

안전분야 - 연구자료
연구원 99-26-96
S-RD-I-99-26-96

대전된 분체의 정전기 제거를 위한 제전기의 개발연구

Development of a Soft X-Ray Ionizer for the
Elimination of Static Electricity of Particles



한국 산업 안전공단
산업안전보건연구원

목 차

요약문

제 1 장 서 론	1
1-1 연구목적 및 필요성	1
1-2 연구 내용 및 범위	4
1-3 연구결과에 대한 기대효과 및 활용방안	5
제 2 장 분체폭발의 재해사례 조사	7
2-1 분진폭발의 현황	7
2-1-1 현 황	7
2-1-2 분진폭발의 재해와 경향	8
2-2 분진폭발의 재해사례(한국)	11
2-3 분진폭발의 재해사례(일본)	14
제 3 장 분체의 대전 및 방지	25
3-1 정전기현상	25
3-1-1 정전기 재해·장해 현상	25
3-1-2 정전기 발생에 미치는 요인	31
3-2 정전기에 의한 화재·폭발	33
3-2-1 정전기에 의한 화재·폭발의 발생조건	33
3-2-2 가연성물질의 착화 위험성	34
3-2-3 방전에너지와 착화 한계	36

3-3 절연물의 대전방지	37
3-3-1 정전기의 발생방지	37
3-3-2 제전기에 의한 대전 방지	43
3-4 정전기에 의한 화재·폭발의 방지	49
3-4-1 가연성 분위기의 방지	50
3-4-2 착화원의 방지	51
 제 4 장 분진폭발의 예방 대책	52
4-1 분체의 대전에 미치는 인자	52
4-1-1 분체의 대전	52
4-1-2 대전 인자	56
4-2 분진폭발 예방대책	66
4-3 분진폭발 피해억제 대책	75
4-4 대책의 구체적인 예	75
 제 5 장 정전기 제거용 제전기의 비교	77
5-1 코로나 방전식 제전기	78
5-2 광조사식 제전기	81
 제 6 장 분체의 최소 착화에너지 측정장치의 설계 및 개발	86
6-1 실험장치	86
6-2 실험방법	89
 제 7 장 연X선 제전기의 설계 및 제작	90
7-1 시스템의 구성	90
7-2 시스템의 설계 및 제작	90

제 8 장	연X선의 제전기의 정전기 제거 특성	102
8-1	실험장치 및 방법	102
8-2	실험 결과 및 고찰	105
8-2-1	타게트 전압 및 전류의 변화에 따른 대전완화 시간특성 ...	105
8-2-2	설치거리의 변화에 따른 대전완화 시간특성	107
8-2-3	수직·수평 설치각도의 변화에 따른 대전완화특성	109
8-2-4	도전성 차폐막 설치에 따른 대전완화특성	112
8-2-5	연X선 제전기의 이온 전류 특성	114
8-2-6	코로나 방전식 제전기와 연X선 제전기의 발전특성	117
8-2-7	안전성 검토	118
8-3	현장 적용 실험	121
제 9 장	결 론	127

[참고문헌]

여 백

요 약 문

1. 과제명 : 대전된 분체의 정전기제거를 위한 제전기의 개발 연구

2. 연구기간 : 1998년 9월 1일 ~ 1998년 12월 31일

3. 연구자 : 한국산업안전공단 산업안전연구원 안전연구실 이형수

부경대학교 산업시스템·안전공학부 이동훈

4. 연구목적

근래에 와서 산업의 발달에 따라 합성수지, 합성섬유, 합성고무, 목재가 공공장 등의 분체취급공정이 날로 늘어나서 분체입자의 정전기대전에 의하여 화재·폭발의 소지가 현저하게 증가하고 있는 추세이다. 이것은 새로운 분체를 취급하게 되는 업종, 사업장이 증가해서 분체에 의한 화재·폭발의 잠재적인 위험성이 확대되는 경향을 나타내고 있는 것이다. 이상과 같이 분체를 다루는 곳에서는 분체와 주위의 물체, 인체 등에서 정전기가 발생하여 분체 자체가 가연성 분체운을 형성하고 있으면 정전기 방전에 의해 분체폭발이 발생하는 위험이 있다. 생산공정에 있어서 점화원, 특히 정전기 방전에 기인한 분체류의 착화·폭발 재해를 방지하기 위해서는 분체류의 정전기 제거를 위한 제전기의 개발이 시급한 실정이다.

대전물체의 정전기를 제거하기 위한 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 코로나방전식의 제전기는 제전기 자신이 착화원이 되어서는 안되도록 방폭형 구조로 되어야 한다. 그러나 코로나 방전식 제전기로는 방폭형구조를

갖기 어려울 뿐만 아니라, 유지 및 보수 또한 아주 어려운 실정이다. 따라서 대전된 분체의 정전기 제거를 위하여서는 새로운 제전방식이 필요성이 대두되게 되었다. 대전된 분체의 정전기 전압을 착화를 야기하지 않을 정도까지 저하시키기 위한 적합한 최적의 정전기제거장치를 개발하여 대전된 분체로 인한 화재·폭발의 사고를 미연에 방지하고자 한다. 따라서 본 연구는 대전분체의 정전기제거에 가장 적합한 제전기로서 연 X선을 이용한 제전기를 개발하고자 한다.

5. 연구내용

분체의 최소착화에너지 측정장치를 개발하고, 아울러 대전된 분체의 정전기제거에 적합한 제전기, 즉 광선(연X선)을 이용한 제전기를 개발하고, 개발된 제전기의 적합성을 확인하기 위하여 관련 산업현장에 적용한다. 본 연구 과제의 주된 내용은 다음과 같다.

- 가) 문헌조사 및 자료수집
- 나) 분체의 최소착화에너지 측정장치 개발 및 특성 조사
- 다) 연X선을 이용한 정전기 제거용 제전기의 개발 및 특성조사
- 라) 최종 시험 및 특성조사
- 마) 현장 적용 실험
- 바) 최종보고서 작성

6. 활용계획

본 연구에서 개발된 제전기는 분체를 사용하는 공정, 특히 사료공장, 식품가공공장, 고분자제조화학공장, 목재가공공장 등에서 부유분진의 정전기 대전으로 화재·폭발사고의 위험성을 근원적으로 방지하는데 적용할 수 있다.

과학적이고도 실용적인 측면에서의 활용계획을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 분체취급·제조공정에서 대전된 분체의 정전기를 제거하여 착화한계 이하로 대전전압을 저하시킴으로서 정전기 착화로 인한 화재·폭발 사고를 방지하여 산업재해를 줄일 수 있다.
- ② 선진 외국에서도 이제 개발단계에 있으므로 본 연구에서 개발된 정전기를 실용화하여 국내 산업현장에 보급함으로써 충분한 경쟁력을 바탕으로 산업안전에 기여할 수 있을 것이다.

제 1 장 서 론

1-1 연구목적 및 필요성

최근 산업의 발달에 따라 합성수지, 합성섬유, 합성고무, 목재가공공장 등의 분체취급공정이 날로 늘어나서 분체입자의 정전기대전에 의하여 화재·폭발의 소지가 현저하게 증가하고 있는 추세이다. 특히 PTA 등과 같은 가연성 분체는 폴리에스텔 섬유와 엔지니어링 플라스틱, 필름, 도료, 전자제품, 타이어코드, 식음료 용기 등에 사용된다. 이는 전기적 스파크나 정전기착화 등의 아주 적은 점화원에 의하여 착화되어 대형의 폭발사고로 발전할 위험성을 갖고 있다. 화학 공장이나 정유 공장은 물론이고 제재소, 제분공장, 섬유공장과 같은 가연성 분진이 있는 장소에서는 어디서나 정전기가 착화원으로 작용하여 화재·폭발을 일으켜 대형 재해를 야기할 수 있다. 또한 생산 공정의 다양화로 인하여 정전기의 발생 메카니즘을 더욱 복잡하게 하여 이로 인한 장·재해의 예방을 더욱 어렵게 하고 있다. 또한 분체가 파이프속을 흐르거나 호퍼(Hopper) 내에 투입될 때 이들과의 마찰에 의하여 분체에 정전기가 대전한다. 그러나, 대전하더라도 보통은 공간에서 흩어지므로 전하밀도가 큰 대전물체로는 되지 않아 화재·폭발로 연결되는 경우가 그리 많지 않으나, 마찰에 의해서 대전한 분체가 일정한 공간에 부유하여 밀폐되는 작업장에서 취급하면 전하밀도가 크게 되어 화재·폭발로 연결될 수가 있다. 이러한 정전기의 대전에너지는 가연성 가스 분체를 착화, 폭발시키는 위험이 있다는 것도 널리 알려져 있는 사실이다. 또한 분체를 다루는 공정에 있어 다루는 분체의 입도가 작기 때문에 분체운이 발생하여 분체 폭발의 위험성이 있다. 최근에는 신소재로서의 기능성 물질과 전자재

료 개발이 진행되어 분체는 뛰어난 특성과 분체 취급 기술의 발전으로 다
방면에 응용분야가 확대되고 있다. 이것은 새로운 분체를 취급하게 되는 업
종, 사업장이 증가해서 분체에 의한 화재·폭발의 잠재적인 위험성이 확대
되는 경향을 나타내고 있는 것이다. 이상과 같이 분체를 다루는 곳에서는
분체와 주위의 물체, 인체 등에서 정전기가 발생하여 분체 자체가 가연성
분체운을 형성하고 있으면 정전기 방전에 의해 분체폭발이 발생하는 위험
이 있다. 생산공정에 있어서 점화원, 특히 정전기 방전에 기인한 분체류의
착화·폭발 재해를 방지하기 위해서는 분체류의 정전기 제거를 위한 제전기
의 개발이 시급한 실정이다. 분진의 입경이 10 μm 보다 큰 분진은 대개의
경우 점화에너지가 크므로 분체의 정전기대전이 원인이 되어 발생하는 착
화·폭발을 일으킬 확률은 적다. 그러나 입경이 10 μm 보다 작은 분체의 주
위의 공간에 가연성 액체의 증기 또는 가스를 포함하고 있으면 수십~수
백 μJ 정도의 대단히 적은 정전기 에너지에 의하여 점화하므로 분체의 정
전기 대전이 화재·폭발로 연결된다.

대전물체의 정전기를 제거하기 위한 방법으로 가장 많이 사용되고 있는
코로나방전식의 제전기는 스패터링(Spattering) 현상에 의해 전극의 끝부분
으로부터 0.1 μm 이상의 금속미립자가 엄청나게 발생하고, 스패터링 현상에
의해 전극 끝부분의 손상 및 결손이 발생하기 때문에 수개월 한번씩 새것
으로 교체하여야 한다. 또한 O3 발생 (O3은 반응성이기 때문에 분체의 정
전기 부착을 촉진함.), 이온 극성의 불균형 등의 결점이 있고, 또한 침 전극
에 분체가 부착되므로써 코로나 방전을 약화시켜 제전능력을 약화시킨다.
가연성분체의 정전기 제거를 위하여서는 제전기 자신이 착화원이 되어서는
안되도록 방폭형 구조로 되어야 한다. 그러나 코로나 방전식 제전기로는 방
폭형 구조를 갖기 어려울 뿐만 아니라, 유지 및 보수 또한 아주 어려운 실
정이다. 따라서 대전된 분체의 정전기 제거를 위하여서는 새로운 제전방식

이 필요성이 대두되게 되었다. 즉, 방사선의 공기전리작용을 이용하는 방법과 연X선의 광전효과를 이용한 방법이 있다. 전자는 방사선원의 안전성과 방사선 폐기물의 문제가 있다. 그러나 후자는 아주 미약한 연X선(파장 1.3 Å 이상)을 이용해서 주위 분위기중의 가스 분자를 이온화해서 제전대상물체의 정전기를 중화·완화시키는 방법으로 대전분체의 정전기를 제거하는 방법에 가장 적합하다고 사료된다. 대전된 분체의 정전기제거를 위한 제전기의 개발연구를 원만히 수행하기 위하여서는 첫째로 정전기로 인한 분체의 화재·폭발을 예방을 위하여 가연성 분체의 최소착화에너지를 정량적으로 해석·측정하여 가연성 분체 착화한계 대전전압을 구하여야 하고, 둘째로 대전된 분체의 정전기 전압을 착화를 야기하지 않을 정도까지 저하시키기 위한 적합한 최적의 정전기제거장치를 개발하여 대전된 분체로 인한 화재·폭발의 사고를 미연에 방지하고자 한다. 현재 일본, 미국을 위시한 선진국에서는 3-4년 전부터 이에 대한 기초연구를 시작하여 거의 마친 상태이거나, 시제품이 개발된 상태이다. 따라서 국내에서도 이러한 기술을 확보하기 위하여서는 대전된 분체의 정전기 제거용 제전기를 개발하는데에 적극적이고도 체계적인 연구가 반드시 수행되어야 한다. 아울러 본 연구가 원만히 수행되어진다면 가연성분체의 최소착화에너지측정장치의 개발을 위한 기초자료를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 국내의 생산공장에서 주로 사용하고 있는 분체의 최소착화에너지를 자료화하여 기본적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구는 대전분체의 정전기제거에 가장 적합한 제전기로서 연 X선을 이용한 제전기를 개발하고자 한다.

1-2 연구 내용 및 범위

우리 나라 산업현장에서 주로 사용하는 분체를 대상으로 보다 광범위하게 적용할 수 있는 분체의 최소착화에너지 측정장치를 개발하고, 아울러 대전된 분체의 정전기 제거에 적합한 제전기, 즉 광선(연X선)을 이용한 제전기를 개발하고, 개발된 제전기의 적합성을 확인하기 위하여 관련 산업현장에 적용한다. 본 연구 과제의 주된 내용은 다음과 같다.

가) 문헌조사 및 자료수집

본 연구와 관련된 문헌 및 자료의 수집

나) 분체의 최소착화에너지 측정장치 개발 및 특성 조사

- ① 시험용 분진의 물성조사(mesh, 건조도, 발열량)
- ② 콘덴서 충전용 직류고전압 발생장치의 제작 및 특성 실험
 - － 고전압 충전콘덴서의 용량계산, 누설전류 평가, 선로의 부유를 고려한 콘덴서의 적정배치
- ③ 방전통 및 방전전극의 제작 및 특성 실험
 - － 방전통(강화유리), 폭발방산 장치의 제작
 - － 시험용 분진의 분사장치의 제작
- ④ 구대구 전극의 제작 및 전극간격을 자유롭게 조절하기 위한 거리조절장치 제작 및 기중에서의 방전전압대 방전전류 측정
- ⑤ 폭발통 내의 압력변화에 따른 최소착화에너지의 측정
- ⑥ 방전전극간격의 변화에 따른 최소착화에너지의 측정
- ⑦ 데이터 처리 소프트웨어 설계 및 실험
 - － 시험용 분진의 최소착화에너지를 계산하기 위하여 기중방전시의 방전전류 및 방전전압의 데이터를 GPIB를 통하여 오실로스코프에서 컴퓨터로 저장하여 프로그램을 이용하여 최소착화

에너지를 계산함

다) 연X선을 이용한 정전기 제거용 제전기의 개발 및 특성조사

① 연X선 제전기의 개발

② 연X선 제전기의 제전 및 발전 특성 조사

③ 연X선 발생장치의 개발

라) 최종 시험 및 특성조사

마) 현장 적용 실험

1-3 연구결과에 대한 기대효과 및 활용방안

가) 기여도

분체를 사용하는 공정, 특히 사료공장, 식품가공공장, 고분자제조화학공장, 목재가공공장 등에서는 부유분진의 정전기대전으로 화재·폭발사고가 우리 나라 전체 중대산업재해의 많은 부분을 차지하고 있는 실정이다. 이러한 분진의 정전기 착화로 인한 위험성을 근원적으로 방지하기 위하여서는 대전분체의 최소착화에너지를 정량적으로 해석하여야 하고, 또한 대전된 분체의 정전기 제거에 가장 적합한 제전기를 개발하여야만 한다. 따라서 본 연구에서 제전기가 개발되면 대전된 분체로 인한 화재·폭발을 예방할 수 있으므로 이로 인한 산업 재해 손실까지 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

현재 일본, 미국을 위시한 선진국에서는 이미 1~2년전부터 대전분체의 정전기제거용 제전기를 개발에 대한 기초연구를 시작하여 거의 마친 상태이다. 따라서 국내에서도 이러한 기술을 확보하기 위하여서는 대전분체의 정전기제거용 제전기를 개발하여 선진기술에 당당히 도전할 수 있다.

나) 기대 효과 및 활용 방안

과학적이고도 실용적인 측면에서의 기대효과를 살펴보면 다음과 같다.

- ① 분체취급·제조공정에서 대전된 분체의 정전기를 제거하여 착화한계 이하로 대전전압을 저하시킴으로서 정전기 착화로 인한 화재·폭발 사고를 방지하여 산업재해를 줄일 수 있다.
- ② 선진 외국에서도 이제 개발단계에 있으므로 본 연구를 통하여 개발된 정전기를 실용화하여 국내 산업현장에 보급함으로서 충분한 경쟁력을 바탕으로 산업안전에 기여할 수 있을 것이다.

제 2 장 분체폭발의 재해사례 조사

2-1 분진폭발의 현황

2-1-1 현황

최근 플라스틱공업, 유기합성공업, 금속분체공업 및 사료공업 등의 기술이 진보함에 따라서 원료 및 제품을 분체로 취급하는 공정은 분체공학의 발달로 현저하게 증가되고 있는 실정이며, 미립자의 제조, 분쇄, 건조, 분급, 혼합 등의 신공정에서는 유동이나 부유상태로 취급하거나 고온 분위기하에서 처리하는 경우가 많다. 그리고 이에 수반하여 분진폭발 위험성이 상당히 인식되고는 있으나 가스 또는 액체에 의한 폭발 위험성만큼 충분히 알려져 있지 않고 있다. 또한 분진은 항상 폭발하는 것은 아니고, 일정한 조건이 갖추어져야 비로소 폭발위험성을 갖는다. 즉 분진은 가연성 고체를 세분화한 것으로, 특히 크기가 작은 입자중에서도 $100\mu\text{m}$ 이하의 고체 입자를 분체라고 하며, 그 중에서도 직경이 $75\mu\text{m}$ 이하인 입자를 분진이라 한다. 이러한 분진에 대한 최초의 폭발기록은 1785년 이탈리아의 제분공정에서 일어난 사고였다. 그 이전에는 탄광의 갱내 폭발사고를 단순히 가스폭발이 원인이라고 생각했었는데 이 시기에 이르러 분진폭발이 원인일 수 있다는 인식을 갖기 시작하였던 것이다. 결국 18세기말부터 이러한 분진폭발에 대한 연구가 유럽과 미국, 소련 등에서 산업재해의 방지대책으로서 연구되기 시작하였으나 그 실적은 매우 부족하였다. 그러나 20세기 들어서 각종 산업에서 여러 가지의 분체를 생산·취급하면서 세계 도처에서 분진폭발이 다수 발생하여 수많은 인적·물적 피해가 발생하였으며, 이로 인해 전세계적으로 분진폭발에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 분진폭발에 관한 통계를 살펴

보면 일본의 경우 1952년부터 1984년까지 분진폭발의 발생건수가 225건에 사상자수가 562명에 이르고 있다. 분진폭발로 인한 재해를 방지하기 위하여 “중양노동재해방지협회”에서 14명으로 구성된 “분진폭발 방지대책 조사연구위원회”를 설치하여 산업현장에서의 분진폭발·화재에 의한 재해사례를 수집 및 조사하는 등 분진폭발·화재에 대한 대책을 마련한 바 있다. 미국의 경우 1900년부터 1956년까지 총 1,083건에 사망 604명, 부상 1,709명의 사상자를 냈으며 재산피해액도 약 1억불에 달한다고 보고된바 있다. 또한 곡물가공공업의 곡물산업에서도 매년 다수의 폭발재해가 발생하여, 특히 1977년에는 21건의 분진폭발사고가 발생해서 65명이 사망하고 84명이 부상을 당한 기록도 있다. 그 중에는 1억달러 이상의 피해를 낸 사고도 2건이나 있었다. 그 이후에도 사고는 끊임없이 발생하여 1979년부터 1986년동안 곡물가공시설에서 160건의 분진폭발이 발생하여 사망 50명, 부상자 220명이 발생한 바도 있다. 한편 국내의 경우도 1974년 섬유공장의 분진폭발로 인해 대형화재가 발생하여 150여억원의 재산피해를 냈으며, 1989년에도 ABS 수지 분말의 폭발로 인한 피해사례가 보고된 바 있다. 또한 이러한 분진폭발은 부유분진에 의한 폭발뿐 아니라 부유분진에 의한 1차폭발의 압력파에 의하여 퇴적분진의 부유에 대해 2차, 3차의 연쇄폭발을 유도함으로써 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로 분진폭발을 예방하기 위해서 착화원 관리가 보다 중요한 방지대책이 된다.

2-1-2 분진폭발의 재해와 경향

1952년부터 1984년까지 일본에서의 분진폭발의 발생상황에 의하면 연평균 발생건수는 6.8건, 연평균사상자수는 약 17명에 달한다. 즉, 1건당 평균 사상자수는 2.5명에 상당한다. 또한 설비가 대형화함에 따라 사고의 규모나 물질 피해는 점점 커져가는 경향이 있어 폭발 후의 화재로 인한 공

장전소의 예도 있다. 표 2-1은 분진의 착화원별 폭발발생상황을 표시하였고, 표 2-2는 분진의 종류별 폭발발생상황을 표시하였다. 이온에 의하면 착화원으로는 약 1/3이 마찰·충격이고, 다음으로는 정전기 착화에 의한 것으로 나타났다.

표 2-1 이온 착화원별 분진폭발 발생 상황(일본, 1952년~1984년)

착화원별	발생건수
마찰·충격	68
{ 이물질 혼입	19
기 타	49
금속 가열	9
나 화	14
정전기 방전	39
전기 설비 사고	10
용접·용단의 불꽃	26
자연 발화	26
불 명	24
기 타	9
계	225

표 2-2 이온 분진의 종류별 폭발발생 상황(일본, 1952년~1984년)

분진의 종류		발생건수	사상자수	사망자수	부상자수
석탄		12	45	7	38
무기약품	유황	29	37	9	28
	카-본 규화석탄				
금속	알루미늄	49	166	37	129
	마그네슘 기타금속				
농산가공품	미당	42	113	16	97
	사당				
	전분				
	소맥분				
	수수분				
	표백분				
	맥주효모				
	대맥분				
	사료분				
	코프라粕				
	기타곡분				
합성물	안료중간물	31	51	5	46
	플라스틱				
	합성세제				
	합성효료				
유기화학 제품	무수프탈산	42	72	9	63
	가류제				
	의료품				
	기타				
섬유류	목분	19	74	5	5
	코크분				
	리구닝				
	종이가루				
	기타				
기타		1	4	-	4
계		225	562	88	474

2-2 분진폭발의 재해사례(한국)

1984년부터 1994년 사이에 국내에서 발생한 주요한 분진폭발사례는 다음과 같다.

번호	회사명	주요 생산품	발생 설비	가연 물질	발 생 원 인	피해정도	발생 일시
1	○○목재 (주)	가구류	공기 수송 덕트	목분	공정에서 발생하는 목분을 보일러 연료용으로 사용하기 위하여 공기수송 시스템으로 이송중 팬(Fan)의 마찰 스파크에 의해 폭발	수송덕트 (10m) 파괴	'84. 9
2	(주)○○	합성 수지	유동 충진 습기	ABS 수지	ABS 수지를 유동충진습기를 이용 스팀을 열원으로 건조작업중 정전기 스파크로 폭발	건조기 연결덕트부 파괴	'89
3	○○홍업 (주)	합판	백필터 집진기	분말	목분진의 마찰 또는 정전기로 인하여 1차 폭발, 진화작업중 집진기 2차 폭발 - 폭압방산구가 건물창문 쪽으로 잘못 설치·피해 확대	사망 2명	'89.10
4	○○사료 공업	배합 사료	분쇄기 및 집진 덕트	곡물분	공장내부 2층 분쇄기에 연결된 덕트의 외부 보수작업을 위한 용접작업중 폭발 - 설비를 가동한 상태에서 용접, 스파크로 폭발	집진기 및 부속덕트 파괴	'90.6
5	(주)○○ 산업	곡물 하역 저장	피이더 및 컨베이어	옥수수	옥수수 운송 선박에서 사일로까지의 하역 작업중 곡물에 함유된 이물질과 피이더(Feeder)의 마찰 스파크에 의해 발화, 컨베이어를 통하여 급격하게 화염 전파	고무벨트 및 FRP전소, 붐(Boom), 피이더, 컨베이어 열 손상	'90.11

번호	회사명	주요 생산품	발생 설비	가연 물질	발 생 원 인	피해정도	발생 일시
6	○○ 싸이로 (주)	곡물 하역 저장	호퍼, 버킷 엘리 베이터 및 집진기	소맥	소맥운송선박에서 하역작업중 호퍼내부에서 1차폭발후 버킷 엘리베이터 및 집진기에서 2~3차 연속폭발. 착화원은 정전기로 추정되고 있으나 정확한 발생장소 및 원인은 불명	건물벽면 전파, 버킷 엘리베이터, 집진기, 컨베이어등 좌골 손상	'91. 2
7	제일 ○○사	장본, 인쇄물	-	종이 분진	전기설비의 충전부 누전으로 퇴적되어 있던 종이 분진에 착화, 화재발생 추정	부상 1명, 인근 18개 사업장전소	'91. 3
8	○○공업 (주)	운송용 기계	백필 터집 진기	알루 미늄분	시설물 용단작업중 용접불꽃이 분진 배출구 알루미늄 분진이 담겨있는 마대에 비산, 발화후 내부로 전파되어 진화작업중 집진기 폭발 - 폭압방산구 미설치	사망 1명, 부상 3명	'91. 8
9	(주)○○ 목재	가구류	운송 배관 및 백필터 집진기	목분	목분진이 운송배관의 토출측 배관을 막음으로서 이송 팬(Fan)의 마찰열로 발화, 진화작업중 이송배관에서 1차 폭발, 화염전파로 집진기가 2차 폭발 - 집진기의 폭압방산구 미파열 (설계잘못)	부상 6명	'92. 4
10	○○종합 식품(주)	전분, 당	공기 운송 다트	전분	공기운송 다트로 전분을 이송하는 공정에서 이물질 혼입(장치에서 탈락된 철판)으로인한 스파크로 폭발	수송다트 및 사이클론 파괴	'92.11

번호	회사명	주요 생산품	발생 설비	가연 물질	발 생 원 인	피해정도	발생 일시
11	(주)○○ 사료	배합 사료	정전기	곡물 사료	곡물저장 탱크 상단에 설치된 정전기의 외부 케이싱 파손 부 위에 전기용접 작업중 정전기 내부로 용접 불티가 튀어 들어 가 곡물사료 분진에 급격히 인 화 연화되면서 정전기에 연결 된 설비로 화염이 전파되어 폭 발, 내압에 가장 약한 버킷 엘 리베이터 케이싱(BE-203)이 파 열되면서 화염이 공장내부로 분출(Fire ball)되어 버킷 엘리 베이터 케이싱 중위에 있던 작 업자 8명이 부상당하고 설비 일부가 파괴되어 약 8천만원의 재산 피해를 입은 재해임	부상 8명	'94. 2

2-3 분진폭발의 재해사례(일본)

1975년부터 1986년 사이 일본에서 발생한 주요한 분진폭발 재해사례는 다음과 같다.

가) 무기약품의 분진

번호	업종	가연물	발생설비	사상자수 () 사망	발생상황 및 원인	착화원
1	화학 공업	유황분	바켓 엘리 베이터	0	액상유황을 덩어리모양으로 해서 선적중, 버켓 엘리베이터 부근에서 이상음이 난 직후에 소폭발과 동시에 화재가 발생되어 컨베이어의 일부를 소실했다. 즉, 작업중에 유황의 이송이 중단되었기 때문에 정지시켜 컨베이어를 점점한 후, 다시 운전하다가 폭발했다. 바켓엘리베이터 등은 부식해서 너덜너덜하게 되어 있었던 데에다 질소 가스 이송용 레버는 닫혀 있었기 때문에 비활성가스가 치환되어 있지 않은 채 재운전시에 어떠한 착화원이 발생해서 분진 폭발을 일으킨 것으로 생각된다.	불명
2	화학 공업	유황분	바켓 엘리 베이터	1(1)	탱크에서 덩어리에 보내어진 액체유황은 냉각·고화되어 분체가 되어 버켓엘리베이터에 들어간 후 사일로에 이동된 당일 덩어리에서 유황이 넘치고 있었기 때문에 엘리베이터의 운전을 중지하고 점점한 바, 엘리베이터 상부의 샷터가 오므라들어 있었기 때문에 샷터를 두드리다가 폭발했다. 원인은 엘리베이터 타워 내에 유황분이 부유하고 있던 곳을 두드렸기 때문에 다시 분체가 낙하하여 정전불꽃에 의해 착화되었다고 생각된다. 통상은 질소가스에 의해 엘리베이터 내부는 비활성화 되어 있지만 당시에는 가스의 방출노즐이 막혀 있었기 때문에 질소가 치환되어 있지 않았다.	정전기 불꽃

나) 금속 분진

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
3	화학 공업	알루 미늄분	알루 미늄 분수 송관	0	주물압탕 보온제조공장에서 원료의 금속 알루미늄분과 알루미늄잔재를 원료투입구에 투입하고 나서 수분후 원료를 혼합기에 보내는 수송관내에서 폭발했다. 수송관내의 콜로와 관벽 강판과의 마찰에 의해 알루미늄분이 발화된 것이다.	마찰열
4	화학 공업	니켈· 알루 미늄 합금분	백필 터	3(1)	라네-니켈촉매제조를 위해 2연식 햄머밀에서 니켈·알루미늄합금을 분쇄작업 중 햄머밀 출구측 호퍼에 접속시킨 백필터내에서 폭발이 일어나고 집진기, 진동장치, 플렉시블덕트 등이 인화 연소되었다.	불명
5	금속 제품 제조업	알루 미늄분	집진 장치	3(0)	건제수정용 연마기를 사용해서 알루미늄 건제를 연마중 일시작업을 중단해서 연마기의 교체를 하고 재시동했을 때 집진장치 내부의 알루미늄 분에 착화폭발하여 후드에서 분출된 불꽃에 의해 작업자가 상처를 입었다.	불꽃
6	수송용 기계 기구 제조업	알루 미늄분	옥내 분진 기	3(1)	알루미늄제 자전거부품의 연마작업을 하려고 옥내집진기 스위치를 넣었을 때 집진기가 돌연 폭발했다.	불명
7	화학 공업	티탄분	건조기	5(1)	수세스폰지티탄(약 100메시전후)을 건조기내에 쏟아넣는 중에 충격불꽃, 마찰열 등의 원인에 의해 발화되고 건조기내에서 티탄이 연소되었다. 그로 인하여 건조기의 하부 맨홀부가 녹아 고온스폰지티탄이 유출되었다. 거기에 자켓의 물이 유출되었기 때문에 수소가 발생했고 폭발을 유발했다.	충격 화재 또는 마찰열

다) 농산가공품의 분진

번호	업종	가연물	발생설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
8	비철 금속 제조업	알미 늄분	합마밀	3(2)	햄머밀에서 침상알미늄을 구모양으로 분해하는 공정서 동일한 밀내의 망을 통과하지 않은 알미늄분이 다른 알미늄분과 결합하여 크게 되지 않도록 하고, 이것이 고속회전하여 망 눈금부분과의 충격마찰에 의해, 용사현상을 발생하여 발화하고, 동일 밀내에서 작은 폭발이 생겼다. 이 폭발에서 다른 알미늄분이 날라 올라가면서 동일 집진실, 분사실, 회수실의 순서로 폭발이 일어난다.	충격 마찰
9	비철 금속 제조업	알미 늄분	백필터 (사이 크론)	2(1)	알미늄주물을 연마하기 위한 연쇄기에서 연마용 알미늄분을 수송하는 로타의 날개 8매중 3매가 파손한 것으로서 이것을 바꾼후 시운전 할 때 연쇄기에 접속되어 있는 레진용 백필터의 탱크가 폭발, 탱크내의 퇴적분진이 연소하는 고로 공장내에서 비산하고 부근의 작업자가 열부상을 입었다. 또 백필터의 날개는 비산하여 상부 뚜껑부분에 막히기도 하고, 위에 집진용 모터도 막혔다. 사고후의 조사에서 로타의 날개 2매가 파손된 고로 날개의 교환때 몇 개의 날개가 파손되는지를 조사하다가 다시 같은 모양의 파손을 일으키고 착화원으로 된 것을 볼 수 있었다.	충격 화화

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
10	자전차 동부품 제조업	알미 늄분	집진 장치 · 다터	3(0)	경합금 공장의 자전거바퀴용 뼈대 자동연마라인의 자동연마장치 면포에 토렌체크 작업을 행할 때 면포기의 구키가 회전중의 브러시에 접촉하여 불꽃이 발생하고 그 불꽃이 연마장치내의 알미늄분진이나 면에 착화하여 연소하였다. 화염이 후드로부터 집진탱크내에 흡입되어 닥트 및 집진장치내의 알미늄분진에 착화하고 이들의 장치가 폭발하였다. 이 폭발에 의해 공장(3200㎡)의 슬레이트 및 슬레이트벽, 유리창의 대부분이 날려서 비산하고, 공장내에서 작업하고 있던 피해자들이 떨어진 슬레이트 파편에 의해 부상하였다.	충격 화화
11	전기 화학 공업	티탄 함유분	집진 장치 · 다터	3(2)	전기분해방식에 의해 음극 회전로라워에서 프린트 배선판용 동박을 연속적으로 제조하는 공장에서, 보수를 위한 회전로라를 퍼프(Puff) 연마중에 퍼프분이 집진기 혹은 닥트 중에서 발화하여 작업자가 피해를 받았다. 퍼프분에는 많은 티탄분이 혼입하였다. 그 후 다른 집진기에서 쌓인 동종의 집진분을 전기청소기에서 제거하고 있던중에 발화하여 2명이 불에 타서 죽었다. 발화의 원인은 불명이다.	불명
12	금속 가공 제조업	알미늄 마그 네슘 합금분	분쇄기 주변	2(1)	알미늄과 마그네슘의 합금을 홀에서 분해하는 공장에서 분쇄기를 전기제진기로 미분을 제진하던 중에 돌연 폭발하였다. 철골 슬레이트가 날려 신축공장 280㎡건물이 파괴되었다. 비닐호스를 사용하였던 고로 발화원은 정전기로 추정한다.	정전기 화화

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
13	금속 가공 제조업	알미 늄분	가속 지지대	5(2)	알미늄박의 조각을 집진하는 호퍼를 설치하던중 지붕위의 C형 채널내에 축적된 알미늄미분이 용단불꽃에 인화하였다. 다시 벽면사이의 횡목위에 오랫동안 쌓였던 미분층을 날려 폭발이 계속된 것으로 추정된다.	가스 용단 불꽃
14	기계 장치 제조업	금속 규소분	바닥	0	금속규소 미분해 가공설비의 바닥부근에서 분진폭발이 생기고 설비 및 건물을 파손하였다. 원인은 바닥에 금속규소가 접촉하고, 발화하여 분진폭발에 이른 것으로 추정된다.	충격 마찰
15	식료품 제조업	쌀겨	바케트 컨베 이어	3(1)	기존의 쌀겨 저장탱크가 가득차 있었기 때문에 저장용 바케트컨베이어에 슈트를 부착하여 별실에 쌀겨를 보낼 목적으로, 컨베이어 닥트에 가스용단기로 슈트부착구멍을 뚫고 있을 때 컨베이어 내부에서 분진폭발이 발생했다.	가스 용단 불꽃
16	식료품 제조업	사료분	저장 탱크	3(0)	사료의 반제품을 저장하는 탱크 내부의 사료투하슈트해체작업시 탱크내측과 벽면에 걸쳐진 L형 앵글에 작업자가 타고, 앵글과 슈트의 접합부를 가스용단한 바, 앵글이 벗어나 작업자가 떨어졌으므로 탱크양벽의 부착분진이 날아올라 용단불꽃에 의해 분진폭발을 일으켰다.	가스 용단 불꽃

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
17	식료품 제조업	전지 분유	사이 클론 소음실	0	전지분유 제조설비의 일부인 사이클론이 고장나서 분유가 막혔기 때문에 아크용접에 의한 수리중, 옥외의 소음실이 폭발했다. 원인은 사이클론에 레커(사이클론 벽에 부착한 분유를 두드려 떨어내는 부속기기)를 용접했을 때, 사이클론에 구멍이 뚫리고 내부의 분유가 발화한 것과 사이클론을 이동시킨 채 수리를 했기 때문으로 생각된다.	아크 용접 불꽃
18	설비 공사업	소맥분	소맥분 탱크 호퍼	4(0)	소맥분탱크의 호퍼내부에 들어가서 아크용단을 행한 바 탱크내부의 청소가 불충분했기 때문에 탱크의 측벽에 남아 있던 소맥분이 탱크내에서 폭발농도를 형성하고 아크용접 아크가 착화원이 되어 분진폭발이 발생했다. 이 폭발 때문에 공사에 종사하고 있던 작업원 4명이 화상 등의 중상을 입었다.	아크 용접 불꽃
19	배합 사료 제조업	옥수수 분	사료 용사 일로	1(0)	사료(옥수수수분, 일부 고량분 혼합)용 사일로 내부구조물 수리를 위해 철공업자가 사일로내에서 용접작업중 벽면에 부착(20cm두께)되어 있던 옥수수수분이 하부 배출구에서 낙하하고, 아크용접 불꽃이 전파해서 사일로 내부에 부유하고 있던 분진이 불타고 사일로내에 있던 작업자가 전신에 화상을 입었다. 사일로내의 분진제거가 완전하게 되어 있지 않고 또 환기도 상부팬홀(1/3정도 옴)과 하부배출구의 자연통기뿐이었다.	아크 용접 불꽃

