creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:48009-200000180143

공학석사학위논문

마찰계수와 정전기 대전특성의 상관관계 연구

A Study on the Correlation between Friction Factor and Electrostatic Charge Characteristics

울산대학교 대학원
안전보건전문학과
오길환

마찰계수와 정전기 대전특성의 상관관계 연구

지도교수 김종면

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2018년 12월

울산대학교 대학원
안전보건전문학과
오길환

오길환의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원	김	종	면	인
심사위원	김	두	석	인
심사위원	임	기	창	인

울 산 대 학 교 대 학 원

2018년 12월

요약문

1. 연구제목

마찰계수와 정전기 대전특성의 상관관계 연구

2. 연구배경

산업현장에서 화학물질의 사용과 취급에 따른 정전기 대전 및 방전현상이 점화원으로 작용하여 화재·폭발사고가 발생하여 소중한 인명과 재산의 손실을 입고 있다. 특히, 산업현장에서 인체대전에 의한 방전으로 정전기 화재·폭발이 발생하여 인명과 재산상의 손실이 발생하는 데 그중에서 작업자가 걸어다니면서 바닥과 신발사이에 발생하는 인체대전에 대한 정전기 대전특성을 연구하여 인체대전에 의한 정전기 방전대책을 제시고자 한다.

3. 연구목적

본 연구에서는 작업자가 작업현장에서 신고 있는 신발과 바닥의 마찰에 따른 마찰 정전기 에너지를 실제 실험을 통하여 측정하고 인체대전으로 인한 방전으로 화재폭발을 일으킬 수 있는 요인으로 작용하는지에 대한 고찰과 그 추이를 알아보고자 한다.

4. 연구내용

가. 신발 미끄러짐 측정 장치

나. 정전기 전압측정기(KSD-0108)

5. 연구결과

가. 신발과 바닥 마찰횟수에 따른 정전기 대전전압

❍ 바닥재질이 장판일 때 최고의 대전전압 발생

- 각 7개의 재질별로 두 차례에 걸쳐 대전전압을 측정한 결과 바닥재질이 장판인 1차 측정시(온도 :16. 2도, 습도 : 47.7%) 가장 많은 전압이 대전되었음. 특히, 장판-운동화일 때 착지횟수 5회일 때가 가장 높은 44.9[kv]의 대전전압이 측정되었음.

나. 환경조건과의 상관관계

❍ 습도에 따른 정전기 대전전압 변화

- 1차 측정인 습도가 47.7%일 때는 정전기 대전전압의 총합이 496[kv] 였으며, 습도가 67.3% 인 2차 측정시에는 94[kv]가 측정되어 대전전압이 81.8%가 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 습도는 정전기 대전에 상당한 영향을 미친다는 것이 증명되고 있다.

다. 보호구 대전전압 측정결과 분석

❍ 안전화와 정전기 대전화의 정전기 대전전압 비교

- 1차 측정결과에 따른 안전화와 정전기 대전화의 대전전압은 각각 35.9[kv], 43.2[kv]가 측정되어 오히려 정전기 대전화의 대전전압이 안전화에 비해 16.9% 높게 측정되었으며, 2차 측정시에도 역시 정전기 대전화가 8.6% 높게 나왔다.

6. 기대효과

가. 마찰계수와 인체대전 상관관계 정립

나. 인체대전방지대책 제시

7. 중심어

정전기 대전, 마찰계수, 마찰 정전기, 인체대전, 정전기 전압, 대전방지용 안전화, 작업복

연락처: 울산대학교 대학원 안전보건전문학과 오길환

TEL : 052-703-****

E-mail : oh2288@kosha.or.kr

SUMMARY

1. Research Title

A Study on the Correlation between the Friction Coefficient and the Electrostatic Charge Characteristics

2. Research Background

In the industrial field, static electricity and discharge due to the use and handling of chemicals act as ignition sources, resulting in fire and explosion accidents, resulting in losses of valuable lives and property.

In particular, electric power fire and explosion caused by discharge by human war in industrial field cause loss of life and property. Among them, the worker walks and studies the electrostatic charge characteristics of the Inje war between the floor and the actual fire, and suggests electrostatic discharge measures by human charge.

3. Research Purpose

In this study, we will examine whether frictional static energy caused by friction between shoes and floor worn by the worker at the work site is measured through actual experiments and act as a factor that can cause fire explosion due to discharge due to human charge.

4. Research contents

A. Shoes slip measurement device

B. Electrostatic voltage measuring device (KSD-0108)

5. Research result

A. Electrostatic Concharge Voltage by the number of Shoes and Floor Frictions

❍ The highest charge voltage generation when flooring material is a sheet

- The first measurement (temperature: 16.2 degrees, humidity: 47.7 percent) was the most charged voltage when the floor material was the floor plate as a result of measuring the charge voltage twice for each of the seven materials. In particular, the charge voltage of 44.9 [kv], which is the highest when the number of landings is 5 times when it is a long plate - sneaker, was measured.

B. Correlation between Temperature and Humidity and Environmental Conditions

❍ Changes of electrostatic voltage by humidity

- When the first measure, humidity, was 47.7%, the total total of the electrostatic voltage was 496 [kv], and 94 [kv] was measured in the second measure with 67.3% humidity, indicating that the total voltage of the anti-tank was reduced by 81.8%. Therefore, humidity has been proven to have a significant impact on electrostatic warfare.

C. Analysis of the Measurement Results of Electrostatic Voltage

❍ Comparison of electrostatic conducting voltage in Safety and electrostatic congestion

- The safety of the primary measurement and the charge voltage of the electrostatic charge were measured by 35.9 [kv] and 43.2 [kv], respectively, and the electrostatic charge of electrostatic charge was measured by 16.9% higher than that of safety.

