑스선관이나 연엑스선 이온라이저의 경우 작업자의 출입이 통제된 자동화된 반도체, LCD 라인 등이 설치된 클린룸내부에서만 사용이 가능한 문제점이 있었다(허시환, 2015).

완전방호형 정전기 제거장치는 승인 과정에서 원자력 안전법규를 기준으로 안전하다고 승인된 제품으로 별도 인허가를 필요로 하지 않아 선호도가 높다. 다만, 제품의 성능이 기존의 연엑스선 정전기 제거장치 보다 떨어지고, CDA 사용이 필수적이라는 점에 의해 적용은 제한적이다.

3. 전기적 연결형태에 관한 이론적 고찰

(1) 직렬 연결

1) 직렬 구조 방식

전압과 전류를 제어하기 위한 전기적 연결방법 중 직렬 구조 방식은 빛을 내는 전구형태의 연결방법 중 다수의 연결과 제어를 위해 사용되며, 연엑스선 정전기 제거장치의 고전압 발생장치와 연엑스선관의 전기적 연결구조 방식에서 다수의 연결과 제어를 위해 채택할 수 있다.

전기적 연결구조 방식에서 직렬 구조 방식은 전류제한 저항의 개수가 적고 선로 구현 시 도선의 길이가 짧아서 저가 구현에 용이하지만, 단락 사고 시 LED가 Open이 되면 램프 전체가 소등 된다는 단점이 있다(이춘호, 2011). 반면, 많은 수의 조명 기기를 효율적으로 제어하기 위해 직렬연결을 이용한 통합 조명 제어 시스템의 구조를 제안하고 이를 구현 하였다(이승원 · 송문빈 · 이택수 · 정연모, 2004).

2) 연엑스선 정전기 제거장치에서의 직렬 구조 방식

연엑스선 정전기 제거장치에서의 전기적 연결구성은 고전압을 발생시키는 고전압 발생부와 연엑스선관을 1:1로 매칭하는 것으로 구성된다. 만약 연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결구성을 1개의 고전압 발생부에 다수의 연엑스선관을 연결할 경우 선로의 단락 시 불평형이 심하지 않는 직렬 구조 방식을 우선적으로 채택할 수 있다.

〈표 2.7〉 연엑스선 정전기 제거장치 형태별 전기적 연결 구성

구분	Union Type	Bar Type
제품		
전기적 연결구성		

(2) 병렬 연결

1) 병렬 구조 방식

병렬 구조 방식의 경우엔 직렬에 비해 각 선로에 저항이 들어가 효율이 떨어지지만 단락 사고시엔 직렬 구조보다는 안정하여 신뢰성 면에서 유리하다 볼 수 있다. 직렬 구조와 달리 단락 사고 시 램프 전체가 소등되지 않는다는 장점은 있지만, LED 단락 사고 시 선로의 불평형이 심하다는 단점이 있다(이춘호, 2011).

2) 연엑스선 정전기 제거장치에서의 병렬 구조 방식

연엑스선 정전기 제거장치에서의 전기적 연결구성을 고전압을 발생시키는 고전압 발생부와 1:1 매칭으로 기본 구성을 할 경우에는

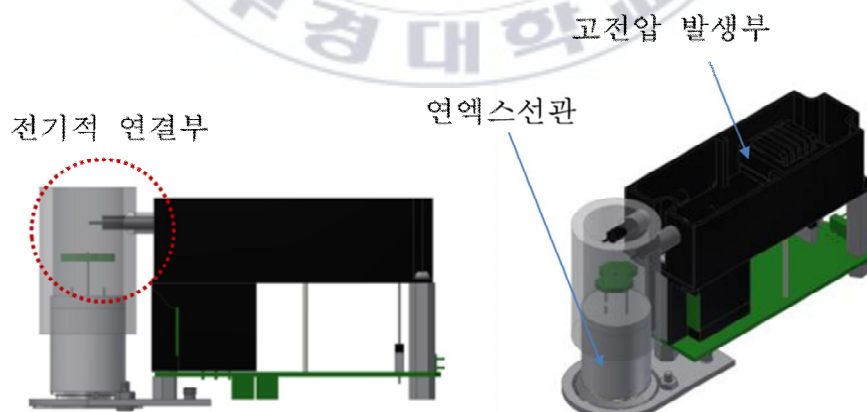
문제가 없지만 연엑스선 정전기 제거장치에서 1개의 고전압 발생부에 다수의 연엑스선관을 병렬로 연결할 경우에는 단락 시 선로의 불평형이 심해진다. 선로의 불평형은 단락되지 않은 또다른 연엑스선관에 전류가 집중되고 사양을 벗어나는 이상 출력현상을 가져올 수 있다.

(3) 연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결 구성

1) 1:1 매칭방식의 전기적 연결

연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결구성은 1:1 연결을 중심으로 개발되어 왔다. 그 이유는 5keV에서 15keV 까지 높은 고전압을 발생시키는 고전압 발생부 제어회로를 서로 연결할 필요가 없었기 때문에 전기적 연결구성은 1:1 연결 구성을 기초로 하고 있다.

<그림 2.6>은 연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결 구성을 알 수 있는 그림으로 고전압 발생부와 연엑스선관을 전기적으로 연결하고 컨트롤 PCB를 통해 제어하는 방식으로 설계한다.



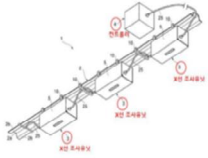
<그림 2.6> 연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결 구성

2) 1:N 매칭방식의 전기적 연결

2015년 이후 연구 및 개발된 연엑스선 정전기 제거장치의 형태는 비교적 넓은 공간의 정전기 제거를 위해 길다란 막대형태로 고전압 발생장치 1개에 연엑스선관을 1:1로 매칭하여 길게 배치한 구성을 채택하고 있다.

연엑스선 정전기 제거장치의 1:N 매칭방식의 전기적 연결방식에 대한 선행연구는 찾아 볼 수 없었고, 램프의 전기적 연결형태에 관한 이론적 고찰을 통해 직렬 또는 병렬로 전기적 연결을 고려할 수 있다. 또한, 연엑스선 정전기 제거장치의 1:N 매칭 구성에 대한 선행 특허를 검색한 결과 <표 2.8>과 같이 일본기업을 중심으로 연엑스선 발생장치 중 의료용에 국한된 일부 특허에서 관련 기술에 대한 언급은 있으나 정전기 제거장치 기술분야와 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

〈표 2.8〉 연엑스선 발생장치 1:N 매칭 구성 특허검색 결과

No.	특허 출원인 (발명의 명칭)	일자	관련도	요약	비고
1	HAMAMATSU PHOTONICS (X선 조사원 및 X선 조사장 치)	2016.08.12	Y		하나의 컨트롤러(4) 에 대해, 복수 개의 X선 조사유닛(3)이 직렬 결합되어 있다 는 특징
2	TOSHIBA(CT스캐너)	2012.09.21	X		고속의 스캔을 복수 의 고전압 장치들 사용하는 것 없이 또한 선명한 화상을 얻을 수 있도록 수 행

관련 논문 검색을 통해 정전기 제거장치에 대한 연구는 코로나 방전식 정전기 제거장치의 연구개발에서 연엑스선 정전기 제거장치에 대한 개발 방향으로 전환되었다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 FPD 및 반도체 공정에서 필요로 하는 성능과 기능을 구현하기 위한 연구를 중심으로 진행되었으며 연엑스선 소스를 이용하는 의료용 연엑스선 발생장치의 특허 검색결과 복수의 고전압 발생장치를 사용하는 특허와 하나의 컨트롤러에 복수개의 조사유닛을 결합하는 구성은 찾아볼 수 있었지만 해결하고자 하는 과제가 상이함을 확인할 수 있었다.

〈표 2.9〉 탄소나노튜브 연엑스선 발생장치 1:N 매칭 구성 특허검색 결과

No.	특허 출원인 (발명의 명칭)	일자	관련도	요약	비고
1	(주)선재하이테크 (복수개의 탄소나노튜브 엑스선 발생모듈 및 이 를 갖는 정전기제거장 치)	2021. 09.01	Y	한 개의 파워장치로 복수개 의 엑스선 발생 모듈을 제어 하는 것을 특징	

공개특허 10-2 021-0107246 복수개의 탄소나노튜브 엑스선 발생모듈 및 이를 갖는 정전기제거장치 특허는 한 개의 파워장치로 복수개의 엑스선 발생모듈을 제어하는 것을 특징으로 한다. 한 개의 파워장치에 복수개의 탄소나노튜브를 이용한 엑스선 발생모듈들을 병렬로 연결하여 복수개의 엑스선 발생모듈들을 제어할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하는 복수개의 탄소나노튜브 엑스선 발생모듈 및 이를 갖는 정전기 제거장치를 제공하는 것이다.

복수개의 탄소나노튜브 엑스선 발생모듈 및 이를 갖는 정전기제거장치 특허는 (주)선재하이테크에서 출원한 특허로 저전력 연엑스선 정전기 제거장치를 기술사업화 하는 특허 출원인과 동일하다. 문헌적으로 저전력 연엑스선 정전기 제거장치에서 해결하고자 하는 과제해결 원리가 일부 포함되어 있어 특허출원을 위한 기술적 진보성은 갖추지 못했지만 선행특허를 통해 기술을 보호받을 수 있다.

본 연구에서 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발을 통해 해결하고자 하는 과제는 FPD 산업과 반도체 산업 그리고 고급 필름산업에서 사용량과 비중이 증가하고 있는 연엑스선 정전기 제거장치의 소비전력을 감소시키는데 있다. 에너지 효율을 상승시킬 수 있는 연엑스선 정전기 제거장치의 개발은 ESG 경영 및 탄소중립 정책에 적극적으로 반영될 수 있다. 따라서 연엑스선 정전기 제거장치의 기능 및 성능을 개선하기 위한 기존 연구에 비해 가치있고 차별화 된다.

Ⅲ. 연구방법

본 연구의 목적을 달성하기 위해 고전압 발생장치 1개에 연엑스선관 2개를 직렬구성으로 연결하여 시제품으로 제작해서 소비전력의 변화와 주요 성능변화를 살펴보고자 한다. 시제품에 대한 정량적인 평가는 국제규격(IEC 61340-5)에 기준에 따라 정전하 감쇠 시간 측정(Decay Time), 이온밸런스(Ion Balance)를 중심으로 측정하고, 장기 수명평가와 환경평가는 KS규격에 따랐다. 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 기술사업화 타당성에 대한 평가는 BMO(Bruce Merrifield -Ohe) 이론을 적용하여 검증하고자 한다.

1. 실험모형

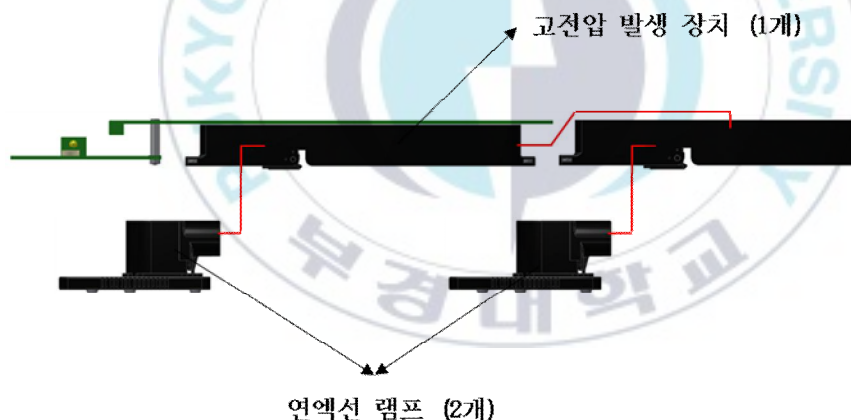
(1) 제품의 설계

본 연구목적은 연엑스선 정전기 제거장치의 전원공급장치 1개와 연엑스선관 1개의 연결구성을 1개의 전원공급장치에 다수의 연엑스선관을 직렬로 연결함으로써 소비전력을 낮출 수 있는지 검증하기 위함이다. 이러한 연구목적을 달성하기 위해 먼저 램프 형태의 전기적 연결 구성에 대한 선행개발로 이춘석(2011)은 램프(LED) 구동설계를 위한 효율적인 구조설계에서 직렬 및 병렬연결 구성의 장·단점에 대한 연구를 살펴 보았으며, 이승원 등(2003)의 직렬연결 방식을 이용한 통합 조명 제어 시스템에서 여러 개의 램프(조명)을 원하는 대로 제어할 수 있는 시스템 구현에 대해 살펴보았다.