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
20	곡물 창고업	옥수수 수분	바켓 엘리베 이터, 컨베이어	1	당일은 휴일로 사일로의 본선하역은 하고 있지 않았지만, 옥수수를 주병에서 부병으로 사일로를 바꾸기 위해 기계실의 운전운전을 시작했다. 작업개시후 1시간 정도 지나서 바켓엘리베이터 상부에서 폭발이 발생하여 1초후에 엘리베이터 하부에서, 2번째의 폭발이, 2초후 암벽의 반입 끝, 컨베이어에서 3번째 폭발이 발생했다. 당시 안벽근처에서 작업을 보고 있던 외부 트럭운전사가 피해를 입었다. 원인은 바켓엘리베이터의 정상부 헤드프리의 세트스크류가 바른 위치에 세트되어 있지 않았기 때문에 이동하여 케이싱에 스쳐서 적열되었기 때문에 내부의 분진구름을 발화시킨 것으로 추정된다.	마찰열
21	곡물 창고업	대맥분	곡물 사일로	0	완성되지 얼마되지 않아서 곡물 사일로 주부사일로 53대 중, 부사일로 1대(강판형, 반경 3.2m, 높이 48m 원통형)의 탑집에서 폭발이 일어났다. 사고전에 보리 6톤을 투입했기 때문에 분진폭발이라고 생각되지만 원인은 정전기 이외 불명이다. 주 사일로 5대와 부사일로 2대도 상부가 벗기거나 균열이 갔지만 작업원은 조작실에서 재빨리 대피했으므로 상처는 입지 않았다.	정전기 불꽃

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
22	과자 제조 업	콘스타 치분	건조 실, 다트	8	상자에 들어간 옥수수 녹말 분진층상에 엿과자 원액을 적하해서 남은 상자를 34 개 겹쳐 손수레로 건조실로 반입중 방입 구에서 전도했다. 그 결과 제습용의 옥수 수녹말 분진 68kg이 떠올라 일부가 날아 올랐다. 피해자가 서둘러서 실내로 들어 가려고 입구에 갔을 때 분진폭발이 일어 나서 전신화상을 입었다. 당시 히터의 열 원은 꺼져 있었으므로 착화원인은 불명 이다.	불명

라) 유기화학공업제품의 분진

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
23	화학 공업	텔레 프탈 니트릴 분	건조 실	0	텔레프탈니트릴 건조실에서 정전기 스파 크가 모터의 가열에 의한 점화원으로 작 용하여 텔레프탈니트릴의 분말이 폭발해 서 스크류컨베이어와의 연결슈트위를 불 꽃이 전파되었다.	정전 기불 꽃
24	화학 공업	조사마 이신분	건조 기	2(0)	항생물질 조사마이신의 분말을 건조하기 위해, 폴리포대에서 건조기로 투입하고 있었던 바, 약 120kg 투입했을때에 내부 에서 폭발을 일으켰다. 분말 속에 함유되 어 있던 미량의 톨루엔 투입시 정전기 불꽃에 의해 발화되고 분진폭발이 생긴 것이다.	정전 기불 꽃

번호	업종	가연물	발생설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
25	화학 공업	바라 포름분	건조기	2(0)	바라포름의 페레트를 분쇄기에 넣어 미분화하는 공정에서 분쇄기의 하부에 불꽃이 발생하여, 백필터에 인화·폭발했다. 원료에 혼입되어 있던 볼트가 분쇄기에서 불꽃을 발생시켜, 바라포름 분진이 폭발한 것이다.	충격 불꽃
26	화학 공업	폴리스 틸렌분	건조기 백필터	0	폴리스틸렌 탈수건조공정에서 폴리스틸렌을 원통건조기에 넣고 건조중에 분진폭발이 일어났다. 원인은 백필터의 테트론필터에 쌓인 폴리스틸렌의 미분을 세정조정 및 박리할 때 고전위 정전기 방전불꽃에 의해 인화하여 폭풍이 회전식 건조기에 역류했던 것으로 추정된다.	정전기 불꽃
27	의약 품제 조업	약제분	유동 건조기	0	입형유동충건조기(내용적 2.7m ³ , 스팀히터식 열원사용)에서 진통제과립을 불어올려 확산건조를 개시한 직후 건조기내에서 폭발이 발생했다. 원인은 과립의 일부 분진이 폴리에스테르제 백필터에 부착되어 박리했을때 정전기불꽃에 의해 용제 IPA의 증기에 인화하여, 분진폭발한 것으로 생각된다.	정전기 불꽃
28	화학 공업	폴리에 틸렌분	백필터	0	폴리에틸렌분말을 분말원료 탱크에 공기수송하고 있을 때, 탱크에 접속되어 설치되어 있던 백필터내에서 폭발했다. 필터의 도전성이 저하되어 있던 곳에서 정전기 불꽃에 의해 착화라고 생각된다.	정전기 불꽃

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
29	화학 공업	지페닐 프로판 분	배기 blower 및 배기 덕트	1(0)	에폭시공정의 건물내에서 원료의 DPP (지페닐프로판) 850kg이 든 백을 호이스트로 끌어올려 반응기 상부 호퍼에서 투입작업중 돌연 호퍼에서 화재가 일어나서 작업중인 피해자가 상반신에 화상을 입었다. 화재는 약 12분 후에 진화되었지만 반응기 부속 기기류와 주변설비 일부가 소손되었다. 원인은 반응기 건물 2층 천장의 배기송풍기 내부에서 분진폭발이 발생해서 이 화재가 배기덕트로 전파되어, DPP 투입중인 반응기 주변에 이르러 화재가 발생한 것이다.	불명
30	화학 공업	ABS 수지분	집진 장치	0	ABS를 제조하고 있는 ABS수지 가공 포장공장내에서 작업중, ABS 수지조제 등의 혼합계열에 설치되어 있는 국소배기장치 등의 내부에서 분진폭발이 발생했다. 원인은 수지혼합기에 설치되었던 국소배기장치의 흡인덕트부에 발생했던 정전기불꽃이 착화원이 되어 발화하여 덕트내를 전파하고 집진기내에서 분진폭발을 일으킨 것으로 생각된다.	정전기 불꽃
31	화학 공업	폴리에 틸렌분	폴리 에틸렌 반제품 사일로	0	폴리에틸렌 조립공정에서 펠레트를 반제품사일로에 공기수송중에 사일로가 폭발했다. 사일로속의 청소를 하지 않았기 때문에 퇴적된 폴리에틸렌분이 박리낙하했을 때 정전기 불꽃이 착화원이 되었던 것으로 생각된다.	정전기 불꽃

번호	업종	가연물	발생 설비	사상자수 ()속 사망	발생상황 및 원인	착화원
32	화학 공업	비스페 놀A분	제품 축적 사일로	0	에폭시수지의 원료가 되는 비스페놀 A제품공장의 최종공정인 제품축적 사일로속에서 폭발이 일어나 사일로 본체 및 근접한 건물의 지붕, 측벽을 크게 부숴다.	반송장 치회전 부분의 마찰열
33	의약 품제 조업	벤트 탠산 칼슘분	유동 건조기	0	판토텐산칼슘합성생성물을 원심분리해서 메탄올과 물을 포함한 습제품을 유동건조기 속에서 130℃ 열풍건조중에 분진폭발이 발생했다. 제품은 건조중 비산하므로 2대의 사이클론을 연결해서 분진을 회수하고 있었지만 안전과열판이 작동해서 불꽃을 뿜었다. 착화원은 정전기로 추정된다.	정전기 불꽃
34	도료 제조업	복사용 토너	충전 용기 주변	2(1)	2층 캐리호퍼에서 전자복사용 토너를 2층부분에 두었던 카트릿지에 충전작업중 분진이 용기에서 넘쳐 부유·분산되었다. 1층 부분에 있는 채완용의 석유스토브에서 분진구름이 발화, 분진폭발에 이르렀다.	석유 스토브
35	화학 공업	석유 수지분	사일로	0	석유수지쇄분을 압송식 공기수송으로 6인치 배관 30m를 수평, 수직부를 통해서 금속제 사일로에 투입중에 폭발해서 사일로 상부뚜껑(지붕)이 파손되었다. 원인은 수송중에 곡관부 등에서 분쇄미분화된 분진이 대전되어 사일로 속에서 雷狀 방전한 것으로 추정된다.	정전기 불꽃

제 3 장 분체의 대전 및 방지

3-1 정전기 현상

3-1-1 정전기 재해·장해 현상

정전기는 주로 물체와 물체의 접촉·분리과정에 의하여 모든 물체에서 발생하며 발생과 동시에 누설된다. 이 정전기의 누설을 완화라고도 하며, 발생한 정전기와 완화된 정전기와 차가 물체에 축적된다. 이 정전기의 축적을 대전이라 하고 정전기가 축적되어 있는 물체를 대전물체라고 한다. 이와 같이 대전은 발생과 완화와의 차이이며 완화는 전하의 흐름에 의하여 발생한다. 따라서 전류가 흐르기 쉬운 금속과 같은 도체는 발생한 정전기의 대부분이 완화되기 때문에 결과적으로 대전량이 작아진다. 그러나 반대로 고유저항이 $1,012 \Omega \cdot m$ 이상인 부도체(절연물)는 완화가 적어서 발생한 정전기의 대부분이 대전된다. 정전기가 절연물에 대전로 쉬운 것은 그 때문이며, 또한 도체라도 대지와 절연되어 있으면 발생한 정전기가 대지에는 완화되지 않기 때문에 대전된다. 정전기는 접촉·분리라는 기계적인 에너지가 전기적인 에너지로 변환된 것이기 때문에 대전물체는 전기에너지를 축적하고 있다. 그 결과 대전물체는 그 전기에너지에 의하여 일을 한다. 대전물체의 주변에 나타나는 정전기 현상은 다음과 같은 두 가지 현상으로 나타난다.

첫째, 그림 3-1에 나타낸 것과 같이 대전물체의 주변에 존재하는 작은 물체를 흡인·반발하는 역학적인 현상이다.

둘째, 대전물체의 주변에 존재하는 공기와 같은 기체분자를 양(+)과 음

(-)의 이온으로 전리되게 하는 작용이다. 이 전리작용이 일어나면 그림 3-2에 나타낸 것과 같이 이온이 이동하여 대전물체의 정전기를 중화한다.

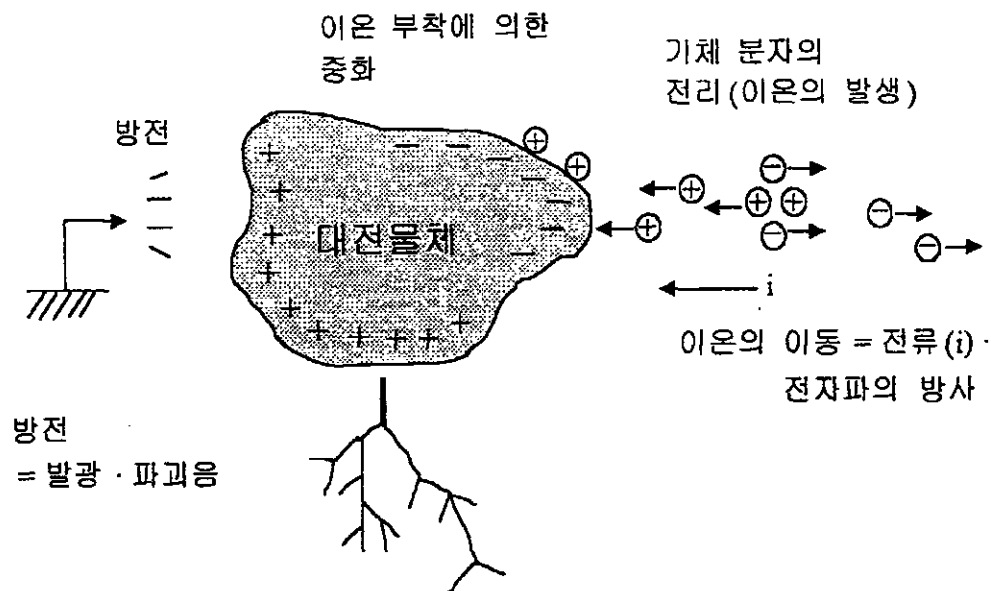


그림 3-1 정전기에 의한 역학 현상

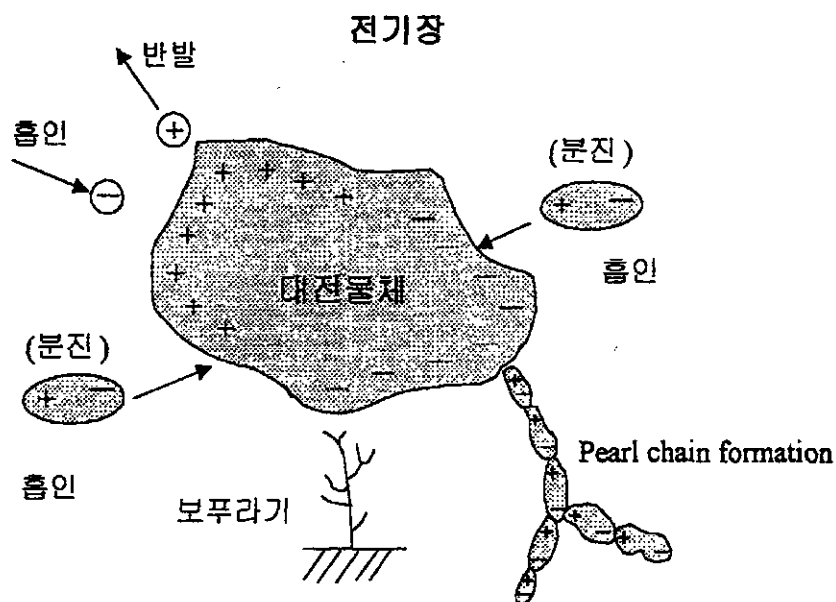


그림 3-2 정전기에 의한 방전 현상

여기서, 전리작용을 방전현상이라고도 하며, 방전현상에는 미약한 발광과 파괴음이 일어나거나 이온의 이동에 의한 전류가 흐르기 때문에 전자파(전파)가 방사된다.

가) 역학현상에 의한 장애·재해

정전기가 일으키는 역학 현상인 흡인·반발작용은 힘이 고작 수 100 mg/cm²로 작으며, 물체의 표면에 작용한다. 따라서 표면적과 체적과의 비인비(比)표면적이 크게 되면 정전기력이 중력보다도 크게 된다. 그 결과 지름이 200 μ m 정도 이하의 비표면적이 큰 분체, 종이, 필름, 섬유 등은 정전기의 작용을 크게 받는다.

특히 분체의 생산공정에서는 채 구멍의 막힘, 수송 파이프, 호퍼의 폐쇄이나 분말의 자동계량 또는 포대투입 등의 공정에서는 계량 오차, 투입시의 화재 등의 장애가 발생한다. 또 인쇄공정에서는 보푸라기에 의한 인쇄불량, 인쇄지의 송출불량에 의한 기계정지 등의 생산장애가 발생한다.

한편 생산환경에 떠다니는 더스트, 미스트 등은 정전기의 역학적인 작용을 받기 쉽고 이것들이 흡인되어 원재료, 반제품 또는 제품에 부착되면 오염이 발생한다. 전형적인 장애는 반도체 산업에 있어서의 웨이퍼의 오염으로 수율 저하의 주된 원인이 된다. 표 3-1은 정전기 역학현상의 오염에 의한 생산장애의 예를 나타낸다.

표 3-1 오염에 의한 생산 장애의 예

업 종	주요장애의 예
바이오 산업	· 무균 시료 · 무균 동식물 · 유전자 등의 오염에 의한 바이오 장애, 바이오 리액터의 폭주
전자 통신 공업	· 각종 웨이퍼, VLSI 등의 부품, 컴퓨터, 자기 메모리 등의 마이크로 오염에 의한 불량품 증대
정밀 광학 공업	· 먼지의 정전 부착에 의한 렌즈 · 필름의 품질 저하, 사진제판의 불량, 정밀도 저하, 기구 부품의 흠
의약품 제조업	· 세균 오염에 의한 품질 · 순도 저하, 곰팡이의 발생
식품 공업	· 먼지의 부착, 세균 오염에 의한 곰팡이 발생, 발효 불량, 변질, 변색
사진 인쇄 공업	· 먼지의 정전 부착에 의한 사진, 제판, 필름, 잉크 등의 품질 저하, 보푸라기, 가루알(pill) 등의 발생에 의한 마감 불량

나) 방전현상에 의한 장애 · 재해

방전현상은 대전물체가 보유하고 있는 에너지의 방출이다. 이 정전기 방전시에 방출되는 에너지는 수 mJ 정도로 아주 작은 것이다. 그러나 이러한 방전에 의해 여러 가지 장애 · 재해가 발생한다. 가장 대표적인 재해는 화재 · 폭발이다. 이 화재 · 폭발은 방전에너지에 의하여 가연성 가스 · 증기 · 분체의 온도가 상승하여 연소반응이 유발되기 때문인데 정전기 방전이 착화원이 되어 발생한 재해의 전형적인 예이다. 이들 정전기의 방전이 착화원이 되어 발생한 가연성 물질의 화재 · 폭발은 방전에너지에 한계가 있기 때문에 최소착화에너지 수 mJ 이하의 가연성 물질로 거의 한정되어 있다. 따라서 정전기에 의한 화재 · 폭발은 최소착화에너지가 비교적 적은 가연성 가스 · 증기 또는 평균 입자의 지름이 수 100 μ m 이하의 미세분말에서 주로 나타난다.

한편, 방전에너지는 작으나 방전시에 최대 수 μA 정도의 방전전류가 수 μs 시간 동안에 흐르기 때문에 방전이 인체에서 또는 인체로 향하여 일어나면 전기충격을 받는다. 이로 감전사하지는 않지만 피부가 파괴되거나 그 쇼크로 넘어지거나 추락 등의 2차 재해가 발생하기도 한다. 또한 IC, LSI 와 같은 고집적 반도체에 대하여 방전이 일어나면 이것들이 파괴되거나, 특성 열화 등의 장애가 발생된다. 예를 들면 반도체 소자로 된 측정기, 정보 처리기기 등의 조립, 조정, 검사공정 등에서는 소자의 정전파괴에 의하여 제품불량, 생산효율 저하 등의 장애가 발생한다. 한편 정전기 방전시에 수 천 MHz까지 이르는 광대역의 주파수 성분을 가진 전자노이즈가 방사된다. 그 결과 신호를 고속으로 처리하고 있는 컴퓨터, 자동생산기기 등의 전자기기가 이 전자노이즈에 의하여 오동작을 일으켜 생산시스템의 폭주, 정지뿐만 아니라 이것이 1차 원인이 되어 사상자를 수반하는 2차 재해가 발생되기도 한다. 표 3-2은 정전기 방전에 기인한 장애·재해의 예를 나타내며 그림 3-3은 정전기에 장애·재해의 주된 예를 나타낸다.

표 3-2 정전기 방전에 기인한 장애·재해 사례

발 생 공 정	장애·재해의 개요	추 정 원 인
차체의 조립	벨트 컨베이어를 제어하고 있던 컴퓨터가 전자노이즈에 의하여 오작동, 작업자가 차체와 폭주한 조립 기계에 끼어서 부상	용접 로봇의 방전또는 벨트 컨베이어의 대전
전자 부품의 세정	용제 세정 벤치의 파티션 패널이 컴퓨터의 오작동으로 열려 용제 분무와 공기에 의하여 폭발분위기가 형성된 화재	세정노즐에서 고속으로 분출한 대전 미스트운의 방전
절연포의 수지 도포	글라스울에 에폭시 수지를 도포, 프린트 기판을 제조하는 공정에서 보이드 방지에서 진공 탈포의 시험중, 진공 용기의 봉합불량으로 공기가 들어가 폭발, 작업자가 화상	고속 주행하고 있는 글라스울의 대전
재료의 자동 반송	에폭시 수지를 바른 바닥 위를 주행하는 무인 반송차가 폭주하여 정지 위치의 밀림, 가대에 충돌, 화물 낙하 등이 발생	바닥과 차와의 마찰대전
텐트의 봉제	마이크로 컴퓨터 제어 공업용 머신이 프로그램에 따라 작동하지 않고 바늘이 부러지거나 봉제 미스 등의 불량품이 빈발	옷감 또는 작업자의 대전
생산라인의 모니터 감시	OA의자에서 일어났을 때 모니터가 점멸하거나 키보드에서의 입력 미스가 발생	OA의자 또는 작업자의 대전

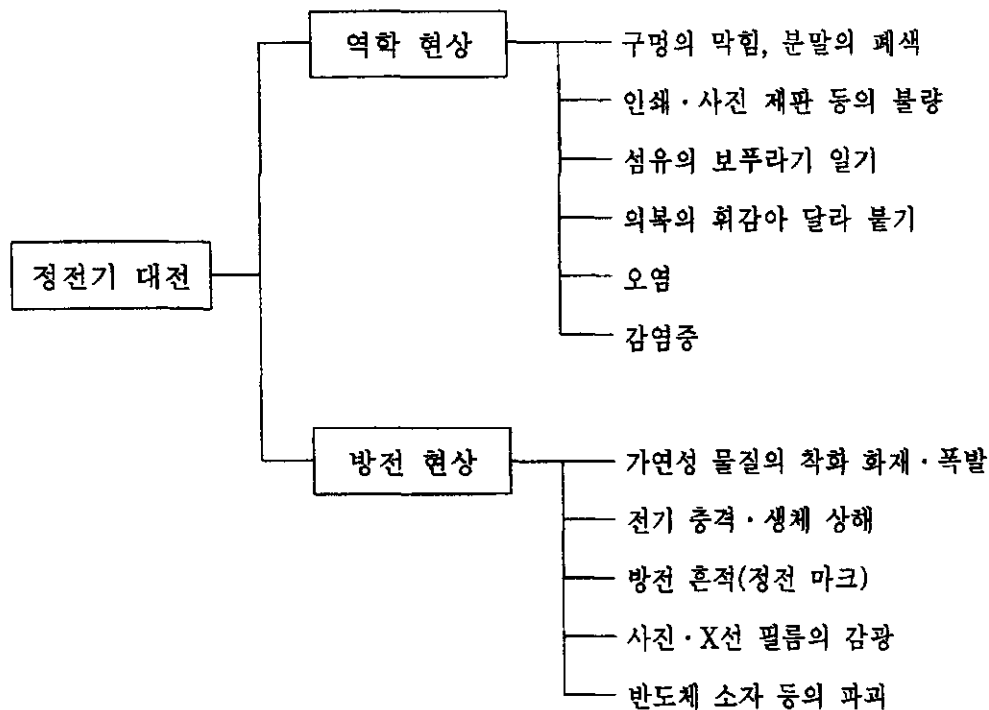


그림 3-3 정전기에 의한 장애·재해

3-1-2 정전기 발생에 미치는 요인

정전기는 물체간의 접촉, 마찰 또는 충격 등에 의하여 분자가 이온화 되거나 금속물질내의 자유전자가 이동하여 전하의 불균형이 일어나 발생하는 현상이다. 정전기 발생의 요인으로는 물체의 종류, 표면의 상태, 접촉 압력, 분리 속도 등을 들 수 있다.

가) 물체의 종류

접촉이나 마찰에 의하여 일어나는 대전은 대전서열이라고 불리는 물질의 서열상 상대적 위치에 영향을 받는다. 어떤 두 물체를 접촉시키거나 마찰할 때 대전서열에서 (+)측에 있는 물질이 양극성을 띠고, (-)측에 있는 물질이 음극성을 띠게 되며, 대전서열에서 서로 멀리 떨어져 있는 물체일수록 정전기의 발생이 용이하여 대전량이 많아지게 된다.

④																						①
유	머	나	양	레	비	견	아	오	필	고	테	비	사	다	카	폴	카	셀	사	셀	영	테
리	리	이	모	이	니	포	세	오	프	무	릴	닐	린	클	트	리에	칼	루로	진필	로판	화비	프론
	틸	론		온	른		테	른	노		런	런		론		칠	론	이드	론	닐		
					인		이트	흔	지		○					런						
					건		인	방														

표 3-3 대전 서열

나) 표면 상태

표면의 상태는 표면의 오염, 부식, 수분과 같은 화학적인 것과 표면의凹凸, 거칠음 등과 같은 물리적인 것이 있다. 일반적으로 표면이 깨끗하거나 평활할 때 정전기의 발생이 적다.

다) 접촉면적 및 접촉압력

물체간의 접촉면적이 클수록 정전기의 발생량은 많아진다. 접촉압력은 실질적으로 접촉면적과 관계가 있어 이 압력이 클수록 접촉면적도 커져 정전기의 발생량이 많아지게 된다.

라) 대전 이력

동일한 물질과 조건에서도 연속적으로 일어나는 정전기의 발생량은 처음에는 많다가 점차 줄어들어 어느 수준에 이르러서야 일정하게 된다. 다시 말하면 어떤 물질에 있어서 정전기의 발생은 그전에 일어났던 그 물체에 대전이력에도 영향을 받는다. 이는 대전에 따라 물체 표면의 상태가 변화하기 때문이다.

마) 분리 속도

분리속도가 크면 발생된 전하의 재결합이 적게 일어나 정전기의 발생량이 많아지게 된다. 급한 발진, 정지, 변속 등은 분리속도를 크게 하여 정전기의 발생량이 많아지므로 피하여야 한다.

바) 기타 요인

기타 정전기 발생에 영향을 미치는 요인으로는 온도, 습도, 불순물 등을 들 수 있다. 온도가 높으면 정전기 발생은 많아지는 경향이 있다. 습도가 높으면 물체표면에 수분이 많이 생겨 대전된 정전기를 누설시켜 제거하는데 도움을 준다. 불순물이 많으면 정전기의 발생량은 증가하나 도전율도 커져 발생된 전하를 더 많이 누설시키므로 잔류하는 정전기의 양은 어느 한도 이상에서는 오히려 감소할 수 있다.

3-2 정전기에 의한 화재·폭발

3-2-1 정전기에 의한 화재·폭발의 발생조건

가연성 가스, 증기, 분체 등의 가연성 물질이 공기와 같은 지연성(支燃性)가스와 혼합되어 그 혼합농도가 폭발범위에 있으면 정전기 방전에너지에 착화하여 화재·폭발을 일으킨다. 즉 가연성 혼합기속에서 정전기 방전이 발생하면 방전에너지의 대부분은 방전경로에 있는 가연성 혼합기의 온도상승에 소비되며, 이 온도상승에 의하여 가연성물질이 연소 반응을 개시하여 착화된다. 화재·폭발에 가연성물질의 연소반응이 차례차례로 순간적으로 진전되는 것에 의하여 일어난다. 따라서 가연성물질의 정전기에 의한 착화조건은 가연성물질의 농도가 폭발범위에 있거나 정전기방전이 그 연소 반응을 일으킬 만한 방전энер지를 방출할 때이다.

3-2-2 가연성물질의 착화 위험성

가연성물질의 농도가 지나치게 낮거나 높아서 폭발범위이면 충분한 방전 에너지를 방출하는 정전기가 생성되었다 하더라도 연소반응의 연쇄적인 진전, 즉 화염의 전파가 일어나지 않고 착화되지 않는다. 가연성액체라도 그 취급온도가 인화점 이하이면 마찬가지로 착화하지 않는다. 여기서 인화점이란 가연성액체의 포화증기 농도가 폭발하한계에 달하는 온도이다. 폭발범위는 주변의 온도에 의존하며 압력이 일정한 조건하에서는 온도가 상승하면 폭발하한계 농도가 감소하고 폭발상한계 농도는 증가하여 폭발범위는 확대된다. 더욱 온도가 높아지면 자연발화영역이 나타나 착화원이 없어도 착화하게 된다.

한편 가연성 혼합기의 착화에 필요한 에너지는 가연성물질과 가연성가스와의 혼합농도에 크게 의존하여 그림 3-4에 나타낸 바와 같이 화학량론 조성의 농도 부근에서 최소로 된다. 가연성물질의 착화에 필요한 최소의 에너지를 최소착화에너지라고 한다. 최소착화에너지는 온도, 압력, 첨가물 외에 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받는다. 가연성가스가 산소이면 공기에 비하여 최소착화에너지가 저하한다. 또 온도 의존도가 높고 온도의 상승과 아울러 대부분 최소착화에너지는 지수 함수적으로 감소한다. 압력 의존성도 커서 거의 압력의 제곱에 반비례하여 최소착화에너지는 감소한다. 대기의 상대습도에도 영향을 받아 상대습도가 증가하면 최소착화에너지는 크게 된다.

표 3-4~3-6은 각각 각종 가연성 가스, 액체 및 가연성 분체의 착화 위험성을 나타낸다. 여기서의 최소착화에너지는 상온상압하에 있어서의 공기와 혼합에 의하여 얻어진 것이다. 다만 분체의 최소착화에너지는 표 3-6에 나타낸 바와 같이 입자 지름이 미세할수록 작아지는 경향이 있어서 지름이 수십 μm 이하의 분체에서는 표 3-6에 나타낸 값보다 최소착화에너지는 작은 값으로 예상된다.

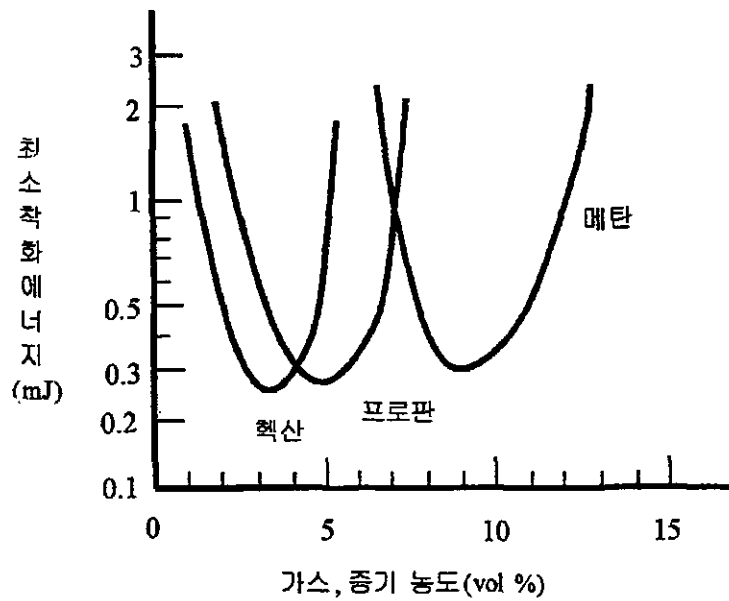


그림 3-4 가연성 가스, 증기의 농도와 최소 착화 에너지

표 3-4 가스, 증기의 착화 위험성

물질명	폭발 한계(vol%)		인화점(℃)	최소 착화 에너지(mJ)
	하한계	상한계		
메 탄	5.0	15.0	-187	0.280
에 탄	3.0	15.5	-130	0.250
프 로 판	2.1	9.5	-104	0.250
부 탄	1.5	8.5	-72	0.250
헥 산	1.1	7.5	-26	0.240
벤 젨	1.2	8.0	-11	0.200
메 탄 올	5.5	44.0	11	0.140
수 소	4.0	75.6	-	0.019
아 세 틸 렌	1.5	82.0	-	0.019
이황화 탄소	1.0	60.0	<-30	0.009

표 3-5 분말의 착화 위험성

물 질 명	폭발 하한계 농도 (g/m ³)	최소 착화 에너지 (mJ)
알 루 미 늄	30	10
유 황	35	15
석 탄	40	30
에폭시 수지	20	9
합 성 고 무	30	30
폴 리 에 틸 렌	20	10
폴리프로필렌	20	25
소 맥	40	40
설 탕	35	30
목 재	20	20

표 3-6 분말의 입경과 최소 착화 에너지의 관계

입 경 (μm)	최소 착화 에너지 (mJ)
710~1,680	> 5,000
355~709	250~500
180~354	50~250
105~179	< 10
53~104	< 10

3-2-3 방전에너지와 착화 한계

가) 도체로부터의 방전

대전된 도체로부터의 방전은 보통 불꽃방전이 되어 방전 전에 축적한 정전기 에너지의 거의 전부가 방전에너지로서 방전공간에 방출된다. 이 방전 에너지가 가연성 물질의 최소착화에너지보다 크면 착화된다. 방전에너지는 다음과 같은 식 (3-1)로 나타낸다.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C} \quad (3-1)$$

여기서, $W(J)$: 방전에너지, $C(F)$: 대전물체의 정전용량,
 $V(V)$: 대전전위, $Q(C)$: 대전 전하

나) 절연물로부터의 방전

대전물체가 절연물이면 이것으로부터 방전이 발생해도 방전시에 대전전하의 일부가 방전하는 것에 불과하기 때문에 방전에너지는 식 (3-1)로는 나타내지 못한다. 이 경우의 방전에너지는 다음 식 (3-2)로 산출할 수가 있다.

$$W = \int IVdt = \int I^2 Rdt = \int \frac{V^2}{R} dt \quad (3-2)$$

여기서, $I(A)$: 방전전류, $V(V)$: 방전전극간의 전압, $R(\Omega)$: 방전공극의 저항

식 (3-2)로 구할 수 있는 방전에너지는 사전에 평가할 수 없고 또 그 측정도 곤란하다. 더욱이 가연성 물체의 착화에는 방전에너지의 총량이 아니라 그 시간적·공간적 밀도가 관계하기 때문에 방전에너지는 절연물에서의 방전 착화한계로서는 사용할 수 없다.

3-3 절연물의 대전방지

3-3-1 정전기의 발생방지

절연물의 정전기를 제거하기 위하여서는 우선적으로 정전기의 발생을 가능한 한 방지한다. 정전기 발생을 방지하는 일반적인 방법은 다음과 같다.

- ① 설비와 물질 및 물질 상호간의 접촉 면적·접촉 압력의 감소
- ② 접촉 횟수의 저감

- ③ 접촉·분리 속도의 저하
- ④ 접촉물의 급속한 박리 방지
- ⑤ 표면상태의 청정 및 평활화
- ⑥ 불순물 등 이물질의 혼입 방지
- ⑦ 정전기 발생이 적은 재료의 선정

정전기는 생산공정에 따라서 발생하기 때문에 발생 방지는 원칙적으로 곤란한 경우가 많다. 구체적으로는 정전기 발생을 회피하기 위하여 가연성 액체의 취급에 있어서는 유속 제한, 스프레이·로딩의 회피, 물·공기 등 이물질의 혼입 방지, 분체 취급에 있어서는 규모 제한, 입자 지름의 증대화, 분진의 비산 방지, 종이·필름 등의 취급에 있어서는 속도 제한, 가연성 기체·액체 가스의 분출 방지·압력 제한 등이 실시된다. 또 정전기의 발생량과 대전 극성은 접촉·마찰하는 물체의 종류에 영향을 받기 때문에 대전서열을 참고로 하여 정전기 발생이 적은 재료를 선정한다.

가) 자연 완화

절연물이라고 해도 저항률은 무한대가 아니기 때문에 접지된 용기 등에 담아두면 대전전하가 서서히 완화된다. 이 경우 대전량은 일반적으로 지수 함수적으로 감소하기 때문에 충분한 정치시간이 경과되어야 완화된다. 예를 들면 저항률이 $1 \times 10^{11} \Omega \cdot m$ 인 물질에서는 완화시간이 10초 정도의 정치시간으로 대전방지를 할 수 있다. 그러나 저항률이 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 이면 완화시간은 1,000초(17분)로 되어 정치시간을 길게 해도 대전방지가 되지 않는다.

나) 다습화

환경의 습도가 높으면 공기중의 수증기 일부가 대전물체에 흡착되어 표면에 얇은 수막의 도전층이 형성되며 표면저항률이 저하하여 대전이 억제된다. 반대로 습도가 낮으면 물체표면에서의 수분증발이 촉진되고 표면저항

물이 상승하여 대전성이 증가한다. 물체의 표면저항률은 일반적으로 습도에 반비례하여 변화하지만 대전전위는 그림 3-5에 제시된 것과 같이 상대습도가 40~50% 이하에서는 포화되는 경향이 있다. 따라서 대전방지를 위한 상대습도를 70% 정도로 유지하여야 한다. 상대습도의 증가에 따라 대전방지의 효과가 있는 것은 건, 종이, 목재, 피혁, 유리 등과 같이 대전하는 표면이 대기 중의 수분과 평형상태가 되는 물질에 한정되어 있고, 가열시킨 표면이나 기름, 기타 유체 또는 수분을 흡착하지 않는 고체의 경우는 고습도가 대전방지에 대하여 거의 효과가 없는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 흡수성이 강한 물질로는 $-OH$, $-NH_2$, $-SO_3H$, $-COOH$, $-OCH_3$ 등의 기나 CO결합으로 이루어져 있는 분자를 보유한 물질로 보고 되고 있다. 반면에 표면에 CH_3 , C_6H_5 기 등이 배열한 물질은 배수성이고 또 폴리우레탄, 아닐린수지, 에폭시수지, 아크릴중합체 등은 분자구조 중에 친수성의 기가 적어 습도에 의한 대전방지 효과가 미흡한 것으로 알려져 있다.