6. Expected Effect

A. Correlation between Friction Factor and Human Body charge

B. Proposals for Preventing Electrostatic Congestion in Human Body

7. Central Language

Electrostatic charge, Friction Coefficient, Friction Static Electricity, Human body charging, Safety shoes for anti-controversial purposes, Work clothes

A contact address : University of ulsan general graduate school safety and health specialist Oh gil-hwan

TEL : 052-703****

E-mail: oh2288@kosha.or.kr

차례

Ⅰ. 서론 ····· 1
1. 연구배경 ····· 1
2. 연구목적 ····· 2
3. 연구내용 ····· 3
4. 연구방법 ····· 3
5. 기대효과 ····· 3

Ⅱ. 정전기 재해통계 및 특징 ····· 5
1. 재해통계 분석 및 특성 ····· 5
2. 정전기 재해분석 ····· 11
3. 주요 발생형태 및 특징 ····· 16

Ⅲ. 정전기 발생이론 및 대책 ····· 18
1. 정전기의 발생원리 ····· 18
2. 정전기 발생 메카니즘 ····· 19
3. 정전기 대전 ····· 22
4. 정전기 발생에 영향을 주는 요인 ····· 23
5. 정전기로 인한 장·재해 ····· 24
6. 정전기 재해 예방대책 ····· 27

Ⅳ. 마찰 정전기 측정 ····· 39
1. 정전기 측정장치 ····· 39
2. 정전기 전압측정기 ····· 42
3. 마찰 정전기 측정방법 ····· 42
4. 마찰 정전기 측정결과 ····· 44

Ⅴ. 결론 ····· 58

참고문헌 ····· 61

Ⅰ. 서론

1. 연구배경

산업의 발달로 인하여 산업현장과 생활주변에 인화성 및 폭발성 물질의 취급이 급격히 증가하는 추세이며, 규모도 대형화 복잡·다양화 되어 대형 화재·폭발의 위험이 항상 상존하고 있는 실정이다.
특히 석유화학공장은 1960년대부터 국내에 설립되어, 1970년대 정부의 중화학공업 육성정책으로 규모가 대형화되기 시작하였으며, 2000년대 들어와서는 전세계적으로 선진국 뿐만 아니라 개발도상국들의 급격한 수요증가로 인하여 설비의 증설이 지속적으로 이루어지고 있다. 또한 전자업종에서도 반도체 및 디스플레이 산업의 발달로 인화성 및 폭발성 화학물질의 사용이 점점 증가하고 있다.

제조업체에서 사용되고 있는 인화성 및 폭발성 물질이 어떤 이유로 점화되어 화재·폭발이 발생할 경우 그 피해는 생산설비, 기계설비 파손 등의 경제적 손실은 물론이고 인명피해도 수반되어 사회적 문제로 대두되고 있다.
따라서 경제발전과 아울러 안전한 사회를 만들기 위해서는 정전기 등에 의한 화재·폭발사고 예방은 산업현장에서 지켜야 할 가장 기본적인 조건이라 할 수 있다.

화재·폭발을 예방하기 위해서는 인화성 가스, 산소(공기), 및 점화원 즉, 화재·폭발 3용소 중 한가지만 제거하더라도 화재·폭발 사고를 예방할 수 있다. 일반적으로 공정 특성상 인화성 가스와 산소는 항시 사용되기 때문에 제어할 수 있는 요소인 점화원을 관리하여 화재·폭발을 예방하는 것이 가장 용이한 방법이다.

이러한 화학물질의 사용과 취급에 따른 정전기 대전 및 방전현상이 점화원으로 작용하여 산업현장이나 생활환경에서 화재·폭발사고가 발생하여 소중한 인명과 재산의 손실을 입고 있다.

정전기가 점화원으로 작용하여 일어날 수 있는 재해는
(1) 화재·폭발
(2) 전격
(3) 생산 장해 등이 있다.

특히, 산업현장에서 인체대전에 의한 방전으로 정전기 화재·폭발이 발생하여 인명과 재산상의 손실이 발생하는 데 그중에서 작업자가 걸어다니면서 바닥과 실발사이에 발생하는 인제대전에 대한 정전기 대전특성을 연구하여 인체대전에 의한 정전기 방전대책을 제시고자 한다.

2. 연구목적

두 물체를 마찰시키면 그 물체들은 전기를 띠게 되는데 이 전기를 마찰전기라 한다. 각각의 물체에는 양전기와 음전기의 두 종류로 대전(帶電)된다. 이와 같이 어떤 물체가 양전기와 음전기만을 띠는 대전체로부터 외부에 나타나는 전기적인 현상을 정전기(靜電氣, static electricity, electrostatic)라 한다.

정전기는 우리의 생활주변에서 뿐만 아니라 생산현장에서도 빈번히 발생되는데 발생여부와 과정이 확실하게 파악되지 않고 있으며, 이의 방지를 위한 근본적인 대책도 어렵다.

정전기 현상은 산업분야에서는 전기설비의 오동작으로 인한 작업손실과 정전기 방전불꽃에 의한 화재·폭발, 방전에 의한 전격재해 등의 사고에 대한 위험요소로 되고있다.

(1) 화재·폭발

정전기에 의한 화재·폭발은 정전기 방전이 가연성 물질과 공기 등 혼합물의 점화원으로되어 연소를 개시하여, 화염이 전달됨으로써 일어나는 사고·재해이다.

일반적으로 정전기에 의한 화재·폭발은 최소점화에너지가 작은 가연성 가스·증기의 점화원으로 되어 발생하는 경우가 많지만, 불꽃방전, 연면방전 또는 뇌상방전이 일어나면, 최소점화에너지가 큰 가연성 분체도 점화시킬 수 있다.

(2) 전격

정전기에 의한 전격은 대전된 인체에서 접지도체 또는 대전물체로부터 인체로 정전기 방전이 일어날 때의 방전전류에 기인하여 발생한다.

정전기에 의한 전격이 직접원인으로 되어 사망에 이르는 경우는 없지만, 근육의 급격한 수축에 의한 어깨 탈구 등 신체적인 손상을 초래할 위험이 있고, 또한 전격을 받아 쇼크로 신체의 균형을 잃어 높은 곳에서 추락, 전도, 기계로의 접촉 등 2차 재해를 일으킬 위험이 있다. 더욱이 전격에 의한 불쾌감·공포감 등으로 작업능률의 저하를 초래하는 경우도 있다.

(3) 생산 장해

정전기에 의한 생산 장해는 정전기의 역학현상·방전현상에 의해 발생하는 품질저하· 생산성 저하 등 생산 상의 장해이고, 재해로는 직접 연결되지 않지만 생산현장에서 커다란 문제로 된다.

역학현상에 의해 발생하는 생산 장해에는 가루로 인한 망의 막힘, 실의 엉킴, 인쇄불량, 제품 오염 등의 예가 있다.

본 연구에서는 작업자가 작업현장에서 신고 있는 신발과 바닥의 마찰에 따른 마찰 정전기 에너지를 실제 실험을 통하여 측정하고 인체대전으로 인한 방전으로 화재폭발을 일으킬 수 있는 요인으로 작용하는지에 대한 고찰과 그 추이를 알아보고자 한다.