그리고 연엑스선 정전기 제거장치와 관련하여서는 이수환·이동훈

(2018)의 선량 중첩을 이용한 멀티형 연 X-선 정전기 제거장치의 개발에 관한 연구를 참고하여 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 전원연결 구성을 직렬연결로 구성하였다. 공개특허 10-2 021-0107246에서 한 개의 파워장치에 복수개의 탄소나노튜브를 이용한 엑스선 발생모듈들을 병렬로 연결하여 복수개의 엑스선 발생모듈들을 제어할 수 있도록 하는 기술적 사상을 바탕으로 하나의 고전압 발생장치에 다수의 연엑스선 램프를 연결하는 구성의 제품 구상을 확정하였다.

본 연구를 위한 연엑스선 정전기 제거장치의 설계 구상도는 <그림 3.1>과 같이 연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결구성을 고전압 발생장치 1개에 연엑스선 램프 2개를 직렬로 연결하는 것으로 설계하였다.



<그림 3.1> 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결 구성

(2) 연구결과 예측

1) 연엑스선 매칭 조건이 소비전류에 미치는 영향

연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결 구성은 1개의 고전압 발생 장치에 여러 개의 연엑스선관을 연결할 수 있다는 개념으로 접근하였다. 1:1의 전기적 연결 구성 대비 1:2 연결 구성은 1개의 연엑스선 고전압 발생 장치 1개를 사용하지 않아도 되어 고전압 발생 장치 자체 소비전력을 감소시킬 수 있을 것으로 추정하였고 다음과 같은 연구결과를 예측할 수 있다.

① 1개의 고전압 발생 장치에 연엑스선관 연결 수량을 증가시키면 전

체 소비전력 감소에 양(+)의 영향을 미칠 것이다.

② 이때, 연엑스선 정전기 제거장치의 성능에는 변화가 없을 것이다.

2) 고전압 발생 장치 출력 조건이 소비전류에 미치는 영향

연엑스선 정전기 제거장치의 연엑스선관에서 엑스선을 발생시키기 위해서는 고전압 발생 장치에서 관전압과 관전류를 연엑스선관에 공급해야 한다. 이때, 관전압과 관전류의 출력을 상승시키면 연엑스선 정전기 제거장치의 성능은 상승되는 효과는 있지만 소비전력은 증가하게 될 것이다. 따라서 고전압 발생 장치 출력 조건은 소비전력에 영향을 미칠 것으로 추정되며 다음과 같은 연구결과를 예측할 수 있다.

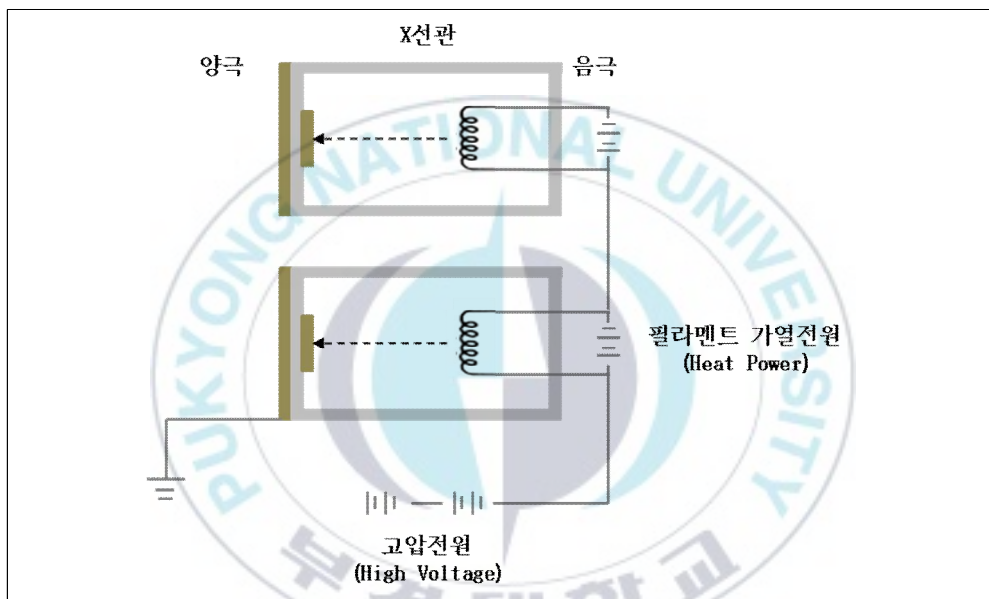
① 고전압 발생 장치의 관전압 상승은 소비전력 감소에 음(-)의 영향을 미칠 것이다.

② 고전압 발생 장치의 관전류 상승은 소비전류 감소에 음(-)의 영향을 미칠 것이다.

(3) 연구결과 측정

1) 1:N 매칭 조건별 특성

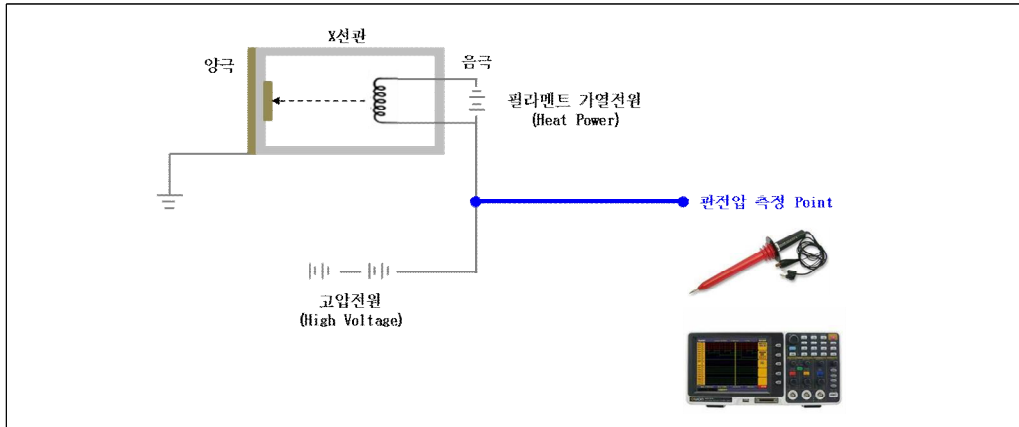
<그림 3.2>와 같이 구성하여 고전압 발생 장치 1개에 연엑스선 램프를 1개 또는 2개를 연결하여 조건별 특성을 측정하였다.



<그림 3.2> 연엑스선 정전기 제거장치 1:N 매칭 조건별 특성 측정

2) 관전압(X-ray tube voltage)

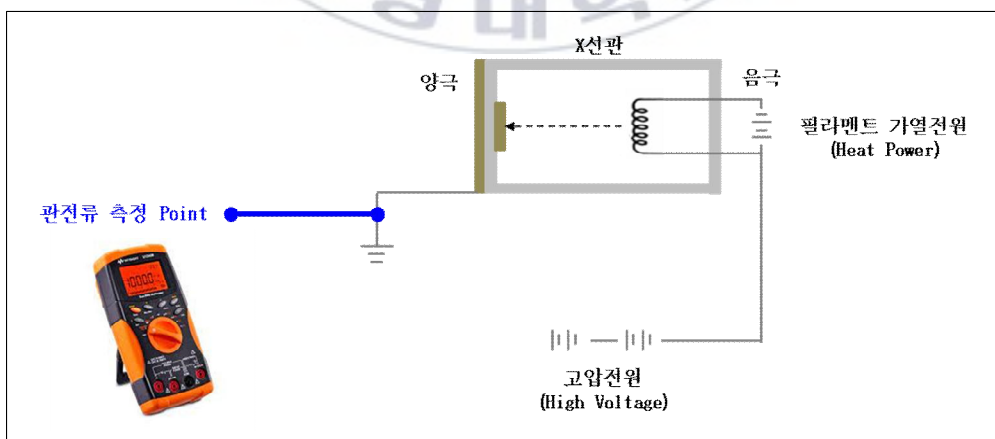
엑스선관에 인가되는 관전압은 연엑스선 정전기 제거장치의 에너지를 결정하게 된다. 본 연구에서는 관전압을 4.98kV로 설정하였고 <그림 3.3>과 같이 구성하여 관전압을 측정하였다.



<그림 3.3> 연엑스선 정전기 제거장치 관전압 측정

3) 관전류(X-ray tube current)

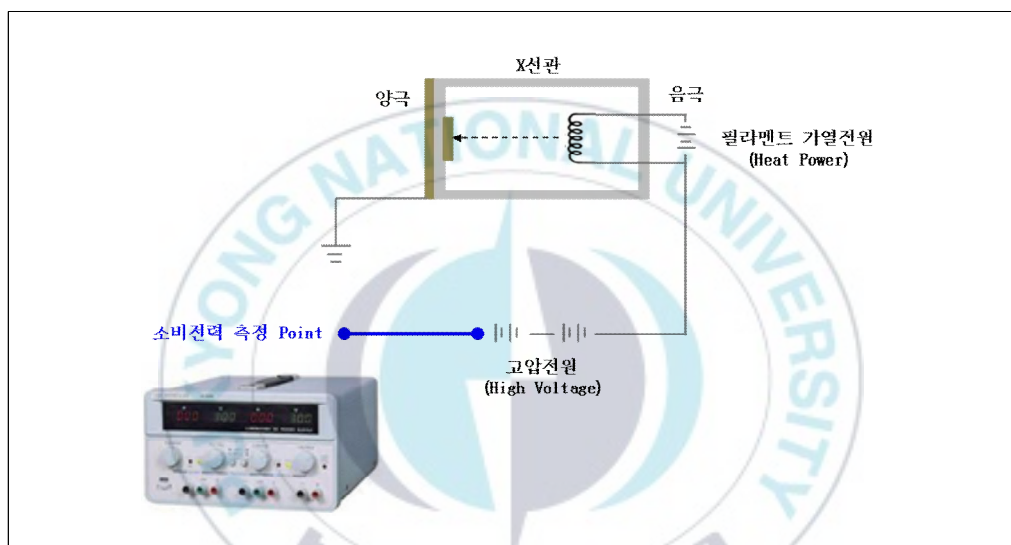
엑스선관에 인가되는 관전류는 단위 시간당 전자가 이동하는 양으로 필라멘트 저항이 동일한 조건일 때, 관전류가 높으면 엑스선관에서 발생하는 X선량은 증가하게 되는데 본 연구에서는 관전류를 600uA 설정하였고 <그림 3.4>와 같이 구성하여 관전류를 측정하였다.



<그림 3.4> 연엑스선 정전기 제거장치 관전류 측정

4) 소비전력

연엑스선 정전기 제거장치가 정상적으로 동작하기 위해 공급되어야 하는 시간에 따른 전기 에너지를 소비전력으로 공급되는 실제 전력을 측정 하였다. 소비전력 측정 도구 및 방법은 <그림 3.5>와 같이 구성하였다.

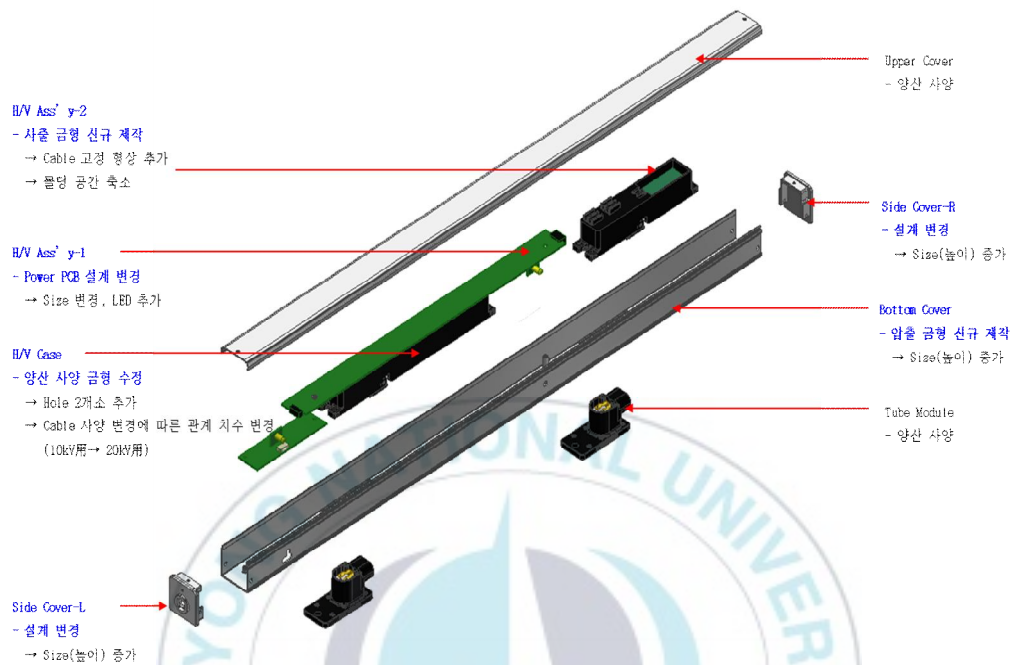


<그림 3.5> 연엑스선 정전기 제거장치 소비전력 측정

(4) 연구대상과 자료 분석 방법 (시제품의 구조)