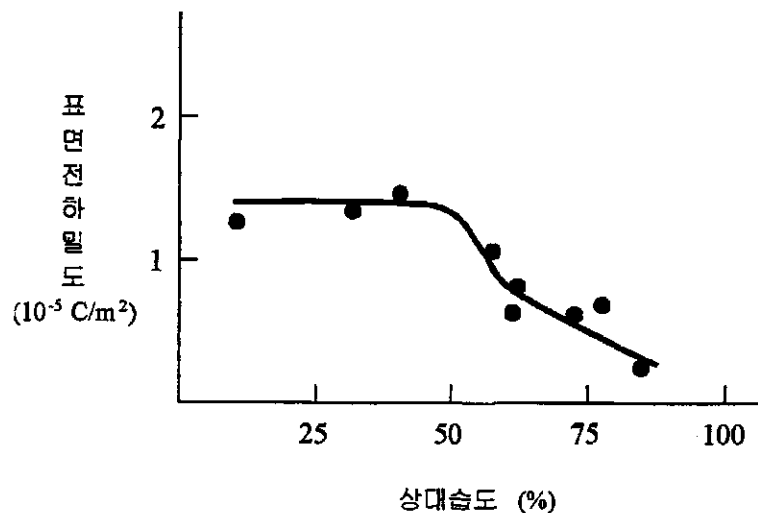


그림 3-5 상대습도와 플라스틱의 대전량과의 관계

다) 대전방지재료의 사용

대전방지재료를 써서 플라스틱 같은 절연물을 대전방지하는 방법에는 표면의 도전화와 내부에 도전성 재료를 첨가하는 두 종류가 있다. 표면처리재료에는 대전방지제, 도전성 도료, 도금, 도전성 박 등이 있으며 내부 첨가재료에는 대전방지제, 도전성 필러, 도전성 폴리머 등이 있다. 도전성 재료의 종류와 주요 대전방지 용품을 표 3-7에 나타냈다. 대전방지제의 대표적인 것은 계면활성제이며 이것이 공기중의 수분을 흡착하면 물체표면의 도전성이 증가한다. 대전방지제의 일반적인 특징은 습도 의존성이 커서 상대습도가 40% 정도 이하에서는 대전방지 성능이 저하하는 것과 물세척에 의하여 표면의 계면활성제가 제거되어 대전방지 효과가 오래 지속되지 않는다는 것이다.

고무, 플라스틱 등의 절연물에 카본 블랙, 금속분말, 금속섬유 등의 도전성 필러를 반죽하면 체적저항이 저하하여 대전방지 재료가 된다. 도전성 필러로서는 첨가량에 의하여 저항률을 폭넓게 조정할 수가 있는 카본 블랙 콤파운드가 많이 사용된다. 도전성 섬유는 섬유제품 등에 혼입하는 것에 의하여 미소한 코로나 방전을 일으켜서 섬유를 대전방지하는 것인데 그 효과는 습도에 영향을 받지 않는 특징이 있다. 도전성 섬유로서는 카본블랙 미립자를 분산한 폴리머를 복합사로 방직한 것이 많이 사용된다.

표 3-7 주요 대전방지 재료·용품

도 전 성 재 료	대 전 방 지 재 료·용 품
카본 블랙, 금속분 등을 분산시킨 고무	타이어, 캐스터, 벨트, 롤러, 패킹, 호스, 매트, 신발, 슬리퍼, 장갑, 테이프, 시트
카본 블랙, 금속분 등을 분산시킨 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 스폰지, 파이프, 호스, 반도체용 용기·자루, 차폐재, 바닥재, 각종 성형품
카본 블랙, 금속분 등을 분산시킨 도공제	도료, 접착제, 페이스트, 라미네이트, 코팅제
도전성 도공제를 적층, 프린트한 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 반도체용 포장재
금속 도금, 증착한 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 반도체용 용기·자루, 미터 커버, 클린 룸 창, 차폐재
대전 방지제를 혼입한 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 반도체용 용기·자루, 바닥재, 각종 성형품, 섬유 제품
도전성 섬유를 혼입한 천, 실	작업복, 방한복, 무진·무균옷, 모자, 장갑, 양말, 카펫, 백필터, 벨트, 로프, 슈트, 네트, 호스, 웨브, 포대

라) 제전기의 사용

대전물체 가까이에 대전전하의 극성과 반대 극성의 이온을 공급하면 쿨롱의 힘에 의하여 생성된 이온이 대전전하에 흡인되어 중화됨으로서 정전기의 제거가 이루어진다. 제전기는 여러 가지 기종이 사용되고 있다.

대부분의 제전기는 침상전극에 용량 결합으로 교류 고전압을 인가하여 코로나 방전에 의한 양·음이온을 교대로 생성·공급하는 교류 전압인가식 제전기이다. 그러나 제전기 자체가 가연성 가스·증기의 착화원이 될 수 있다. 이를 예방하기 위하여 특수 방폭구조의 제전기가 사용되고 있다. 이 제전기는 착화성 방전을 일으키지 않는 전극 구조를 가지고 있으며 또 절연 열화에 의한 불꽃방전의 발생을 억제하기 위한 보호장치 등을 갖추고 있다.

다만 사용에 있어서는 제전전극의 청소 등 보수점검이 중요하다.

자기방전식 제전기는 도전성 섬유를 혼입한 포(천)·사(실), 도전성 필름 등을 접지한 금속제 홀더에 부착한 간단한 구조이다. 제전포 등을 대전물체의 표면에 수cm 이하로 접근시키면 도전성 섬유에서 코로나 방전이 발생하여 대전물체의 전위를 2~3kV 정도까지 제전할 수 있다.

마) 정전 차폐

정전 차폐는 접지된 도체를 사용하여 정전계를 차폐하는 것으로 대전물체 자체의 차폐와 외부 정전계에 대한 차폐의 두 종류가 있다. 외부 정전계 차폐는 반도체 디바이스의 보호 등을 위한 것으로 각종 정전기 대책용 포장재료 등이 사용된다. 대전물체의 차폐는 차폐효과에 의하여 대전물체의 전위를 저하시키고 또 방전 면적을 제한하여 방전을 억제한다.

그림 3-6은 호스의 정전차폐의 한가지 예이다. 피치 2~3cm 이하의 금속 망사나 나선형 철사이면 호스 외부에서의 위험한 정전기 방전의 발생이 방지된다. 단 차폐용 도체가 접지되지 않으면 이것이 정전유도를 일으켜 오히려 전위가 상승하여 위험한 상태로 된다. 정전차폐는 대전전하를 제거하는 것이 아니기 때문에 외부를 정전차폐해도 내면에서의 정전기 발생이 심한 경우, 예를 들면 분말의 공기 수송용 호스, 집진 호스, 분말 취급용의 플렉시블 콘테이너 백에서는 내면에서의 연면(沿面) 방전의 발생을 방지하지 못한다.

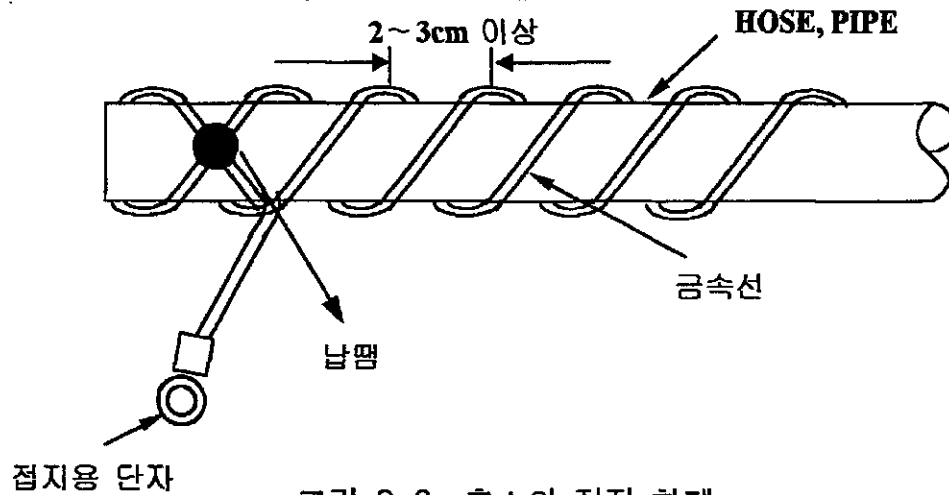


그림 3-6 호스의 정전 차폐

3-3-2 제전기에 의한 대전 방지

가) 제전원리

제전기는 코로나 방전으로 공기를 전리시켜 양, 음이온을 생성하며 이 이온에 의하여 대전물체의 정전기를 중화하는 것이다. 제전기는 이온생성 방법에 따라 그림 3-7에 나타난 바와 같이 자기방전식 제전기, 전압인가식 제전기, 방사선식 제전기의 3종류로 나눈다.

방사선식 제전기는 이온생성에 α 선원의 방사성 동위원소의 공기전리작용을 이용하고 있기 때문에 일반적으로 거의 사용되지 않고 있다.

자기방전식 제전기란 고압전원을 사용하지 않고 접지한 자기방전전극을 대전물체의 근방에 설치하여 대전물체의 전계를 방전전극 끝에 집중시켜 방전전극 끝부분에서 코로나 방전을 발생시켜 생성된 이온으로 대전물체를 제전하는 방법이다. 그림 3-8은 자기방전식 제전기의 제전원리를 나타낸다.

전압인가식 제전기란 고압전원을 방전전극에 인가하여 방전전극과 접지전극간에서 발생하는 코로나 방전에 의하여 이온을 생성하고 이 이온으로

대전물체를 제전하는 방법이다. 그림 3-9는 전압인가식 제전기의 제전원리를 나타낸다.

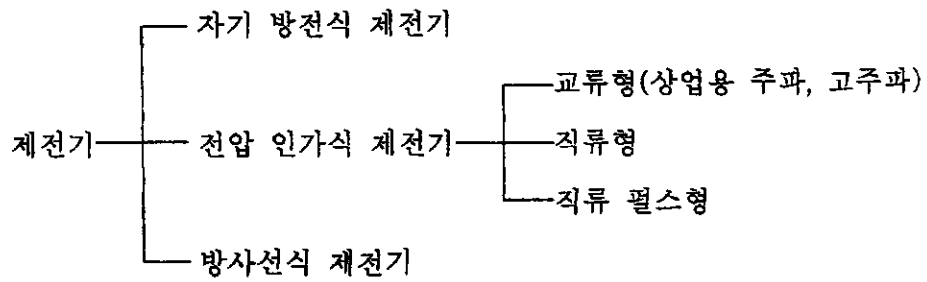


그림 3-7 제전기의 분류

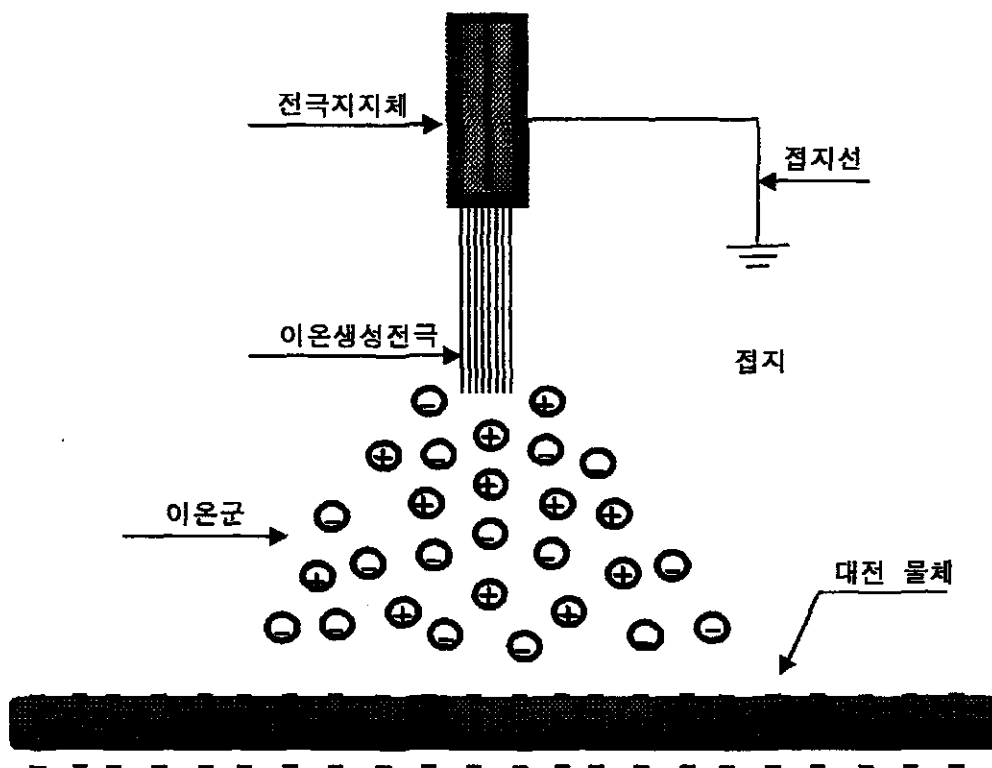


그림 3-8 자기 방전식 제전기의 제전

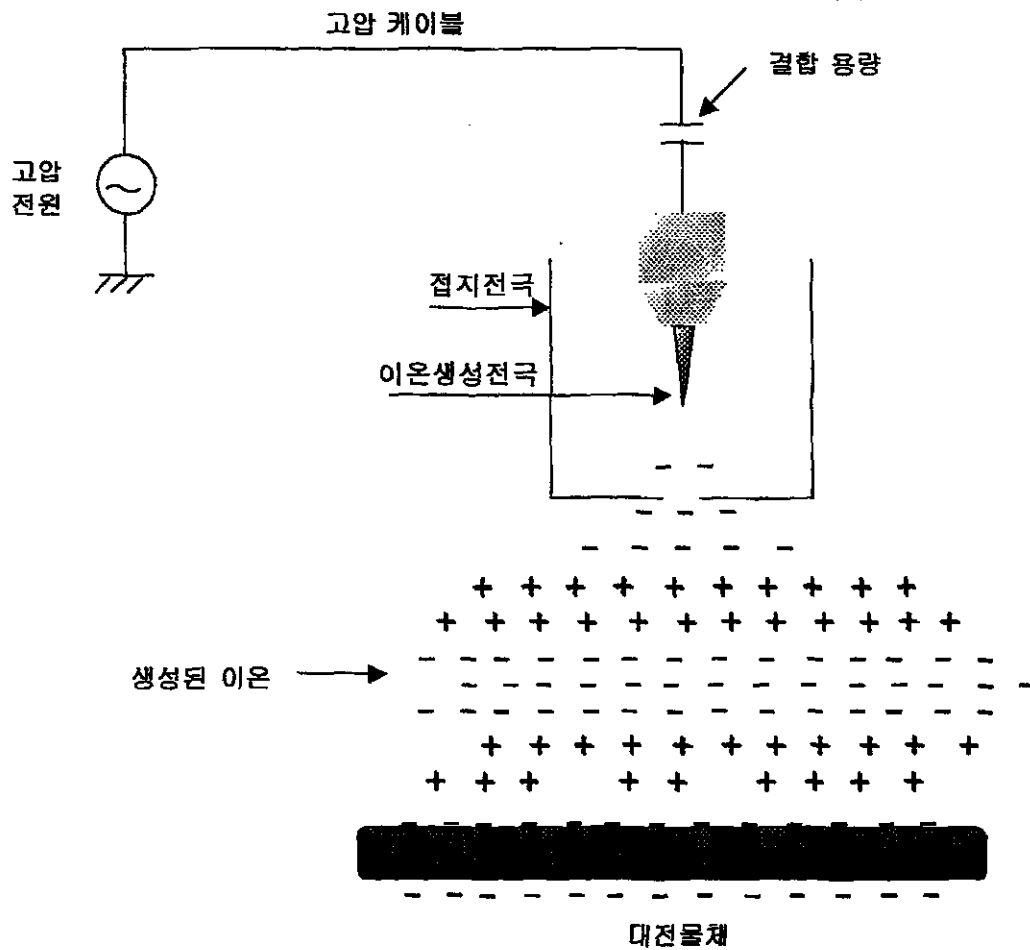


그림 3-9 전압인가식 제전기의 제전

나) 제전기의 종류와 특징

자기방전식 제전기는 자기방전극으로 가요성이 있는 도전성의 카본 섬유, 스테인레스 섬유, 도전성 섬유 등의 코로나 방전이 발생하기 쉬운 형상 (직경 : 수십 μm 정도)인 것을 쓰고 있다. 이것을 금속체의 지지대로 끼운 구조의 제전기나 금속물을 지지대에 감아 붙인 것 등이 있다. 자기방전식 제전기 구조의 한가지 예를 그림 3-10에 나타내었다.



그림 3-10 자기방전식 제전기의 구조

자기방전식 제전기는 대전물체의 근방에 설치하여 전극을 접지하면 간단하게 사용할 수가 있으나, 제전효과는 대전물체의 대전전위, 대전물체와 자기방전식 제전기간의 거리에 크게 의존한다. 이 때문에 대전물체의 대전전위가 낮을 때나 설치거리가 떨어져 있으면 제전능력이 저하하는 단점이 있다. 용도로서는 플라스틱 시트나 필름, 고무 등의 제조·가공공정에서의 먼지부착 방지, 복사기나 인쇄, 제지 공정에서의 인쇄불량, 종이결림, 두장 넘어가기 등의 생산장해나 전기충격을 방지하기 위하여 사용되고 있다.

전압인가식 제전기는 보통 고압전원과 제전전극, 고압 케이블 등으로 구성되어 있으며 방전전극은 코로나 방전이 발생하기 쉬운 침상 전극으로 되어 있다. 제전 봉형 제전기의 일례를 그림 3-11에 나타내었다. 전압인가식 제전기에서는 안정된 코로나 방전을 얻는 것과 함께 방전전극에서의 전기충격이나 착화성 방전을 방지하기 위해 방전전극에는 정전용량을 삽입하여 안전을 고려한 구조로 되어 있다.

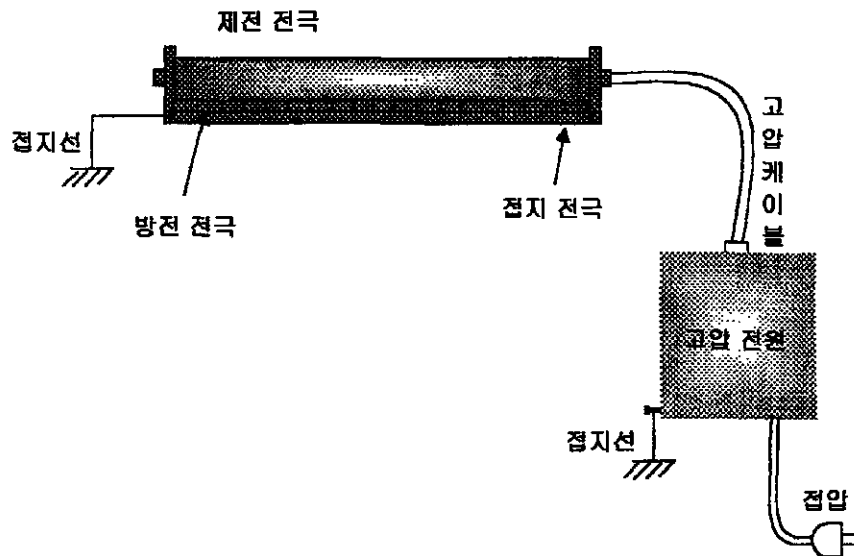


그림 3-11 전압인가식 제전기(제전 봉형)의 구조

전압인가식 제전기의 종류는 방전전극에 인가하는 고전압에 의하여 교류 (상용주파, 고주파)형, 직류형, 직류 펄스형 등이 있으며 그 용도에 따라서 여러가지의 것이 있다. 주된 전압인가식 제전기의 특징은 다음과 같다.

1) 교류형 제전기

일반적인 제전기로서 교류식이기 때문에 양이온과 음이온을 교대로 생성하여 대전물체의 대전극성에 상관없이 사용된다. 용도로서는 인쇄기, 필름·직물 등의 제조·가공공정에서 인쇄불량, 종이 분진 등의 부착, 종이결림, 두장 넘어가기 등의 생산장해나 전기충격을 방지하기 위하여 사용되고 있다.

2) 직류형 제전기

각각의 양극 방전전극과 음극 방전전극에서 코로나 방전을 발생시켜 각각의 전극에서 양이온과 음이온을 연속적으로 생성하는 제전기이다. 이온

생성능력이 높고, 고속(150m/min 이상)으로 이동하는 대전물체의 제전이나 교류방식에 비하여 떨어진 거리에서 제전할 수 있는 제전기이다. 용도로서는 교류 제전 봉형과 같은 공정이나 탁상 작업용의 제전에 사용되고 있다.

3) 송풍형 제전기

교류식과 직류식의 두 종류가 있으며 제전 전극부와 송풍 블로어를 내장하여 양·음이온을 원거리까지 반송할 수 있고 복잡한 형상을 가진 대전물체, 떨어진 위치에서의 제전이나 비교적 넓은 공간의 제전에 이용되고 있다.

용도로서는 종이나 필름 등의 보내기, 감기 공정, 전자부품을 작업대 위에서 취급하는 작업, 플라스틱 성형 제품의 제전 등에 이용되고 있다.

4) 노즐형, 권총형 제전기

상용 주파와 고주파 고전압을 인가하며 압축공기를 써서 대전물체에 정전기력으로 부착한 먼지나 티끌을 불어날림과 동시에 제전을 하는데 이용되고 있다. 용도로서는 플라스틱 성형 제품, 정밀기기 등의 조립·마감 공정, 필름 등의 먼지 제거와 제전에 사용되고 있다.

5) 방폭형 제전기

가연성 가스·증기가 존재하는 위험장소에서 사용하여도 방전전극에서 발생하는 방전이 착화원이 되지 않는 방폭성능을 가진 제전기이다.

코로나 방전이 발생하는 방전전극과 접지 전극간에 가연성 가스·증기가 들어가지 않도록 제전전극을 에어퍼지화한 내압방폭구조이다. 그리고 고압전원을 내압방폭구조로 한 제전기와 방전전극에 인가하는 교류 고전압을

용량결합하여 방전전극에서 발생하는 방전 불꽃으로 착화하지 않는 두 종류가 있다.

방폭구조 제전기는 고압전원의 2차 전압 변동을 검출하는 회로나 방전불꽃을 검출하는 회로의 보호장치가 부가되어 있다. 용도로서는 가연성 잉크를 사용하는 그라비아 인쇄공정, 종이, 필름 기재에 가연성 용제를 점착제나 자성재료 등을 도포하는 공정에서 사용되고 있다.

6) 기타

반도체나 전자·정밀기기 제조, 제약, 식품 등의 분야에서는 클린룸용 제전기를 사용한다. 이 클린룸용 제전기에는 직류형, 교류형, 직류 펄스형이 있으며 방전전극에서의 금속제 발진을 방지한 것과 방전전극에 먼지 등의 부착을 억제하기 위하여 방전전극부에 클린에어를 공급하는 타입이 있다.

3-4 정전기에 의한 화재·폭발의 방지

정전기에 의한 화재·폭발의 방지대책은 그림 3-12에 나타낸 바와 같다. 정전기에 의한 가연성물질의 착화를 방지하기 위해서는 착화원이 되는 정전기 방전을 방지하거나 또는 가연성 분위기를 방지하거나 어느 쪽이나 한 쪽이 완전하면 된다. 그러나 가연성 분위기를 최대한 방지하는 것은 화재·폭발 방지상의 일반적인 대책으로서 필수이기 때문에 보통은 양자가 병행된다. 그러나 가연성 분위기의 방지대책은 정전기의 방전방지가 곤란한 경우만 실시를 하는 경우가 많다. 정전기에 의한 화재·폭발을 완전히 방지하는 것은 일반적으로 곤란하기 때문에 만일의 착화에 대비하여 화재·폭발을 확대 방지키 위하여 초기 소화설비, 폭발방산설비, 인화방지장치, 화재전파저지장치 등에 의하여 피해를 국소화시킨다.

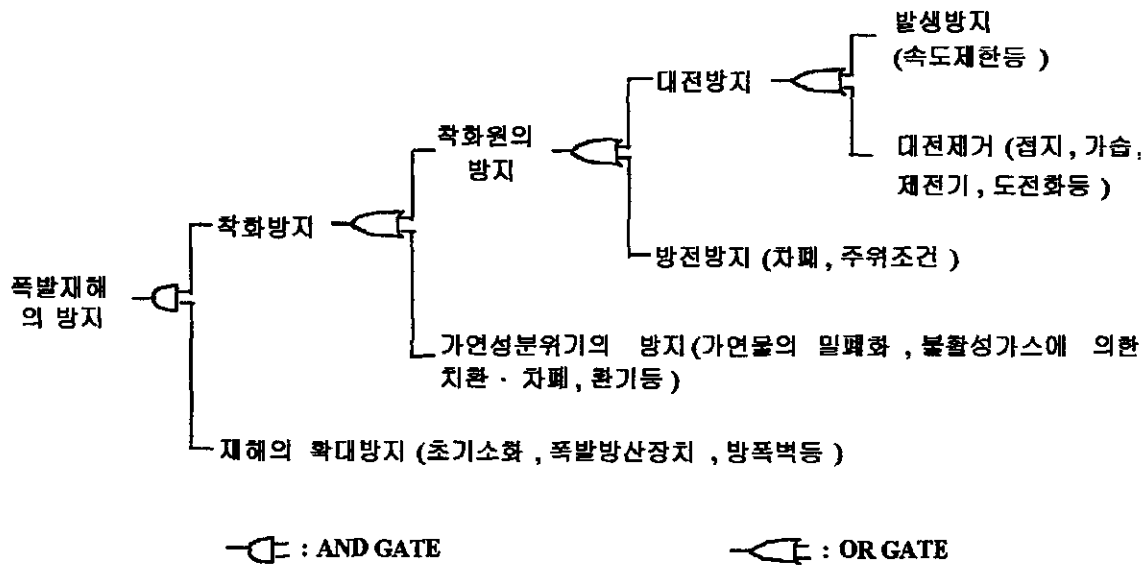


그림 3-12 정전기에 의한 화재·폭발 방지 대책의 체계

3-4-1 가연성 분위기의 방지

정전기 방전에 의하여 착화되는 가연성 분위기를 방지하기 위해서는 가연성 물질을 대기중에 개방시키지 않도록 가능한 한 밀폐하여 취급함과 아울러 누설을 방지한다. 또 가연성 물질의 농도를 폭발범위로부터 벗어나게 하기 위하여 환기 또는 불활성 기체, 불연성 가스에 의한 치환·주입 등을 한다.

불활성 기체에 의한 치환, 주입은 산소농도를 낮게 하여 폭발한계를 좁히는 것이 주된 목적이며 이것은 글라스 라이닝 용기에 의한 교반, 대형탱크의 세정, 가연성 용제의 고속 충전, 분체의 사일로 저장 등과 같이 정전기 방전의 방지가 곤란한 경우에 유일하게 유효한 대책이다. 표 3-8은 불활성 기체 치환·주입에 있어서의 산소농도지표를 나타낸 것이다.

표 3-8 불활성 기체 치환·주입에 있어서의 산소농도의 지표

위험성 구분	폭발 한계 산소농도(%)	관리 산소 농도 의 지표(%)	가연성 물질의 예
1	0	0	분해 폭발성 물질(에틸렌 옥사이드 등), 실란
2	0~4	< 1	Si-H 결합을 갖는 실란 유도체
3	4~8	< 2.5	수소, 일산화탄소, 이황화탄소, 황화수소, 아세틸렌 및 이들을 다량으로 포함한 혼합 가스
4	8~12	< 5	대다수의 유기 화합물, 유기분진
5	> 12	< 8	암모니아, 일부의 할로젠화 유기 화합물

3-4-2 착화원의 방지

착화원이 되는 정전기 방전을 방지하기 위해서는 도체의 접지, 신발과 바닥의 도전화에 의한 작업자의 대전방지, 부도체의 도전화, 제전에 의한 대전방지, 정전기의 발생방지, 방전의 억제 등의 정전기 대책이 필요하다.

제 4 장 분진폭발의 예방 대책

4-1 분체의 대전에 미치는 인자

물체를 구성하고 있는 원자는 원자핵과 전자이며 통상적인 상태에 있어서는 이 원자핵과 전자의 결합이 강하고 전자는 자유로운 이동을 할 수 없다. 이때 물체는 전기적으로 중성이지만 다른 물체와의 접촉이나 마찰 등으로 각 물체에 과잉된 양 또는 음의 전하가 주어져서 물체가 대전한다. 두 물체를 분리하면 각각에 이 전하가 잔류한다. 전하량·즉 대전량은 접촉횟수, 접촉면적, 충돌의 강도 등의 영향을 받는다. 따라서 물체끼리의 접촉횟수나 면적 등이 커지면 그 전위도 커진다. 분말의 수송이나 저장 탱크에의 투입 등 분말을 취급할 때 취급량의 증가나 분말의 운동이 심하게 되면 대전량이 증대된다. 이 전하가 크게 되면 응집이나 부착 등 장애가 발생하고 또한 방전이 발생하면 발생하는 분진운에 착화하여 분진 폭발 등의 재해를 일으키는 일이 있다. 고체가 세분화 되어서 미세한 입자로 되면 그 질량은 입자반경 3배로, 표면적은 2승에 비례하기 때문에 분체가 대전한다고 하면 입자가 작아짐에 따라서 정전기력이 중력에 비해서 커서 대전의 영향을 받는다.

4-1-1 분체의 대전

가) 충돌대전

분체입자의 충돌 대전의 특성을 결정하는 요인중 하나가 충돌시의 접촉면적이라고 할 수 있다. 구형입자와 평면과의 충돌의 경우, 충돌시의 변형이 탄성변형 범위에서는 충돌시의 접촉면적 S 는 탄성론으로부터 다음 식 (4-1) 및 (4-2)가 유도된다.

$$S = \{1.85(DR^2mv^2)^{1/5}\}^2 \quad (4-1)$$

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (4-2)$$

여기서 R : 구의 반경, m : 구의 질량, v : 충돌속도, ν_1 , E_1 및 ν_2 , E_2 : 각구와 평면의 포이슨(poisson)비 및 영율이다.

충돌속도가 빨라지게 되면 탄성변형영역을 넘어서 소성변형으로 된다. 충돌이 반복될 때 충돌시의 접촉면적은 새롭게 접촉한 부분과 이미 접촉한 부분으로 구성되어 있기 때문에 충돌회수 n과 새롭게 접촉한 부분의 누적 접촉면적 S_n 과의 관계는 입자를 구로 하면 다음 식 (4-3)로 표현된다.

$$S_n = S_0 \left[1 - \exp \left\{ n \ln \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) \right\} \right] \quad (4-3)$$

여기에서 S : 1회의 충돌로 접촉한 면적, S_0 : 입자의 표면적이다. 반복된 충돌에 의한 대전량 Q_n 는 표면전하밀도를 σ_p 로 하면 다음 식 (4-4)로 나타낼 수 있다.

$$Q_n = \sigma_p S_n = \sigma_p S \left[1 - \exp \left\{ n \ln \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) \right\} \right] \quad (4-4)$$

나) 분열대전(입자상호간의 접촉, 마찰에 의한 대전)

분체입자 상호간의 접촉, 마찰에 의한 대전은 노즐로부터 분체를 분출시킨 경우 등에서 볼 수 있고, 기구적으로는 입자의 크기, 표면형상의 차이에 의한 비대칭마찰 및 접촉면의 파괴에 의한 전하분리에 의하여 생성된다고 할 수 있다. Kunkel은 압축공기를 사용해서 공기중으로 분산한 시리카 분체를 직류전압을 인가한 평판 전극내로 유입하여 대전량 분포를 측정했다. 수직으로 놓여진 평행전극간에 대전입자를 자연낙하시키면 입자의 운동 궤적은 그 대전극성에 따라서 어느쪽인가의 전극방향으로 기울어진다. 이때

입자속도의 수평성분을 V_x , 수직성분을 V_y 라 하면 대전량 q 는 식 (4-5)과 같이 된다.

$$q = \frac{3\pi\eta V_y}{E} d \quad (4-5)$$

여기서 E : 전계, η : 공기의 점성계수, d : 입자의 직경이다. d 는 스토크 법칙을 이용해서 다음식 (4-6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \left\{ \frac{18\eta V_v}{(\rho_1 - \rho_2)g} \right\}^{1/2} \quad (4-6)$$

여기서 ρ_1, ρ_2 : 각각의 입자와 공기의 밀도, g : 중력가속도이다.

그림 4-1은 수정입자의 입경과 대전량의 관계이다. 대전량의 평균치를 나타낸 곡선은 正・負에 거의 대칭으로 되어 같은 입경에서는 正・負의 입자 수가 거의 같고 입자 전하의 총량은 중성에 가까운 것을 알 수 있다.

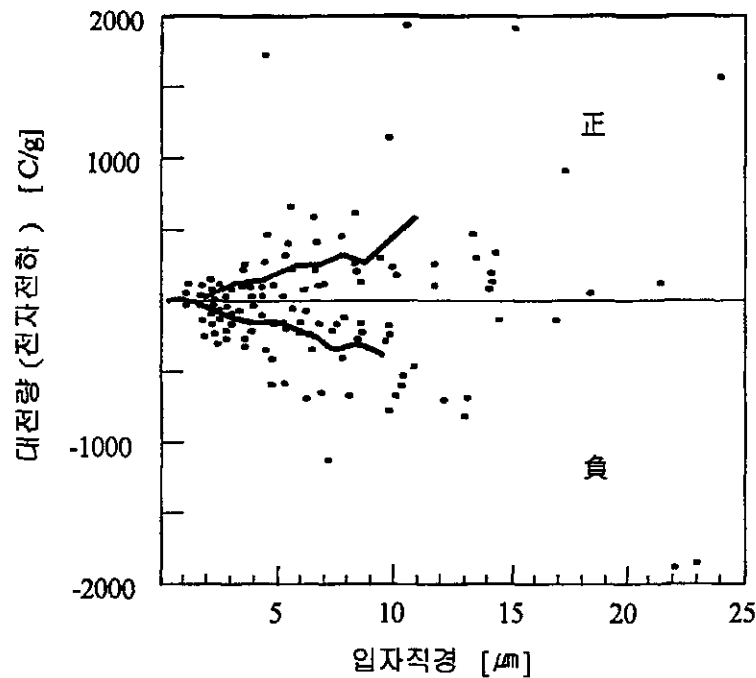


그림 4-1 수정입자의 대전

다) 마찰대전

분체의 마찰대전은 접촉, 충돌, 마찰, 분쇄 등의 여러종류의 운동과정에서 일어난다. 분체와 고체 벽사이의 마찰로 인한 대전량은 마찰거리의 증가에 따라서 지수함수적으로 증가하는 경우가 많다. Peterson는 Ni제 실린더 내에서 석영 및 유리구를 회전할때의 대전량을 실험하였다. 대전율(단위 회전거리당의 대전율)이 구표면상에서 아직 대전해 있지 않은 영역의 면적에 비례하고, 전하누설이 구의 총대전량에 비례한다고 가정한다면 다음 식(4-7)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dS} = a(1 - \frac{q}{q_s}) - kq \quad (4-7)$$

여기서 q : 대전량, S : 마찰거리, q_s : 누설이 없을때의 포화 대전량, k : 누설정수(표면도전율에 비례), a : 전하발생에 관한 정수이다.

위 식에서 $(1-q/q_s)$ 는 미대전영역의 면적에 대한 구전체표면적의 비를 나타낸다. 이 식으로부터 q 는 아래 식(4-8)과 같이 된다.

$$q = q_m(1 - e^{-as/q_m}) \quad (4-8)$$

여기서, q_m : 최대대전량이다.

노즐로부터 분체입자를 분출 시켰을 경우의 대전은 노즐과 분출시킨 분체의 재질이 다른 경우 분열대전에 의한 것보다도 마찰에 의한 대전으로 된다. 이 현상은 분체도료가 노즐로부터 분출된 입자도료의 대전에 영향을 주었기 때문이다. 고압 분쇄내에서 CO_2 가스를 분출할 때에는 가스 혹은 분쇄가 대전한다. 이것은 가스가 대전한 것처럼 보이지만 실제로는 CO_2 가스가 분출될 때 건조한 입자가 노즐과 마찰해서 대전한 현상이다.

4-1-2 대전 인자

최근 분체 제조·취급 공정에 있어서 분체의 대전제어가 가장 중요한 기술이다. 분체가 접촉·마찰을 수반하여 대전되면 그림 4-2에 표시한 바와 같이 대전량은 급격히 증가하다가, 어느 시점에서 마찰공정을 중단하여 방치하면 분체의 대전량은 시간경과에 따라서 서서히 감소한다. 분체의 대전량 $Q(t)$ 는 시간(t)에 따라서 다음의 관계식(4-9)과 같이 증가한다.

$$Q(t) = Q_{\infty}\{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (4-9)$$

대전 종료후의 경과시간(t)에 대해서는 식(4-10)과 같이 감소한다.