3. 연구내용

가. 선행연구

❍ 논문검색 www.riss.kr : "정전기 마찰계수"

- 학위논문 2편 : 주로 정전기 작업복 관점
- 국내학술지 논문 2편 : 작업복과 미세먼지입자 거동분석 논문

나. 정전기 재해분석

다. 정전기 측정장치

라. 정전기 전압측정기

마. 마찰정전기 대전전압 측정 결과

4. 연구방법

가. 정전기 대전전압 측정 방법

1) 신발 종류별 측정
   - 안전화, 운동화, 고무장화, 정전기대전방지화 등

2) 마찰 바닥 재질 : 고무, 양모 등의 바닥으로 간 신발별 마찰로 인한 전전기 대전전압 측정

3) 측정방법
   - 신발의 중량
   - 신발의 바닥 착지속도
   - 신발의 바닥 착지각도
   - 보행중 미끄럼 계수(신발과 바닥의 종류, 재질 및 체중)에 따른 정전기 전압 측정
   - 실내 온·습도에 따른 정전기 대전전압 변화 측정

5. 기대효과

가. 정전기 대전에 대한 새로운 분야의 연구

정전기 연구는 그동안 물질과 물질간의 마찰, 박리, 유동, 분출대전 등에 의한 점화로 인한 화재·폭발에 대한 연구가 이뤄져 왔는데 이번에 인체의 동작에 의한 대전현상을 연구함으로써 정전기 연구분야의 다양화와 새로운 실험결과를 얻어 정전기 재해예방에 기여할 수 있음.

나. 연구결과 예상

1) 정전기 대전전압과 습도는 반비례할 것으로 보이며, 습도의 변화에 따른 정전기 대전전압 감소율을 나타낼 수 있을 것이다.

2) 그리고 작업자가 착용하는 정전기 대전방지화는 바닥이 도전성 처리되지 않은 상태에서는 대전전압이 다른 신발과 어떤 차이를 보이는지도 알아볼 수 있을 것이다.

3) 인체의 정전기대전 방지를 위한 규정 신설 검토

❍ 정전기 대전방지화는 산업안전보건법 제34조(안전인증)의 대상품이지만 정전기 대전방지복 성능기준은 법적기반이 없는 KOSHA GUIDE에 있고 인체 접지용 팔목접지기구는

기준자체가 없는 상태여서 그 성능을 신뢰할 수 없는 상태에서 사용되고 있는 실정이다.

❍ 따라서 산업현장에서 작업자 인체 대전에 의한 정전기 화재·폭발 예방을 위해서는 정전기 대전방지복과 인체접지용 접지기구 등의 보호구는 산업안전보건법 시행령 제28조(안전인증대상 기계·기구 등)에 의한 안전인증 대상품에 포함되어야 할 필요성이 있다고 볼 수 있다.

Ⅱ. 정전기 재해통계 및 특징

1. 재해통계 분석 및 특성

가. 사고 사례[1)]

산업설비, 인체에서 대전된 정전기 방전에너지에 의한 가연성 가스·증기·분체로의 화재·폭발 사고가 우리나라의 경우는 해마다 20 여건(일본은 70 여건)이 발생되고 있다.
정전기 방전 점화원의 화재·폭발사고는 피해규모가 크기도 하며, 정전기의 대전 및 방전 현상의 재현이 거의 불가능하다는 점이다. 정전기 사고는 원인규명보다는 화재·폭발 재해가 일어나지 않도록 전기설비와 인체의 정전기를 안전수준으로 유지하도록 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.
다음은 국내의 화재・폭발과 관련하여 중대재해/중대산업사고의 원인이 정전기로 규명되거나 추정되는 재해보고서를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
1. 2017년 1월 25일 14시 경 인천 소재 OO(주)	코팅작업 전 먼지 제거를 위해 제품표면을 닦는 작업 중 화재	1명 부상	알코올	-정전기 -마찰 스파크(휴대폰 케이스)
2. 2017년 02월 08일 07시 경 충남 천안시 소재 OO건설(주)	이동식 발전기에 휘발유를 채워 넣는 중 화재	1명 부상	휘발유	-정전기
3. 2016년 11월 18일 14시 경충북 청주시 소재 OO제약(주)	장비실에서 용매(톨루엔) 이송 작업 중 폭발로 화재 발생	1명 부상	톨루엔	-정전기
4. 2016년 06월 30일 12시 경 경기 김포시 소재 OO화학	작업도중 용제를 받다가 옷에 튄 상태에서 화재	1명 부상	신나	-정전기
5. 2016년 06월 02일 09시 50분 경 인천 소재 OO산업(주)	사업장에서 폐차 전 자동차의 연료통 분해작업을 위해 연료통에서 휘발류를 기름통에 이동 중 화재	1명 부상	휘발류	-정전기
6. 2015년 12월 31일 15시 경 경남 밀양시 소재 OO(주)	작업장 외부에서 페인트 도색 용기 세척작업 중 화재	1명 부상	신나	-정전기 -마찰 스파크
7. 2015년 5월 10일 23시 18분 경 충남 서산시 OO(주)	설비 레벨 게이지가 상승하여 powder 배출 여부를 확인하려던 중 가스가 외부로 배출되면서 화재	1명 부상	프로판 가스	-정전기
8. 2015년 03월 09일 16시 30분 경 경기도 포천시 OO(주)	마이다 세척작업 중 화재	1명 부상	신나	-정전기 -마찰 스파크

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
9. 2015년 01월 17일 19시 경 충북 소재 OO(주)	배합기에 원료 투입 도중 폭발·파열	1명 부상	아세톤(함유량 0.33 %)	-정전기
10. 2014년 12월 09일 12시 경 대전 소재 OO인재사	CNC조각기 작업후 분진 청소 중 화재	1명 부상	분진(마그네슘 가루)	-정전기
11. 2014년 8월 3일 14시 30분경 경기도 OO	기름 주유중인 보트에서 화재 발생	1명 부상	휘발류	-정전기 -열원
12. 2014년 7월 15일 10시 경 경북 대구시 OO주유소	사업장 정기 탱크청소 및 배관검사 위해 유류탱크 내 가연성 가스 제거 작업중 폭발·파열	1명 부상	가연성 가스	-정전기 -열원
13. 2014년 01월 09일 16시 경 경기도 양주시 소재 OO주유소	주유기 신설 공사 중 유증기가 발생하였고 주유 중 화재 발생	2명 부상	휘발류	-정전기 -열원
14. 2013년 05월 09일 12시 경 경기도 포천시 소재 OO(주)	텐타작업 중 집진기로 통해 배출되지 못한 일부가스에 의해 화재	2명 부상	가스	-기계적 스파크 -정전기
15. 2013년 05월 09일 15시 경 경기 화성시 소재 OO산업(주)	폐기물 운반 차량에서 저장 탱크로 이송 중 폭발·파열	1명 부상	폐유	-정전기 -열원
16. 2013년 01월 29일 09시 경 충북 소재 OO	슬리터 설비를 이용한 필름 분리작업 중 화재	1명 부상	아세톤	-정전기
17. 2013년 01월 20일 19시 경 경북 대구시 소재 OO(주)	작업현장에서 바닥에 누출되어 있는 가스에 불이 점화되어 화재	1명 부상	LPG가스	-정전기 -열원
18. 2013년 1월 11일 11시 15분 경 전북 소재 OO상사	원심분리기로 제품 여과 중 폭발(1차), 원심분리기 뚜껑에 충격(2차)	1명 사망	감광제원료(MIPHOTO TPPA) 톨루엔 -폭발범위(%) : 1.2 ~ 7.1 -인화점(℃) : 4 -발화점(℃) : 480	-기계적 스파크 -정전기