1) 시제품 부분 전개도

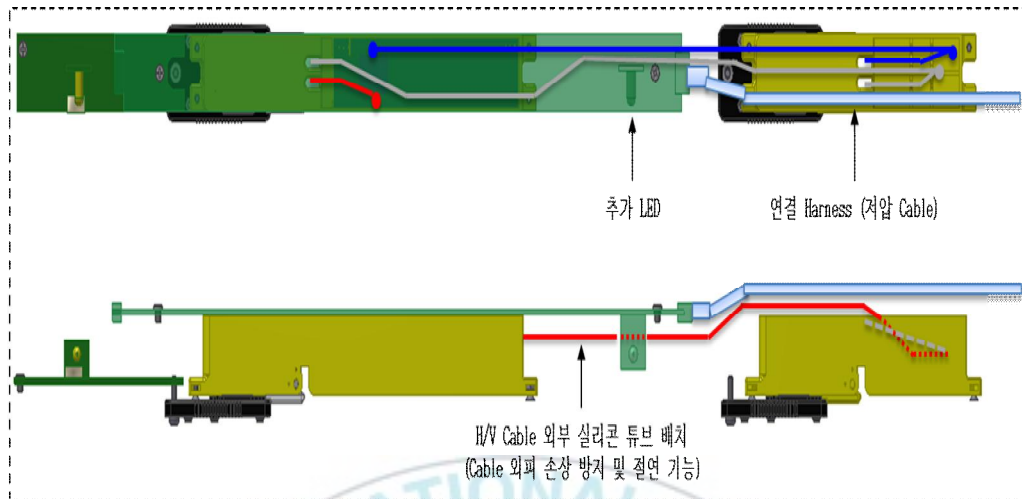
시제품이 제작은 기존제품을 기초로 <그림 3.6>과 같이 설계하였으며 주요 구성은 몸체를 구성하고 있는 막대형태의 몸통부와 고전압 발생장치, 연엑스선관 모듈, 컨트롤 PCB(Printed Circuit Board, 인쇄 회로기판)로 하였다. 외관은 동일하되 내부는 고전압 발생장치 1개에 2개의 연엑스선관을 전기적으로 직렬 연결하는 것을 특징으로 한다.



〈그림 3.6〉 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품 전개도

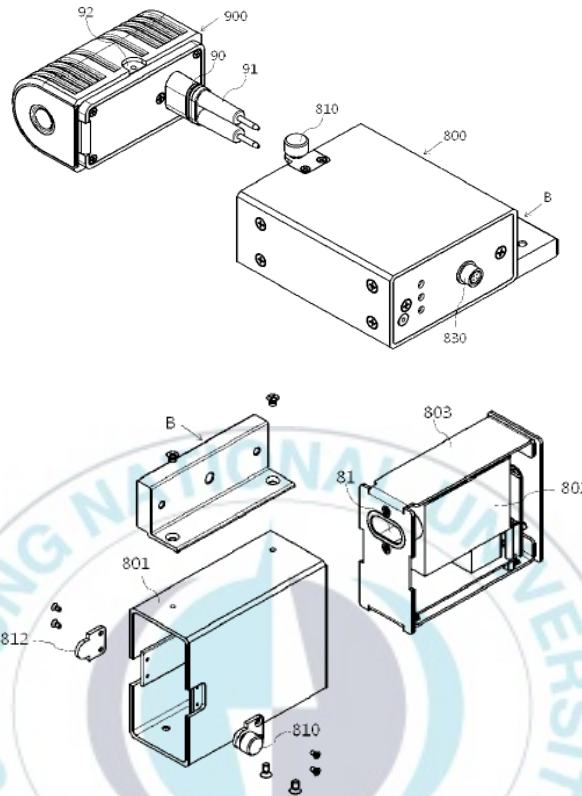
2) 시제품의 전기적 연결 구조

소비전력을 낮추기 위해 고전압 발생장치 1개에 2개의 연엑스선관을 전기적으로 연결하는 연결구조는 <그림 3.7>과 같다.



<그림 3.7> 연엑스선관 직렬 구성 간략도

<그림 3.7>과 같이 고압선과 저압선의 교차가 발생하지 않도록 조치하여 전기적으로 연결하였고 연엑스선관은 <그림 3.8>과 같이 유지보수가 용이하도록 탈부착이 가능한 분리형 구조를 채택하였다.



<그림 3.8> 연엑스선 발생부 및 고전압 발생부 탈착구조

2. 실험장치

(1) Test Chamber

코로나 방식의 정전기 제거장치와 달리 연엑스선 정전기 제거장치는 방사선 발생장치로 사용 및 취급을 위해 원자력안전법에 의해 관리되고 있다. 특히, 방사선 발생장치의 사용을 위해서는 반드시 인체에 피폭되지 않도록 안전을 위한 차폐조치를 하도록 규정하고 있으며 원자력안전위원회고시 제2019-10호 제13조 차폐물의 설계기준에

따르면 방사선방호를 위해 차폐벽이나 차폐물에 대한 설계기준을 규정하고 있다.

- ① 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소는 연간 방사선 량이 20mSv를 초과하지 아니하여야 하고 1주당 방사선량은 1mSv를 초과하지 아니하여야 한다.
- ② 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량 이 1mSv를 초과하지 아니하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1mSv를 초과 하지 않아야 한다.

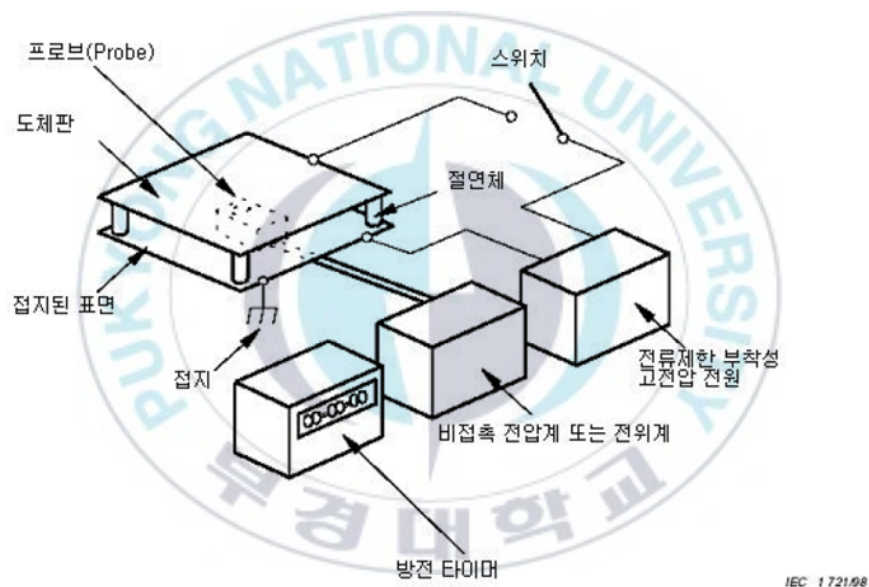
<그림 3.9>는 연엑스선 정전기 제거장치 성능측정을 위해 안전하게 차폐된 챔버(Chamber) 로 작업자를 보호하기 위해 방사선 누설이 없도록 차폐되어 있다.



<그림 3.9> 연엑스선 정전기 제거장치 성능측정을 위한 차폐 챔버

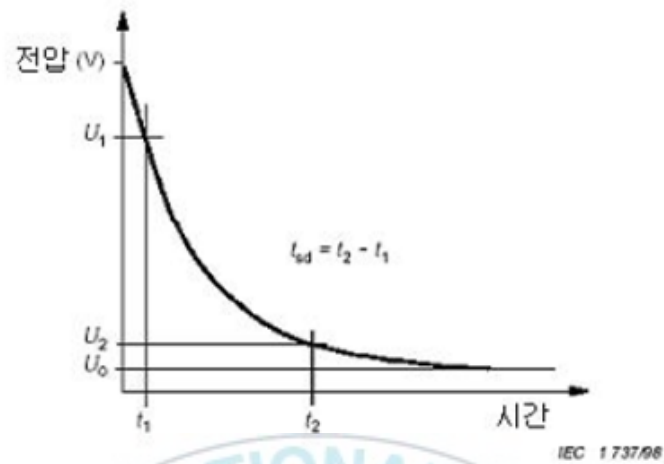
(2) CPM(Charged Plate Monitor)

정전기 제거장치의 성능을 측정하는 장치로 금속 플레이트(Plate)에 1000V를 인가해서 100V까지 인가된 전압이 감쇠하는 시간(제전성능, Decay Time)을 측정하는 장치이다. IEC 규격에서 권장하는 플레이트의 크기는 가로 15cm × 세로 15cm 로 자체 정전용량은 15pF이며, 회로 전체 정전용량은 $20 \pm 2\text{pF}$ 이고 CPM의 구성은 <그림 3.10>과 같이 구성되어 있다.



<그림 3.10> CPM 구성

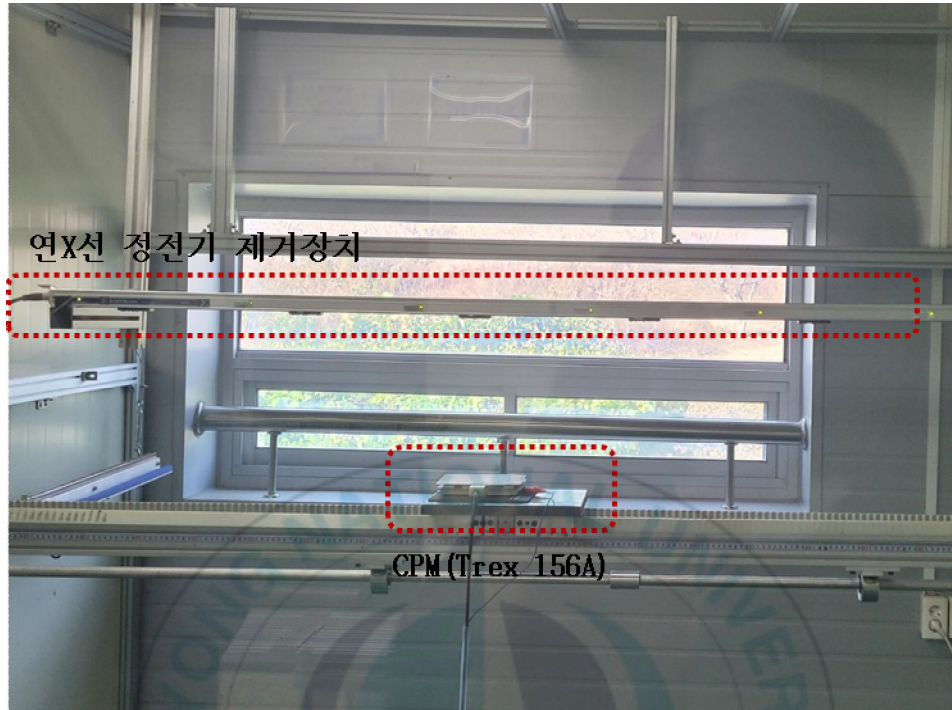
<그림 3.11>은 CPM을 이용하여 연엑스선 정전기 제거장치의 정전하 감쇠시간을 측정하는 측정법에 대한 설명으로 노출된 금속 플레이트 상의 초기 전압 전위 U_1 이 목표로 하는 저전압 전위 U_2 까지 감소하는 시간을 설명하고 있다. 본 연구에서는 U_1 을 1000V, U_2 를 100V로 설정하였다.



<그림 3.11> 정전하 감쇠 시간(Decay Time)

CPM을 이용하여 정전기 제거장치의 성능을 측정할 수 항목은 (+),(-) 제전성능, 이온밸런스, 피크전압(Peak Voltage) 등이 있으며, 본 연구에서는 제전성능과 이온밸런스를 측정하는 것으로 실험 조건을 설정하였다.

본 연구에서 사용된 CPM은 Trek 156A 모델을 이용하여 측정하였으며, 구성 시스템은 <그림 3.12>와 같이 연결하여 구성하였다.



〈그림 3.12〉 연엑스선 정전기 제거장치와 CPM 연결 구성

구성은 상부에 연엑스선 정전기 제거장치를 장착하였으며 아래쪽에 CPM을 위치시켜 X,Y축으로 이동시킬 수 있도록 구성하였다.

(3) 기타 실험장치

기타 실험장치는 관전압 및 관전류를 측정하기 위한 장치로 구성하였으며 방사선량을 측정하기 위한 장치는 실험자가 방사선에 노출되지 않도록 안전을 확인하기 위한 장치로 구성하였다.