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t/\tau) \quad (4-10)$$

여기서, Q_{∞} , Q_0 는 각각 포화대전량, 초기대전량이고, τ 는 시정수이다.

일반적인 대전현상으로는 전하발생 또는 부착과정(대전)과 그 전하가 소멸해 가는 과정(완화 또는 방전)이 동시에 존재한다. 어느 시각 t 에서 Q 인 전하를 갖는 분체의 전하량은 dt 시간 동안에 dQ 만큼 증가하는 것이다. 여기서 dQ/dt 는 전하의 발생속도 β 에서 전하의 완화속도 Q/τ 를 뺀 식(4-11)과 같은 미분방정식이 성립한다.

$$dQ/dt = \beta - Q/\tau \quad (4-11)$$

즉 식(4-11)의 미분방정식을 적분하면 식(4-9)가 얻어진다. 식(4-11)에서 $\beta=0$, 즉 전하의 발생이 전혀 없다고 하면 식(4-10)이 얻어진다. 여기서 분체의 대전, 분체의 전하완화를 커패시터의 충전·방전과 동일하게 보면 식(4-12)로 표시할 수 있다.

$$\tau = \epsilon/\sigma = \epsilon\rho \quad (4-12)$$

여기서 ϵ : 유전율, σ : 도전율, ρ : 저항율이다. 시정수 τ 을 이용하면 포화대전량 Q_∞ 는 식(4-13)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_\infty = \beta\tau \quad (4-13)$$

분체의 마찰대전의 경우의 대전조건은 분체의 물성값(분체의 입경, 저항률, 유전율, 수분함유율), 대전의 극성, 포화대전량 Q_∞ , 시정수 τ 에 크게 영향을 받는다. 이에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

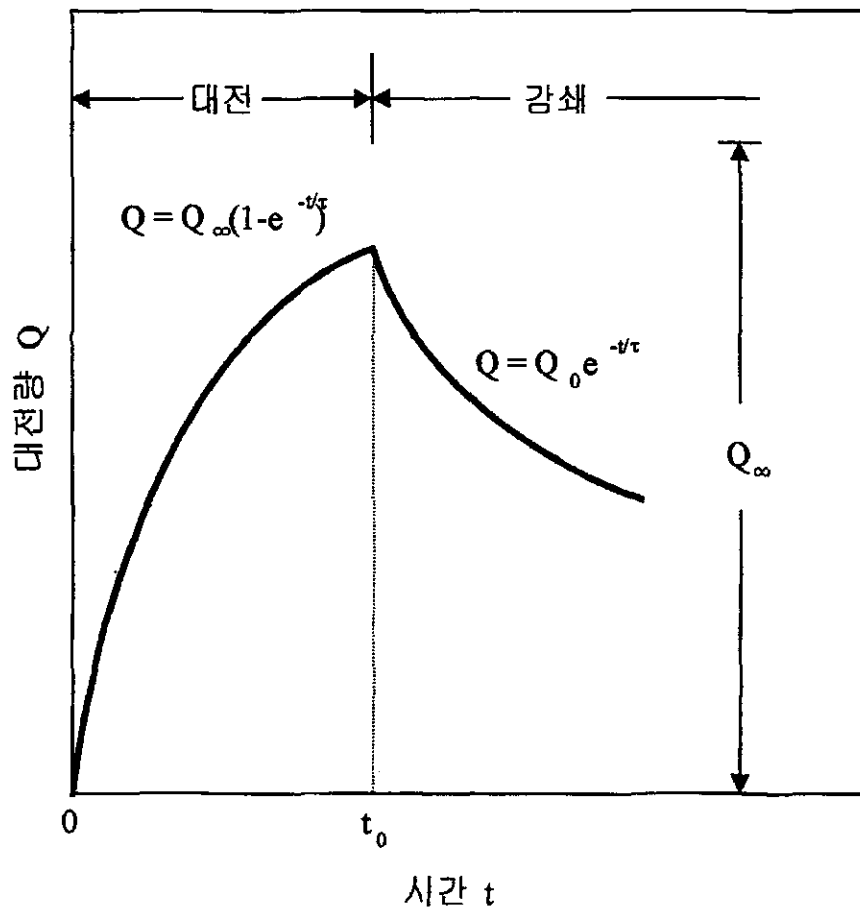


그림 4-2 대전량의 시간변화

가) 입경(반지름)

고체를 미소한 입자로 분해하면 분해된 입자의 합계는 분해전의 표면적에 비교해서 대단히 큰 값으로 된다. 지금 반경 r_0 의 구를 n 개의 반경 r 의 구형입자로 분해한다고 하면 분해된 소구의 표면적 s 를 합친 전체면적 S 는 아래 식(4-14)처럼 나타난다.

$$S = Ns = 4\pi \frac{r_0^3}{r} \quad (4-14)$$

분해 전후의 표면적비 R 는 아래 식(4-15)와 같이 된다.

$$R = \frac{S}{S_0} = \frac{r_0}{r} \quad (S_0 = 4\pi r_0^2) \quad (4-15)$$

예를 들면 $r_0 = 1 \text{ cm}$ 의 고체구를 $r=1\mu\text{m}$ 의 소구로 분할하면 면적 S 는 원래면적의 10^6 배로 된다. 마찰·충돌 등의 작용으로 분체표면상에 발생한 전하의 밀도는 표면적에 비례하여 큰 전하를 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 구표면이 일정한 모양의 전하밀도 σ 로 대전되고 있을 때, 구표면상의 전계강도 E 는 다음식 (4-16)으로 표현할 수 있다.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (4-16)$$

여기에서 ϵ_0 : 진공의 유전율이다. 공기의 절연파괴 강도를 약 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ 라고 하면, 전하밀도 σ 는 식 (4-17)로 된다.

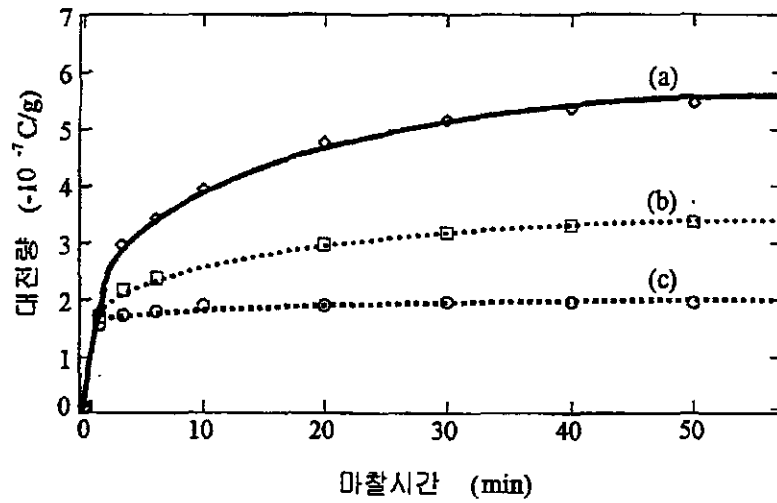
$$\sigma = \epsilon_0 \times 3 \times 10^6 \approx 2.66 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \quad (4-17)$$

이때 공기중에서 기중방전이 일어나 구표면의 전하를 잃어버린다. 방전이 개시되기 위한 충돌전리작용은 우주선 및 자외선 등의 전리작용으로 공

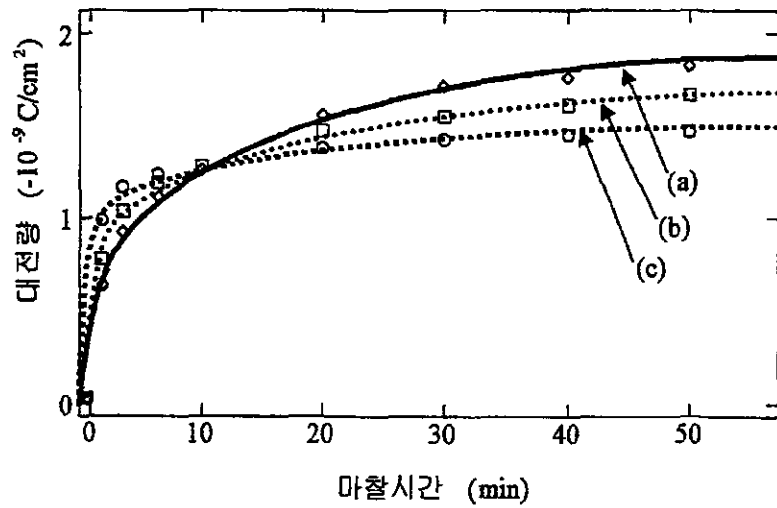
기중에 존재한 하전된 입자가 가속되기 시작하여 고전계 영역이 좁은 공간으로 한정되면, 그 공간내의 하전입자수의 감소와 가속거리가 짧아지기 때문에 방전이 개시하기 어렵게 된다. 따라서, 미소입자는 큰 입자에 비해서 높은 전하밀도를 가질 수 있다. Schumann에 의하면 반경 r 의 미소입자의 최대전하밀도 $\sigma_{\max}$ 는 아래 식(4-18)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\max} = (100r)^{-0.3} \times \frac{10}{3} \times 10^{-5} \text{ [C/m}^2\text{]} \quad (4-18)$$

분체의 대전특성에 미치는 가장 중요한 인자는 입자의 반지름이다. 입경과 대전량(Q_{∞})와의 관계는 종래부터 여러 가지 논의가 있어 왔다. 그림 4-2의 종축은 보통 대전량으로 취하지만 분체대전의 경우에는 시료분체의 단위질량당 전하량(C/g)으로 표시하는 경우가 대부분이다. 예를 들면 평균 입경이 서로 다른 3종류의 폴리프로필렌 분체를 폴리스티렌(입경:약 2mm)와 서로 마찰하는 경우 폴리프로필렌 분체가 갖는 전하량을 마찰시간의 함수로서 Blow-off법으로 측정한 결과를 그림 4-3(a)에 표시하였다. 분체의 단위질량당 전하량은 평균입경이 작은 시료에서는 크게 나타난다. 이는 입경이 작은 분체는 비표면적이 전체적으로 크게 되기 때문으로 생각된다. 즉 정전기는 표면에 비례하기 때문이다. 여기서 폴리프로필렌 분체의 비표면적을 계산하여, 그림 4-3(a)의 결과를 분체의 단위표면적당의 전하량으로 나타내면 그림 4-3(b)가 얻어진다. 다소 차이가 있지만 거의 하나의 곡선으로 수렴함을 알 수 있다. 그림 4-2로부터 미루어볼 때 분체의 대전량을 단위질량당의 값으로 표시하면 입경에 의존하지만, 분체의 단위표면적당의 값으로 표시하면 입경에는 의존하지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4-3 Polystyrene과 마찰한 Polypropylene 분체의 대전량
(평균입경 : (a) 230 μ m, (b) 350 μ m, (c) 530 μ m)

접지한 구리파이프중을 입경이 다른 유리비드(Glass beads)를 공기로 수송한 경우, 파이프 내벽과 마찰·충돌에 의해 유리비드에 발생하는 전하량을 표 4-1에 나타내었다.

이 경우에도 유리비드의 입경이 클수록 단위질량당 전하량은 감소하고 있지만, 단위 표면적당 전하량은 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

표 4-1 구리파이프중을 공기로 수송되는 유리비드(Glass beads)에 발생하는 전하량
(유속 : 12.7 %, 상대습도 : 25 %)

입경 (μm)	입자전하 (10^{-12}C)	Q/M (10^{-5}C/kg)	Q/S (10^{-6}C/m^2)
137 ± 12	0.229	6.193	1.487
196 ± 16	0.408	4.138	1.461
390 ± 35	1.834	2.362	1.535
550 ± 50	3.302	1.516	1.387

이상의 결과로부터 입경이 어느정도 이상 큰 입자에서는 표면전계강도가 공기의 절연파괴강도(약 30KV/cm)보다 적어서 대기중에서 입자의 최대 표면전하밀도는 $27 \mu\text{C/m}^2$ 정도로 된다. 그러나 입경이 작게 되면 전계가 작용하는 공간이 좁은 영역으로 한정되기 때문에 최대 표면전하밀도가 크게 되어 공기의 절연파괴강도보다 크게 될 가능성이 있다. 분체의 단위표면적당 대전량이 입경에 의존치 않는다는 것은 분체한개당 대전량은 입경의 2승에 비례한다는 것을 의미한다. 그러나 최근 분체의 대전량의 입경의존성에 관한 보고는 입경의 1~3승의 범위에 분포하고 있다고 보고되고 있다.

나) 분체의 저항을 및 유전을

식(4-13), (4-14)에서 알 수 있듯이 분체의 포화대전량 Q_{∞} 는 시정수 τ 에 비례하고, τ 는 유전을 ϵ 과 저항을 ρ 의 곱과 같다. ρ 는 물질에 따라 상당히 다르기 때문에 분체의 대전기구는 ρ 에 상당히 영향을 받음을 알 수 있다. Styrene-Acryle계 수지에 Carbon-black을 첨가한 평균 입경 약 $12\mu\text{m}$ 의 입자(toner)을 만들어서 마찰대전을 일본에서 행한 실험한 결과를 그림 4-4에 나타냈다. 그림 4-4에 표시한 바와 같이 Carbon-black의 첨가비율이 증가할수록 포화대전량이 감소한다는 것을 알 수 있고, 이는

Carbon-black의 증가에 의해 입자의 저항율이 감소하기 때문이다. 또한 이들은 동시에 Carbon-black의 증가에 따라서 대전의 시정수가 짧게 되는 것도 확인하였다. 동시에 Carbon-black의 증가에 따라서 입자의 대전량이 감소한다는 것을 보고하였다. 일반적으로 절연체에서는 ρ 가 대단히 크기 때문에 τ 가 크고, Q_{∞} 가 어느정도의 값으로 되어 대전을 한다. 그러나 도체는 ρ 가 아주 적기 때문에 τ 가 극단적으로 적다. 따라서 Q_{∞} 가 극히 적어서 거의 대전하지 않는다.

분체대전과 유전율(ϵ)의 관계는 저항률 ρ 와의 관계와 동일하다. 그러나 ρ 가 물질에 따라 크게 다른 값을 갖는데 비해서 ϵ 는 물질에 따라서 크게 변화하지 않기 때문에 대전에 미치는 ϵ 의 영향은 그다지 현저하지는 않다. 전자사진 현상제의 대전성을 제어할 목적으로 티탄산 바륨과 같은 고유전성 물질을 첨가하는 연구도 행해지고 있다. 접촉·마찰대전에 대한 유전율의 영향에 대해서는 유전율이 다른 2개의 물질을 접촉하면 유전율이 큰쪽이 +, 작은쪽이 -로 대전하는 경향을 보인다.

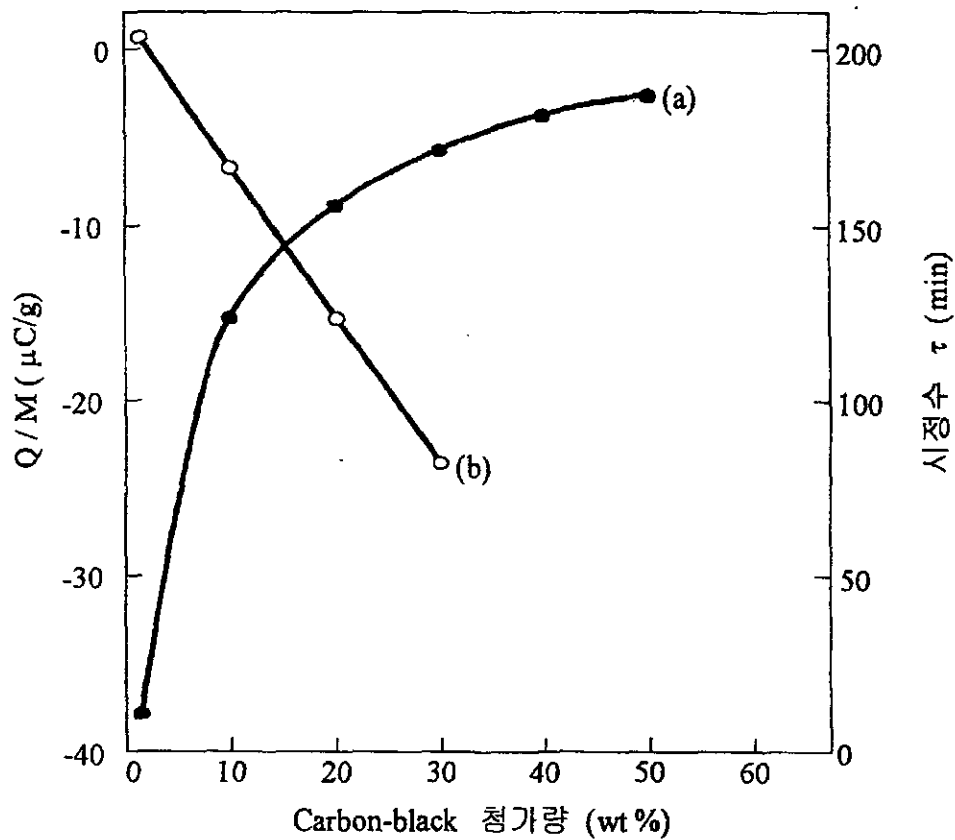


그림 4-4 입자의 대전량 Q/M , 시정수 τ 의 Carbon-black 첨가량 의존성

다) 분체의 수분 함유율

분체의 마찰대전에 미치는 수분의 영향에 대한 결과를 그림 4-5에 표시하였다. 이것은 평균입경이 1.75 μ m의 폴리스틸렌 입자를 파이프를 통해서 공기수송한 경우의 실험결과이다. 그림 4-5에서 알 수 있듯이 입자의 대전량은 수송용 공기의 상대습도의 증가에 따라서 감소하고, 상대습도가 약 80%이상이면 거의 대전하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 상대습도가 증가하면 폴리스틸렌 입자의 표면에 흡착수분층이 형성되고, 이러한 이유 때문에 분체의 걸보기 저항율이 감소하여 결과적으로 시정수가 감소하여 식(4-13)에서 알 수 있듯이 포화대전량이 감소한다. 상대습도의 증가

에 따라서 대전량이 감소하는 것은 유리입자, 석탄 등의 물질에서 나타난다. 따라서 분체의 공기수송시의 정전기의 발생을 억제하기 위해서는 공기의 상대습도를 높게 하는 것이 일반적으로 권장되고 있다.

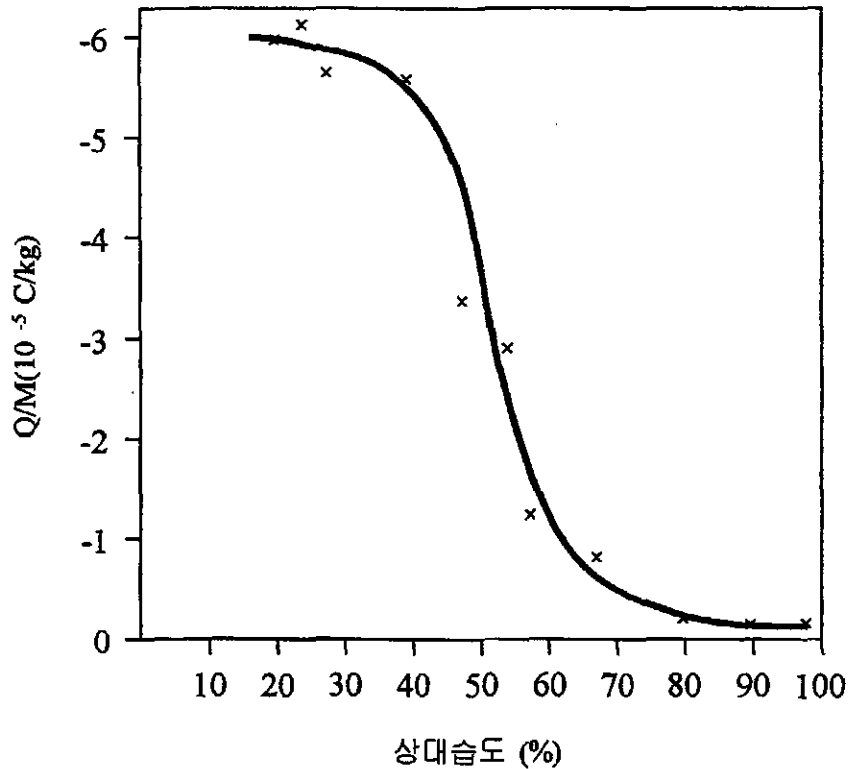


그림 4-5 파이프중에서 수송되는 Polystyrene 입자의 대전량 Q/M의 상대 습도 의존성

그러나, 분체의 코로나 대전시 수분의 영향은 마찰대전의 경우와는 다소 다를 수도 있다. Polyvinylalcohol(PVA) 분체를 두께 약 1.5mm로 충전한 층 위에서 코로나 대전을 약 1초 정도 실시하고, 표면전위 감쇄를 측정한 결과를 그림 4-6에 나타내었다.

실험에서는 시료분체에 함유된 수분량을 변화시켰지만, 수분량에 관계없이 표면전위의 초기값은 거의 일정한 값으로 되는 것을 알 수 있다. 코로나 대전은 코로나 방전에 의해 생성된 이온이 물체에 부착하는 현상이다.

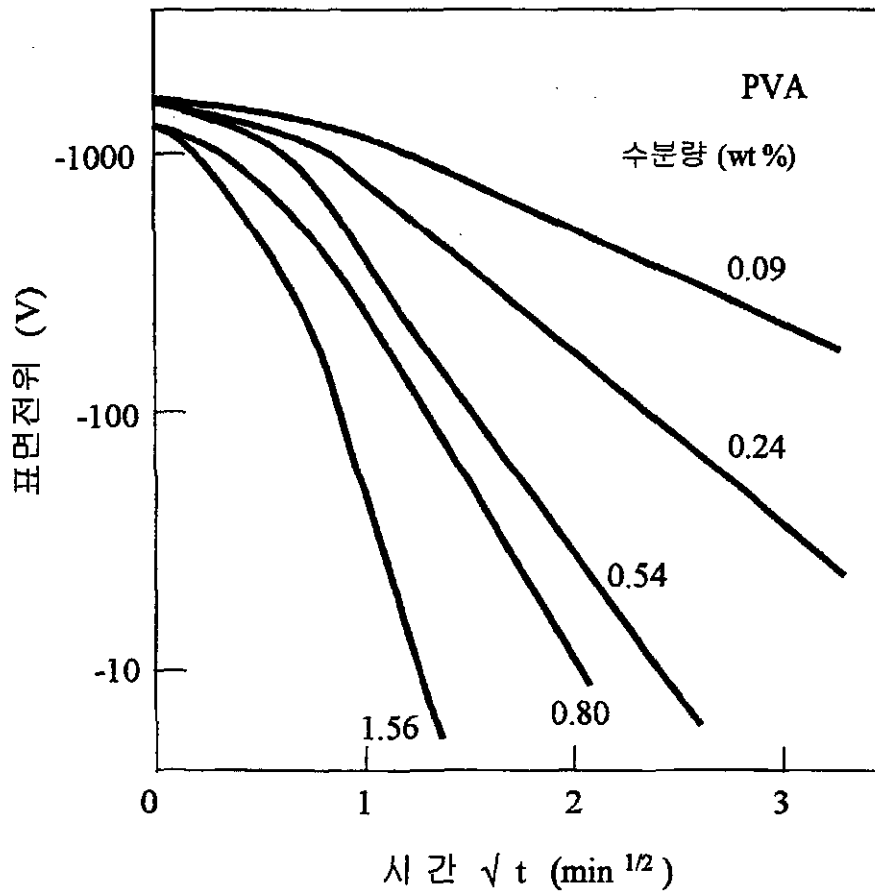


그림 4-6 PVA 분체중의 코로나 대전후 표면전위 감소

라) 충돌속도 - 마찰의 정도

마찰대전의 경우 마찰이 심하면 대전량이 증가한다. 실제 유송대전에서 그림 4-7에 보는 바와 같이 반송공기의 유속이 증가할수록 분체의 대전량이 증가한다. 이와 같이 미분체 충돌대전의 경우 미분체의 충돌속도가 증가하면 대전량이 증가하는 대전기구는 Masui에 의해 해명되었다.

그는 크롬을 부착한 판에 PMM 입자로 충돌시킨 경우 입자의 대전량은 충돌속도가 클수록 크지만, 충돌속도가 커지면 입자의 변형이 크게 되는데, 이는 접촉면적이 증가하기 때문임을 밝혀냈다. 그러나, 입자의 단위면적당 전하는 충돌속도에 의존하지 않음을 알 수 있다.

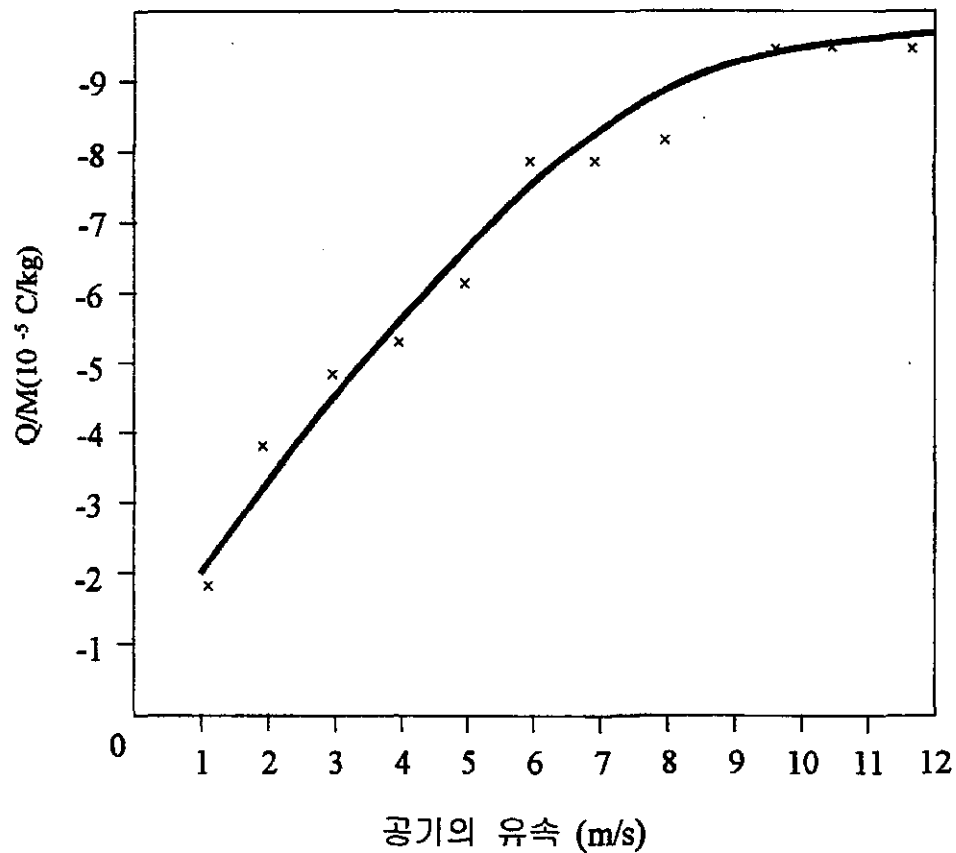


그림 4-7 파이프중에서 수송되는 Polystyrene 입자의 대전량 Q/M 의 공기 유속 의존성

4-2 분진폭발 예방대책

분진폭발로 인한 재해방지 대책으로는 설비내에서의 화재·폭발을 사전에 방지하는 예방대책과 만일의 경우 폭발이 발생할 것에 대비하여 피해범위를 최소화하고 설비와 인적손실에 대한 방호를 목적으로 하는 피해억제 대책을 들 수 있다. 일반적인 폭발 예방대책으로는 설비내에 분진이 부유·분산되지 않게 하는 방법, 부유·비산된 분진의 농도를 폭발하한계 이하로 억제하는 방법, 그리고 착화에너지를 갖는 착화원을 제거하는 방법 등 다음

에 제시한 각종 방법이 활용될 수 있는바 취급설비 및 공정을 충분히 고려하여 적절한 방법을 선정하여야 한다.

가) 분진의 발생방지

분진폭발을 방지하기 위해서는 무엇보다도 분진이 부유·비산되지 않게 하여야 한다. 부유·비산을 방지하기 위해서는 첫째, 분진의 발생을 방지하는 방법, 둘째, 비산을 방지하는 방법, 셋째, 발생된 분진을 제거하는 방법 등이 이용될 수 있다. 여기서 발생을 방지하는 방법으로는 원료의 종류, 원료의 입도 및 제조방법을 변경함으로써 가능한 그 발생을 억제하는 것이다. 그러나 곡물을 저장 또는 가공하는 사료공장 등에서는 원료 또는 제품의 특성상 발생을 억제하는데 어려움이 있다.

나) 분진의 비산방지

발생한 분진이 주위로 비산되어 분진운이 생성되는 것을 최소화하는 방법이다. 일반적으로 비산을 방지하기 위해서는 첫째, 설비를 기밀구조로 하고, 둘째, 호퍼, 사일로 등의 낙차를 감소할 수 있는 특수 슈우트를 사용하며, 셋째, 설비를 변경 즉 버킷 엘리베이터 등을 공기수송으로 변경하는 방법 등이 이용될 수 있다. 그러나 곡물 등을 취급하거나 가공하는 설비는 부유분진의 형성을 방지하기가 어렵고 분체공기수송 등을 제외하고 보통 그 농도를 제어하는 것이 곤란하다. 하지만 플랜트의 설계나 프로세스의 적절한 선택에 의해서 분진운의 형성을 억제하고 그 용적을 최소한으로 억제하는 것은 가능하다. 예를 들면 사일로의 최상부에서 분체를 투입하는 것보다 측벽의 적당한 투입구에서 투입함으로써 부유 분진운의 형성을 어느정도 억제할 수 있다. 또 필요하게 큰 용적의 플랜트도 분진농도가 폭발하한제

이상으로 공간내에 형성될 위험성이 높아 바람직하지 않다. 따라서 가능한 설비의 크기를 작게 하고 또 여러개로 분할하는 것이 바람직하다. 그리고 분체를 가능한 건식보다도 습식으로 취급하는 것이 좋다.

다) 설비 내·외부에서의 분진 제거

일단 발생한 부유분진이나 누적되어 있는 분진은 제거되어야 한다. 누적되어 있는 분진도 화재나 소규모의 폭발 또는 화재의 진화 과정 중에 부유하게 됨으로써 폭발 또는 2차 폭발을 야기하고 경우에 따라서는 건물 전체에 대폭발을 야기하는 사례가 많다. 특히 곡물하역·저장업체나 사료공장 등 농산물 가공업체에서는 대부분 사일로, 버킷 엘리베이터, 각종 컨베이어류, 백필터 등 집진기류, 분쇄 분리기 등이 한 시스템으로 구성되어 있어 소규모의 폭발이 대형 폭발로 이어질 위험성이 높기 때문에 특히 주의하여야 한다. 따라서 부유분진이 형성되는 경우에는 가능한 빨리 이를 제거하는 것이 바람직하며 사일로 등에서 분진의 형성을 방지할 수 없는 경우에는 집진기를 설치하여 이를 제거하여야 한다. 이때 백필터 등 집진기는 정전기 등으로 인한 폭발위험이 없도록 주의하여야 한다. 집진기에 문제가 있는 경우에는 오히려 집진기에서의 폭발이 사일로 등의 폭발을 야기함으로써 더 큰 사고를 유발할 위험이 있기 때문이다. 설비 내·외부에서의 분진 누적을 최소화하고 청소 등을 용이하게 하기 위하여 건물 또는 설비의 구조는 다음 사항을 고려하여야 한다.

1) 건물구조

설비가 건물 내부에 설치되어 있는 경우에 건물을 불연성 구조로 하는 것이 바람직하며 건물의 내부구조는 분진이 가능한 누적되기 어렵고 또한 누적된 분진도 청소, 제거가 용이한 구조로 하여야 한다. 벽면은 골목부가

적게 하고 돌출부는 가능한 수평에 대하여 60° 이상 경사를 갖도록 하는 것이 바람직하다.

2) 설비의 구조

설비는 가능한 방진(防塵)구조로 하고 외부로의 분진 누출을 방지할 수 있도록 기밀구조로 하거나 음압상태로 운전하는 것이 바람직하다. 특히 집진계통의 덕트류는 폭발·화재의 전파를 방지할 수 있도록 가능한 다른 덕트류와의 연결을 피하고 청소를 위한 개구부는 분진이 누적되기 쉬운 위치에 설치하여야 한다.

라) 불활성물질의 첨가

불활성가스나 분체 등 불활성물질을 첨가함으로써 분진 자체의 폭발위험성을 제거할 수 있으나 불활성 분체류는 농산물의 경우에 사용이 거의 불가능하며, 불활성가스의 경우는 경제성 및 제품의 품질관리 측면에서 플랜트에 적용하기 어려움이 있다. 특히 곡물 사일로나 농산물 가공설비가 대기압 상태에서 운전되는 경우가 많고 기밀성이 양호하지 못하여 일반 화학플랜트와는 달리 불활성가스를 사용하기가 어려운 실정이다. 그러나 착화위험성이 큰 경우에는 확실하게 효과를 기대할 수 있기 때문에 설비와 공정을 개선하여 사용할 경우의 대책으로서 바람직하다. 불활성가스로서는 일반적으로 탄산가스와 질소가 사용되고 있으며 연소폐가스가 사용되는 경우도 있다.

1) 산소농도

폭발방지를 위하여 산소농도를 0%로 할 필요는 없으며 일반적으로 탄산가스를 사용하는 경우에는 8~12%, 질소를 사용하는 경우에는 5~9% 정도

로 하는 것이 좋으나 강한 착화원 즉 고온표면, 폭발물, 용접 버너 등이 존재하는 경우에는 산소농도를 특히 낮게 유지하여야 한다.

2) 사용에 적합한 설비 및 안전장치

앞에서 언급한 바와 같이 불활성가스는 분쇄기, 혼합기, 건조기, 저장탱크 등 밀폐형의 장치에서 기밀성이 충분히 유지된 경우에 유효하다. 그러나 백필터 집진 또는 버킷 엘리베이터 시스템 등에서도 불활성가스를 대기중에 방출하면 운전비가 높아지기 때문에 폐쇄형으로 하여 재순환시키는 경우가 있다. 이 경우 분진 배출시 등의 불활성가스 손실분은 보충해 주어야 한다. 그리고 불활성 가스의 부족 또는 첨가가 정지될 경우 탄산가스, 산소 등 가스분석장치와 연동하여 자동적으로 경보를 발하고 운전이 정지되거나 불활성가스가 추가 공급되도록 인터록장치를 설치하는 등 충분한 검토가 요망된다.

마) 착화원의 제거

표 2-1에서 언급한 일본에서의 분진폭발 사고사례 225건의 분석결과 착화원은 이물질 혼입 및 기타 원인으로 인한 마찰·충격이 68건, 정전기 스파크 39건, 용접·용단용 화염 26건, 자연발화 26건, 나화(裸火) 14건, 전기설비 10건, 금속의 과열 9건 등이었으며, 또한 곡물 사일로에서의 분진폭발 10건의 경우 착화원은 용접·용단용 화염이 5건, 이물질 혼입 및 기타 원인으로 인한 마찰·충격 3건, 원인불명 2건으로 착화원의 관리에 특히 유의하여야 한다.

일반적으로 가연성가스의 착화에너지는 가스나 증기에 비하여 높으며 가스의 최소발화에너지는 약 0.02~0.5mJ인데 반하여 분진은 가스에 비하여

약 10~100배 이상 높다. 그러나 보통의 스파크도 그 에너지가 100mJ을 초과하는 경우가 많아 화기 관리에 대한 대책이 필요하다.

1) 일반 화기

일반화기로는 성냥,ライター, 담배불, 난로 등을 말하며 작업장내에 이들을 소지하고 출입함은 물론 사용을 엄격하게 금지시켜야 한다. 특히 난로, 보일러 등을 취급하는 작업장은 가연성분진이 발생하는 위험장소와 완전하게 격리하여야 한다.

2) 전기설비의 과열 및 스파크

분진이 발생하는 작업장에는 전동기, 조명기구, 스위치, 콘센트 등 스파크를 발생시키거나 과열 우려가 있는 전기설비를 설치 사용하여서는 안된다. 흔히 스위치류의 개폐시 스파크, 휴즈나 배선 등의 쇼트 또는 누전, 전구의 파손시 스파크, 모터나 조명기구의 과열 등에 의한 폭발·화재사고가 많이 발생되고 있다. 따라서 분진이 발생하는 장소에 전기기기를 사용할 경우에는 다음 사항에 특히 유의하여야 한다.

① 위험등급에 따라 충분한 방폭성능을 갖는 전기기기를 설치, 사용하여야 한다.

② 분진폭발의 위험성이 있는 사일로, 버킷 엘리베이터, 집진기 등을 점검 및 수리하거나 청소하기 위하여 내부에서 전기기기를 사용할 경우에도 방폭성능이 있는 것을 사용하여야 한다.