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
19. 2012년 06월 23일 10시경 경북 영천시 소재 OO저유소	휘발유탱크 개방검사를 위해 탱크 잔유를 이동용 간이 펌프를 이용하여 회유하는 과정 중 폭발파열	3명 부상	무연 휘발유 -폭발범위(%) : 1.2 ~ 7.6 -인화점(℃) : -43 -발화점(℃) : 280~456 - 증기압 [kg/cm^2(37.8℃)] : 0.45~0.85	-전기스파크(구동용모터, 플러그, 콘센트) -마찰스파크 -정전기
20. 2012년 04월 08일 07시 경 전난 여수시 소재 OO(주)	폐유 운반선 작업 준비 중 화물(폐유) 탱크 유증기에 실화	1명 부상	폐유	-정전기
21. 2012년 03월 29일 19시 경 인천 소재 OO	UV 도장을 위해 세척작업 도중 화재 발생	1명 사망	수소처리된 경질 나프타(100 %): 아이소 파라핀 유도체(80~85 %), 사이클로 화합물 유도체(15~20 %) -인화점 : 0 ℃ 이하 -최저인화 한계치/최고인화 한계치 : 연소범위 하한(0.8%), 상한(8%)	-마찰스파크 -정전기
22. 2011년 12월 24일 13시 경 경북 경주시 소재 OO(주)	변압기 TANK 세척작업 중 화재	1명 부상	신너	-마찰스파크 -정전기
23. 1998년 3월 3일 15시 50분경, 부산시 소재 (주)○○유화	반응기에서 가연성 물질 누출로 폭발.화재 발생	1명 사망 37명 부상	메틸 알콜, 이소프로필 알콜, 에틸아크릴레이트 모노머, 메타메틸아크릴레이트, 아크릴산, 아크릴로니트릴	-전기스파크(스위치) -비방폭형 전기설비
24. 1997년 9월 11일 10시경, 전남 여천 소재 ○○정유(주)	폐수처리장 집수조의 절단 앵커 볼트 용접 중 폭발 발생	4명 화상	휴발류 -폭발한계 : 1.4 ~ 7.6 Vol.%	-용접 불꽃
25. 1997년 5월 ○일 15시 30분경, 경남 소재 ○○조선소	선박내부에서 도장작업 중 폭발	4명 사망 9명 부상	인화성물질 신너	-용접/용단 불꽃
26. 1994년 2월 ○일 22시경, 부산시 소재 (주)○○가스	탱크로리의 LPG 주입호스 절단에 의한 가스누출로 화재발생	4명 화상	LPG -부탄 -프로판	-정전기 -열원(배기가스)
27. 1993년 12월 ○일 10시 경, 경북 고령군 소재 ○○산업	압력용기 기밀시험 중 파열로 인한 화재발생(2차: 톨루엔 저장탱크 강타 화재발생)	6명 화상	1차: 인화성 물질(확인불가) 2차: 톨루엔	-기계스파크 -정전기(분출대전)

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
28. 1993년 11월 ○일 04시 40분경, 경기도 안산시 소재 ○○알루미늄(주)	경유 Service Tank 연결부에서 경유 누출되어 폭발위험분위기 형성	1명 사망	경유 -인화점 : 50~70 ℃ -발화점 : 257 ℃ -폭발한계 : 1~6 Vol.%	- 전기스파크(Control Panel)
29. 1993년 10월 ○일 05시 58분경, 충남 천안시 소재 ○○산업(주)	휴대용 부탄가스 충전작업장에서 가스누출로 폭발위험분위기 형성	1명 사망 6명 부상	부탄 -발화점 : 365 ℃ -폭발한계 : 1.5~8.5 Vol.% 프로판 -발화점 : 470 ℃ -폭발한계 : 2.0~9.5 Vol.%	-전기스파크(컨베이어용 전동기 케이블) -기계스파크(빈용기간)
30. 1993년 8월 ○일 16시 05분경, 경기도 안산시 소재 ○○금속공업(주)	작업장 내 바닥 도장작업 중 폭발위험분위기 형성	1명 사망 2명 부상	신너 -톨루엔(20 %) : 1.27~7.0 Vol.% -크실렌(20 %) : 1.1~7.0 Vol.% -메틸에틸케톤(40 %) : 1.8~10 Vol.% -메탄올(20 %) : 6.7~36.5 Vol.%	-전기스파크(분전함 내) -정전기
31. 1993년 8월 ○일 15시경, 경북 대구시 소재 ○○섬유(주)	나일론 원단을 코팅작업 중 유기용제에 의한 폭발위험분위기 형성	2명 사망 4명 부상	톨루엔 -발화점 : 480 ℃ -폭발한계 : 1.27~7.0 Vol.% 이소프로필알콜 -발화점 : 460 ℃ -폭발한계 : 2.0~12.7 Vol.%	-전기스파크(비방폭 전기설비) -정전기
32. 1993년 7월 ○일 10시 20분경, 인천시 소재 ○○합성화학	원단을 접착하여 건조하던 중 건조기 폭발	2명 사망 7명 부상	메틸에틸케톤 -발화점 : 5160 ℃ 톨루엔	-누전 및 전기스파크(전선) -전동기 축수부의 과열 -정전기(마찰전기)
33. 1993년 4월 ○○합화(주)	인쇄용 용제를 계량탱크로 송입하던 중 누출에 의한 폭발위험분위기 형성	2명 사망	톨루엔(70 %) 아세톤(30 %) -발화점 : 557 ℃ -폭발한계 : 2.6~128 Vol.%	-전기스파크(제어반)
34. 1993년 3월, 인천시 소재 ○○호텔	중수설비조 청소작업 중 화재.폭발	7명 부상	메탄 등 -폭발한계 : 5~15 Vol.%	-기계스파크(랜턴, 공구)