〈표 3.1〉 기타 실험장치

실험장치	용도
	
Red Eye B20	Digital Oscilloscope
	
High Voltage Probe	DC Power Supply
	
Digital Multimeter	MH Timer

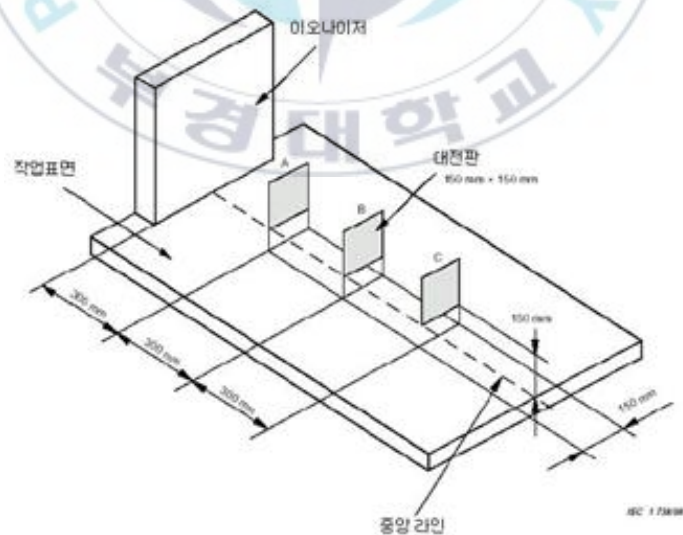
3. 기술개발의 신뢰성 확보 및 평가

(1) 성능평가

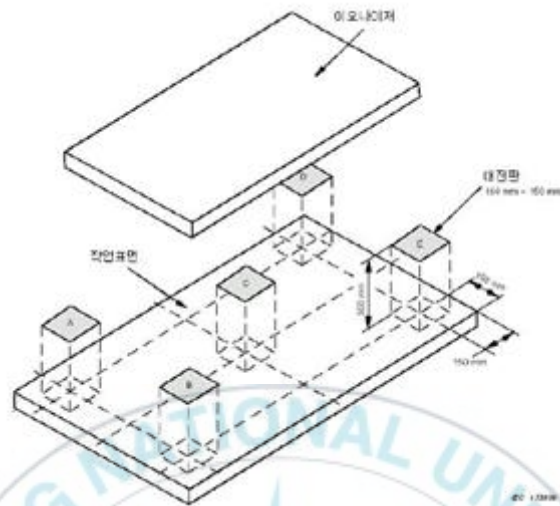
본 연구에서 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 성능평가 기준은 IEC KS C 61340-5-2 기준에 따라 진행하였으며, 정전하 감쇠시간과 이온밸런스를 측정하였다.

1) 모니터의 측정 위치

연엑스선 정전기 제거장치의 성능평가를 위한 모니터의 측정 위치는 수평 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치와 수직 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 모니터의 측정 위치는 수평 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치를 기준으로 <그림 3.13>과 같이 300mm, 600mm, 900mm로 두고 측정하였다.



<그림 3.13> 수평 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치



〈그림 3.14〉 수직 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치

수직 사용 시의 대전판 모니터의 측정 위치를 기준으로 〈그림 3.14〉와 같이 측정하며, 본 연구에서는 수평사용을 기준으로 측정하였다.

2) 정량적 평가항목 선정

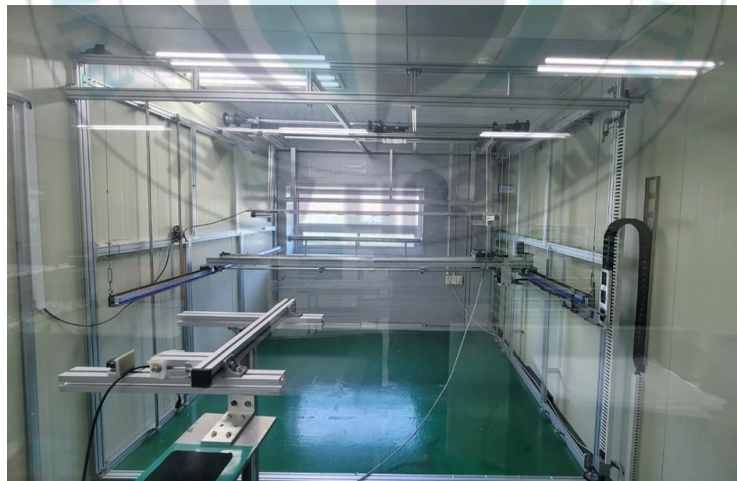
본 연구에서 연엑스선 정전기 제거장치의 정량적 평가항목은 이온화판의 제전성능을 나타내는 제전시간과 이온밸런스로 선정하였다.

- ① 제전시간 : CPM의 플레이트에 발생시킨 모의 정전기 (+), (-)1000[V]를 (+), (-)100[V] 까지 저감(감쇠) 시키는데 걸리는 시간
- ② 이온밸런스 : 정전기 제거장치로부터 발생한 이온에 의해 대전되는 (+) 또는 (-) 로 치우친 전압의 크기

2) 장기수명 평가

연엑스선 정전기 제거장치에 적용되는 연엑스선관은 백열전구와 같이 내부 진공상태에서 필라멘트(Filament)의 저항에 의해 열전자가 발생하게 된다. 따라서 연엑스선 정전기 제거장치의 필라멘트의 수명이 실제 수명을 결정하게 되며 장기수명 평가의 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 실제 수명을 확인하기 위한 평가를 진행하였고 수명은 정격전압으로 연엑스선 정전기 제거장치를 동작시켜서 필라멘트가 끊어질 때까지의 실제 가동된 시간을 측정하였다. 기타 시험 조건은 백열전구(일반조명용) KSC-7501에서 정하는 시험조건을 따랐다.

<그림 3.15>는 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 장기수명 평가를 진행하고 있는 차폐 챔버 내부의 모습이다.



<그림 3.15> 성능평가를 위한 방사선 차폐 챔버

(3) 환경시험 평가

본 연구에서 정전기 제거장치의 내구성을 평가하기 위한 규격은 KS C IEC60068-2 기본 환경시험 절차에 따라 진행하였다. 연엑스선 정전기 제거장치에 대한 환경시험 평가 기준은 별도로 찾아볼 수 없었고 가장 유사한 전자제품을 기준으로 <표 3.2>와 같이 고온고습 동작 시험, 온습도 사이클 시험, 저온시험 및 고온시험, 자유낙하 시험, 진동 시험, 열충격 시험으로 평가를 진행하였다.

<표 3.2> IEC 규격에 의한 시험평가 항목 및 조건

시험 규격	시험 항목	시험 조건	시험기간
IEC60068-2	고온 고습 동작 시험	· 온도 : 50 [°C] · 시간 : 96 [Hr] · Cycle : 1 Cycle · 습도 : 85[%] · 동작 : Power On · 장비 : 항온항습기	시험 : 4일 후열 : 2Hr 방치 : 1일
	온습도 사이클 시험	· 온도 : 25 [°C] ~ 55 [°C] · 습도 : 95[%] · 시간 : 3[Hr](25°C) - 3[Hr](온도변화) - 3[Hr](55°C) - 3[Hr](온도변화) · 동작 : Power Off · Cycle : 8Cycle · 장비 : 항온항습기	
	저온 시험	· 온도 : 0 [°C] · 시간 : 96 [Hr] · Cycle : 1 Cycle · 습도 : 0[%] · 동작 : Power Off · 장비 : 항온항습기	
	고온 시험	· 온도 : 60 [°C] · 시간 : 96 [Hr] · Cycle : 1 Cycle · 습도 : 0[%] · 동작 : Power Off · 장비 : 항온항습기	
	자유낙하 시험	· 위치 : 단단한 평면 혹은 바닥 · 시험 화물의 무게(Kg)에 따른 낙하 높이 기준 - 0 이상 10Kg 미만 : 760mm - 10 이상 19Kg 미만 : 610mm · 주파수	1일
	진동 시험	· Bracket 적용 제품 : 10-30-10[Hz] · Stand Knob 적용 제품 : 10-20-10[Hz] · 시간 : 각 1 [Hr] / X, Y, Z축 · Cycle : 60Cycle · 동작 : Power Off · 장비 : 진동 시험기	2일
	열충격 시험	· 온도 : 0 [°C] ~ 60 [°C] · 습도 : 0[%] · 시간 : 1[Hr](0°C) - 3[Min](온도변화) - 1[Hr](60°C) - 3[Min](온도변화) · 동작 : Power Off · Cycle : 12Cycle · 장비 : 열충격 시험기	2일

4. 사업 타당성 평가

저전력 연엑스선 정전기 제거장치에 대한 기술사업화를 위한 타당성 평가는 미국 펜실베이니아 대학 와튼스쿨(Wharton School of the University of Pennsylvania)에서 개발한 BMO(Bruce Merrifield-Ohe)틀에 따라 평가하였다.

〈표 3.3〉 사업 타당성 평가표

사업성 (120)					
사업매력도(60)			자사 적합도 (60)		
사업 진입의 매력이 있는가?			진입 사업의 자사 적합성이 있는가?		
No.	항목	평가	No.	항목	평가
1	매출이익 가능성		1	필요한 자금 대응력	
2	성장 가능성		2	마케팅 능력	
3	경쟁 상황		3	제조 및 운영력	
4	위험 분산도		4	기술력 및 고객 서비스 능력	
5	업계 재구축 가능성		5	원재료/부품/정보 입수력	
6	특별한 사회적 상황		6	경영지원	
합계			합계		
합산(사업매력도 + 자사 적합도)					

(1) 사업매력도

1) 매출이익 가능성

매출이익 가능성은 제품출시 5년 후의 추정시장 규모와 매출액 영업이익률을 기준으로 <표 3.4>, <표 3.5>를 기준으로 평가하였다.

<표 3.4> 제품출시 5년 후의 추정시장 규모

1점	2점	3점	4점	5점
1억 미만	10억~15억	15~20억	20~30억	30억 이상

<표 3.5> 매출액 영업이익률

1점	2점	3점	4점	5점
5% 미만	5~10%	10~15%	15~20%	20% 이상

2) 성장 가능성

성장 가능성에 대한 평가는 시장 진입 후 5년간 평균 시장의 성장률과 추정시장의 시장 점유율을 <표 3.6>, <표 3.7>의 기준으로 평가하였다.

<표 3.6> 시장 진입 후 5년간 평균 시장 성장률

1점	2점	3점	4점	5점
5% 미만	5~10%	10~15%	15~20%	20% 이상

〈표 3.7〉 추정 시장 점유율

1점	2점	3점	4점	5점
5% 미만	5~10%	10~15%	15~20%	20% 이상

3) 경쟁상황

경쟁상황에 대한 평가는 선발기업과 예상 진입기업의 대응력 강도와 특허 및 상품에 의한 방어 가능성에 대해 〈표 3.8〉, 〈표 3.9〉 기준으로 평가하였다.

〈표 3.8〉 선발기업과 예상 진입기업의 대응력 강도

1점	2점	3점	4점	5점
선발기업 선점	강한편	중간정도	약한편	선발기업 없음

〈표 3.9〉 특허 및 상품에 의한 방어 가능성

1점	2점	3점	4점	5점
특허 미보유	출원 중	실용신안 상표등록	관련 특허보유	강력한 특허보유

4) 위험 분산도

위험 분산도에 대한 평가는 정성적인 평가로 제조설비 및 개발기술에 대한 응용 분야가 몇 개가 되는지를 기준으로 〈표 3.10〉에 따라 평가하였다.

〈표 3.10〉 위험 분산도 평가

2점	4점	6점	8점	10점
1개분야	2개분야	3개분야	4개분야	5개분야

5) 업계 재구축 가능성

업계 재구축 가능성에 개발기술의 혁신적인 강도에 따라 〈표 3.11〉와 같이 정전기 제거장치 시장을 기준으로 평가 하였다.

〈표 3.11〉 업계 재구축 가능성 평가

3점	6점	10점
단순 개선(개량) 수준	제품 및 판매전략 혁신을 초래할 가능성이 예상	업계 판도를 변화시키거나 시장 구조를 파괴할 수준

6) 특별한 사회적 상황

특별한 사업적 상황은 글로벌 경쟁력 확보를 기준으로 〈표 3.12〉의 기준에 따라 ESG 및 탄소중립을 중심으로 사회적 상황을 반영하여 평가 하였다.