③ 버킷 엘리베이터, 분쇄기, 로터리 밸브 등의 이상현상에 대비하여 모터는 과전류차단기를 설치하여야 한다.

④ 전기설비에 대한 점검부위, 방법, 주기 등을 정하고 체크리스트를 이용하여 점검하고 기록하여야 하며, 불량한 기기는 즉시 보수 또는 교체하여

야 한다. 특히 누전의 위험을 제거하기 위해서는 정기적인 절연저항검사를 행함은 물론 누전경보기를 설치하여야 한다.

3) 정전기 방전

재해 사례에서도 나타난 바와 같이 정전기로 인한 분진 폭발사고는 상당히 많은 비중을 차지하고 있다. 정전기는 접지되지 않은 도체, 절연체, 분체 그 자체 또는 작업자로부터 발생될 수 있으며 흔히 분진은 마찰, 부착, 박리 등에 의해서 대전량이 증가되어 정전기가 발생하고 있다. 일반적으로 곡물을 가공·저장하는 공정에서는 분쇄·분리작업, 벨트 컨베이어 등에 의한 수송작업 등에서 특히 많이 발생할 수 있다. 최근 공기수송 등 공정의 스피드 상승화 경향은 정전기 축적을 증대시키고 있다. 따라서 덕트, 버킷 엘리베이터, 벨트 컨베이어, 집진기, 분쇄기, 분리기 등 정전기가 축적될 수 있는 장치나 부속설비류 등의 재질은 도전성 재질을 사용하여야 하며 절연부분은 동선 등으로 본딩하고 이를 확실하게 접지하여야 하며, 설비중 백필터 집진기의 백, 버킷 엘리베이터의 버킷, 쉘바스, 닥트류, 분체용기류 등에 사용하는 섬유 및 합성수지류는 도전성 또는 대전방지 처리된 재질을 사용하여야 한다. 그리고 분체의 투입 및 이송속도를 너무 높지 않게 조절하여야 하며, 또한 작업자의 작업복 및 작업화도 정전방지용을 사용하여야 한다.

4) 이물질 혼입에 의한 충격 및 마찰 스파크

곡물을 저장 또는 가공하는 공정에서는 흔히 금속편이나 돌조각 등 이물질 혼입으로 인한 충격 및 마찰 스파크로 폭발사고가 발생한 예가 많이 있다. 특히 분쇄·분리기, 스크류 피더, 사일로 등에서 이로 인한 폭발위험성이 높기 때문에 다음사항에 유의하여 설비를 설계하여야 한다.

- ① 곡물 등을 저장하거나 가공하기에 앞서 정선공정에서 이물질을 제거

하여야 한다. 흔히 금속 또는 비금속편 이물질은 밀도차를 이용한 공기식분리기를 이용하여 분리하나 금속편은 오히려 자석을 설치하여 제거하는 것이 편리하며, 경우에 따라서는 금속탐지기를 설치하여 자동적으로 공정의 운전을 정지시켜 수동으로 제거할 수도 있다. 후자의 경우 주의할 점은 정기적인 점검에 의하여 자석에 부착된 이물질을 제거하여야 한다.

② 이물질에는 외부에서 유입된 것 외에 설비에서 이탈된 볼트·너트 또는 파손에 의한 금속편류 등이 있다. 특히 분쇄기, 컨베이어 등 주입부에는 반드시 마그네틱 세퍼레이트를 설치하여 이들을 제거하여야 하며, 세퍼레이트를 통과하는 경사는 가능한 적게하여 분리가 용이하게 하여야 한다.

5) 기계설비의 국부과열

기계설비에서의 국부과열은 작동부분의 마찰에 의한 과열과 덕트류 등 배출구의 막힘 등으로 인한 공급속도의 이상에 의해 분쇄기, 로터리 밸브 또는 스크류피더와 분체류와의 마찰에 의한 과열 등을 들 수 있다.

일반적으로 기계설비의 마찰현상은 축수부의 과열로서 축수의 주유 또는 청소의 불충분으로 인하여 야기되는 경우가 많다. 축수상에 분진이 누적하여 정상적인 윤활기능을 상실할 때 과열이 발생된다. 예를들면 평축수 메탈의 온도는 통산 180℃이하이지만 정상 윤활기능이 상실된 경우에는 300℃ 이상으로 과열되고 누적되어 있는 분진의 축열현상 등으로 착화원이 될 수 있다. 또한 배출구 등의 막힘으로 인하여 분체류가 정지된 상태에서 로터리 밸브 또는 스크류 피더가 회전됨으로서 마찰열에 의해 과열 발화하는 경우가 있다. 최근 국내에서도 “○○ 목재(주)”에서 목분진의 집진 및 수송과정에서 이와 같은 현상에 의해서 화재가 발생하고 이를 진화하는 과정에서 집진기가 폭발, 중대재해가 발생한 사례가 있다.

6) 기계작동부 또는 공구류의 충격스파크

송풍기의 임펠라와 케이싱 또는 기계작동 부분과 가아드에서의 접촉으로 인한 충격 그리고 비방폭 공구의 사용 등에 의한 스파크로 인하여 폭발이 야기될 수 있다. 전자의 경우 이를 방지하기 위해서는 간격 설정에 유의하여야 하며, 특히 위험한 공정에서는 충격시 스파크를 발생하지 않는 재질, 예를 들면 송풍기의 임펠라 그리고 작업 또는 설비의 보수시 사용하는 공구류는 충격시 스파크가 발생하지 않는 배릴리움을 함유한 알루미늄합금재 또는 비금속재류를 사용하여야 한다.

7) 용접·용단작업시의 용접열 및 불꽃

용접·용단작업시의 용접열 또는 불꽃이 가스, 증기 또는 분진의 폭발·화재 착화원으로 작용한 사례가 아주 많다. 그 동안에 발생한 재해사례를 보면 곡물 사일로에서의 분진폭발 사고의 50%가 용접·용단용 화염이 착화원으로 작용하여 발생하였다. 분진 취급설비에 있어서 보수 등을 위하여 용접·용단 작업을 실시할 경우 작업기준에 대해서는 안전보건지('91년 10월호)에 상세하게 기술한 바가 있어 여기서는 생략한다.

8) 자연발화

분진의 종류에 따라 자연발화가 분진폭발·화재를 야기시키는 경우가 흔히 발생되고 있다. 특히 자연발화는 미분탄 등에서 많으나 유지분을 함유한 분말 등도 자연발화의 위험성이 높다. 자연발화는 건조, 저장공정에서 발생할 위험성이 높기 때문에 온도관리에 유의하고 축열되지 않도록 저장하여야 한다. 그리고 설비 내외부에 분진의 누적량을 가능한 적게 하고 장기체류되지 않는 구조로 하여야 한다.

4-3 분진폭발 피해억제 대책

앞에서 언급한 예방대책을 강구한다 할지라도 곡물을 저장 또는 가공하는 공정에서 분진의 발생, 비산 또는 제거를 완벽하게 한다거나 그 농도를 폭발하한계 이하로 억제한다는 것은 현실적으로 거의 불가능한 실정이며, 점화원을 배제한다 하여도 예기치 않은 점화원의 발생 등으로 화재·폭발은 언제나 야기될 수 있다고 보아야 한다. 따라서 만일의 경우에 대비하여 1차 폭발로 인한 설비의 파손은 물론 화염의 전파에 의한 제2, 제3의 폭발 등을 방지하고 폭발시의 압력파, 설비의 파괴로 인한 비산물, 그리고 화염 등으로 인한 인명의 손실과 경제적 손실을 방지하기 위하여 피해억제대책을 반드시 강구하여야 한다.

피해억제 대책으로는 설비를 예상되는 폭발압력에 견딜 수 있게 방폭 설계(Explosion-Proof Design)제작하는 방법, 내압강도 이하에서 폭발압력을 안전하게 방출하는 폭발방산구의 설치, 폭발을 초기에 억제하는 폭발억제장치의 설치 그리고 폭발압력 또는 화염의 전파를 방지하는 폭발전파방지장치 등이 이용될 수 있다

4-4 대책의 구체적인 예

가) 공기 수송중의 분말 제전

종래의 코로나 방전식 제전기는 저농도(수mg/m^3 이하)의 분진운이 저속(약 0.3m/s 이하)으로 유동으로 경우에 응용되지만 산업현장에 있어서의 분말 수송은 고농도 분진운이 고속으로 흐르기 때문에 여기에 응용할 수 있는 제전기가 필요하게 된다. 즉 광조사식 제전기를 설치하여야 한다. 설치 예를 그림 4-8에 나타낸다.

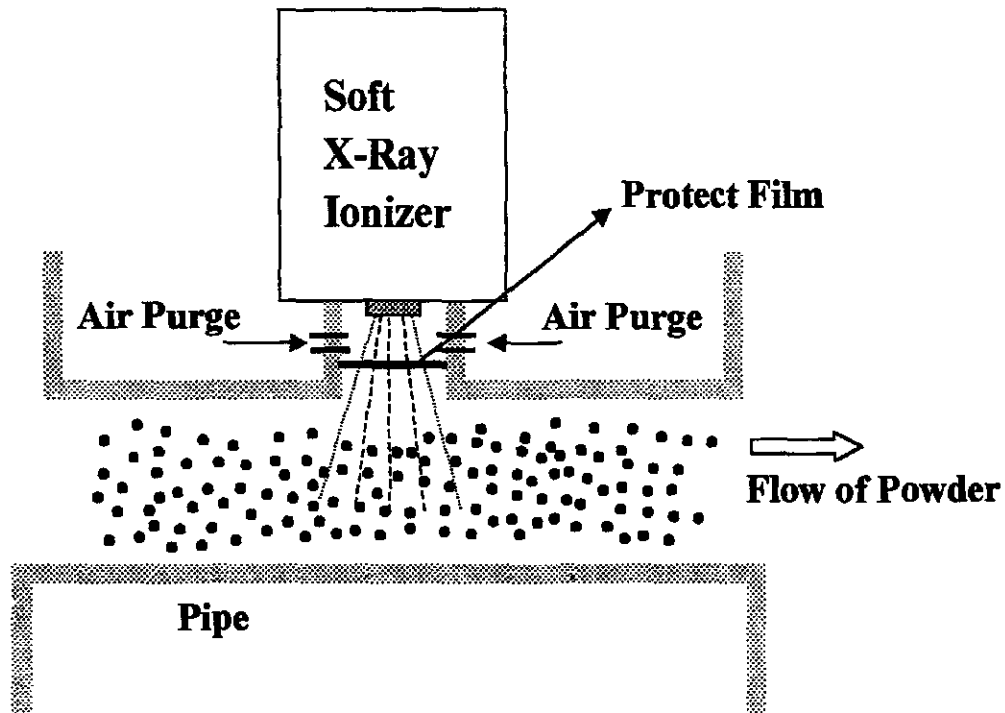


그림 4-8 파이프 내부에서 수송중인 분체의 정전기제거 장치

나) 부유분진(粉塵雲)의 억제

분말을 취급하는 산업 현장에서는 입자의 지름은 수 μm ~수백 μm , 분진농도가 수백 g/m^3 을 넘는 부유분진운이 자주 형성된다. 이와 같은 분진운의 억제에는 전기 집진기나 소연기 등은 적용되지 않기 때문에 새로운 방법이 필요하게 된다. 그 한가지 예로서 분진운 속에서 코로나 방전을 발생시켜 전계를 형성하여 쿨롱의 힘을 이용하는 방법 등이 있다.

제 5 장 정전기 제거용 제전기의 비교

분체 취급 또는 제조공정에 있어서 분체의 정전기 대전현상에 기인한 정전기 장애로는 다음과 같은 것이 있을 수 있다.

a) 대전전하의 방전장애

b) 대전에 의한 분진부착

대전전하의 방전장애는 인체로의 전격과 같은 생체현상과 분체에의 착화 또는 폭발 등과 같은 방전현상 등이 있다. 대전에 의한 분진부착의 장애는 생산공정에 직접 손상을 줄 만큼의 역학적 장애를 주는 일은 없지만 주위 장치의 표면에 정전기로 인하여 장기간 부착되는 분체 먼지로 인하여 제조 공정에서의 여러 가지의 나쁜 영향을 미친다. 또한 제조장치에 하전된 분체 입자는 특히 처리하기가 곤란하다. 일반적으로 분체의 미립자가 물체에 침착하는 메카니즘으로서 판성, 브라운 확산, 중력침강 등의 물리적인 요인 외에 입자 혹은 물체가 대전하고 있는 경우에는 정전기 인력이 작용한다. 일반적으로 정전기는 발생과 함께 누설도 일어난다. 대전방지는 발생을 작게, 누설을 크게 하는 것이다. 그러나 정전기발생을 작게 하는 것은 사실상 불가능한 경우가 많다. 따라서 분체의 대전방지 방법으로는 다음의 2 가지의 기술이 실현 가능한 대책이라고 할 수 있다.

a) 전하의 누설을 촉진할 것

b) 대전된 전하를 제전할 것

우선 전하의 누설대책으로서 접지가 기본적인 대책이다. 그러나 접지는 대전된 분체의 대전물체에 대해서 유효하지는 않다. 전하의 누설 대책으로는 환경습도를 65% RH 정도 이상으로 하는 것도 유효한 대책이다. 그러나 이러한 방법도 역시 대전된 분체의 대전물체에 대해서 유효하지는 않다.

다음으로 대전전하의 제전 또는 완화를 하기 위한 방법으로 제전기를 유효하게 활용하고 있다. 제전기는 침 또는 세선행의 전극에 고전압을 인가해서 코로나 방전에 의해 공기를 이온화하여 제전에 필요한 이온을 생성시켜 생성된 이온에 의해 대전물체상의 정전기를 중화시키는 장치이다. 제전대상물체인 가연성 분체의 정전기를 중화·완화시키는 방법으로 가장 적합한 제전기로서 연 X선을 이용한 제전기를 개발하는데 그 필요성과 중요성이 있다고 할 수 있다. 코로나 방전에 의해 이온을 발생시키는 종래의 제전기와 달리 빛에 의해서 가스분자를 직접 이온화해서 공정중의 반송계 전부에 있어서 대전된 분체의 정전기를 제전할 수 있다.

5-1 코로나 방전식 제전기

일반적으로 코로나 방전식 제전기는 인가전압의 형식에 따라서 펄스DC 타입(Pulsed DC type), AC타입, DC타입의 3가지로 구분된다.

제전기를 클린룸 중에서 가동하면 코로나 방전시의 스패터링(Spattering) 현상에 의해 전극의 끝부분으로부터 0.1 μm 이상의 금속미립자가 엄청나게 발생한다. 스패터링 현상에 의해 전극 끝부분의 손상 및 결손이 발생하기 때문에 수개월 한번씩 새것으로 교체하여야 한다. 또한 O_3 가스의 농도가 4~10 ppm 정도 생성된다(미국 OSHA 기준 : 0.1 ppm 이하).

① Pulsed DC 타입에서는 $\oplus$, $\ominus$ 이온의 발생주기를 길게 하면 좋지만 발생주기가 너무 길면 $\oplus$, $\ominus$ 이온의 재결합율은 저하하지만, $\oplus$, $\ominus$ 이온이 장기간 발생하면서 교반하여 대전물체 표면에 도달하기 때문에 대전표면의 전위는 $\oplus$ 또는 $\ominus$ 를 반복하므로 매끈한 대전완화 감쇄를 얻을 수 없다.

② AC 타입은 50/60 Hz의 주기로 $\oplus$, $\ominus$ 의 이온이 발생하고, 이온은 기류 중에서 혼재하면서 대전체에 도달하기 때문에 대전체에 도달하기 전에

일정의 비율로 이온 재결합이 높게 된다. 대전체의 중화를 신속히 하기 위해서는 이온의 재결합 비율을 낮추어야 한다. 또한 $\oplus$, $\ominus$ 이온의 발생량은 큰 편차가 생겨서 $\oplus$ 이온의 발생량은 $\ominus$ 이온의 발생량의 10배 이상으로 되고, 대전표면은 중화는 되지만 수십 볼트에서 200 V 정도의 $\oplus$ 잔류대전전압이 나타난다.

③ DC type에서는 $\oplus$ 또는 $\ominus$ 의 전극에 직류전압을 인가하기 때문에, 이온 바람이 생겨서 이온을 강하게 날려 보낼 수 있기 때문에 AC type보다 이온의 재결합이 높지 않다. 그러나 전극간의 간격이 가까우면 전극간에 스파크가 생기고, 너무 떨어지면 $\oplus$, $\ominus$ 이온이 독립적으로 존재하는 영역(spot)가 생긴다. 그림 5-1은 코로나 방전식 제전기의 제전원리를 나타낸다.

현재의 코로나 방전식 제전기는 금속 발진(發塵), O_3 발생, 이온 극성의 불균형 등의 결점이 있다. 클린룸 내에서 사용되는 코로나 방전식 제전기로부터의 발진의 문제는 B. Y. H Liu, M. Blitshteyn, R. P. Donovan에 의해 지적되었다. Liu는 正 이온의 스퍼터링에 의한 $\oplus$ 극 자체의 비산과 공기중의 불순물의 공기중에서 화학반응에 의해 석출되는 물질의 퇴적과 재비산이라고 보고하고 있다. M.Blitshteyn은 X선 분석(SEM/EPX)에 의해 SiO_2 가 전기력에 의해 전극상에 포집된다고 보고하고 있다. 또한 R.P.Donvan은 $\oplus$ 극의 부식은 화학반응을 수반하는 스퍼터링이라고 보고하고 있다. B.Y.H Liu는 0.1 μm class 10의 클린룸에서 코로나 방전식 제전기로부터의 발진량을 측정하였다(표 5-1). 그림 5-1은 송풍형 코로나 방전식 제전기의 이온생성원리를 나타낸다.

표 5-1 코로나 방전식 제전기로부터의 발진량

입자 카운터	입경범위	분진농도(개/cft)		
		Pulsed DC type	AC type	DC type
CNC(TSI 3020)	>0.03	1.2×10^3	1.9×10^3	1.3×10^5
LPC(PMS 101)	0.1~0.3	0.3 ± 0.5	-0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.2
	0.3~0.5	0.2 ± 0.1	0	0.1 ± 0.1
	0.5~1.0	0	0	0.1 ± 0.1

측정점 : D = 1.25 , L = 0.0 m 수직기류 : U = 0.31 m/sec

클린룸의 청정도 : $0.1 \mu\text{m}$ class 10 (back ground : 0.4 ± 0.2 개/cft)

back ground 측정과 각 시스템으로부터의 분진농도의 측정은 동시에 하지않음.

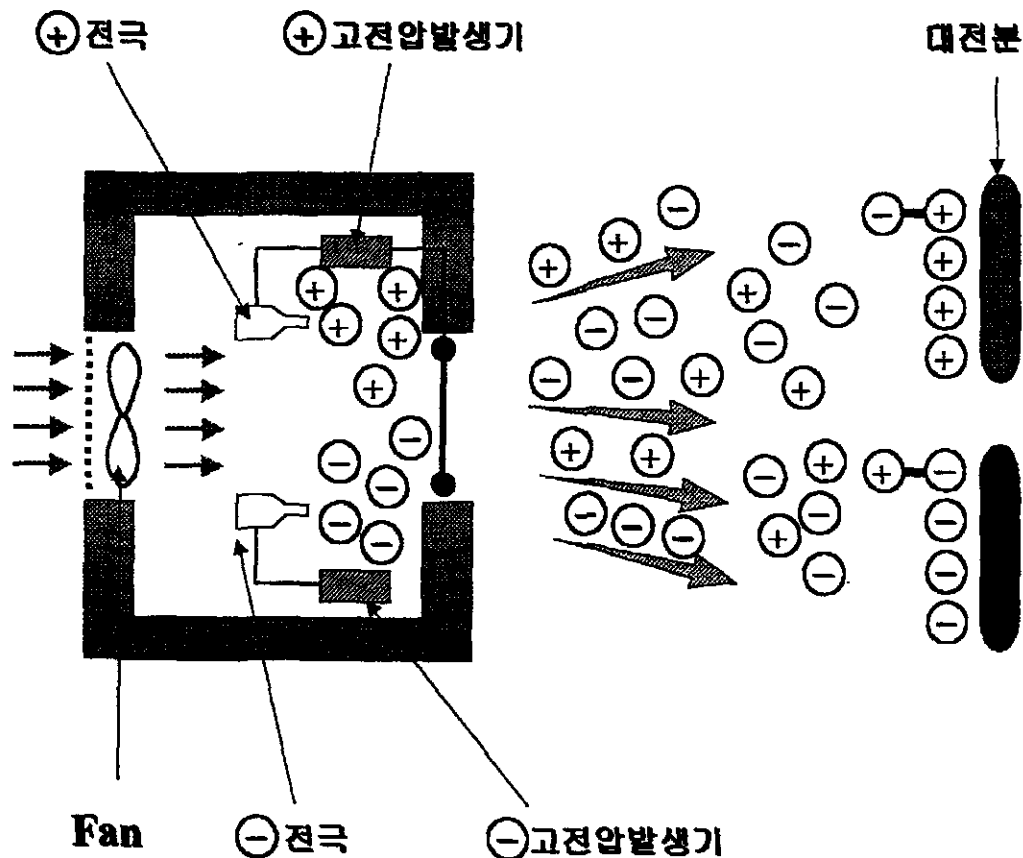


그림 5-1 송풍형 코로나 방전식 제전기의 이온생성원리

5-2 광조사식 제전기

광조사식 제전기는 대전물체 근방의 주위가스를 전리시켜 이온이나 전자를 생성하여 대전물체 표면을 제전하는 방법이다. 따라서 코로나 방전식에서는 이온의 반송을 위하여 송풍장치가 필요하나 광조사 방식에서는 무풍상태의 분위기 속에서도 제전할 수 있는 이점을 가지고 있다. 광조사식제전기에는 자외선 조사와 연X선 조사의 2가지 방법이 있다. 자외선조사식 제전기는 불활성 기체속이나 감압 진공분위기 내에서 유효한 제전기술이다. 대전된 유리기판의 위쪽 공간에 증수소 램프에서 발생한 자외선을 조사하면 대전 물체 근방의 가스가 전리된다. 그러나 산소를 포함한 분위기중에서 조사하면 오존 생성에 에너지가 소비되어 이온이 발생되지 않는 단점이 있다. 한편 연X선 조사식 제전기는 대기압 불활성 기체중이나 산소를 함유한 분위기중(물론 공기중)에 있어서 유효한 제전기술이다. 대전된 유리기판의 위쪽 공간에 연X선 램프에서 발생한 연X선을 조사하면 양과 음의 가스 이온이 발생되어 대전을 중화한다. X선은 방사선의 일종으로 물질 투과성에 따라서 X선을 적정하게 구분할 때, 얇은 공기층에 의해서도 쉽게 흡수되는 투과성이 낮은 것이 연 X선이고, 텅스트젠 등에 사용하는 투과성이 높은 것을 경 X선이라고 한다. 연X선의 에너지는 경X선에 비해 수십분의 일 정도로 낮다. 또한 연 X선은 비교적 안전성이 높기 때문에 피부암의 치료에 이용되는 경우가 많다. 직접 조사된 경우라도 효과는 일반적으로 깊이 2~3 mm의 피부주위에 한정된다. 따라서 경 X선과 비교하면 훨씬 파장이 길고 투과성도 낮기 때문에 체내 심부의 분열세포로 도달하는 일은 없다. 이외에도 방전전극으로 부터의 발진을 방지하기 위하여 침전극에 얇은 석영과 같은 고유전성물질을 피복·처리한 제전기도 일본에서는 기초연구를 하고 있는 실정이다. 표 5-2는 각종 제전기의 특징을 비교, 설명한 표이다.

표 5-2 각종 제전기의 비교

이온 생성 방법		전극의 열화와 전극 교체간격과 램프수명	주위 분위기	장 점	유지보수
코로나 방전	텅스텐 전극	있음(금속 입자 발전), 수주간 교체간격	대기압 공기중	저가	불가 (전극 발전있음)
	실리콘 전극	있음(Si 입자 발전), 수주간 교체간격	기류 필요	Si입자 발생있음	불가 (전극 발전있음)
	글라스 피복 전극	열화없음 · 수개월~1년의 교체간격		반영구적 전극수명	가능 (방전부에 정제 공기)
광조사	자외선	무전극, 약 3000시간의 수명	불활성 기체중 또는 감압 진공중 무산소 상태가 아니면 안된다	제전시간 짧음, 기류가 필요치 않음	가능 (전리공간의 가스 상 불순물 억제)
	연X선	무전극, 약 10,000시간의 수명	가스분위기, 감압 진공중에서는 사용 불가, 클린룸 속에서는 차폐가 필요	제전시간 짧음, 기류가 필요치 않음	가능 (전리공간의 가스 상 불순물 제어)

연X선과 경X선을 구분하면 표 5-3과 같다.

표 5-3 연X선과 경X선의 구분

구 분	파 장	에 너 지	용 도
연X선	수 A ~ 수백 A	수 Kev	분석용
경X선	0.01A ~ 1A	수십 ~ 수백 Kev	의료용, 공업용

전자파에서 X선은 그 파장이 대략 1×10^{-9} m에서 6×10^{-12} m까지이고 주파수는 3×10^{17} Hz에서 5×10^{19} Hz 까지이다. 여기서 연X선의 파장은 수 A ~ 수백 A이고 경X선은 0.01A ~ 1A이다. 그림 5-2는 X선 발생기의 내부 구조도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 연X선은 가속된 전자가 금속타게트에 충돌하면 발생되는 것이므로 X선 발생장치는 전자를 발생하는 필라멘트와 금속타게트에 들어 있는 X선관과 전자를 고속으로 가속시키는 고전

압발생장치로 되어 있다. 양극사이의 인가전압을 타게트전압(Target Voltage)이라고 하면, 충돌할 때의 전자의 운동에너지 E_k 는 다음 식(5-1)과 같이 표시된다.

$$E_k = eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5-1)$$

e : 전자전하(4.80×10^{-10} esu), m : 전자질량(9.11×10^{-28} gm)

v : 전자속도, V : 타게트전압

전자의 운동에너지는 타게트와 충돌할 때 대부분이 열로 변하고 1%이하의 에너지만이 X선으로 변한다. 이때 X선 발생 효율 ϵ 은 다음 식(5-2)로 표시된다.

$$\epsilon = 1.1 \times 10^{-9}ZV \quad (5-2)$$

따라서, X선 관에서 발생하는 최대 X선량은 타게트 원소의 용점 및 열전도도에 따라 달라진다. 그림 5-3은 연X선 제전기의 제전원리를 나타낸다. X선 제전기는 코로나 방전에 의해 이온을 발생시키는 종래의 제전기와 달리 에너지가 높은 빛을 조사하기 때문에 직접 가스분자를 이온화하여 불활성 가스안에서도 제전이 가능한 광조사 제전방식의 제전기이다. X선 제전기의 특징은 고농도의 이온 및 전자를 생성할 수 있기 때문에 상당히 단시간내에서 제전이 가능하고 또한 잔류대전전위가 대단히 낮고, 대기압상태의 불활성가스 분위기 중에서도 제전이 가능하다는 것이다. 연X선은 에너지가 높기 때문에 공기 분위기중의 가스분자를 이온화할 때 오존(O_3)은 생성되지 않고 산소분자는 신속히 $O_2^+ + e^-$, $O^+ + e^-$ 등의 이온으로 전리해 다른 가스분자 이온과 함께 제전에 기여한다. 그러나 기체의 광흡수율은 빛

의 파장이 짧아짐에 따라 저해된다. 연X선의 광흡수율은 $1/10^3 \sim 1/10^5$ 로써 감압하에서는 광자를 흡수하는 가스분자의 양이 적으므로 연X선에 의한 이온생성은 극히 감소한다. 따라서 연X선제전기는 대기압(760Torr)하의 분위기에서 효과를 발휘할 수 없다. 연X선 제전기는 파장 1.3Å 이상의 연X선을 사용하고 있다. 이 파장은 빛의 에너지가 높기 때문에 가스분자를 직접 이온화한다. 또한 광자흡수에 의해 전리된 전자는 높은 운동에너지를 얻으므로 전자사태를 유발한다. 이때 전리된 전자는 부이온이 되기 쉬운 분자(CO_2 , NO_2 등)와 결합해서 부이온이 된다.

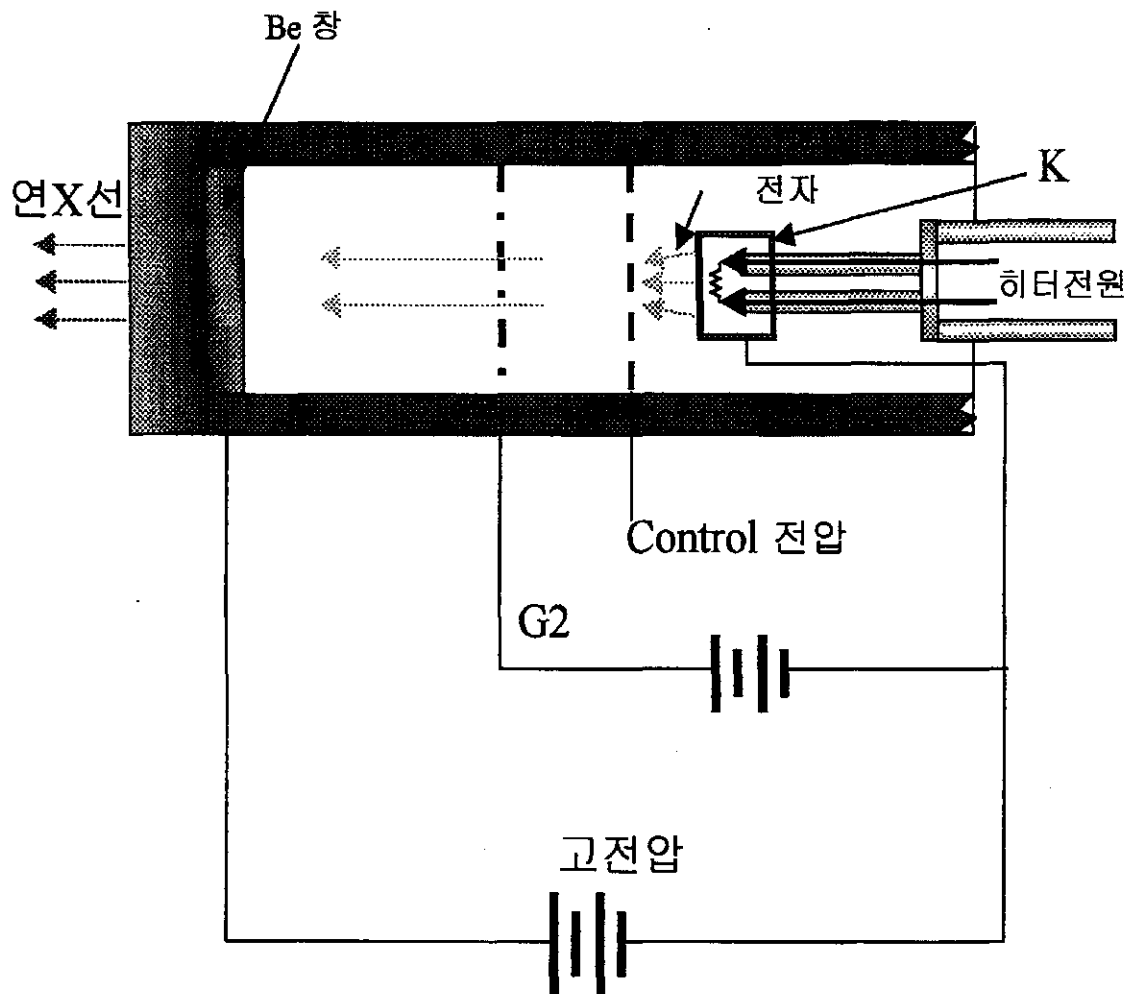


그림 5-2 연 X선 제전기의 내부 회로

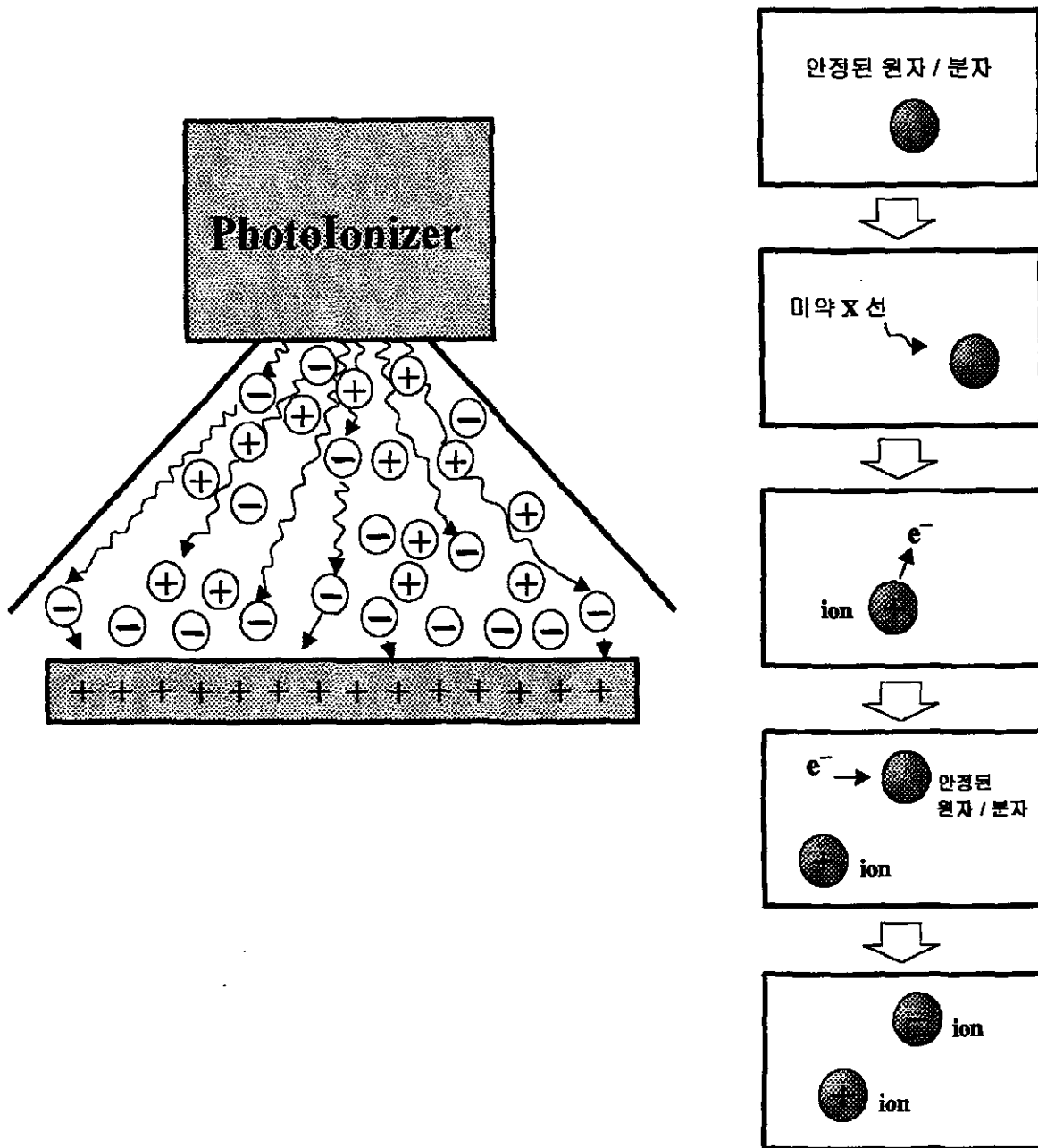


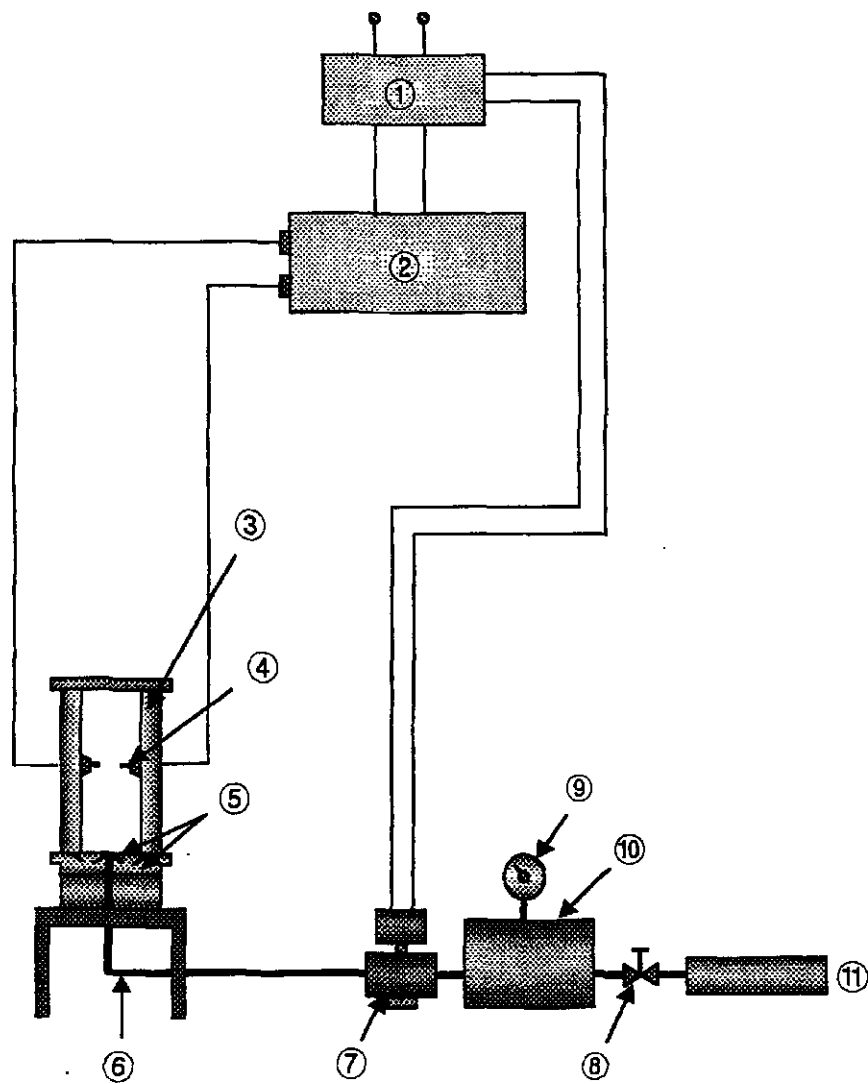
그림 5-3 연 X선 제전기의 이온생성원리

제 6 장 분체의 최소 착화에너지 측정장치의 설계 및 개발

6-1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치로는 그림 6-1과 6-2와 같이 취상식 분진폭발장치와 최소착화에너지 측정장치의 회로도를 나타내고 있다.