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
35. 1993년 3월 ○일 22시 07분경, 인천시 소재 ○○도시가스(주)	탱크로리로 운반된 LPG를 저장탱크로 하역작업 중 누출에 의한 화재발생	1명 화상	LPG -폭발한계 : 2.2~10 Vol.% -MIE : 0.26 mJ	-정전기
36. 1993년 3월 ○○산업	유기용제를 이용한 PVC 코팅에서 코팅 중 화재. 폭발	2명 사망 1명 부상	코팅액 -톨루엔(97.8 %) -아세톤, 트리클로로에탄, 흑연 : 미량	-고온부에 의한 발화(열공급 파이프, 비방폭 백열등)
37. 1992년 11월 ○일 10시 50분경, ○○화공(주)	연막탄 제조 작업 중 폭발	4명 화상	연막제 : Mg(65 %), $KclO_4$(35 %) 점화제 : $KclO_3$(10 %), Sb_2S_3(20 %), Zr(20 %), PbO_2(20 %)	-정전기 -기계스파크(충격, 마찰)
38. 1992년 10월 16일 15시 55분경, 일본 치바현 ○○석유	탈황장치의 배관에서 정유 누출로 인한 폭발발생	9명 사망 8명 부상	정유	-정전기
39. 1992년 9월 ○일 15시경 ○○개발(주)	폐액용기 파쇄작업 중 화재.폭발	2명 사망	에틸글리콜 아세테이트 -폭발한계 : 1.7 Vol.%~ 부틸아세테이트 -폭발한계 : 1.4~8 Vol.% 크실렌 -폭발한계 : 1.1~7.0 Vol.%	-기계스파크(철재 드럼과 유리용기)
40. 1992년 7월 15일, ○○소재	탱크로리에 납사출하 작업 중 화재발생	1명 사망 1명 화상	납사(Naphtha)	-정전기(합성섬유)
41. 1991년 8월 10일 11시 40분경 ○○공업(주)	용접불꽃에 의해 알루미늄분진 마대 화재(1차) 화재진압위해 호퍼에 모래투입 후 폭발(2차)	1명 사망 3명 부상	알루미늄 분진	-화학적 폭발(Al 분진+수분=수소) -정전기(백필터)
42. 1991년 5월 22일 07시 40분경, ○○화학(주)	접착제 제조를 위한 작업 중 톨루엔 누출로 인한 화재발생	3명 사망	톨루엔 (MIE: 2.5 mJ) -발화점 : 480 ℃ -폭발한계 : 1.2~7.1 Vol.%	-전기스파크(차단기) -정전기(누출)
43. 1991년 3월 20일 09시 15분경, 인천소재 ○○정밀	폐유난로를 피우고 작업 중 폭발	15명 부상	-	-난로 과열

사고 일시 및 장소	사고 개요	인적 피해	가연성 물질	사고 원인(추정)
44. 1991년 ○월 ○일 15시 58분경, ○○공장	분리된 납사가 분출되면서 폭발하여 화재발생	1명 사망 8명 부상	납사 -발화점 :300 ℃ -폭발한계 : 1~8 Vol.% -MIE : 0.25 mJ	-정전기(납사 분출 시) -비방폭형 임시전기설비
45. 1991년 1월 28일 17시 45분경, 부산시 소재 ○○금형	방전가공기 점검 중 화재발생	1명 사망 2명 부상	등유 -인화점 : 43~96 ℃ -폭발한계 : 1.2~6.0 Vol.%	-방전가공기의 스파크
46. 1991년 1월 4일 15시 17분경, 울산시 소재 (주)○○	크실렌 탱크에서 샘플채취 중 폭발.화재발생	사망 1명	크실렌(혼합) -인화점 : 23~27 ℃ -폭발한계 : 1.0~7.0 Vol.%	-정전기
47. 1990년 11월 24일 20시 30분경, ○○개발(주)	정재탑 파열로 인한 기름(진사유) 누출에 의한 화재발생	1명 사망	프로판 -발화점 : 466 ℃ -폭발한계 : 2.2~9.5 Vol.% 솔벤트 납사 -발화점 : 481~510 ℃ -폭발한계 : 1.1~6.0 Vol.% C_7-C_{10} -발화점 : 463 ℃ -폭발한계 : 1.0~6.0 Vol.%	-가열로의 불꽃 -누출시 발생되는 정전기 -자연발화 -마찰 스파크

2. 정전기 재해분석

가. 정전기 재해원인[2)]

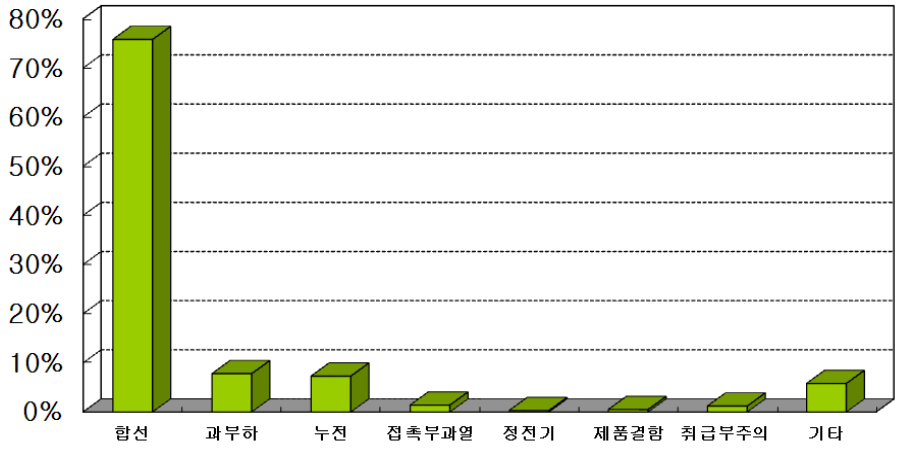
2012년 8월 00화학에서 발생한 화재·폭발사고는 물적 피해는 물론 8명 사망, 3명 부상이라는 엄청난 인적 피해를 가져온 중대산업사고 이었다. 과거 10년간의 중대산업사고에서 사망한 재해자의 절반에 육박하는 큰 인적재해이었다. 해당 인화성 물질의 점화원으로 추정되는 최소점화에너지는 약 0.2 mJ이다.