〈표 3.12〉 특별한 사회적 상황

3점	6점	10점
환경오염 증가 에너지 사용량 증가	글로벌 공급에 마찰없음 에너지 절감	사회환경적으로 환영 (ESG, 탄소중립정책)

(2) 자사적합도

자사 적합도 평가는, 1) 필요한 자금 대응력, 2) 마케팅 능력, 3) 제조 및 운영력, 4) 기술력 및 고객 서비스 능력, 5) 원재료/부품/정보 입수력, 6) 경영지원 부분으로 나뉘어 평가하였으며 세부 내용은 <표 3.13>과 같다.

<표 3.13> 자사적합도 평가 항목

항목	2점	4점	8점	10점
필요한 자금 대응력	부족/소극적	부족/적극적	충분/소극	충분
마케팅 능력	없음	신규 팀 구축	일부 충원	현 조직 적용가능
제조 및 운영력	없음	일부 신규라인 구축 필요	변경 및 증설	현시설 적용가능
기술력 및 고객 서비스 능력	없음	기존 기술 및 서비스망 대폭 수정	기존 기술 및 서비스망 일부 수정	자체기술 및 서비스망 구축
원재료/부품/정보 입수력	신규구축	일부 신규구축	기존 네트워크	기존 강력한 네트워크
경영지원	기대 없음	추가설득 필요	강력한 사업 추진인원 있음	CEO 충분한 지원

(3) 사업성

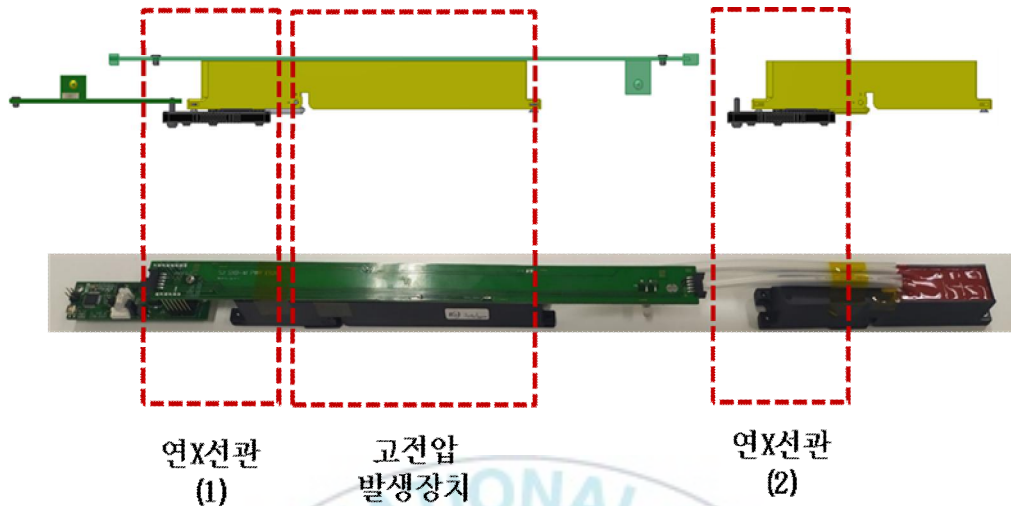
사업매력도와 자사적합도의 합산이 80점 이상인지 확인하고 80점 이상일 경우 사업화 추진을 결정하는 것으로 사업성을 평가하였다.

IV. 실험결과

저전력 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 연구결과 1개의 고전압 발생 장치에 2개의 연엑스선관을 연결하여 기존제품과 비교한 결과 소비전력이 감소하였다. 그리고 고전압 발생 장치 1개에 1개의 연엑스선관을 연결한 제품과 제전성능과 이온밸런스 및 장기수명에서 변화가 없다는 실증 데이터는 기존 연엑스선 정전기 제거장치를 대체할 수 있는 성능과 기능을 구현할 수 있다. 그리고 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 기술사업화 타당성에 대한 BMO 평가결과 사업화를 추진하는데 적합하다는 실험결과를 도출하였다.

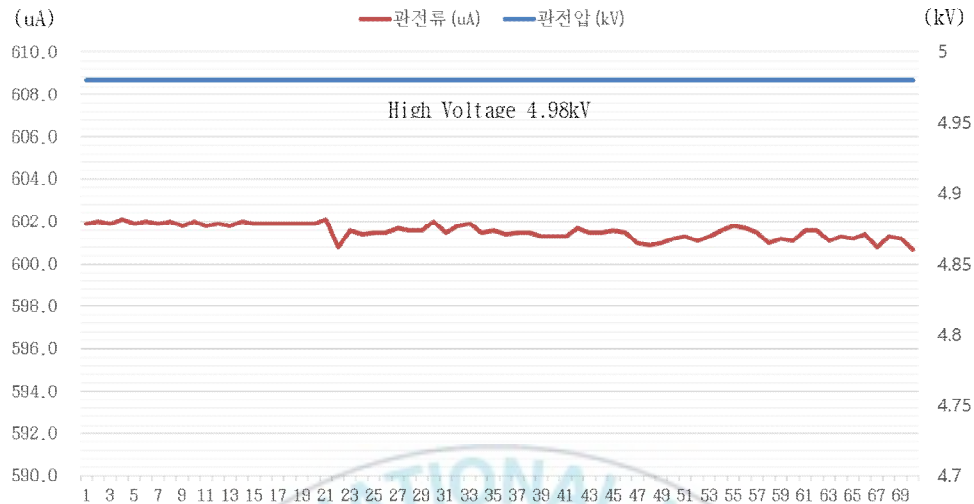
1. 성능에 대한 실험결과

본 연구를 통해 제작된 시제품은 <그림 4.1>과 같이 제작되었으며 평가는 고전압 발생 장치 1개에 연엑스선관 2개를 직렬로 전기적으로 연결한 제품으로 진행하였다.



〈그림 4.1〉 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품

관전압 및 관전류에 대한 전기적 연결구성의 안정성을 확보하기 위한 출력 테스트를 진행하였고 〈그림 4.2〉와 같이 1350시간 동안 관전압은 초기 세팅 값 4.98kV를 유지하였고 관전류는 초기 602uA 에서 600uA 사이의 안정적인 출력을 확인하였다.



〈그림 4.2〉 시제품의 관전압 및 관전류 출력 테스트

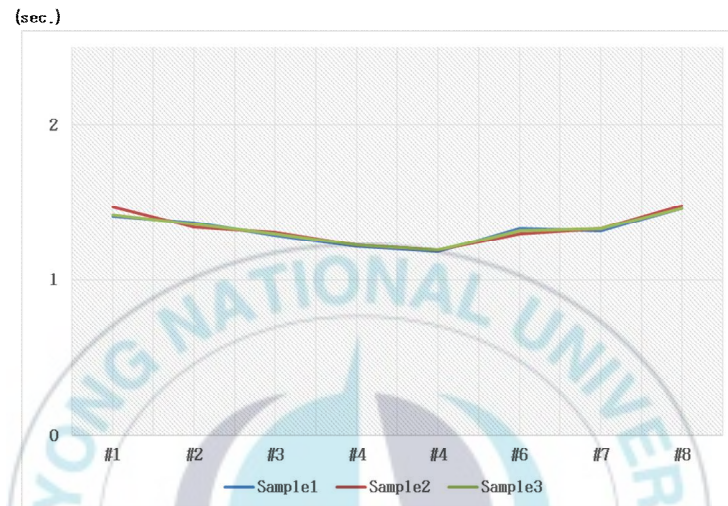
시제품의 관전압과 관전류는 기존 사양과 동일한 고전압 발생장치로 출력을 일정하게 유지 시키기 위한 회로가 구성되어 있어 관전압 및 관전류에 대한 전기적 연결구성의 안정성을 확보하기 위한 출력 테스트는 실험변수에서 제외하였다.

(1) 제전성능

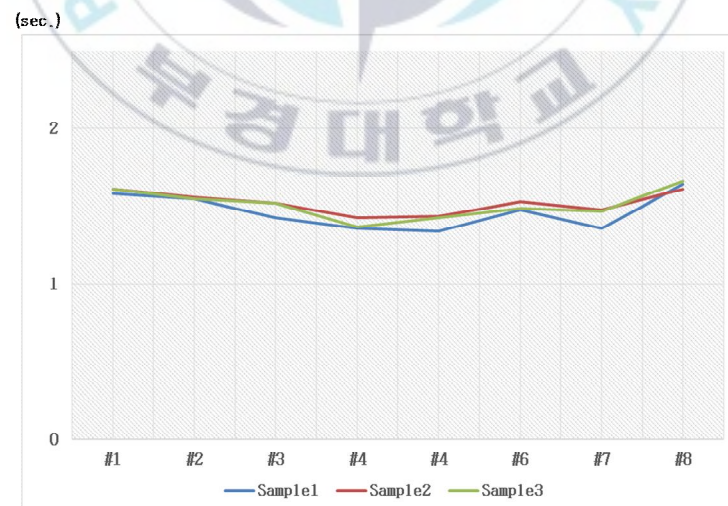
본 연구에서 제작된 시료는 관전압이 5kV 이하 사양은 300mm 전·후의 근거리 정전기 제거장치로 사용된다. 따라서 600mm, 900mm 이격 조건에서의 평가는 IEC KS C 61340-5-2 기준에 따라 성능평가를 진행하였으며, 600mm, 90mm 이격 조건에서의 이온밸런스 데이터는 분석에서 제외하였다.

1) 300mm 이격 제전성능 측정결과

<그림 4.3>과 <그림 4.4>는 300mm 이격 거리에서 측정한 (+),(-) 제전성능 측정결과이다.



<그림 4.3> 300mm 이격 거리에서 측정한 (+)Decay Time

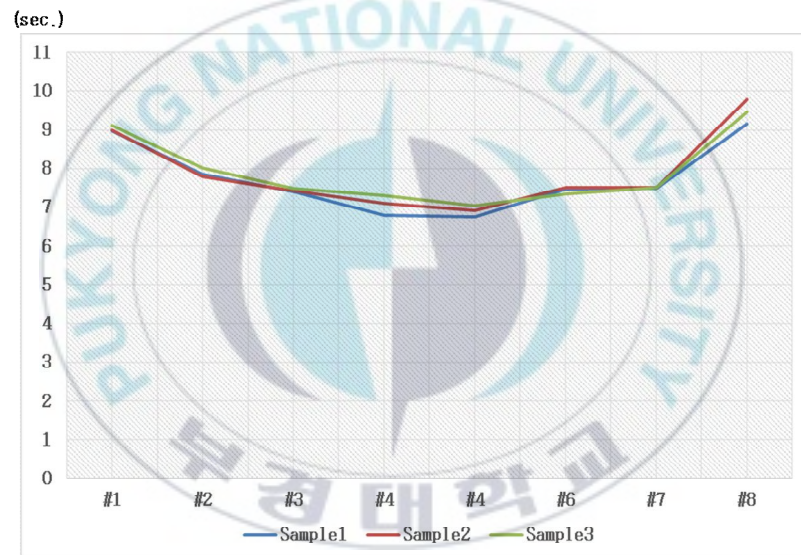


<그림 4.4> 300mm 이격 거리에서 측정한 (-)Decay Time

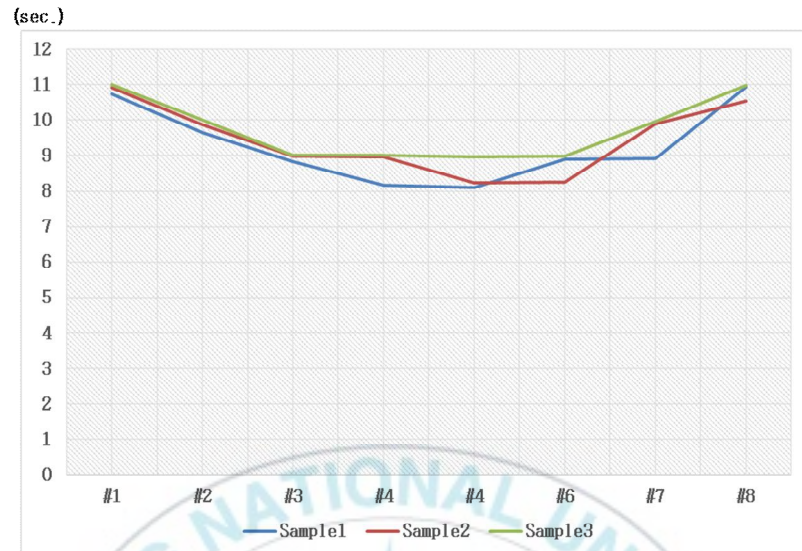
300mm 이격 제전성능 결과는 (+),(-) 제전시간이 2초 이내로 안정적으로 측정되었으며, 양쪽 끝단에서 성능이 일부 떨어지는 현상은 중앙에 위치한 연엑스선관과 달리 연엑스선 선량이 중첩되지 않기 때문으로 해석된다.