측정장치는 정전에너지 저장용으로 사용된 7 종류의 콘덴서(10pF, 30pF, 50pF, 100pF, 300pF, 1000pF, 2000pF)와 가스봉입형 고전압절환스위치(Kilovac社 K61C37C), 방전제한저항(Rx), 침대침 방전전극(재질 : 텅스텐)과 데이터 분석장치(GPIB) 및 직류고전압 발생장치로 구성되어 있다. 접지전극에는 무유도저항(500Ω)을 직렬로 연결하였다. 무유도저항(500Ω)은 임피던스를 저감하여 방전시의 고주파 진동을 억제하기 위하여 삽입하였다. 방전통은 강화유리(두께 5mm, 내경 70mm, 높이 300mm)로 되어 있으며, 방전통의 상부에는 폭발방산장치(종이 직경 93mm, 무게 0.5540g)가 부착되어 있어 폭발시에는 파열하도록 되어 있다. 방전전극은 침대침전극의 구조로 되어 있으며, 전극간격은 Digital Calipers에 연결되어 자유롭게 조절 가능하도록 되어 있다. 그림 6-3은 착화시의 절차(Time Chart)를 나타내고 있다.



- | | |
|--|------------------------------------|
| ① Timer | ⑥ Air pipe |
| ② High transformer | ⑦ Solenoid valve |
| ③ Discharge electrode | ⑧ Supply pressure regulation valve |
| ④ Explosion case | ⑨ Pressure gauge |
| ⑤ Sample platform & dispersion reflection plat | ⑩ Air tank |
| | ⑪ Air compressor |

그림 6-1 분진 폭발 실험 장치도

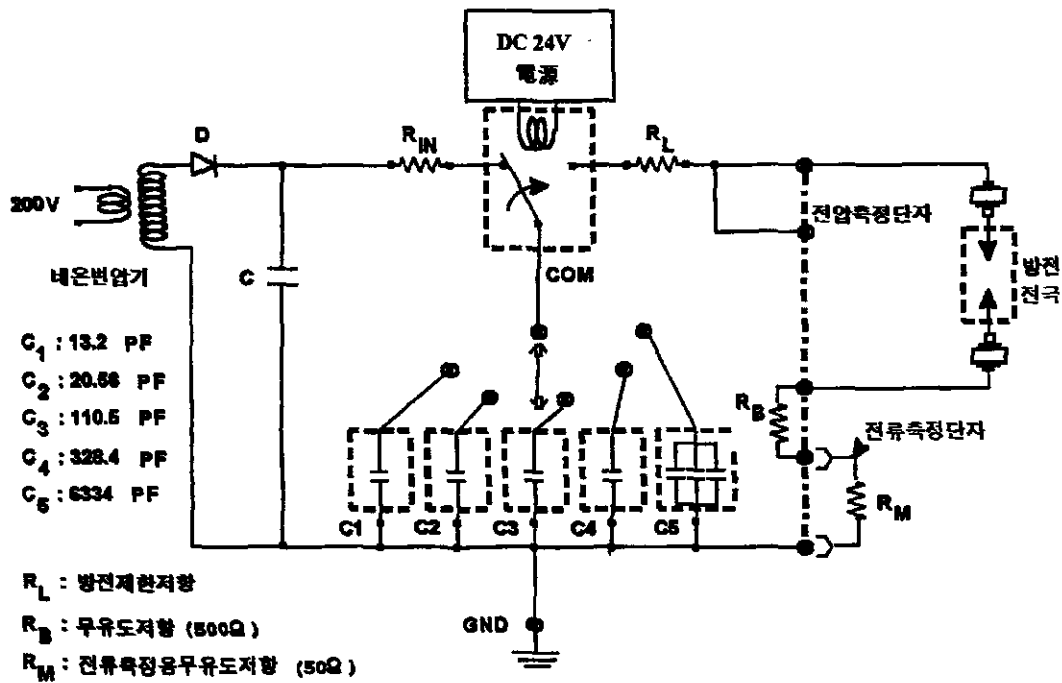


그림 6-2 최소 착화에너지 측정장치의 블록도

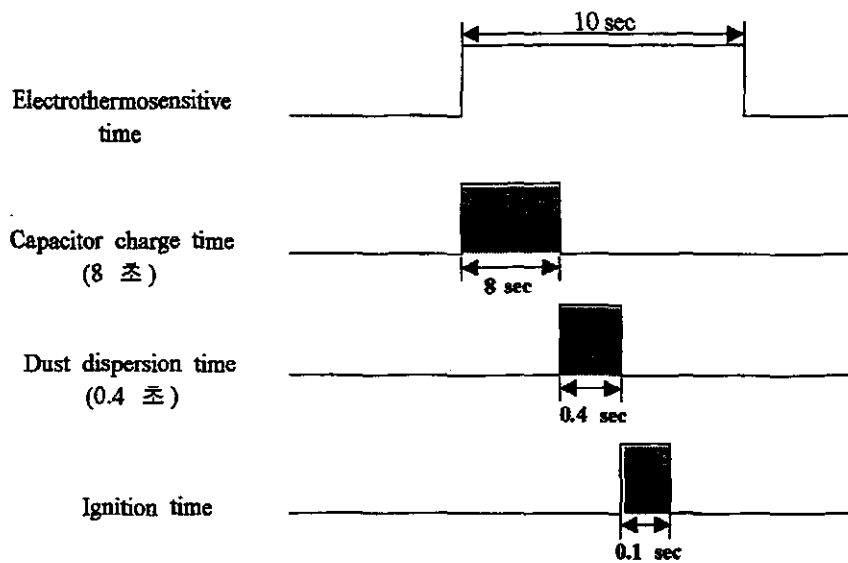


그림 6-3 착화 시퀀스

6-2 실험방법

방전전극과 접지전극간 방전시의 방전전압은 고전압 프로브(Tektronix社 P6015A)에 의하여, 방전전류는 위에서 언급한 전류검출용 무유도저항(R_m , 50Ω)의 전압강하법에 의하여 각각 검출하였다. 또한 방전전류 및 방전전압의 파형을 디지털오실로스코프(Digital oscilloscope, HP380A)에 파형을 기억시키고, 이때의 data는 GPIB를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 오실로스코프의 전류측정 Channel의 입력 Impedance는 $10M\Omega$ 으로써 전류검출용 무유도저항, R_m 50Ω 과 병렬로 연결되므로써 전체적인 전류측정회로의 합성 저항은 거의 50Ω 이다.

착화실험은 그림 6-3에 나타난 동작절차에 따라 고전압 절환 스위치를 작동시켜서 고전압으로 충전한 콘덴서를 방전회로측에 접속하여 순간적으로 기중방전을 일으킴과 동시에 가연성 분진(소나무 분진 - 비열 : $0.415\text{Kcal/kg}^\circ\text{C}$, 열전도율 : $0.297\text{Kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, Mech : $180\sim 360$)을 방전통 내로 분출시켜 착화시키고, 이때의 착화의 유무를 육안과 방전전류의 최대값으로부터 판정하였다. 이때 방전전극 간격간에서 소비된 방전에너지, 즉 최소착화에너지는 방전전극과 접지전극간의 방전전압과 방전전류의 곱, 즉 식(6-1)에 나타난 바와 같이 컴퓨터와 GPIB에 의해 순시적분을 하므로써 산출하였다.

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T i v dt [J] \quad (6-1)$$

여기서 T : 방전지속시간 i : 방전전류 v : 방전전압

제 7 장 연 X선 제전기의 설계 및 제작

7-1 시스템의 구성

연X선 제전기의 구성은 그림 7-1과 같이 연 X선을 발생시키는 헤드부와 연 X선의 누출을 방지하기 위한 격실, 연 X선 발생을 제어하기 위한 전원 제어부로 구성된다.

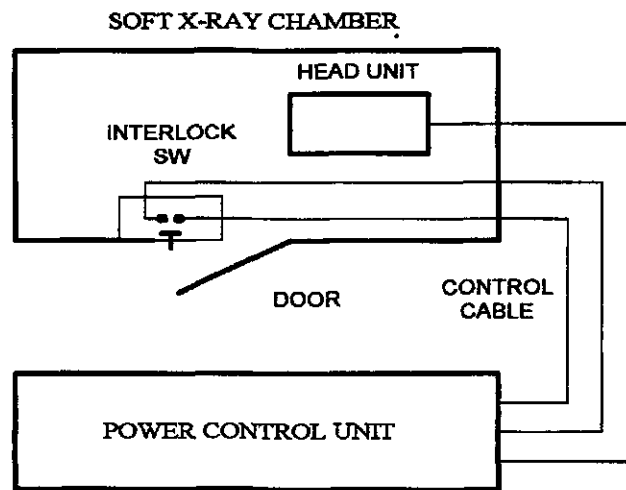


그림 7-1 연X선 제전기의 블록도

7-2 시스템의 설계 및 제작

가) 연 X선 보호부

연 X선의 누출을 방지하기 위한 격실은 두께가 1mm의 강판으로 구성하였으며, 안전을 위하여 인터록 스위치를 장착하여 도어가 열린상태에서는 연 X선이 발생되지 않도록 설계하였다.

나) 전원제어부(Power Control Unit)

전원제어부는 이온생성관을 구동하기 위한 직류 고전압(DC 9.5KV, 190 μ A)을 제외한 이온생성관의 히터전압, 펄스신호 구동회로, G2 의 전원전압 등을 공급하기 위한 전원부이며, 인터록 스위치가 ON 상태일 경우에만 동작하도록 설계하였다.

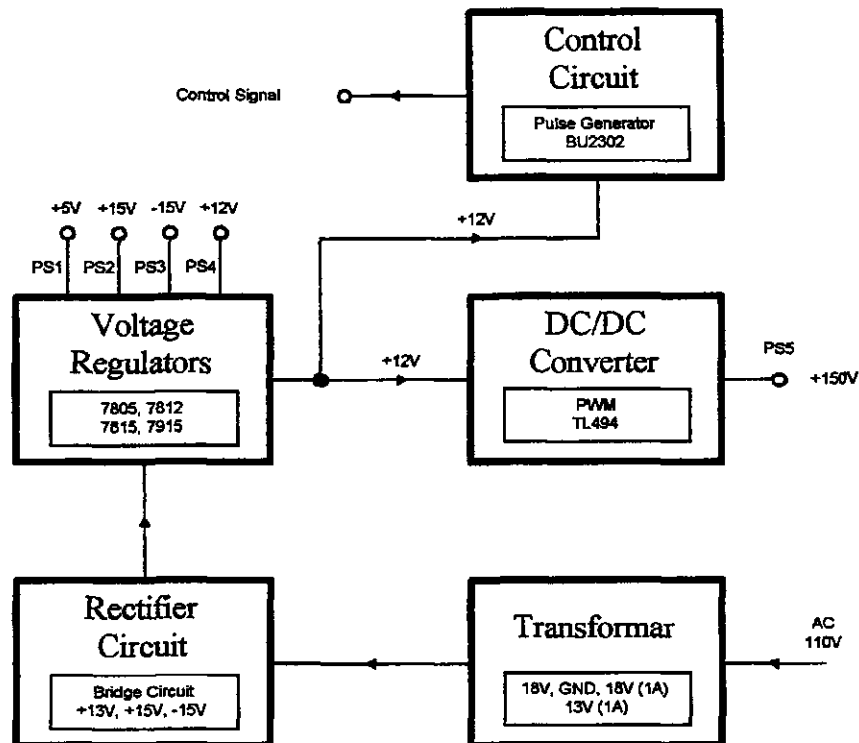


그림 7-2 전원제어부의 내부 블록도

1) 전원 및 제어회로

전원 및 제어회로는 이온생성관을 구동하기 위한 직류 고전압(DC 9.5KV, 190 μ A)을 제외한 이온생성관의 히터전압, 펄스신호 구동(Pulse signal driver) 회로, G2 의 전원전압 등을 공급하기 위한 전원부이며, 그림 7-3과 같이 +15, -15, +12, +5[V]의 직류 전원회로를 설계하였다. 또, 이온생성관의 이온방출을 안정하게 구동하기 위해 BU 2302, TA 75358P,

TC 4013BP, HD 74LS14 등을 사용하여, 펄스 제어회로를 설계하였다.

2) DC/DC 변환기 (G2 high voltage circuit)

이온생성관의 G2 고전압을 안정하게 공급하기 위해 TL494를 사용하여 그림 7-4와 같이 PWM(Pulse width modulation) 발생회로로 DC/DC 변환기를 설계 제작하였다.

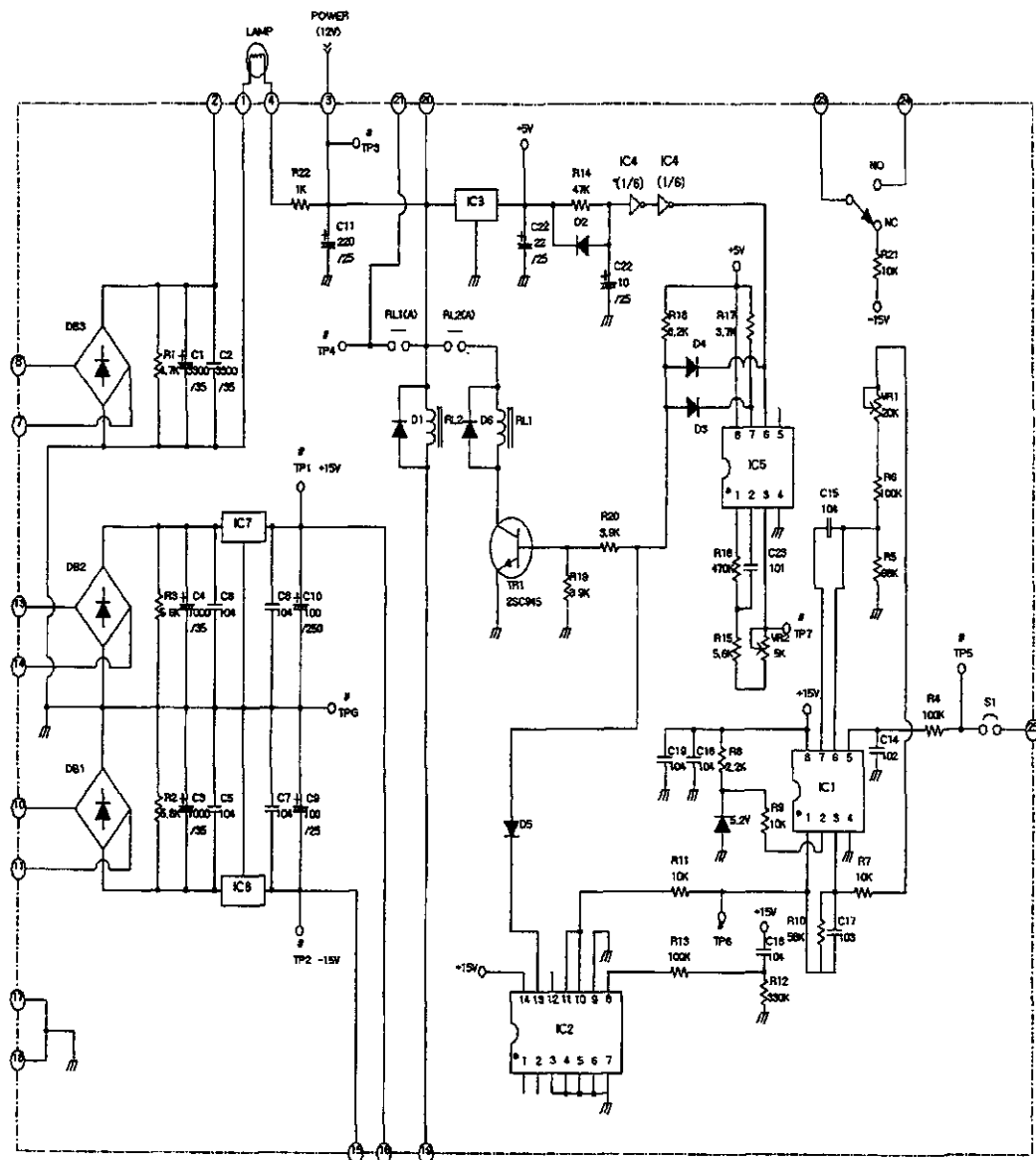


그림 7-3 전원제어 회로

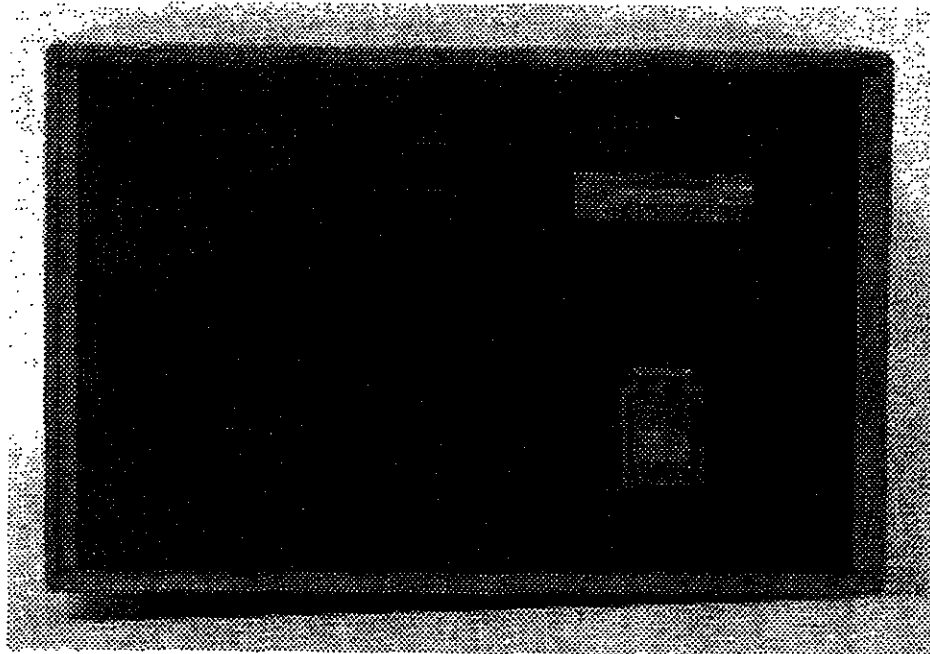


그림 7-5 전원제어부 (전면)

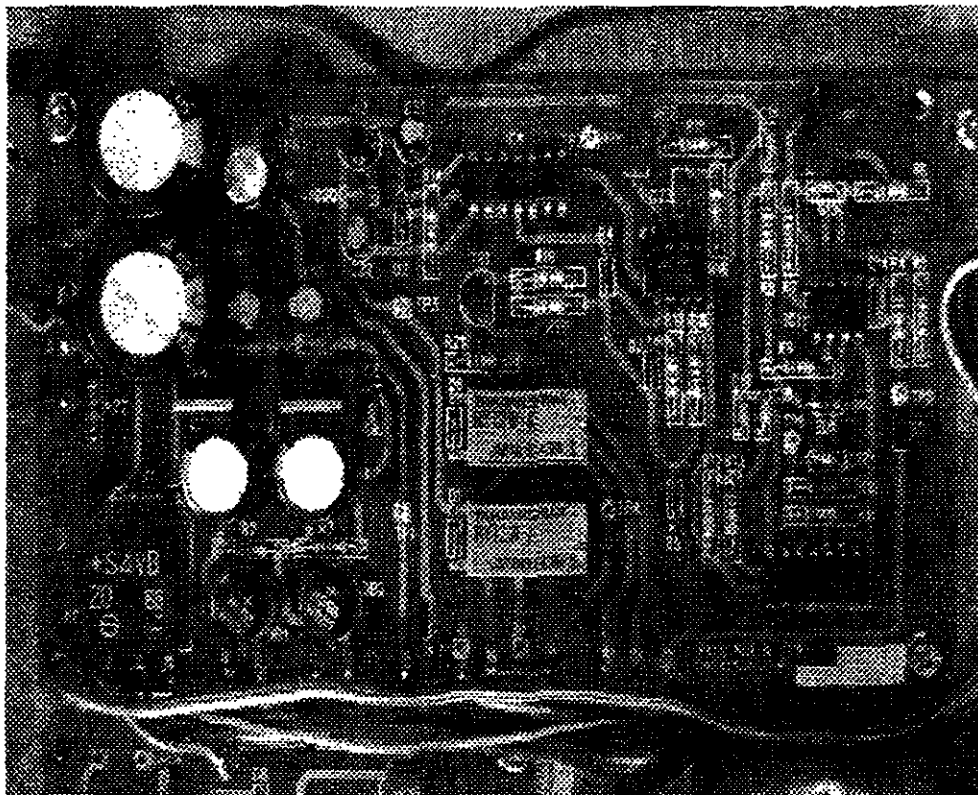


그림 7-6 전원제어부 외장도(전원 및 제어회로)

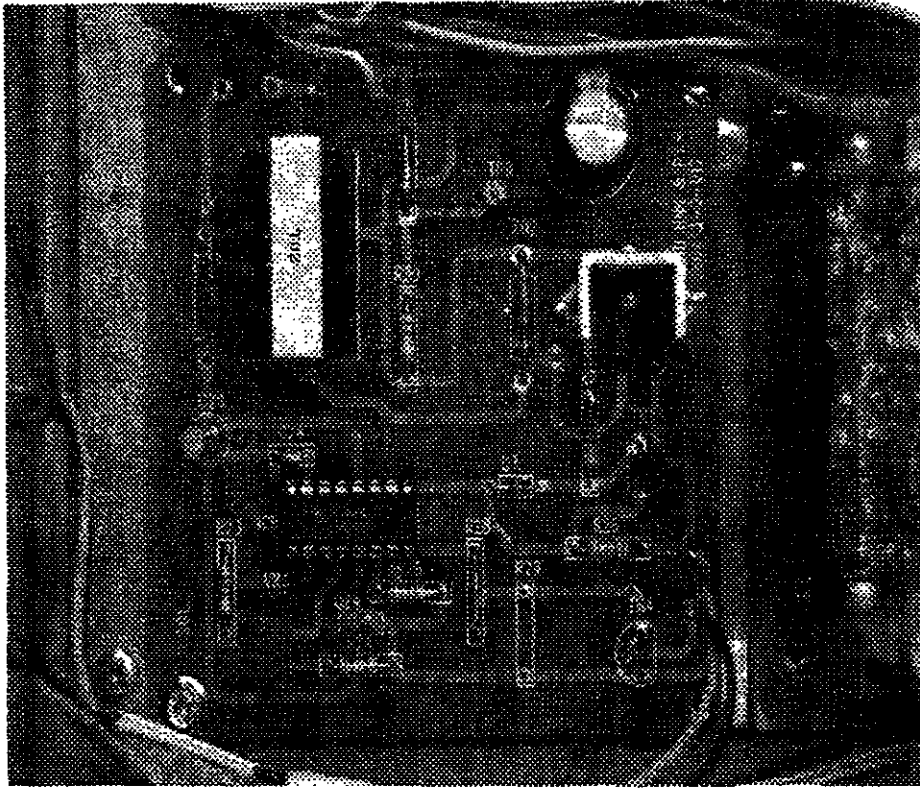


그림 7-7 전원제어부 외장도(DC/DC 변환기)

다) 헤드부

헤드부의 구성은 그림 7-8과 같이 이온생성관(연 X선관), 직류 고전압발생기, 펄스 신호(Pulse signal)회로로 구성하였다.

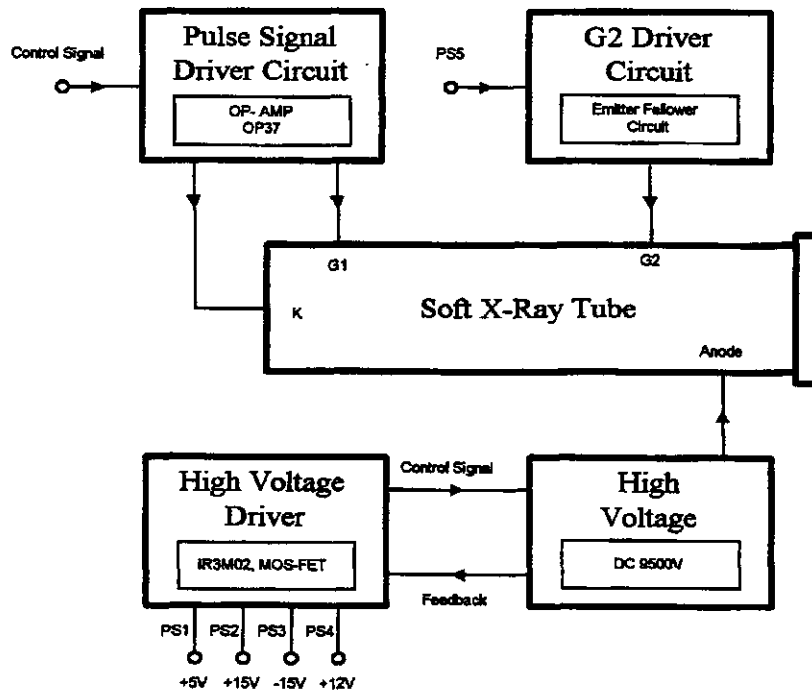


그림 7-8 헤드부의 블록도

1) 이온생성관 (Soft X-Ray Tube)

이온을 생성하기 위한 진공관이며, 창(창)의 재질은 Be, 관의 전압은 9,500V, 관의 전류는 $190\mu A$ 인 이온 생성관을 사용하였다.

2) 제어 회로 (G2 driver & pulse signal driver circuit)

전원전압의 변동 및 주위 온도 변화 등에 의한 불균일한 연 X선 방출을 제거하기 위해 전원제어부로부터 펄스 신호를 받아 이온 생성관의 전자 방출량을 제어하는 회로를 그림 7-9와 같이 설계하였으며, 또한 G2의 안정된 직류 전원을 공급하기 위해 제너 다이오드를 사용하여 볼테이지 펠로우

(Voltage follower)로 구성하여 설계하였다.

3) 직류 고전압 발생회로

헤드부의 내부에 있는 이온생성관을 구동하기 위해 직류 고전압(DC 9.5KV, 190 μ A)이 필요하다. 직류 고전압 발생기는 안정된 전압을 얻기 위해, 직류 고전압(DC 9.5KV)으로부터 펄스 신호를 받아 고압 전원장치를 구동하기 위한 드라이버 회로를 2SC2334를 사용하여 그림 7-10과 같이 설계하였다. 고전압 발생회로는 TL494를 사용하여 PWM(Pulse width modulation) 발생회로로 DC/DC 변환기를 그림 7-11과 같이 설계제작하였다

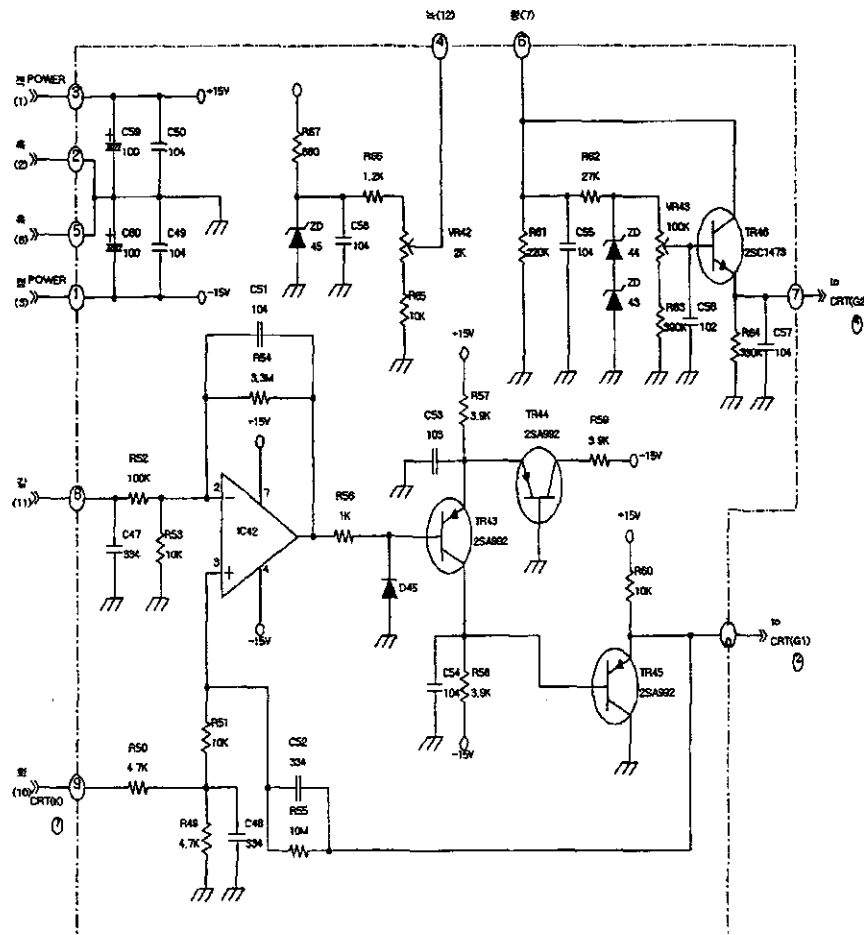
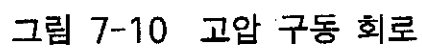


그림 7-9 G2 구동 및 펄스신호 구동 회로



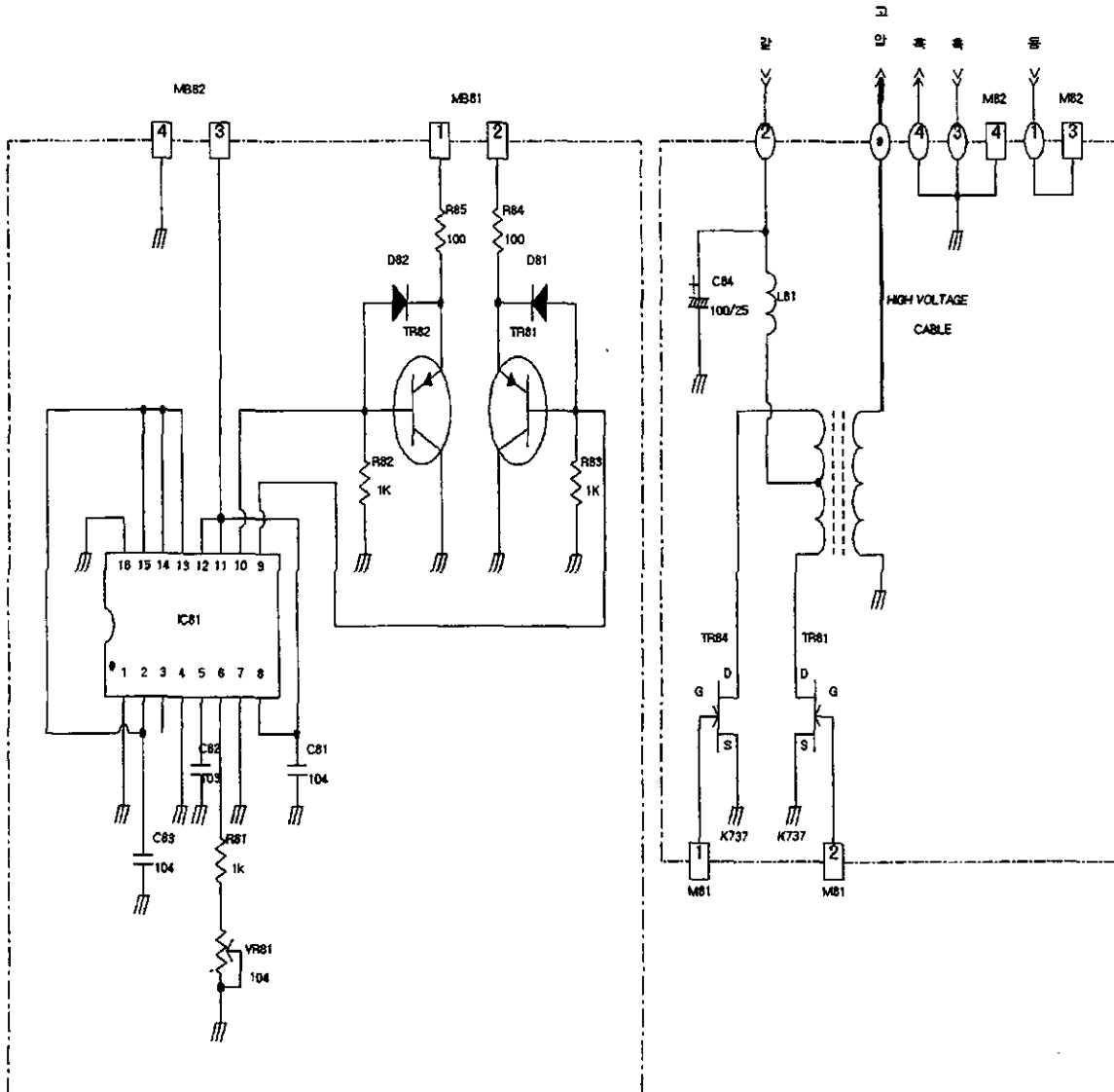


그림 7-11 고압 회로

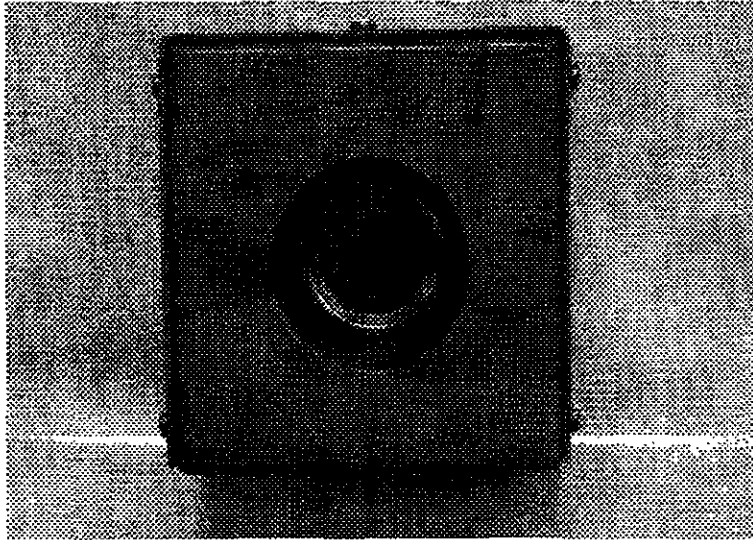


그림 7-12 헤드부 (전면)

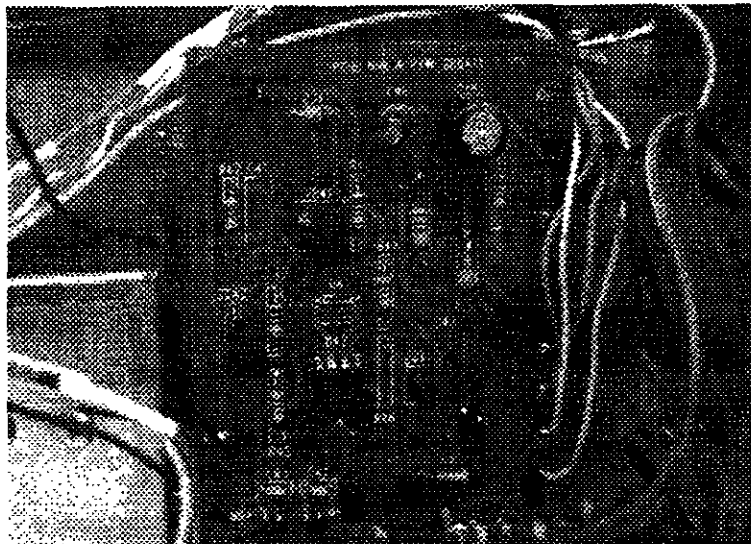


그림 7-13 헤드부 (G2 구동 및 펄스신호 구동회로)

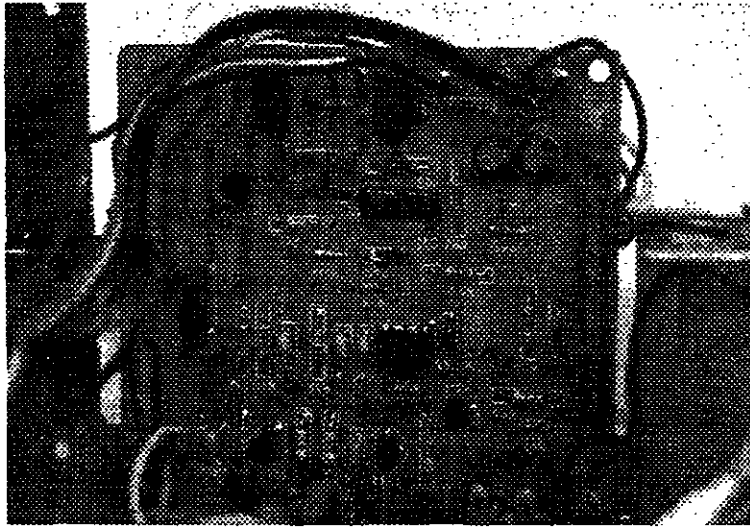


그림 7-14 헤드부 (고압구동회로)

제 8 장 연X선의 제진기의 정전기 제거 특성

8-1 실험장치 및 방법

그림 8-1은 연 X선 조사에 의한 정전기 제전특성을 측정하기 위한 장치이다. 그림 8-2는 본 연구에서 제작된 연X선 제전기의 사진을 나타낸 것이다. 그림 8-3은 수직, 수평방향의 실험영역을 나타낸 것이다. 연 X선은 연 X선발생장치로부터 실험 Chamber내로 방사된다. 연X선을 공기 중으로 조사(조사각 최대 110°)하면 일부는 보다 에너지가 낮은 산란선으로 되어 사방으로 퍼져서 제전효율이 저하할 수 있으므로 그림 8-3과 같이 차폐판을 설치하였다. 이때 쓰인 차폐판의 구조는 PVC (두께 2mm)를 사용하여 차폐율을 99.999% 이상으로 유지하였다. 연 X선에 대한 설치거리와 각도변화에 따른 정전기 제전특성을 얻기 위해 측면에서 조사하는 방법과 상부에서 조사하는 방법의 2가지로 하였고, 설치거리는 500mm, 750mm, 1,000mm, 1,250mm, 및 1,500mm로 하였으며 조사각도는 좌우로 최대 45° 로 하였다. 또 모의 대전체로는 Charge Plate Monitor(Static control service A354, Japan)를 사용하였고 대전전위는 $\pm 5KV \sim \pm 0.5KV$ 로 조절되도록 하였다. 대전완화시간은 이온완화계(Ion decay meter), 이온전류는 이온전류측정기(Simco ionometer ICM-2, Japan), 제전기로부터 발생하는 분진은 분진 측정기(Micro LPC-210)로 각각 측정하였다. 또 본 실험은 환경변화에 따라 상당히 민감한 영향을 받기 때문에 항온항

습기(온도 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 $40\% \text{RH} \pm 2\%$, 대기압 760 Torr)에서 모든 실험 및 측정하였으며, 재현성을 확인하기 위해 평균 3회 이상 측정하였다.