1 mJ의 아주 작은 정전기 방전에너지가 단 한 번에 화재·폭발로 수십억 내지 수백억의 물적 피해를 일으킨다는 것이 정전기 재해의 특징이다. 기인물의 에너지 측면으로 가정하면 가장 작은 에너지가 대형사고를 낸다고 생각할 수 있다.

정전기 방전(Electrostatic Discharge)으로 인한 장해로는 설비의 오동작으로 인한 생산손실, 반도체 소자의 불량 등이 있으며, 재해로는 정전기 방전 에너지가 점화원으로 되어 화재·폭발을 발생시킨다. 국내에서도 장해분야에 대해서는 생산손실 등 직접적인 경제손실을 낮추기 위하여 적극적으로 대처하고 있으나, 정전기 분야가 차지하는 재해 비중이 낮다는 이유로 이 분야의 통계 생산이 중단되는 등 정전기에 대한 인식은 아직도 초보적인 수준에 불과하다.

정전기 화재·폭발의 특성상 중대재해와 중대산업사고로 이어지는 물적 및 인적 손실 방지를 위하여 정전기에 대한 정확한 인식과 근본적인 대책을 수립할 필요가 있다.

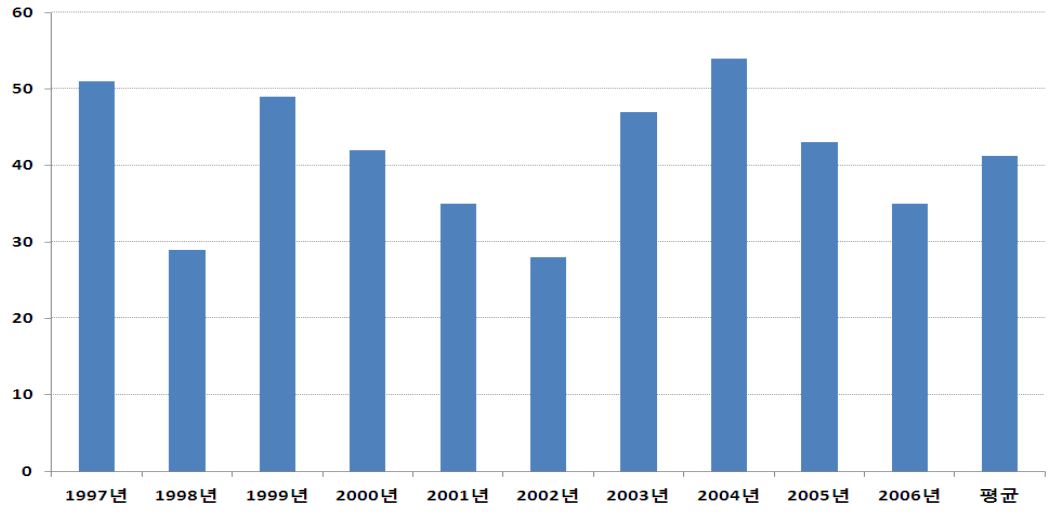
[그림2-1]은 2006년도 전기로 인한 화재원인 분포도를 나타낸 것이다. 재해원인 중에서 합선이 5,947건(75.8 %)으로 가장 많이 차지하고 있으며, 정전기로 인한 재해 건수는 국내의 경우 연간 30여 건(0.3 % 정도), 일본의 경우 70여건 발생하고 있으나, 재해의 특징으로는 아주 작은 정전기 방전에너지(수 μJ ~ 수십 mJ)에 의한 폭발·화재를 발생시켜 년 간 약 1,000여억 원의 큰 피해를 입게 된다.



[그림 2-1] 전기화재 원인 분포도

나. 정전기 재해현황

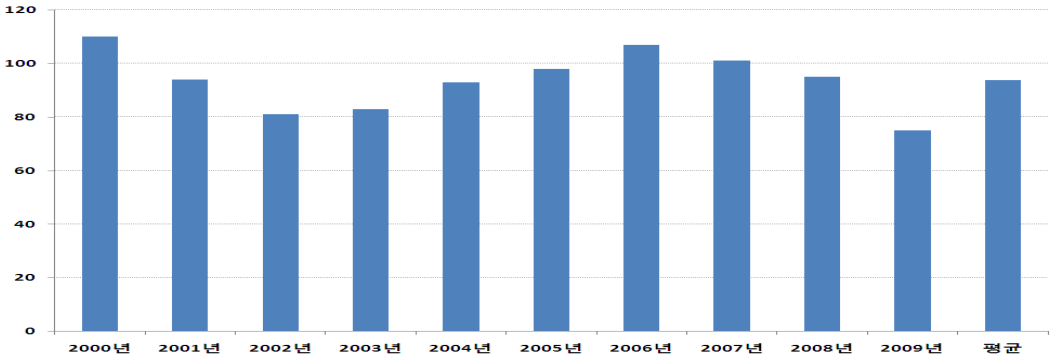
정전기와 관련하여 우리나라 현실을 직시해 볼 수 있는 통계자료로써, [그림 2-2]는 1997년부터 2006년까지의 우리나라의 전 국민을 대상으로 한 전기로 인한 화재원인의 기인물에서 정전기로 인한 발생 건수를 나타낸 것이다.



[그림 2-2] 정전기에 의한 화재·폭발 발생 건수-한국

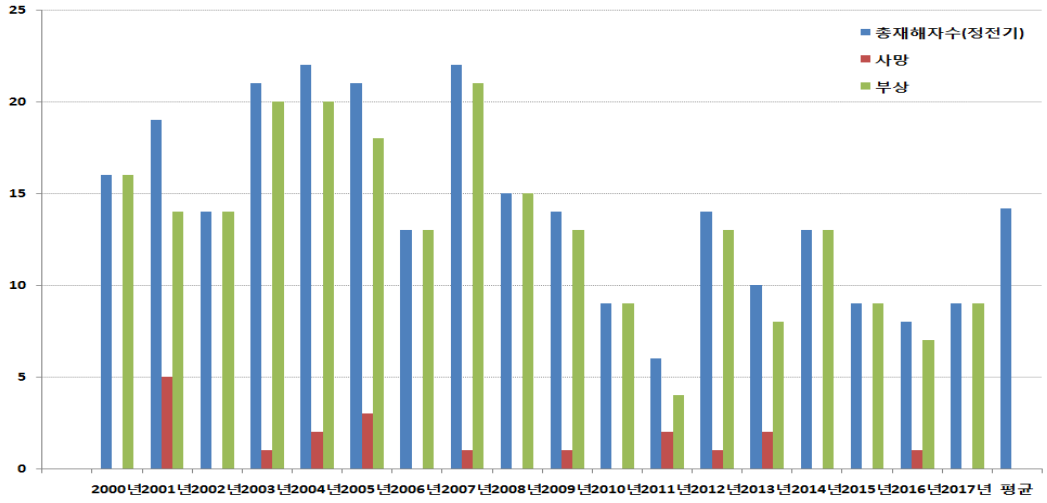
연간 약 40여건(전체 재해의 약 0.4 %)의 화재·폭발이 발생하고 있으며, 불행하게도 본 자료는 2007년부터 화재원인조사에서 조차도 화재원인 분류에서 정전기를 제외하고 있기 때문에 더 이상 볼 수 없다는 것이다.