2) 600mm 이격 제전성능 측정결과

<그림 4.5>와 <그림 4.6>은 600mm 이격 거리에서 측정한 (+),(-) 제전성능 측정결과이다.



<그림 4.5> 600mm 이격 거리에서 측정한 (+)Decay Time

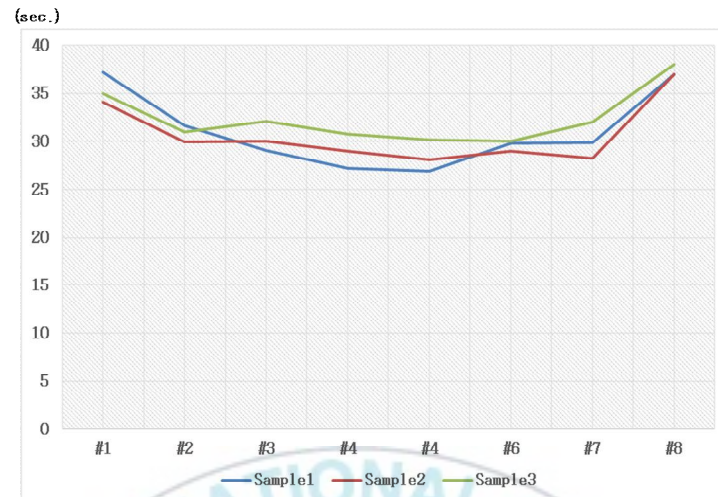


<그림 4.6> 600mm 이격 거리에서 측정한 (-)Decay Time

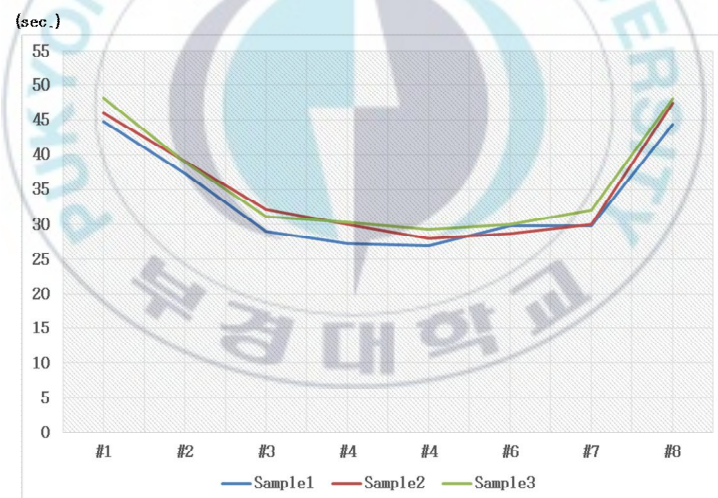
600mm 이격 제전성능 결과는 (+),(-) 제전시간이 8초에서 11초로 측정되었으며, 양쪽 끝단에서 성능이 일부 떨어지는 현상은 300mm 에서 확인된 현상과 동일하게 해석된다.

3) 900mm 이격 제전성능 측정결과

<그림 4.7>과 <그림 4.8>은 900mm 이격 거리에서 측정한 (+),(-) 제전성능 측정결과이다.



<그림 4.7> 900mm 이격 거리에서 측정 한 (+)Decay Time



<그림 4.8> 900mm 이격 거리에서 측정 한 (-)Decay Time

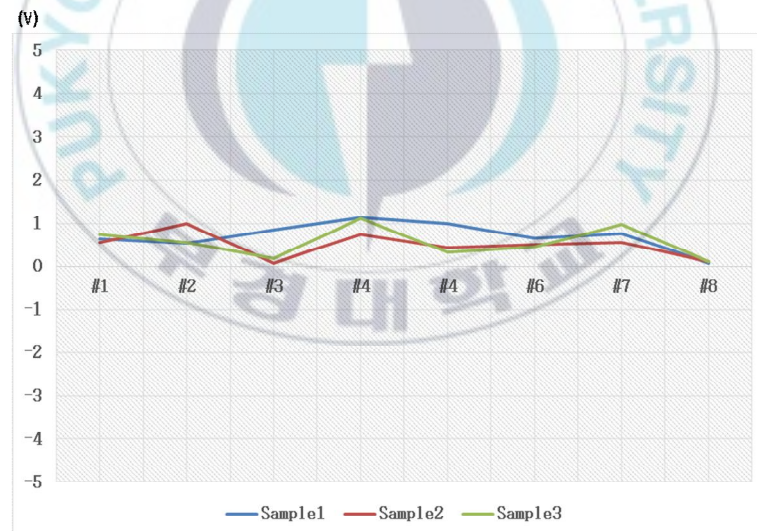
900mm 이격 제전성능 측정결과 (+),(-) 제전시간은 30초에서 50초로 측정되었으며, 적용할 수 없는 유효하지 않은 제전성능으로 측정된 데이터는 분석에서 제외 하였다.

(2) 이온밸런스(Ion Balance)

시제품 연엑스선 정전기 제거장치의 거리별 이온밸런스 측정결과 300mm 이격 조건에서 최대 $\pm 2V$ 이내로 매우 안정적임을 확인할 수 있었다. 600mm와 900mm에서 측정된 이온밸런스 값은 연엑스선 정전기 제거장치의 성능이 미치지 못하는 영역으로 실제 적용 공정에서는 채택될 수 없는 무의미한 데이터로 성능산포에 대한 참고 데이터로 제한하여 활용 하였으며 분석에서는 300mm 이격 이온밸런스 측정결과만 채택하였다.

1) 300mm 이격 이온밸런스 측정결과

<그림 4.9>은 300mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance 결과이다.

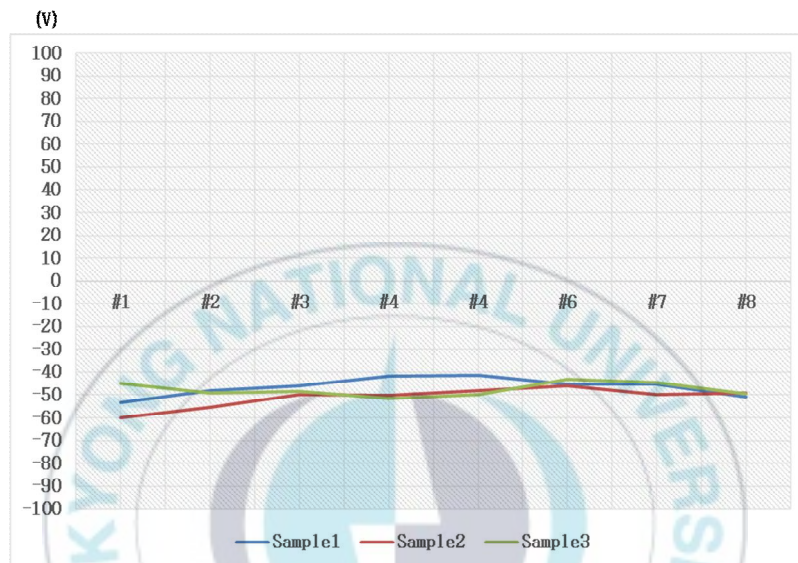


<그림 4.9> 300mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance

300mm 이격 거리에서 이온밸런스는 0~1V 수준으로 계측기 오차 및 외부환경을 반영하면 이론상 (+),(-) 이온량은 동일 하다고 해석된다.

2) 600mm 이격 이온밸런스 측정결과

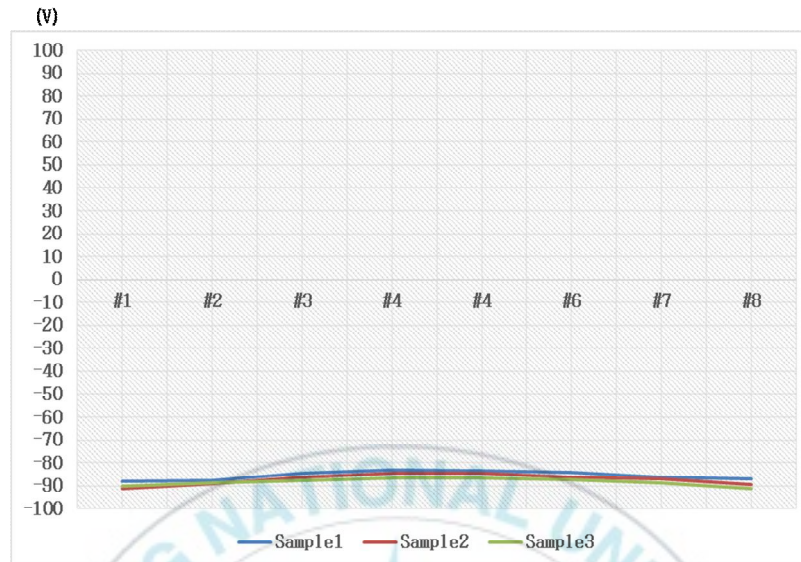
<그림 4.10>은 600mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance 결과이다.



<그림 4.10> 600mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance

3) 900mm 이격 이온밸런스 측정결과

<그림 4.11>은 900mm 이격 거리에서 측정한 Ion Balance 결과이다.



<그림 4.11> 900mm 이격 거리에서 측정 한 Ion Balance

600mm, 900mm 이격 거리에서 측정된 데이터는 분석에서 제외하였다.

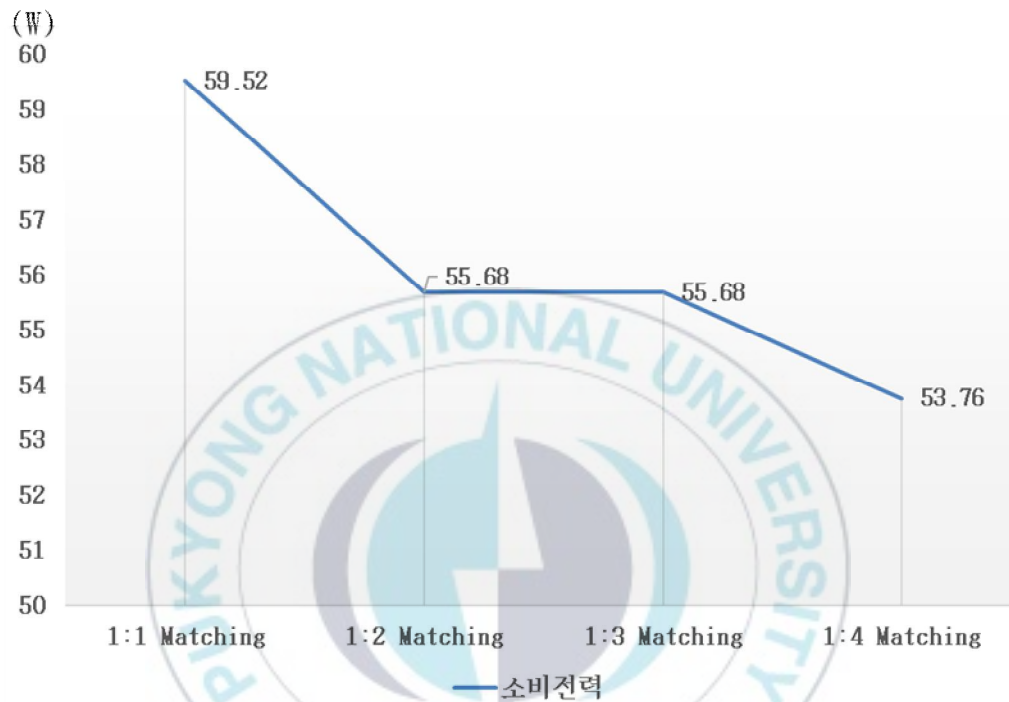
2. 소비전력에 대한 실험결과

연엑스선 정전기 제거장치의 소비전력은 매칭 조건에 따라 동작을 정상적으로 수행하기 위해 공급되는 시간에 따른 전기 에너지이다. 연엑스선 정전기 제거장치에서는 연엑스선관에서 열과 빛으로 방출되며 매칭 조건별 소비전력 측정결과 고전압 발생 장치보다 부하(연엑스선관)에서 더 많은 소비전력을 필요로 한다.

(1) 매칭 조건별 소비전력 측정결과

고전압 발생 장치 1개와 연엑스선관을 각각 1개와 2개를 연결하였

을 때 소비전력의 차이를 검증하기 위해 측정한 결과 <그림 4.12>와 같이 소비전력이 감소하는 것을 확인했다.