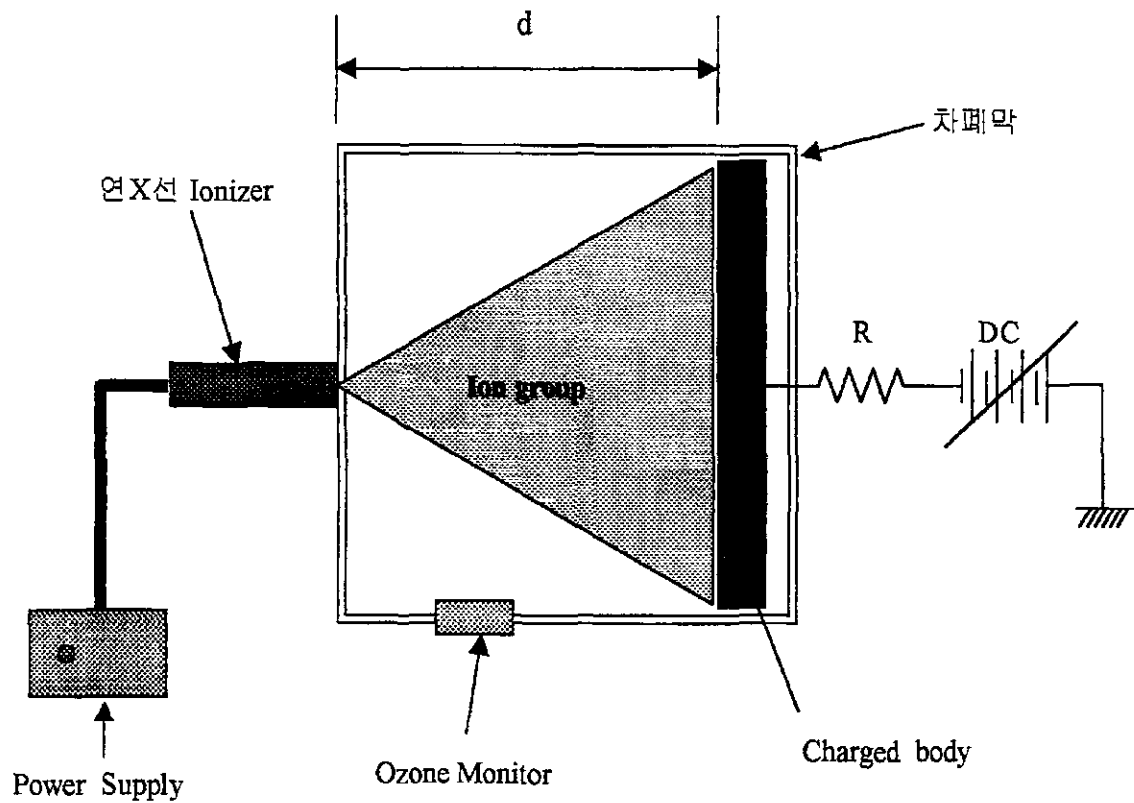


그림 8-1 실험장치도

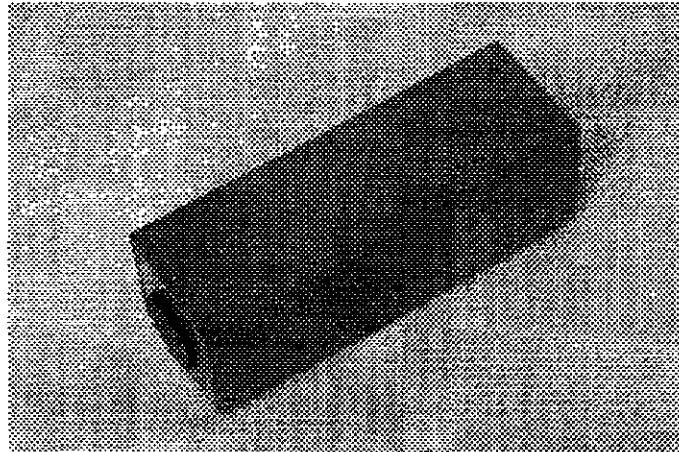


그림 8-2 개발된 연X선 제전기의 외형 사진

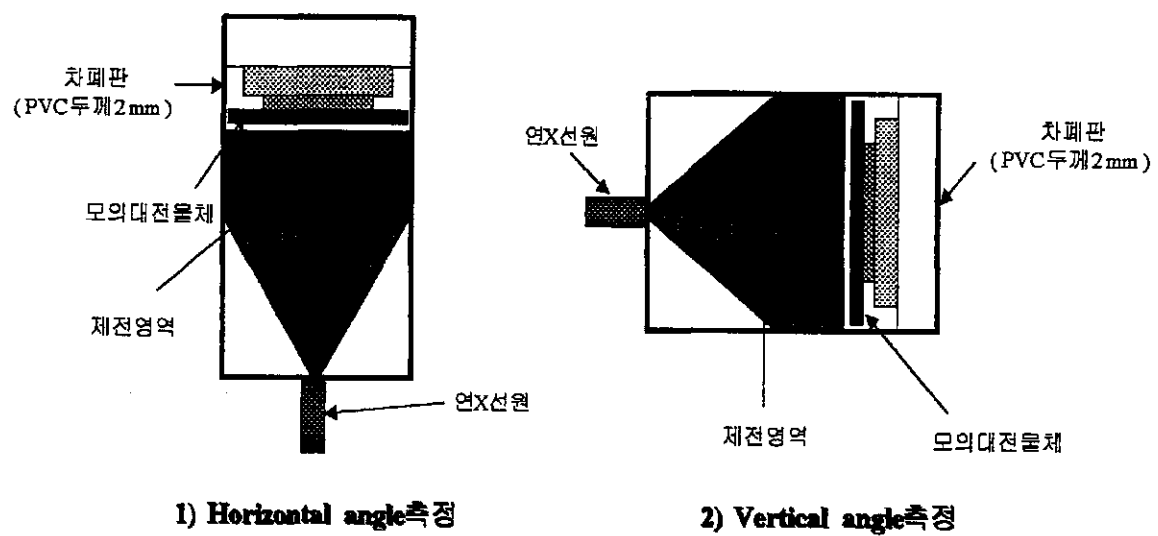


그림 8-3 실험 영역

8-2 실험 결과 및 고찰

연 X선 제전기의 제전능력은 모의대전전압의 90 % 정도의 전압까지 중화되는 시간적 비율과 잔류대전전위로 나타낼 수 있다. 이온에 의한 중화이고 제전기의 이온생성능력이 크면 당연히 단시간에 정전기 제전이 가능하다. 따라서, 타겟 전압 및 전류의 변화가 곧 정전기 제전특성을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 또한 대전물체와 제전기와의 설치거리, 제전기 설치각도 및 피제전지역을 도전성 차폐막으로 차폐하였을 때에도 제전성능이 변화하기 때문에 이에 대한 연구도 아울러 실시하였다.

8-2-1 타겟 전압 및 전류의 변화에 따른 대전완화 시간특성

그림 5-2에서 보듯이 5 keV 에너지를 갖는 특정파장 1.3Å의 연X선은 고전압에 의해 가속되는 전자빔이 티타늄(Titanium) 타겟에 충돌됨으로써 발생된다. 그림 8-4는 전자가속전압, 즉 타겟 인가전압의 변화에 따른 정전기 완화 시간특성을 나타낸 것이다. 그림 8-5는 가속된 전자량, 즉 타겟 전류의 변화에 따른 정전기 완화 시간특성을 나타낸다. 그림 8-4에서 알 수 있듯이 정전기 완화 시간특성은 타겟 전압에 의해 크게 좌우된다는 것을 알 수 있다. 타겟 전압이 5kV 이하일 때 정전기완화시간이 1~3 초 이상으로 비교적 크나, 5kV 이상 7kV 까지는 완화시간이 완만히 저하하고, 그이상에서 최대인가전압 (9.5kV)까지는 서서히 포화하고 있음을 보여준다. 반면에 타겟 전류 변화에 따른 완화시간은 타겟 전류가 50 μ A ~ 100 μ A 사이일 때 타겟 전류에 거의 비례하여 저하한다. 이는 연 X선이 타겟 전류에 비례하기 때문이다. 그러나 100 μ A를 초과할 때에는 완화시간이 서서히 저하하였다. 이것은 타겟 전류의 증가에 따라 이온농도가 증가하면 오히려 생성된 $\oplus$ 와 $\ominus$ 전하사이에서 재결합율이 증가하기 때문이다.

모의대전물체의 대전전압 극성이 $\oplus$ 일 때와 $\ominus$ 일 때 차이가 나타났다. $\oplus$ 로 대전된 물체의 완화시간이 $\ominus$ 로 대전된 물체의 완화시간보다 거의 2배이상 빠르게 나타났다.

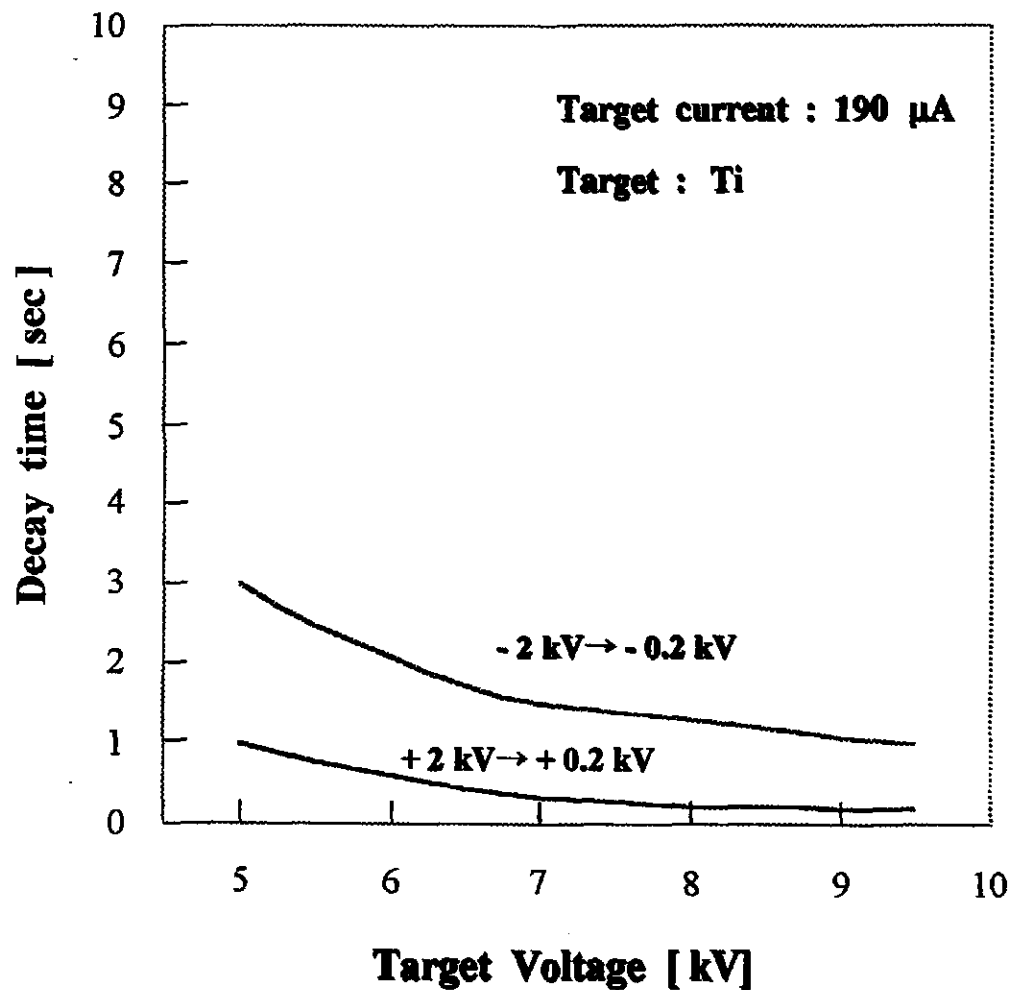


그림 8-4 타게트 전압의 변화에 따른 대전완화 시간특성

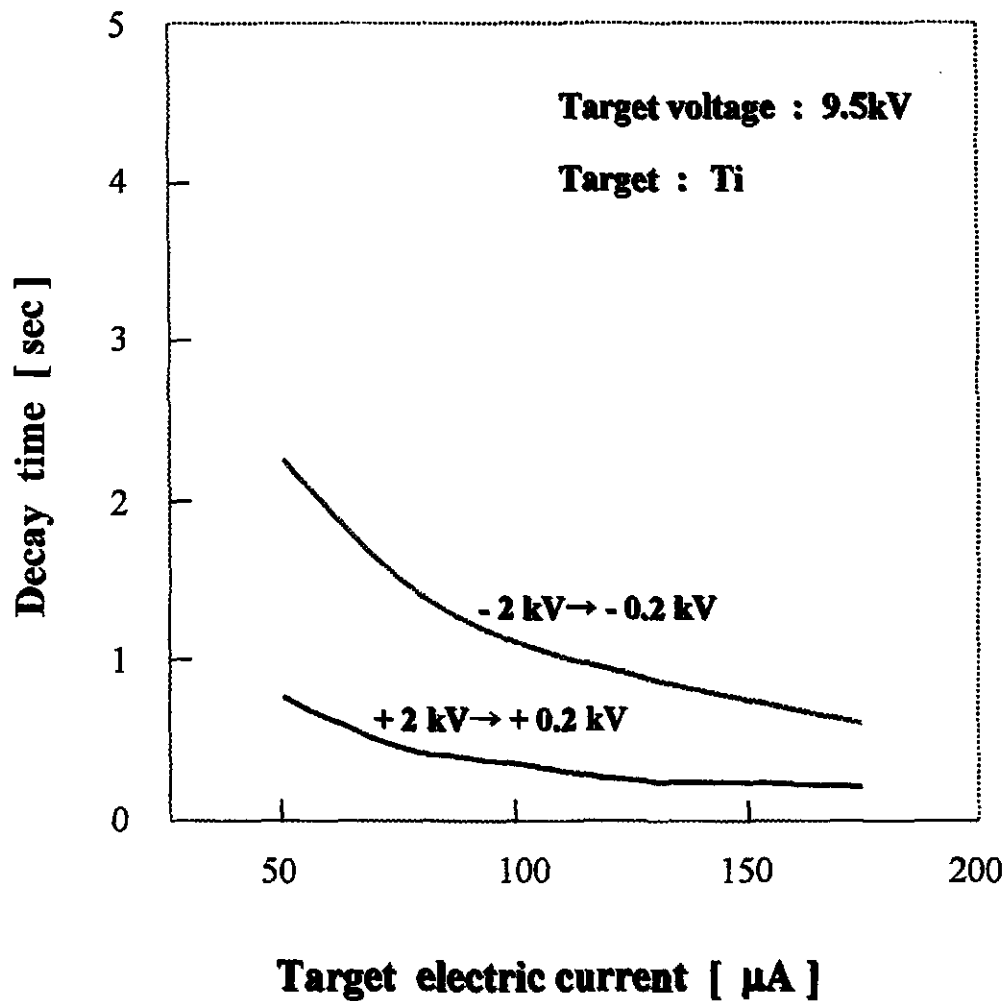


그림 8-5 타게트 전류의 변화에 따른 대전완화 시간특성

8-2-2 설치거리의 변화에 따른 대전완화 시간특성

그림 8-6은 연X선 제전기의 설치조건상 중요한 요인중의 하나인 대전물체와 제전기와의 설치거리(d)를 50 mm에서부터 1500 mm까지 변화시켰을 때 대전물체의 대전완화 시간특성에 미치는 영향을 검토한 것이다. 이때 수직 및 수평방향의 설치각도는 모두 0° 로 하였다. 실험영역내에는 하향기류

가 0.35 m/s를 갖도록 하였다. 여기서, 알수 있듯이 모의 대전물체를 $\pm 5\text{kV}$ 로 대전시켰을 때 $d=500\text{ mm}$ 에서 $d=750\text{ mm}$ 까지는 $+5\text{kV}$ 및 -5kV 로 대전된 물체의 완화시간(τ)가 거의 일치하나, $d > 750\text{ mm}$ 이상으로 이격되면 $\oplus$ 로 대전된 물체가 $\ominus$ 로 대전된 물체보다 다소 빠르게 완화된다는 것을 알 수 있다. 이는 생성된 이온의 이동속도 및 대전물체와의 정전흡인력 특성에 기인한 것으로서, $\ominus$ 이온의 이동속도가 $\oplus$ 이온의 이동속도에 비해서 다소 빠르기 때문인 것으로 생각된다. 즉 $d=500\text{ mm}$ 일 때 $+5\text{kV}$ 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 1.9초, $d=500\text{ mm}$ 일 때 -5kV 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 1.9초, $d=750\text{ mm}$ 일 때 $+5\text{kV}$ 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 3.8초, $d=750\text{ mm}$ 일 때 -5kV 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 4초, $d=1000\text{ mm}$ 일 때 $+5\text{kV}$ 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 6.3초, $d=1000\text{ mm}$ 일 때 -5kV 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 7.1초, $d=1250\text{ mm}$ 일 때 $+5\text{kV}$ 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 10.6초, $d=1250\text{ mm}$ 일 때 -5kV 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 12초, $d=1500\text{ mm}$ 일 때 $+5\text{kV}$ 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 16.5초, $d=1500\text{ mm}$ 일 때 -5kV 에서 거의 0V까지 완화된다는 시간은 19.1초로 나타난다. 따라서 분체 취급공정에서 화재의 위험을 고려하여 적어도 $\pm 200\text{V}$ 이하를 5초 이내 유지하여야 하므로 연X선 제전기의 설치거리는 750 mm 이내일 때가 최적의 제전효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제로 연X선 제전기가 제조공정에서 대전물체에 보다 근접하여 설치하면 제전능력은 더욱 높을 것으로 사료된다. 연X선 제전기의 동작기구 등 다른 중요한 요인중의 하나는 생성된 이온의 조사각(照射角), 즉 수직 및 수평방향에 대한 설치각도라고 할 수 있다.

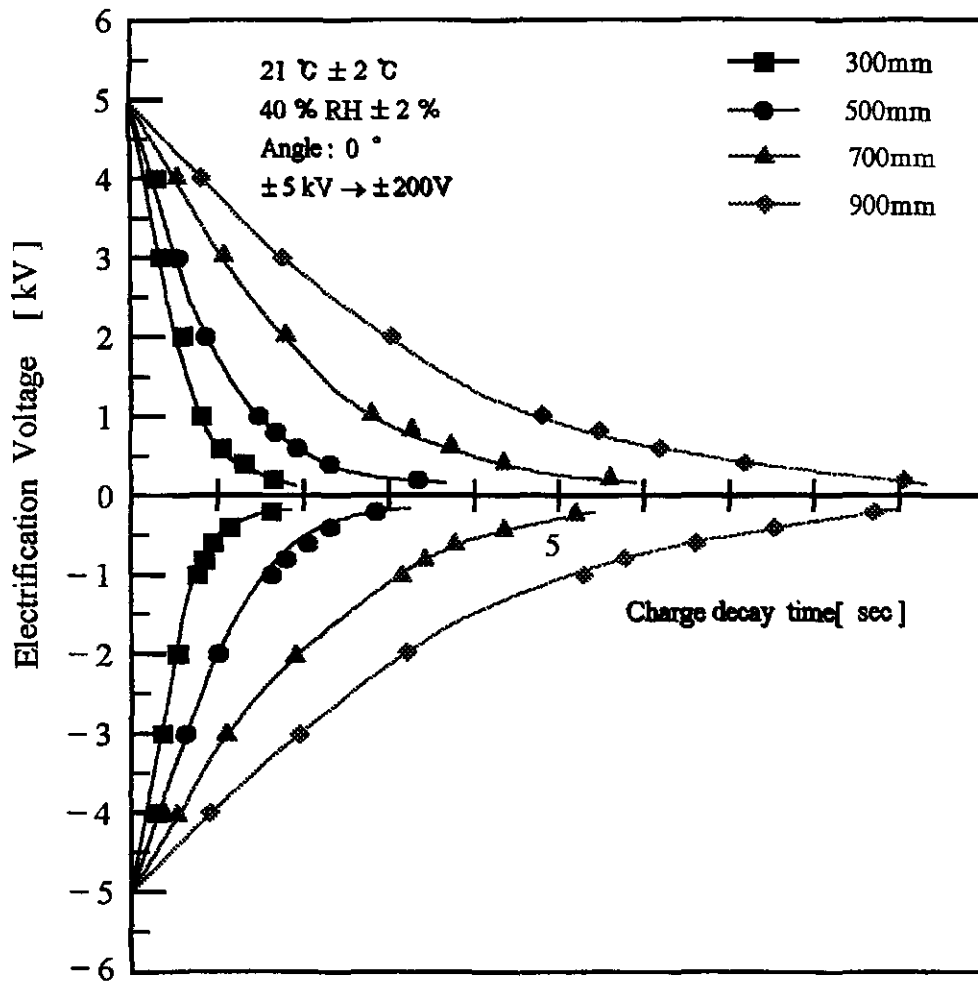


그림 8-6 연X선 제전기와 대전체사이의 거리의 변화에 따른 대전완화 시간특성

8-2-3 수직·수평 설치각도의 변화에 따른 대전완화특성

그림 8-7은 제전기의 설치거리를 500 mm에서 1500 mm까지 변화시키고, 제전기의 수평방향의 설치각도(θ_n)를 0°에서 45°까지 변화시켰을 때 대전 물체의 대전완화시간특성을 나타낸 것이다. 단 이때 제전기의 수직방향의 설치각도(θ_v)는 0°로 고정하였다. 그림 8-7에서 보듯이 θ_n 이 $\pm 30^\circ$ 이내에

서는 θ_n 이 0° 일때와 비교해서 대전완화시간에는 큰 차이가 나타나지 않으나, 30° 이상의 수평각도를 갖을 경우에는 대전완화시간이 약 10%~20% 이상 증가함을 알 수 있다. 이는 대전물체의 단위면적당 제전에 유효한 이온밀도가 수평각도를 증가시킬 수록 감소하여서 대전완화시간이 증가하기 때문이다. 한편 그림 8-7과 동일한 조건에서 제전기의 수평방향의 설치각도(θ_n)는 일정하게 하게 하고, 수직방향의 설치각도(θ_v)를 0° 에서 45° 까지 변화시켰을 때 대전물체의 대전완화 시간특성을 나타낸 것이 그림 8-8이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 그림 8-7과 같이 θ_v 가 $\pm 30^\circ$ 이내에서는 θ_n 이 0° 일때와 비교해서 대전완화시간에는 큰 차이가 나타나지 않으나 30° 이상의 수직각도를 갖을 경우에는 대전완화시간이 최대 10%~20%이상 증가함을 알 수 있다. 이 또한 그림 8-7에서와 같이 제전에 유효한 이온밀도가 설치각도의 증가와 더불어 감소 하였기 때문이라고 생각된다. 그림 8-7과 그림 8-8로부터 미루어 볼 때 설치거리는 750 mm 이내로 하고, 수직 및 수평설치각도는 $\pm 30^\circ$ 이내에 제전기를 설치하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

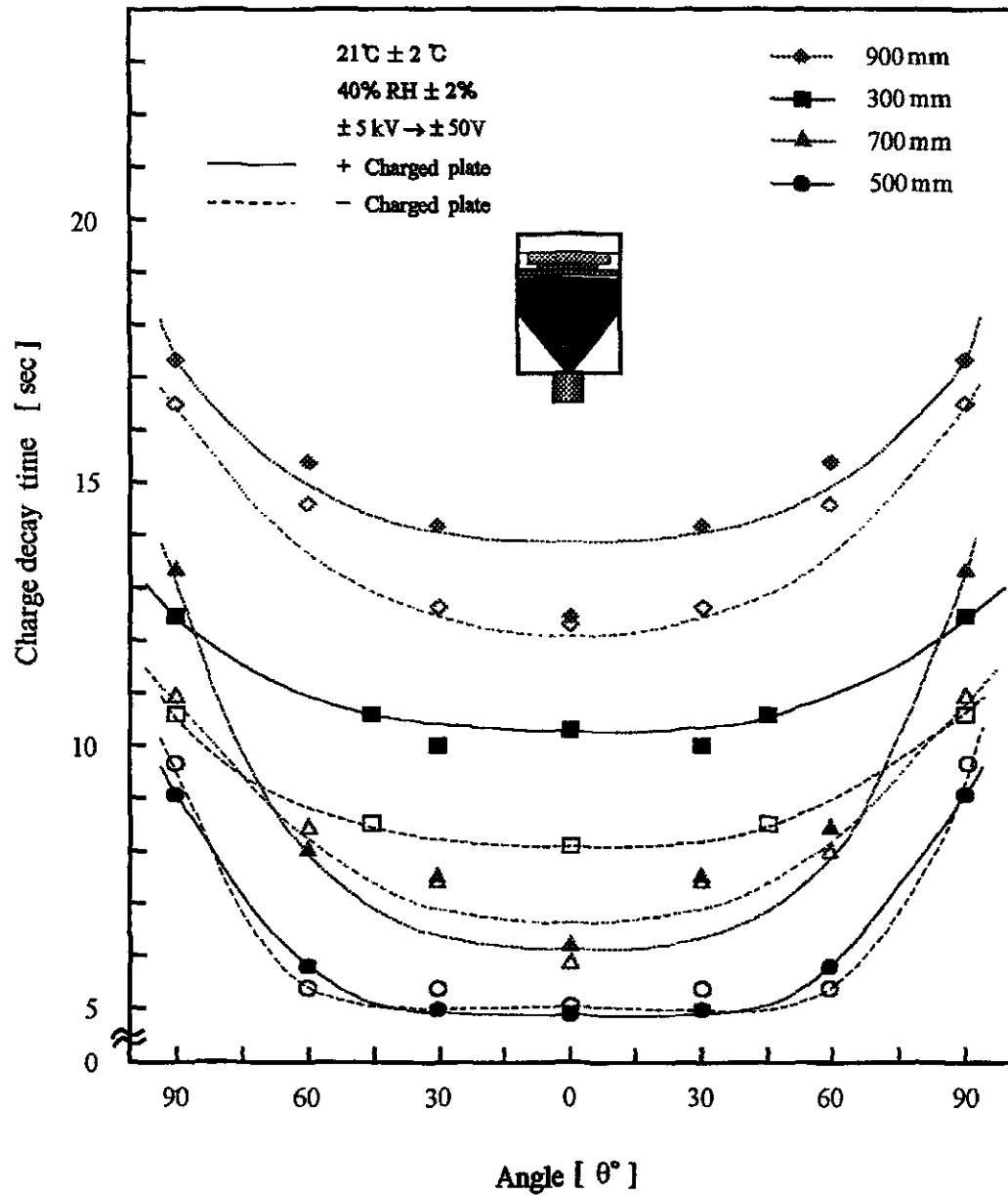


그림 8-7 수평 설치각도에 따른 대전완화특성

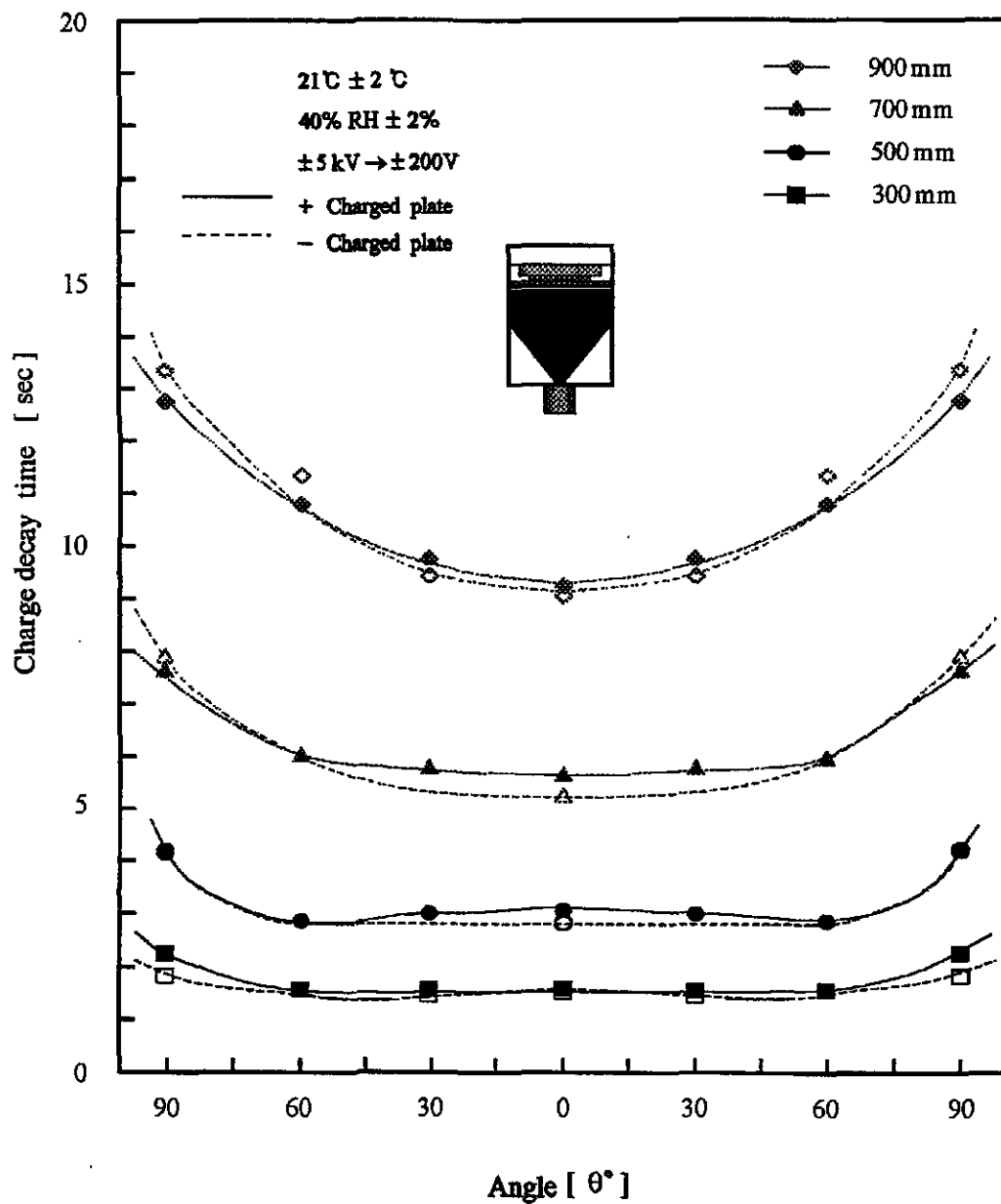


그림 8-8 수직 설치각도에 따른 대전완화특성

8-2-4 도전성 차폐막 설치에 따른 대전완화특성

앞에서 실험한 제전기의 성능을 최대한 높이기 위하여 피제전지역 주위를 최소한의 면적으로 도전성 비닐로 된 차폐막으로 차폐하였을 때 대전완화특성 시간에 미치는 영향을 검토하였다. 그림 8-9는 제전기의 설치거리

(d)를 500 mm, 1000 mm 및 1500 mm로 하고 수직 및 수평설치각도를 각각 0°로 고정하여 피제전지역을 차폐막으로 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때의 대전완화 시간특성을 나타낸 것이다. 그림 8-9에서 알 수 있듯이 차폐막을 설치하였을 때의 대전완화 시간은 차폐막을 설치하지 않았을 때의 대전완화시간에 비해서 약 10%~20%이상 빠름을 알 수 있다. 이는 차폐막을 설치함으로써 연X선 제전기에서 생성된 이온중에서 대전물체의 제전에 유효한 이온 이외에도 다른 무한한 공간으로 날아가버릴 수 있는 비유효한 이온의 차폐를 할 수 있을 뿐만 아니라, 주위의 다른 대전물체로부터 정전유도에 의한 차폐효과가 부가되었기 때문으로 생각된다. 따라서 분체취급 및 제조공정 중에서 특히 정전기 대책이 필요한 국부지역에는 차폐막을 설치하는 것이 바람직하다고 사료된다.

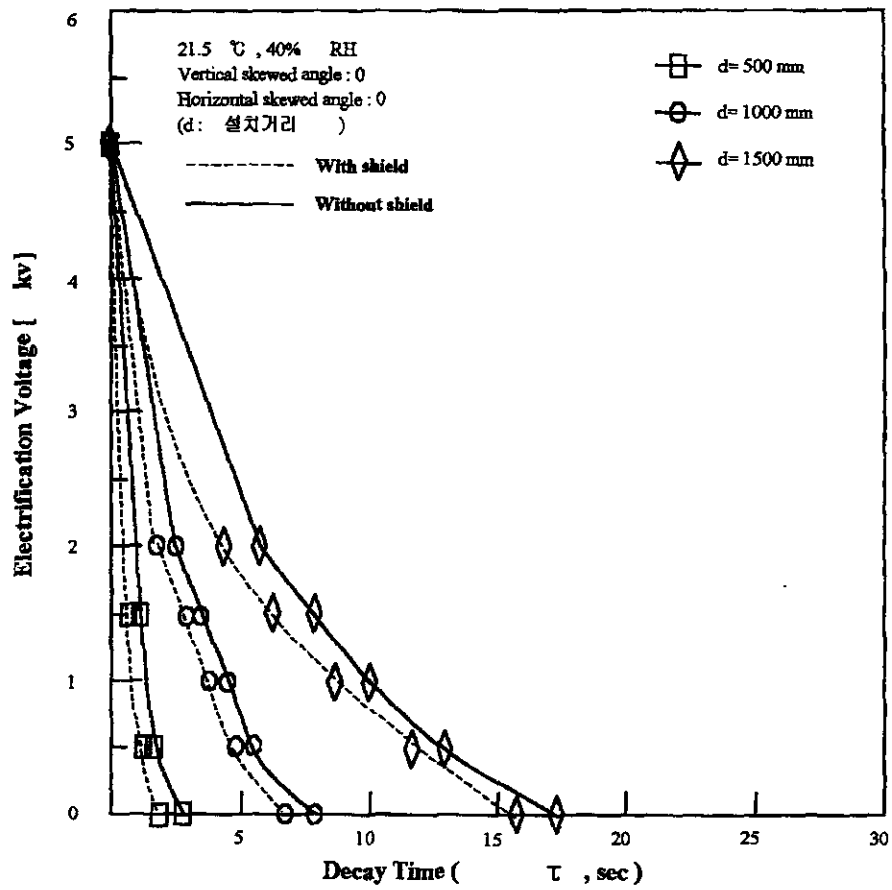


그림 8-9 차폐 효과

8-2-5 연X선 제전기의 이온 전류 특성

그림 8-10은 연X선 제전기로 부터의 이격거리를 50 ~ 1500 mm 까지 변화시킬 때 단위시간당 이온발생율을 나타낸 것이다. 그림 8-10에서 알 수

있듯이 500 mm 이하에서는 이온발생율이 급격히 저하함을 알 수 있다. 이는 생성된 $\oplus, \ominus$ 이온의 재결합에 의한 이온흡수가 X선원의 가까이에서 증가하기 때문이다. 500 mm 이상으로 되면 거의 직선적으로 감소한다. 따라서 공기중 연X선의 흡수계수는 500 mm 이상에서 얻어질 수 있다.