[그림 2-3]은 2000년부터 2009년까지 일본의 전 국민을 대상으로 하여 정전기에 의한 화재·폭발의 발생 건수를 나타낸 것이다. 연간 평균 약 94건 정도 발생되고 있다. 우리나라의 전 국민을 대상으로 한 발생건수보다 약 2배를 훨씬 초과하여 발생하고 있다. 이를 산업규모와 재해조사·분류의 2가지의 관점에서 보면, 정전기 분야에 대한 연구/시설/인력 면에서 일본이 우리보다 역사와 규모면에서 훨씬 오래 되었고, 크기 때문에 재해원인을 정전기로 찾아내어 분류하는 능력이 우수하다고 판단된다.



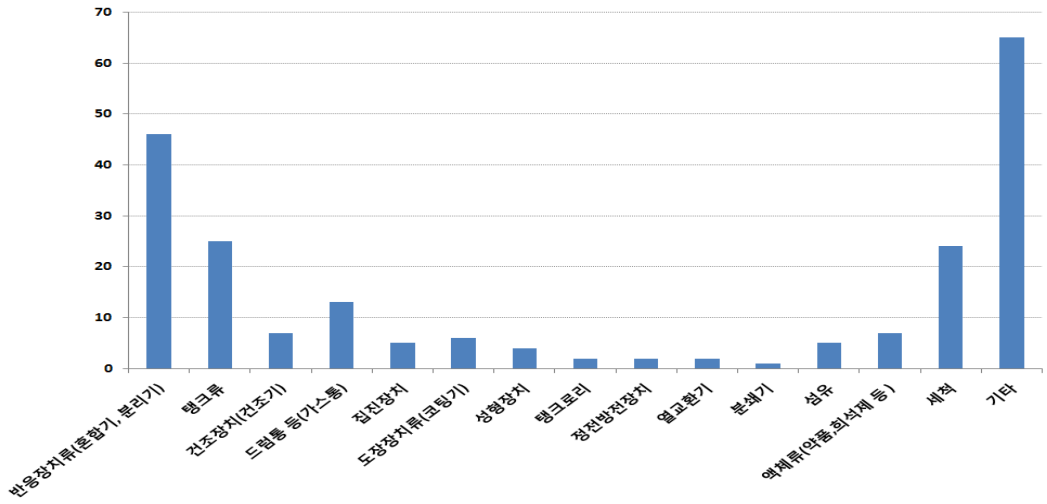
[그림 2-3] 정전기에 의한 화재·폭발 발생 건수-일본

[그림 2-4]~[그림 2-7]까지는 2000년부터 2017년까지의 우리 산업현장에서 정전기로 인한 화재·폭발발로 인한 산업재해 255건에 대하여 분석한 결과를 나타낸 것으로 [그림 2-4]는 연도별 발생 건수를 나타낸 것이다. 연간 약 14건의 화재·폭발이 발생하고 있으며, 2011년까지 감소해왔던 재해가 최근 몇 년 동안은 사망재해는 크게 발생되지 않으나 부상재해는 특이하게 감소되는 경향으로 나타나지 않고 있다. 이에 대한 정밀 분석도 필요하다고 판단된다.



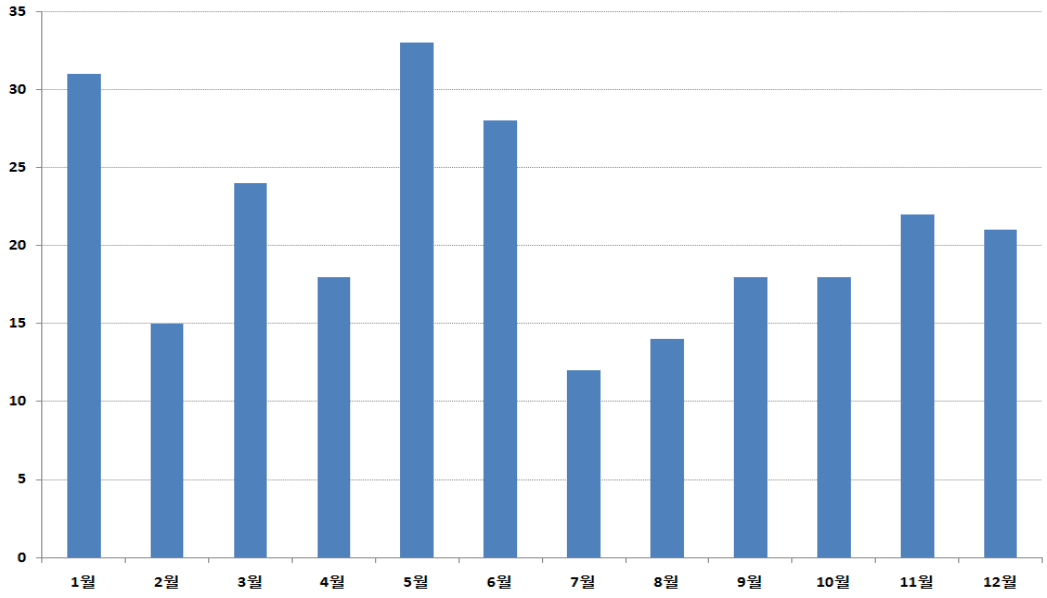
[그림 2-4] 연도별 발생 건수

[그림 2-5]는 장치별로 분류한 것을 나타낸 것이다. 혼합기, 분류기 등을 포함하는 반응장치류에서 많은 재해가 발생되고 있으며, 구체적인 대상설비를 인지가 안되는 기타의 소분 및 코팅 작업에도 정전기 대전에 의한 화재·폭발이 많이 발생되고 있음을 나타내고 있다.