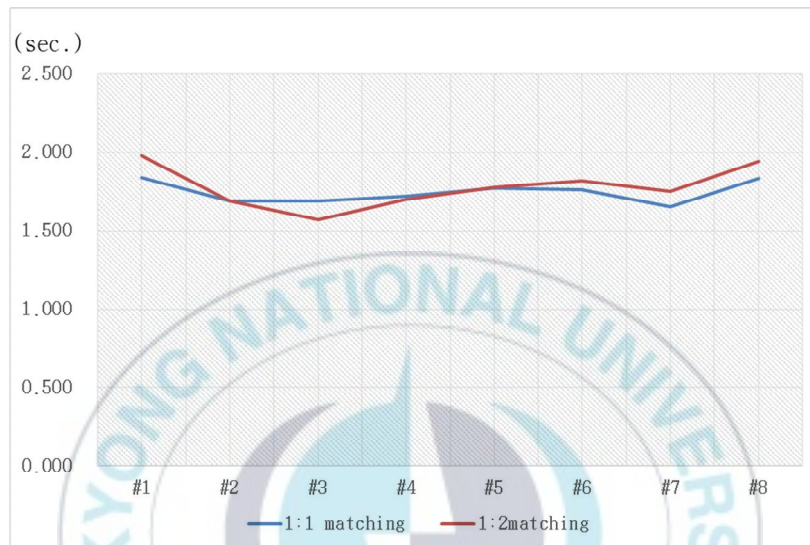
<그림 4.12> 매칭 조건별 소비전력 변화

매칭 구성 블록별 소비전력은 1:1 연결 조건에서 7.44W(8구 완제품 기준 59.52W), 1:2 연결 조건에서 13.92W(8구 완제품 기준 55.68W)로 확인되었으며, 고전압 발생 장치에서 소비되는 전력량보다 연엑스선관에서 소비되는 전력량이 많은 비중을 차지한다.

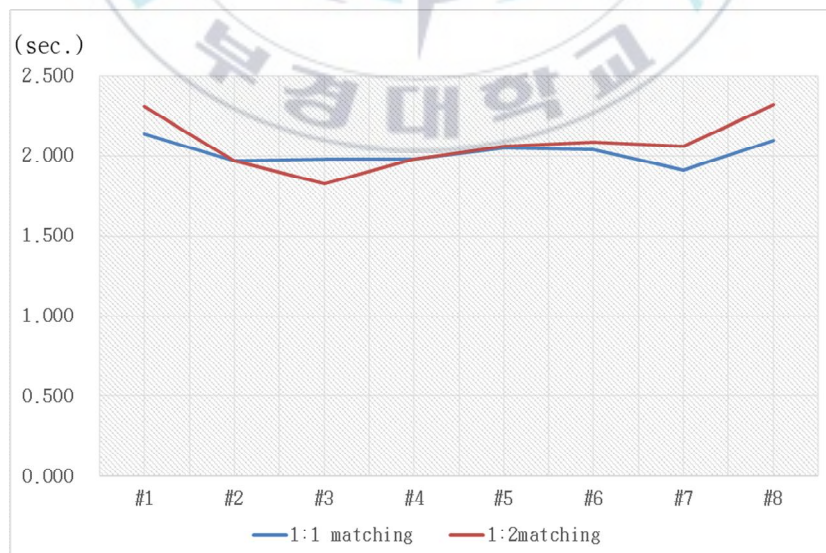
(2) 매칭 조건별 성능 비교

1) 제전성능

고전압 발생 장치 1개와 연엑스선관을 각각 1개와 2개를 연결하였을 때 제전성능에 차이가 있는지를 검증하기 위해 <그림 4.13>과 <그림 4.14> 300mm를 이격시킨 조건에서 성능을 측정하여 비교하였다.



<그림 4.13> 매칭 조건별 300mm 이격 (+)Decay Time

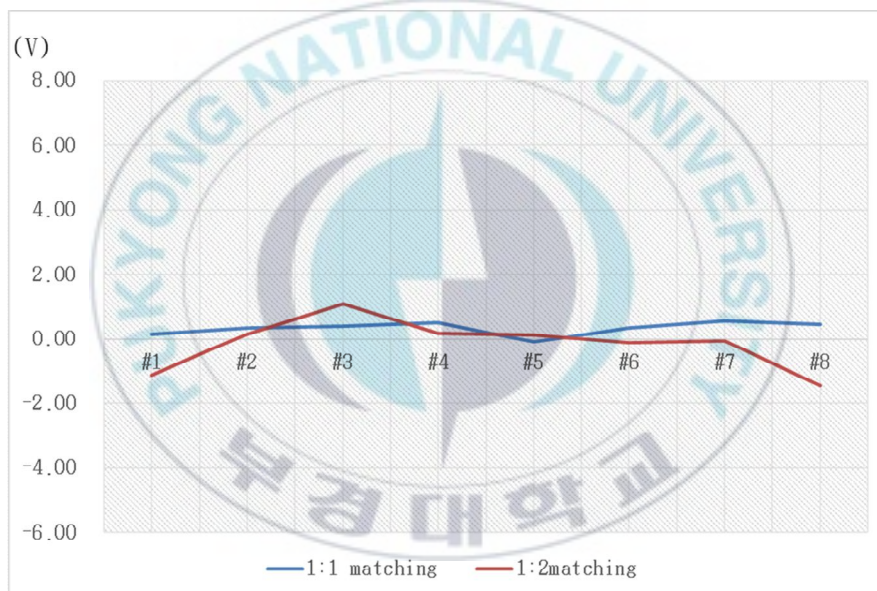


<그림 4.14> 매칭 조건별 300mm 이격 (-)Decay Time

<그림 4.13>과 <그림 4.14>에서 확인된 실증 데이터는 매칭 조건을 변경하더라도 제전성능의 차이는 없는 것으로 확인할 수 있었다.

2) 이온밸런스

고전압 발생 장치 1개와 연엑스선관을 각각 1개와 2개를 연결하였을 때 이온밸런스에 차이가 있는지를 검증하기 위해 300mm를 이격시킨 조건에서 이온밸런스를 측정하였다.

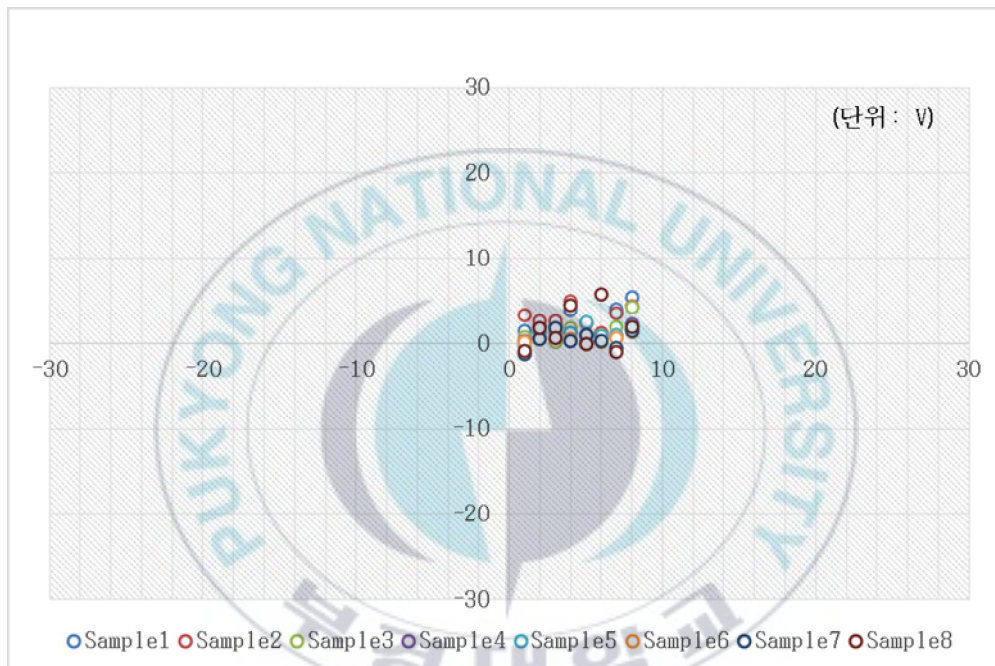


<그림 4.15> 매칭 조건별 300mm 이격 Ion Balance

측정결과 1:1매칭 조건과 1:2매칭 조건의 유의차는 확인할 수 없었으며 $\pm 2V$ 이내로 안정적임을 확인할 수 있었다. <그림 4.15>에서 1:2매칭 조건이 1:1매칭 조건과 차이나는 $\pm 2V$ 이내의 이온밸런스는 계측기 오차 및 측정환경의 산포로 볼 수 있으며 무시할 수 있는 수준이다.

(3) 성능산포

본 연구를 통해 제작된 시료의 이온밸런스 성능산포를 확인하기 위해 8대의 시료를 추가로 제작하였으며, 연엑스선관 직하방향에서 측정되는 이온밸런스를 측정하였다.



<그림 4.16> 300mm 이격 Ion Balance 산포

이온밸런스 측정은 300mm 이격 조건에서 평가하였으며 <그림 4.16>과 같이 $\pm 10V$ 이내로 미국의 산업 표준을 제정하는 미국 국립 표준협회(American National Standards Institute, ANSI) 에서 요구하는 $\pm 30V$ 이내를 충분히 만족하는 것으로 확인할 수 있었다.

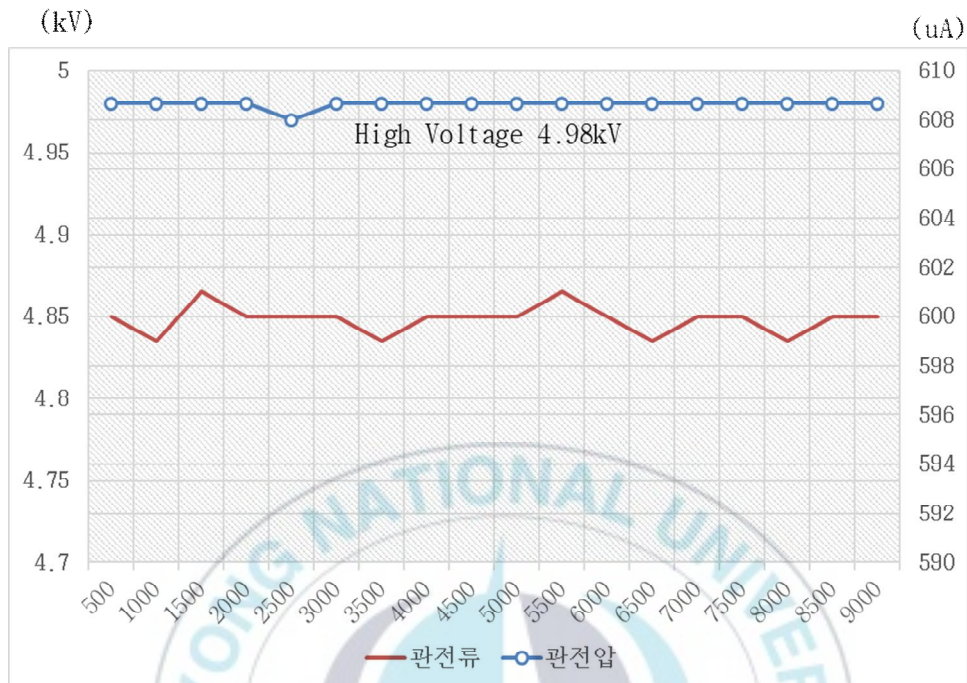
3. 개발기술에 대한 적용결과와 기술사업화

(1) 저전력 연엑스선 정전기 제거장치

1) 보증시간 평가 결과

일반적으로 연엑스선 정전기 제거장치의 보증시간은 시간 단위로 사양을 지정한다. 회로의 오류가 없는 경우 고전압 발생 장치와 연엑스선 내부 필라멘트 수명이 보증수명을 좌우하게 된다. 따라서 연엑스선관의 수명을 검증하기 위한 수명평가를 진행하는 것은 필요하다. 보증시간을 예측하기 위한 가속 수명평가를 진행하는 경우도 있지만, 정격전압을 인가 후 실제 수명을 평가하는 것이 반드시 필요하다.

<그림 4.17>은 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 시제품 8대에 대한 실시간 장기 수명평가 결과를 보여주고 있다. 관전압과 관전류의 변화를 확인한 결과 1차 보증수명 8,000시간을 만족하는 것으로 확인하였다. 그리고 가속 수명평가를 통해 예측된 16,000시간까지 수명을 만족할 것으로 예상한다.