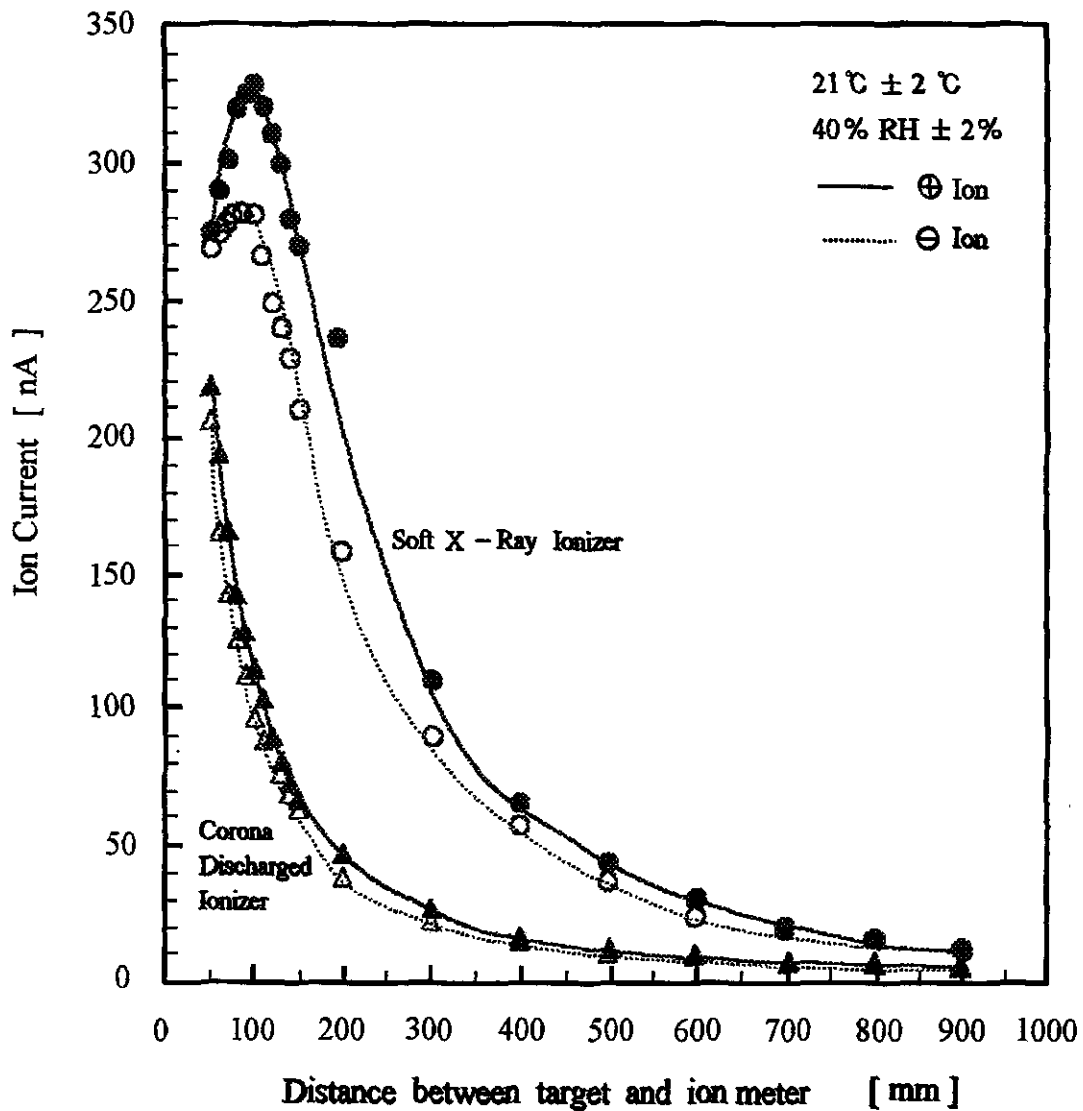


그림 8-10 타겟과 이온전류측정기 사이의 거리에 따른 전류 특성

이격거리 x cm 거리에서 이온발생율 $Qx(\text{ions cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$ 는 그림 8-10로부터 다음 식(8-1)로 주어진다. 여기에서 k 는 흡수계수 (cm^{-1})를 나타낸다.

$$Q_{x_2} = Q_{x_1} \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2 e^{-k(x_2 - x_1)} \quad [\text{ions cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8-1)$$

그림 8-9에 나타난 두 값을 식(8-1)식에 대입하면 흡수계수 $k = 0.037 \text{ cm}^{-1}$ (공기중, 760 Torr), 최대 파장 범위는 $2.5 \sim 2.75 \text{ \AA}$ 이 된다. 이로 미루어 볼 때 더 짧은 파장을 갖는 연 X선은 대전물체의 제전에 기여하지 못할 것으로 사료된다. 이는 흡수계수 k 가 파장이 짧아짐에 따라 급속도로 감소하기 때문이다. 코로나 방전식 제전기에서 발생된 이온중에는 오존(O_3)이 다소 포함되어 있다. 오존가스는 대전물체 표면층의 산화, 플라스틱 재료의 오염 등 나쁜 영향을 끼친다. 그러나 연 X선 제전기의 경우에는 이온이 생성되는 동안 오존(O_3)가스는 전혀 생성되지 않는다. 그림 5-2에서 보듯이 30분 동안 계속해서 연 X선을 방사하는 동안 오존가스농도측정기로 오존농도를 측정한 결과 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 이는 오존 생성에 필요한 에너지를 가진 광자가 생성되지 않았기 때문이다. 그러나 코로나 방전식 제전기로 같은 조건에서 실험을 하였을 경우에 오존가스농도가 수 ppm 이상으로 증가함이 밝혀졌다. 일반적으로 오존은 진공 자외선 또는 코로나 방전시에 생성되는 $6 \sim 10 \text{ eV}$ 에너지를 가진 전자에 의해 산소기로부터 생성된다. 이에 비해 연 X선 방사시에 광자에너지는 수백에서 수천 eV로 매우 높다. 따라서 모든 산소분자는 광자를 흡수할 때 이온화되며 이때 약간의 중성산소기도 발생된다. 이것이 연 X선에 의해서는 오존이 발생하지 않는 이유이다.

8-2-6 코로나 방전식 제전기와 연X선 제전기의 발진특성

거의 완벽하게 세정된 코로나 방전식 제전기와 연X선 제전기를 클린룸(CLASS 100)내에서 발진특성을 조사한 결과를 다음 표 8-1에 나타내었다. 온도는 21.5℃이고 습도는 40%RH, 코로나 방전식 제전기의 풍속은 4m/sec이며 제전기에 가하는 충격에너지는 0.49kg · m/sec²이다.

표 8-1 제전기로부터 발생된 발진량
< 코로나 방전식 제전기의 경우 >

분진의 종류 동작조건	분진농도(개/cft)							
	0.2 μ m	0.3 μ m	0.5 μ m	0.7 μ m	1.0 μ m	2.0 μ m	3.0 μ m	5.0 μ m
스위치 켤 때	88	95	63	47	33	14	10	5
스위치 끌 때	2	1	1	1	1	0	0	0
작동중	0	0	0	0	0	0	0	0
충격을 주었을 때	455	388	249	119	144	56	16	8

< 연X선 제전기의 경우 >

분진의 종류 동작조건	분진농도(개/cft)							
	0.2 μ m	0.3 μ m	0.5 μ m	0.7 μ m	1.0 μ m	2.0 μ m	3.0 μ m	5.0 μ m
스위치 켤 때	0	0	0	0	0	0	0	0
스위치 끌 때	0	0	0	0	0	0	0	0
작동중	0	0	0	0	0	0	0	0
충격을 주었을 때	0	0	0	0	0	0	0	0

표 8-1에서 보듯이 코로나 방전식 제전기는 스위치를 켤 때 다량의 분진이 발생하였으나 작동중 일 때와 스위치를 끌 때는 거의 분진이 발생하지 않았다. 그러나 작동중 일 때 코로나 방전식 제전기에 충격을 주었을 때는

스위치를 켤 때보다도 더 많은 분진이 발생하였다. 그림 8-11은 코로나 방전식 제전기의 침전극 주위의 분진형성 모습을 나타내고 있다.



그림 8-11 코로나 방전식 제전기의 침전극 주위의 분진형성 상태

8-2-7 안전성 검토

방사선의 피폭한도는 국제전기방사선 방호위원회(IEC Pub. 26, 1997)의 권고에 따라서 표 8-2와 같이 결정되어 있다. 일반적으로는 간단히 다음과 같은 한계를 규정하고 있다.

- 1) 직업상 피폭된 성인 : 50mSv/년(확률적 영향, 전신균등조사의 경우)
- 2) 일반인 : 1mSv/년

표 8-2 방사선량 규정

피폭구분 피폭기간	방사선 작업종사자	관리구역 및 방사선구역 수시 출입자
전신, 조혈기관, 생식선 및 눈의 수정체	30mSv(3rem)/3개월	15mSv(1.5rem)/년
뼈, 갑상선, 피부(몸통및 머리부의외 피부에 한함)	150mSv(15rem)/3개월 300mSv(30rem)/년	30mSv(3rem)/년
손, 발, 팔 및 다리관절	400mSv(40rem)/3개월 750mSv(75rem)/년	75mSv(7.5rem)/년
기타 단일장기	80mSv(8rem)/3개월 150mSv(15rem)/년	15mSv(1.5rem)/년
긴급시 작업	100mSv(10rem)/일	
사고시	250mSv(25rem)/일	

본 연구에서 개발된 연X선 제전기는 발생 연X선량은 191.2 mSv/hr 이므로 연X선을 적절한 차폐에 의해서 99.99% 저감할 수가 있다. 그림 8-11은 연X선 제전기로부터의 이격거리에 따라 연X선량을 측정한 것이다. 연X선량의 측정은 X선량 측정기(Victrireen, 470A)로 측정하였다.

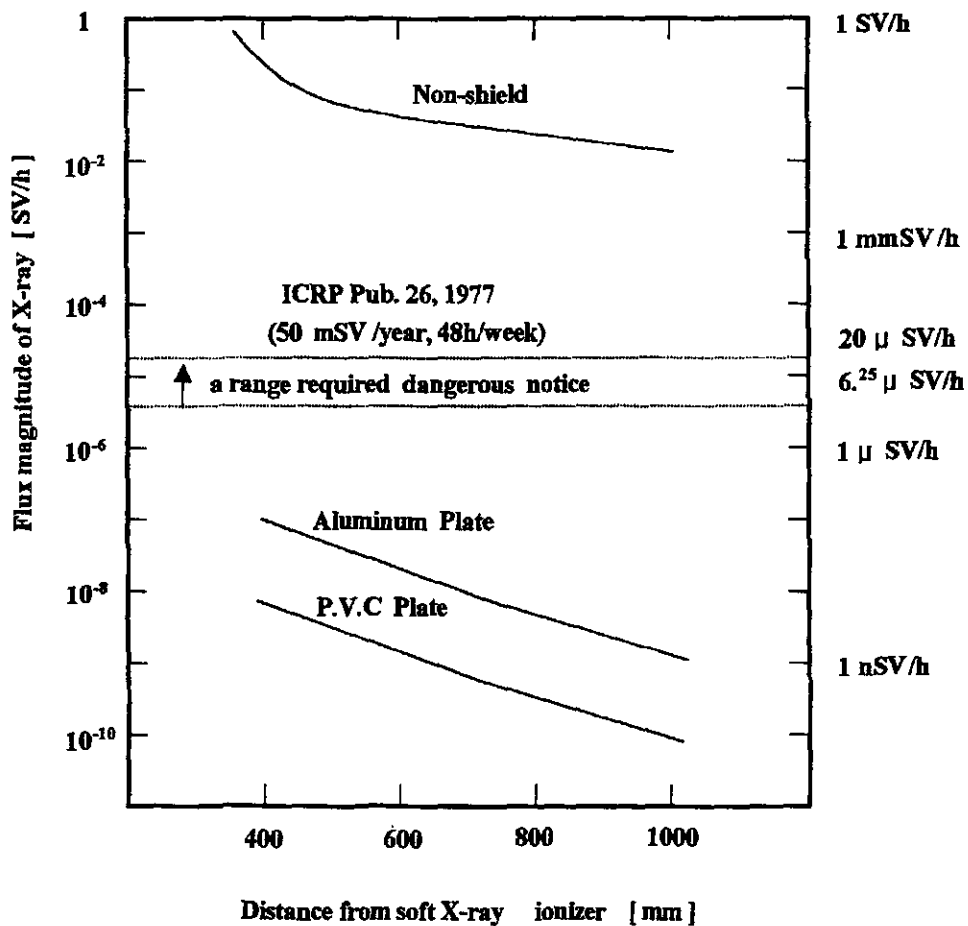


그림 8-12 연X선 제전기로부터 발생선량

그림 8-12에서 알 수 있듯이 두께 1mm인 알루미늄판 및 PVC에 의해서 완벽히 차폐할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 연 X선 제전기를 제조라인에서 설치할 때 연 X선이 곧바로 작업자에 피폭되지 않도록 할 필요가 있다. 가장 간단한 대응책은 차폐물질을 설치하는 것이다. 얇은 두께의 폴리염화비닐 또는 두께 1mm의 얇은 금속판으로도 충분히 연 X선으로부터 완벽하게 보호할 수 있다.

8-3 현장 적용 실험

그림 8-13은 연X선 조사에 의한 대전된 분체의 정전기 제거 특성을 모의 분체대전장치를 이용하여 측정하기 위한 장치이다. 장치의 주요구성은 분체대전장치, 싸이크론용 파이프, 대전된 분체의 정전압 측정을 위한 Faraday Cage, 정전전압계 및 백필터로서 구성되어져 있다. 대전된 분체는 연X선 제전기에 의해 생성된 이온운(공간이온층)으로 형성된 수송관로를 통과하고, 싸이크론 파이프를 통해서 Faraday Cage 내로 포집된다. 한편 Faraday Cage 내로 분체의 유입을 촉진하기 위하여 하부에는 진공펌프를 부착하였다. Faraday Cage에 포집된 분체의 정전전압은 정전용량형 정전전압계(Yokogawa, Japan)를 통하여 직독할 수 있도록 하였다.

그림 8-13은 분체대전장치의 외형구조를 나타낸 것이다. 즉 공기와 분체를 이젝터(Ejector) 방식으로 날려 보내도록 되어 있다. 분체의 대전장치는 방전침에 $\ominus$ 고전압을 인가하여 방전침의 끝부분에서 코로나 방전을 일으켜 공기중의 가스분자 또는 원자로부터 $\ominus$ 이온을 생성시켜, 이를 각각의 분체에 하전시켜서 대전된 분체를 만들도록 하였다. 대전된 분체의 정전전압은 방전침에 인가하는 고전압을 $-20\text{ kV} \sim -80\text{ kV}$ 까지 가변하여 조절하도록 하였다. 또한 대전된 분체의 이동속도를 조절하기 위하여 분체의 분사압력을 2 kg/cm^2 까지 변화시켰다.

본 실험은 분체의 환경변화에 따라 상당히 민감한 영향을 받기 때문에 항온항습실(온도 25°C RH $\pm 2\%$, 대기압 760 torr)에서 모든 실험을 하였으며, 재현성을 확인하기 위하여 평균 3회 측정을 실시하였다.

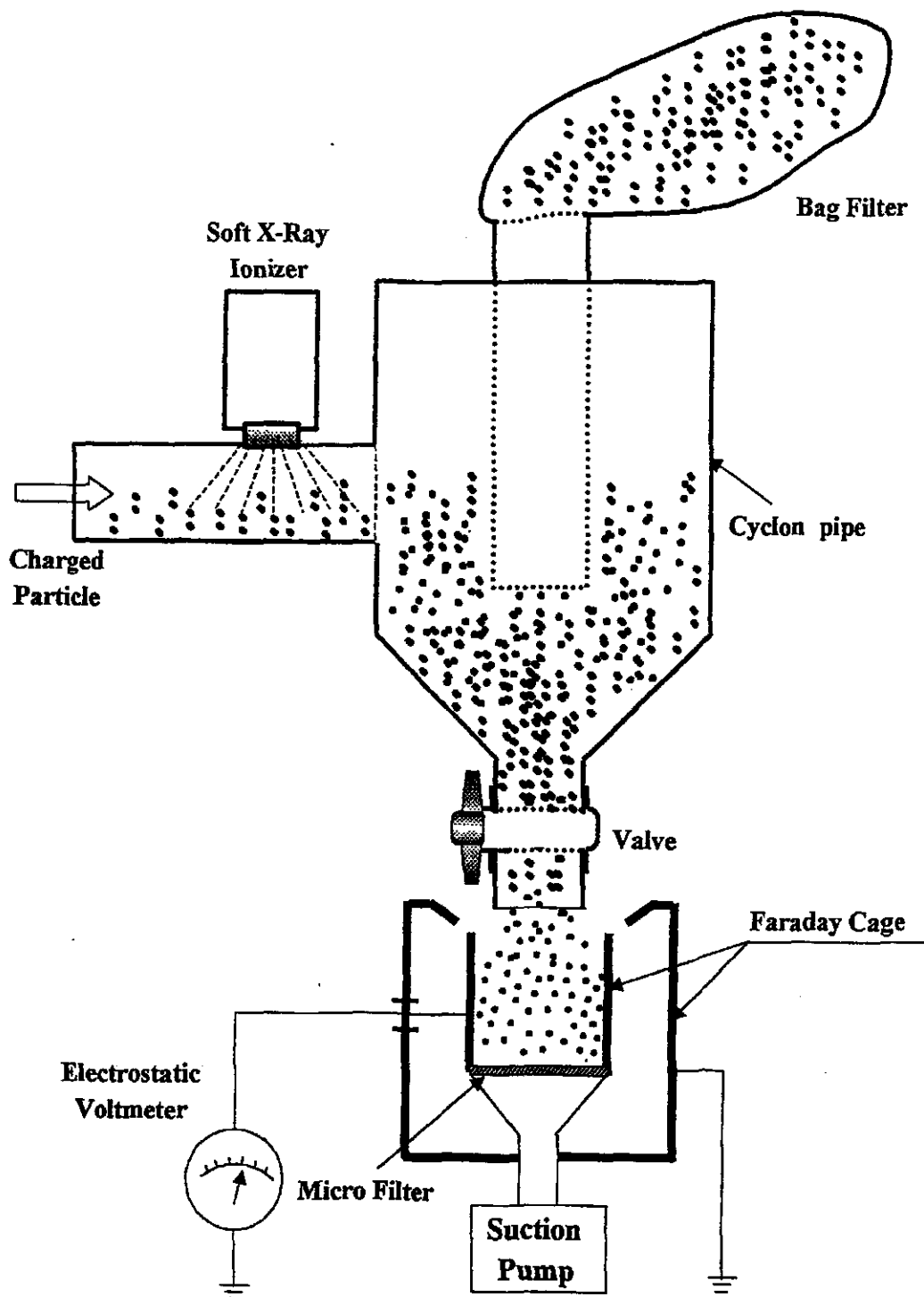


그림 8-13 실험실에서의 분체대전완화 실험 장치도

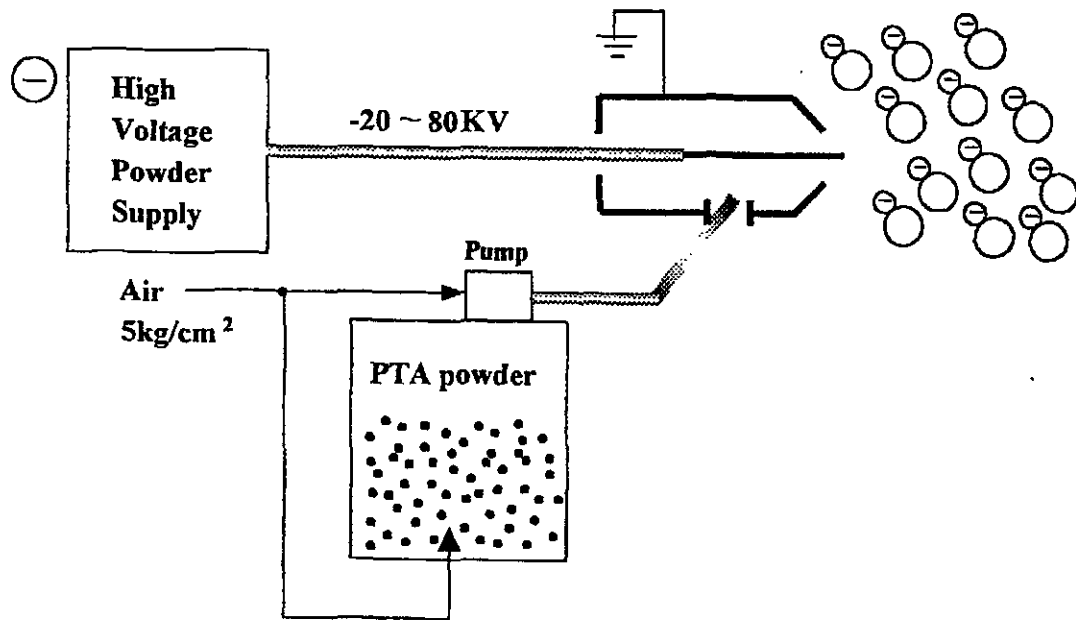


그림 8-14 분체대전장치의 외형 구조

그림 8-15는 PTA(Purified Terephthalic Acid 150 mesh) 분체를 사용하여 정전기 제거 능력을 측정한 실험결과를 보여준다. 그림 8-15에서 알 수 있듯이 제전을 하지 않은 상태에서 분체의 분사압력변화에 따라 PTA 분체를 하전시킨 경우 분사압력이 감소함에 따라 최대하전전압도 서서히 감소함을 알 수 있다. 즉, 6kg/cm²인 경우에는 최대정전전압이 18kV로 나타났고, 2kg/cm²인 경우에는 최대정전전압이 11kV로 나타났다. 한편 연X선 제전기로서 제전을 하는 경우에는 최대정전전압이 약 70% 정도 감소함을 알 수 있다. 즉, 6kg/cm²인 경우에는 약 6kV로 저하하였고, 2kg/cm²인 경우에는 약 3kV 정도로 저하하였다. 따라서 연X선 제전기로서 대전된 분체를 제전함으로서 거의 완화시간이내에 제전됨을 알 수 있다.

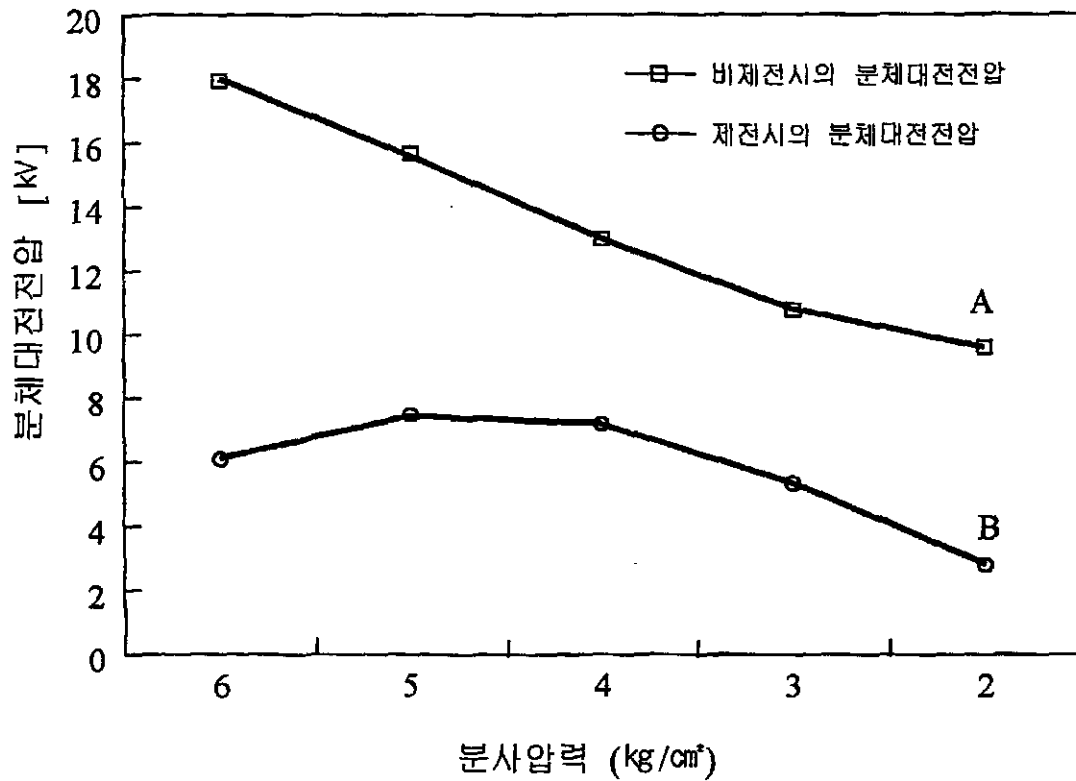


그림 8-15 분사압력변화에 따른 대전전압 특성

그림 8-16은 연X선 제전기의 대전된 분체의 정전기 제거 능력을 평가하기 위하여 울산소재 (주) 금호케미칼화학 및 (주) 삼성석유화학에서 실제 적용한 실험장치이다. 장치의 주요구성은 분체수송관로용 파이프, 대전된 분체의 정전전압을 측정하기 위한 Faraday Cage 및 정전전압계로 구성되어 있다.

사이로에 저장된 분체는 자동계량시스템을 통하여 자연낙하의 방식으로 이동되는 중 마찰·충돌에 의하여 PTA 분체는 최고 10 kV까지 대전된다. 이렇게 하여 대전된 분체는 자동포장공정으로 이동된다. 이때 자동포장공정 중에 작업자가 대전분체에 접촉하는 경우 인체전격을 느끼므로써 2차적 재해를 유발하게 된다. 이를 예방하기 위하여 본 연구에서 개발된 연X선 제

전기를 그림 8-16과 같이 설치하여 정전기를 제거할 수 있는 것이다.

표 8-3은 울산소재 금호케미칼(주) ABS Palatte Bagging시의 대전특성을 실험한 결과를 보여준다. 표에 나타난 바와 같이 제전을 하지 않은 상태에서 최대정전전압은 약 1200V~2400V로 나타났으며, 연X선 제전기로서 대전된 분체를 제전한 경우에는 약 500V정도로 최대정전전압의 70~80% 정도까지 저하하였다.

표 8-3 ABS Palatte의 대전 모의실험 결과

실험회수 \ 제전유무	비제전시 분체대전전압 [V]	제전시 분체대전전압 [V]
1	1200	500
2	1200	300
3	1200	500
4	1000	500
5	2400	1000
6	1200	500
7	1200	500
8	1500	800
9	1200	500
10	1000	500

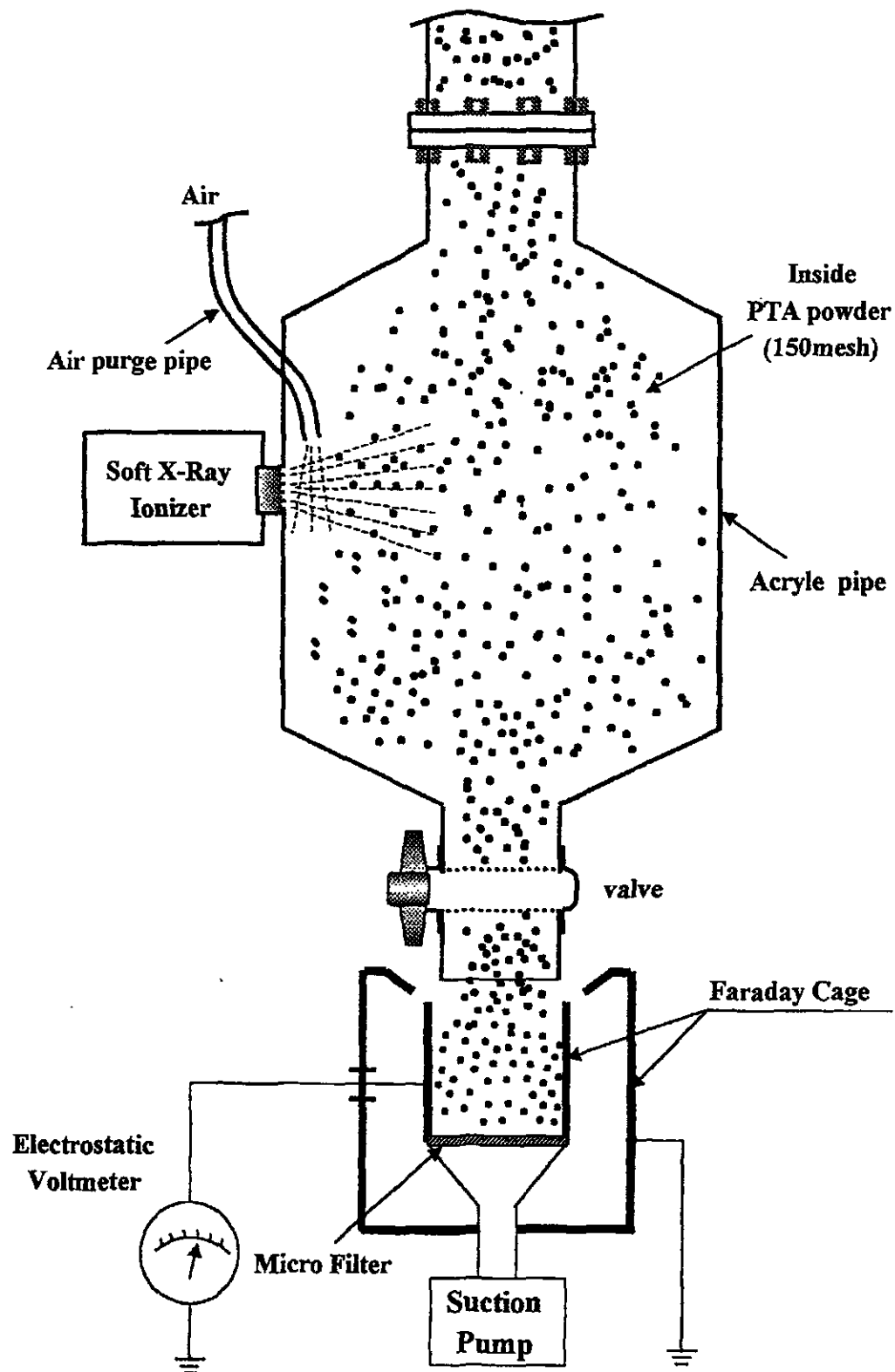


그림 8-16 분체대전완화 실험 장치도(삼성석유화학, 금호케미칼)

제 9 장 결 론

연X선 제전기가 공기 분위기 또는 대기압하에서의 산소가스 분위기에서 정전기 제거효과가 우수함을 알 수 있었고, 특히 기존 코로나 방전식 제전기와는 달리 발진이 전혀 없음을 알 수 있었다. 연X선 제전기는 비교적 짧은 시간내에 정전기 대전준위를 거의 수백볼트까지 감소시키는 능력이 있었다. 본 연구를 통해서 개발된 연X선 제전기를 이용하여 제전거리, 설치각도, 차폐막의 설치에 따른 대전완화시간특성 및 발진특성을 실험한 결과와 대전된 분체의 정전기제거능력을 실험하기 위하여 울산 소재 (주)삼성석유 및 (주)금호케미칼에 적용하여 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대전물체의 대전상태에 따라서 적절한 설치거리를 선택하여야 하는데 실험결과 제전기의 설치거리는 최소 $d = 750\text{ mm}$ 이내이어야 유효한 제 전능력을 얻을 수 있었다.
- 2) 제전기의 설치각도에 따라서 제전효율의 차이가 있기 때문에 적합한 설치각도는 $\pm 30^\circ$ 이내로 하여야 한다는 것이 바람직함을 알 수 있었다.
- 3) 제전지역을 도전성 비닐로써 차폐막을 설치한 경우에 설치하지 않는 경우에 비해 제전능력이 10 ~ 20% 정도 증가함을 알 수 있었다.
- 4) 본 연X선 제전기의 발생 이온전류는 0.1nA이상으로 나타났다. 이는 일본 노동성 산업안전연구소에서 규정하는 제전기의 발생이온전류(0.1nA 이상)의 규정에 적합함을 알 수 있었다.
- 5) 기존의 코로나 방전식 제전기의 전극부분에서 spattering 현상으로 인해 $0.1\mu\text{m}$ 이상의 금속 미립자가 발생하므로 분체 취급 공정에선 오히려

려 분체를 야기할 수 있으므로 절대적 부적합하다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 연X선 제전기는 미립자나 분진의 오염이 전혀 생기지 않은 것으로 이와 같은 공정에 적합하다고 볼 수 있다.

- 6) 또한 현장 적용 결과 대전된 분체의 정전기전압을 초기의 대전전압보다 약30% 까지 저하시킬수 있었음을 알수 있었다.

따라서 향후 분체취급공정에 실제적으로 적용할 수 있도록 하여야 할 것이다. 그 구체적 방안은 개발된 연X선 제전기가 신기술로 특허를 획득할 수 있도록 출원하도록 한다. 동시에 국내 정전기 관련 업체에 개발품의 우수성을 널리 알려 실용화와 제품화를 서둘러서 사업장에 널리 보급하는 방안이 모색되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] John E. B., "Emergency Management of Hazardous Material Incidents", NFPA, 1995
- [2] 중앙소방학교, "Hatman식 분진폭발 실험을 통한 분진의 위험성 분석", 소방기술, 1996
- [3] 安全工學會, 安全工學講座2 暴發, 海文堂. 日本, 1983
- [4] 中央災害防止協會編, 粉じん爆發の防止對策, pp. 22~28, 106~117, 1996
- [5] R.J Loveland, "Electrostatic Ignition Hazards in Industry, Journal of Electrostatics", Vol. 11, No. 1, p. 3, 1981
- [6] Y. TABATA, "全國工場事業場における靜電氣の實態調査", 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-70-3, p. 11, 1970
- [7] H. Haase, Electrostatic Hazards, Verlag Chemie, Weinheim, New York, 1977
- [8] H. Krupp, "Physical models of static electrification of solid", p.1, The Institute of Physics, London, 1971
- [9] 靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック, オーム社, p. 761, 1981
- [10] 田富泰辛他, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-88-1, 1988
- [11] 産業安全研究所編, 靜電氣安全指針, 勞動省部産業安全研究所, 1988
- [12] 高井誠, 靜電氣學會誌, 3, p. 122, 1981
- [13] 田富泰辛他, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-87-1, 1987
- [14] P. Boshung, M. Glor, "Methods for Investigating the Electrostatic Behaviour of Powders", Journal of Electrostatics, Vol. 8, No. 2, p. 205, 1980

- [28] J. W. Peterson, "___", J. Applied Physics, 25, p 907, 1954
- [29] 高橋, 加固, 小林, ,"___", 靜電氣學會誌, 4, p. 168, 1980
- [30] 竹內學, "粉体の帶電に ___ する因る", 靜電氣學會誌, 19, 1, pp. 2-7, 1995
- [31] 정판석, 곡물사일로 및 가공설비의 분진폭발예방대책, 한국산업안전공단안전보건연구원, 연구보고서, pp 70~77, Dec. 1990
- [32] M. Blitshteyn, et al, "Contamination and Erosion of clean room air ionizer emitters", Microcontamination, Vol. 3, No. 3, pp. 46~52, 1985
- [33] 정판석, "분진으로 인한 폭발화재 방지대책에 관한 연구, 한국산업안전공단안전보건연구원, 연구보고서 화학 92-1-20, 1992

대전된 분체의 정전기 제거를 위한 제전기의 개발 연구
(연구원 99-26-96)

발 행 일 : 1999. 4

발 행 인 : 원 장 정 호 근

연구책임자 : 책임연구원 이 형 수

발 행 처 : 한 국 산 업 안 전 공 단
산업안전보건연구원

주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34/6

전 화 : (032)5100-836

F A X : (032)518-0867

비매품