〈그림 4.17〉 장기 성능평가 결과

2) 사업타당성 평가 결과

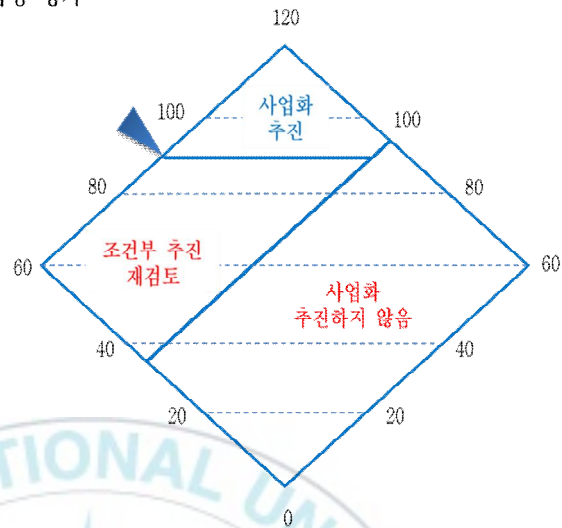
사업성 평가 틀은 정전기 제거장치 시장의 환경 및 아이템의 특수성을 반영하여 평가하였다. <표 4.1>과 같이 사업매력도 평가 결과 41점으로 사업 매력도가 있는 것으로 평가되었으며, 자사 적합도 평가 결과 49점으로 합산한 결과 90점으로 평가 되었고 사업성 평가결과는 <그림 4.18>과 같이 신사업을 착수하는 것으로 결과가 도출 되었다.

〈표 4.1〉 사업타당성 평가 결과

사업성 (120)					
사업매력도(60)			자사 적합도 (60)		
사업 진입의 매력이 있는가?			진입 사업의 자사 적합성이 있는가?		
No.	항목	평가	No.	항목	평가
1	매출이익 가능성	8	1	필요한 자금 대응력	9
2	성장 가능성	7	2	마케팅 능력	8
3	경쟁 상황	7	3	제조 및 운영력	8
4	위험 분산도	6	4	기술력 및 고객 서비스 능력	8
5	업계 재구축 가능성	7	5	원재료/부품/정보 입수 력	8
6	특별한 사회적 상황	6	6	경영지원	8
합계		41	합계		49
90					

사업성 평가

BMO 평가결과	
항목	평가결과
사업매력도	41
자사적합도	49
사업성	90
사업성 평가	사업화 추진



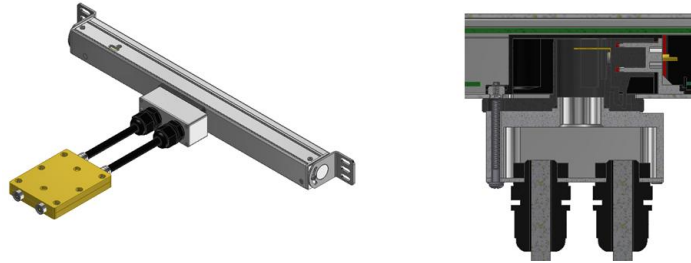
〈그림 4.18〉 저전력 연엑스선 정전기 제거장치 사업성 평가결과

(2) 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 응용

1) 핀 타입 연엑스선 정전기 제거장치

본 연구에서 연엑스선 정전기 제거장치의 전기적 연결구성을 고전압 발생 장치 1개와 연엑스선 램프 2개를 직렬로 구성하여 제품화할 수 있다는 연구결과를 바탕으로 핀 타입 연엑스선 정전기 제거장치에 같은 구성으로 적용할 수 있다는 그것에 착안할 수 있다.

〈그림 4.18〉은 반도체 공정에서 필요로 하는 핀 타입의 연엑스선 정전기 제거장치의 형태로 1개의 고전압 발생 장치에 2개의 연엑스선관을 전기적으로 연결하여 제품화한 실시사례이다. 전기적인 연결은 본 연구의 전기적 연결과 같은 연결구조를 채택하였다.



〈그림 4.19〉 핀타입 연엑스선 정전기 제거장치 디자인

2) 경량 및 초슬림 연엑스선 정전기 제거장치

연엑스선 정전기 제거장치에서 고전압 발생 장치 1개와 연엑스선 램프 2개 이상을 전기적으로 연결하는 구성을 바탕으로 응용할 수 있는 기술 분야이다. 고전압 발생 장치를 구성에서 일부 삭제할 수 있는 기술적인 배경을 통해 경량화하거나 일부 삭제된 구성품의 공간을 이용해 회로를 길고 얇게 설계하여 초슬림 형태의 연엑스선 정전기 제거장치를 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 경량 및 초슬림 연엑스선 정전기 제거장치는 현재 외형으로 적용하기 어려운 협소한 구간에 효과적으로 설치 및 운영할 수 있고 듀얼 연엑스선 정전기 제거장치의 무게를 감소시킬 수 있어 무게로 인한 적용제한을 극복 할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서 연엑스선 정전기 제거장치(Soft X-ray Ionizer)의 전기적 연결구성을 1:1 구성에서 1:2구성으로 변경함에 따라 1개의 고전압 발생장치에 연엑스선관 연결 수량을 증가 시키면 전체 소비전력 감소에 양(+)의 영향을 미치며, 이때 연엑스선 정전기 제거장치의 성능에는 변화가 없음을 확인했다.

1. 기술개발의 요약

FPD 및 반도체 산업에서 사용량이 증가하고 있는 연엑스선 정전기 제거장치를 대상으로 본 연구를 진행하였다. 공정 내 정전기와 미세먼지를 제어하기 위해 필요한 연엑스선 정전기 제거장치의 소비전력을 감소시킬 수 있는 방안을 제시하고 연구목적을 달성하기 위해 고전압을 공급하는 고전압 발생 장치 1개에 복수의 연엑스선관을 직렬로 연결함으로써 소비전력을 감소시킬 수 있는 방안에 대해 연구하였다.

저전력 연엑스선 정전기 제거장치 개발을 위해 기존 연구결과를 기초로 연엑스선 정전기 제거장치 전기적 연결구성이 간결한 고전압 발생 장치 1개에 연엑스선 램프 2개를 직렬로 연결하여 제작한 비교군에 대한 성능 및 기능에 대한 검증결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 전기적 연결구성을 변경하면서 제전성능에 차이가 발생하는지 실험한 결과 300mm, 600mm, 900mm 이격 거리에서 (+)제전성능과 (-)제전성능 모두에서 유의차가 없음을 확인할 수 있었다.

이온밸런스에 대한 실험결과에서도 300mm 이격 조건에서 ANSI규격을 기준으로 공정관리를 위해 요구되는 이온밸런스 관리기준 $\pm 30V$ 를 충분히 만족하는 결과를 확인하였으며 비교군과 대조군의 유의차는 없음을 확인하였다.

소비전력 감소에 대한 검증결과 연엑스선관 8개 적용을 기준으로 1:1매칭에서 측정된 59.52W의 소비전력은 1:2매칭 조건에서는 55.68W로 6.45% 감소됨을 확인하였다. 그리고 1:4매칭 조건의 소비전력에 대해서는 실제 측정을 진행하지 않았지만 1:1, 1:2, 1:3매칭 조건에서의 소비전력을 계산하여 53.76W로 9.68%까지 감소시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있었다.

결론적으로 개발된 제품은 기존 연엑스선 정전기 제거장치와 달리 저전력으로 운용할 수 있는 차별화가 가능하며 본 연구에서 채택한 기술은 공개특허 10-2 021-0107246과 동일한 출원인으로 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 기술사업화에서 기술보호가 가능할 것으로 예상된다. 그리고 획득된 다양한 데이터는 기존제품을 대체하여 운영이 가능한 신제품으로 출시할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 기술개발의 시사점

저전력 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 연구개발은 ESG 경영 및 탄소 중립 정책 등 시대적 요구를 만족하는 사양으로 더욱 활발한 연구개발이 요구되는 분야이다.

특히 제한된 자원을 절감할 수 있다는 기대 효과와 저전력 연엑스선 정전기 제거장치에 관한 연구개발을 통해 다른 응용제품의 연구개발에 필요한 아이디어를 제공할 수 있고 이를 기술사업화할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 고전압 발생 장치 용량의 한계로 인해 고전압 발생 장치 1개에 연엑스선관 2개를 연결하는 연구의 한계가 있었다. 향후 고전압 발생 장치 용량을 더 증가시켜 최대 4개 이상의 연엑스선관을 연결할 수 있는 저전력 연엑스선 정전기 제거장치의 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.



참고 문헌

01. 정필훈 (2018), Monte Carlo N-Particle Extended Code를 이용한 연 X선 정전기제거장치의 최적설계 및 특성, 박사학위 논문, 부경대학교, 부산.
02. 이수환 · 이동훈 (2018), 선량 중첩을 이용한 멀티형 연 X선 정전기 제거장치의 개발, Journal of Korea Society of Safety, Vol. 33, No. 2, pp. 28-31.
03. 정종혁 · 우동식 (2018), 청정환경용 정전기 제거장치 개발, Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 19, No. 1 pp. 603-608.
04. 정필훈 · 이동훈 (2017), Monte Carlo N-Particle Extended Code를 이용한 연엑스선 정전기제거장치의 최적제작에 관한 연구(II), Journal of Korea Society of Safety, Vol. 32, No. 6, pp. 29-33.
05. 박병태 (2016), 불활성가스 분위기에서의 정전기 제거장치의 개발, 석사학위 논문, 부경대학교, 부산.
06. 허시환 (2015), 연엑스선 조사식 정전기 제거장치의 성능특성에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교, 부산.
07. 이춘호 (2011), 사무 공간 조명용 LED 구동 시스템을 위한 효율적 구조 설계, 석사학위논문, 숭실대학교, 서울.

08. 전지훈 (2011), 정전기 제거장치의 성능평가방법 개발, 석사학위 논문, 한양대학교, 서울
09. 권승열 · 이동훈 · 최재욱 · 서민석 (2009), 기류방출형 연엑스선 조사에 의한 정전기 제거 장치에 관한 연구, 박사학위논문, 부경대학교, 부산.
10. 정용철 (2008), 코로나 방전형 정전기 제거장치에서의 이온생성 최적화 조건에 관한 연구, 박사학위논문, 부경대학교, 부산.
11. 이승원 · 송문빈 · 이택수 · 정연모 (2004), 직렬연결 방식을 이용한 통합조명 제어 시스템, 2004년도 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집 27권 1호.
12. 이병인 · 이상용 · 정병환 · 최규하 (2003), Droop Method를 이용한 50(W)급 태양전지 가상구현장치의 다중병렬연결 출력특성에 관한 연구, 전력전자학회 춘계학술대회 논문집 2003. 11. 22.
13. 이병인 · 정병환 · 전윤석 · 최규하 (2002), 태양전지 가상구현 시스템 (50W)의 병렬연결 출력특성에 대한 분석, 2003년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2003. 4. 24~26).
14. 과학기술정보통신부 (2021), 탄소중립 기술혁신 추진전략.
15. 대한민국특허청(KR) 10-2021-0107246, 복수개의 탄소나노튜브 엑스선 발생 모듈 및 이를 갖는 정전기제거장치.
16. 대한민국특허청(KR) 10-2016-0111928, 방사선 차폐형 엑스선이오나 이저.

17. 대한민국특허청(KR) 10-2003-0056410, 연엑스선을 이용한 정전기 제거장치.



감사의 글

먼저 논문이 완성될 수 있도록 깊은 애정과 관심을 가지시고 지도해 주신 옥영석 교수님과 논문을 작성할 수 있는 용기를 주신 이운식 원장님께 깊이 감사 드립니다. 그리고 본 연구를 진행할 수 있도록 아낌없이 지원해 주신 정전기 제거장치 산업에서 글로벌 최고의 기업 (주)선재하이테크 이동훈 대표이사님과 직장 동료 및 선후배에게도 깊이 감사를 드립니다. 몸이 힘들지는 않는지 항상 염려 해시고 응원해 주신 고향에 계신 어머니와 늦은 밤까지 어디서나 같이 해준 각시에게 이 자리를 빌어 사랑의 마음으로 감사 드립니다.

2020년 초겨울 면접을 시작으로 시작된 낯설고 어색했던 MOT 시작을 쉽고 적응할 수 있도록 이끌어 주신 MOT 모든 교수님과 학과 모든 분들께도 감사 드립니다. MOT 과정을 통해 평생학습을 실천할 수 있었고 끊어진 소중한 인맥을 다시 연결할 수 있었으며, 새로운 친구와 선후배를 만날 수 있었던 것은 가장 큰 행운이 아닐 수 없습니다.

평생 학습에 대한 신념을 놓지 않고 작게는 가정에서 자식들에게 모범이 되는 아버지로, 회사에서는 후배들에게 배움을 실천하는 선배의 모습으로 기억될 수 있도록 더 노력하고자 합니다. 그리고 넓게는 배우고 익힌 지식을 학교와 사회를 위해 기꺼이 헌신하고 공헌할 수 있도록 하겠습니다.

다시 한 번 이 자리까지 올 수 있도록 이끌어 주신 모든 분들에게 깊이 감사의 말씀을 전합니다.

감사합니다.

2023년 2월