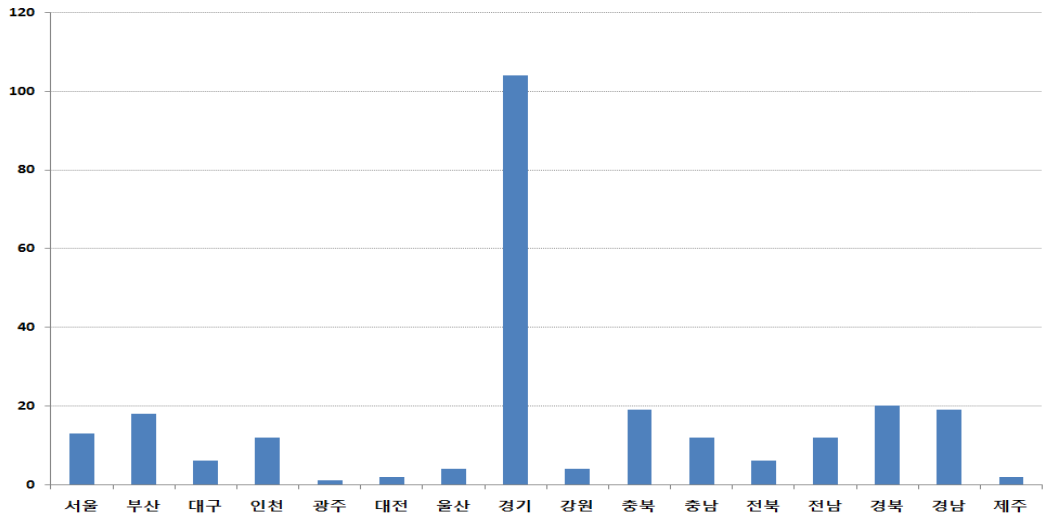
[그림 2-5] 장치별 발생 건수

[그림 2-6]은 월별로 분류한 것을 나타낸 것이다. 정전기 발생 억제 요인인 습기가 많아 역으로 감전재해가 다수 발생하는 여름철에는 정전기 화재·폭발사고가 줄어들고 있다는 것을 볼 수 있으나, 흔히 회자되고 있는 날씨가 건조해지는 겨울에는 정전기 방전에 의한 화재·폭발이 대ㅍ폭 증가한다는 것을 명확하게 증명하는 것은 쉽지 않다. 산업현장의 제품에 대한 제조 및 성능상 건조공정을 필요로 하기 때문으로 판단된다.



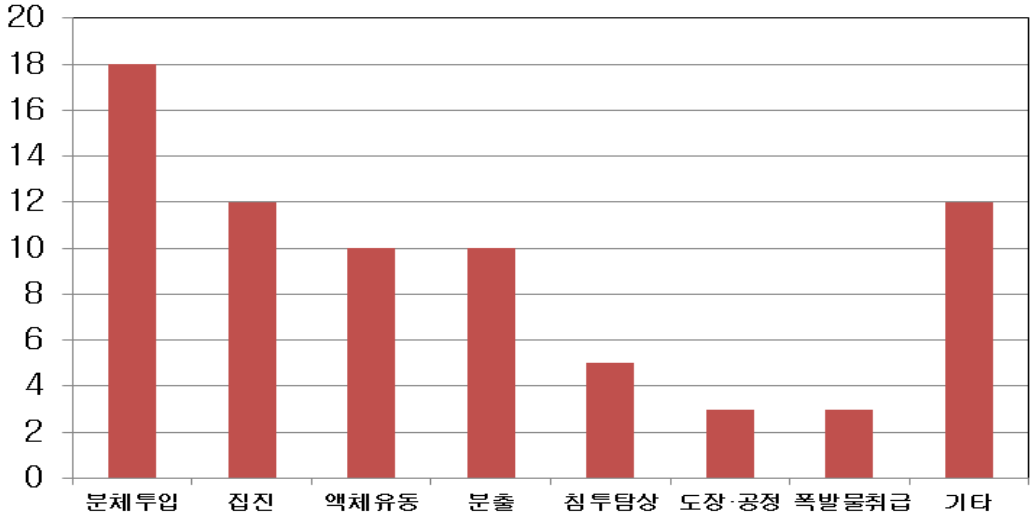
[그림 2-6] 월별 발생 건수

[그림 2-7]은 지역별로 분류한 것을 나타낸 것이다. 경기도가 가장 많은 104건이 발생하여 40 % 정도를 점유하고 있다. 이에 대한 원인은 소재해 있는 사업장의 생산품 및 설비, 규모, 공정, 업종 등 여러부문에서의 원인분석이 필요하다.

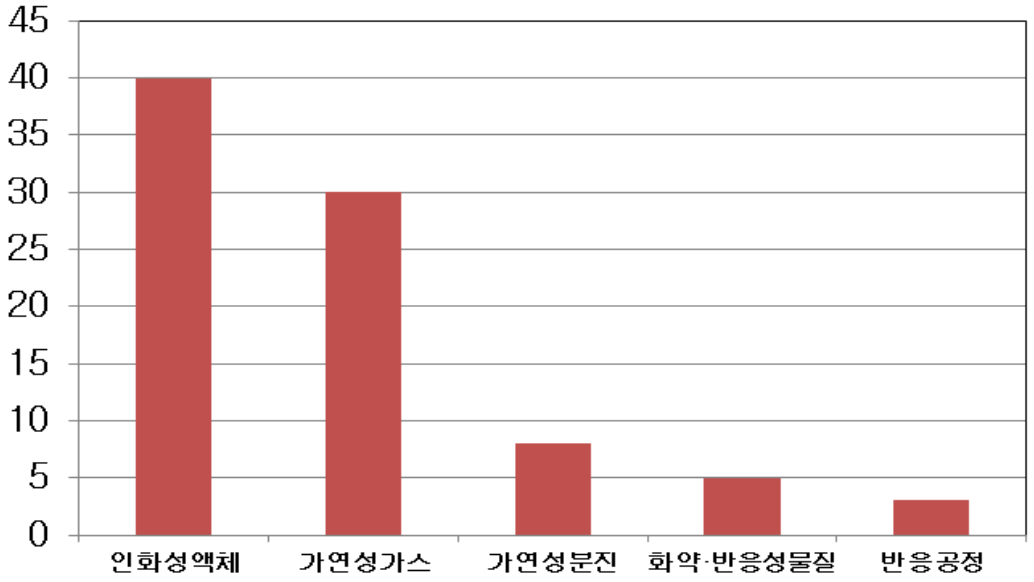


[그림 2-7] 지역별 발생 건수

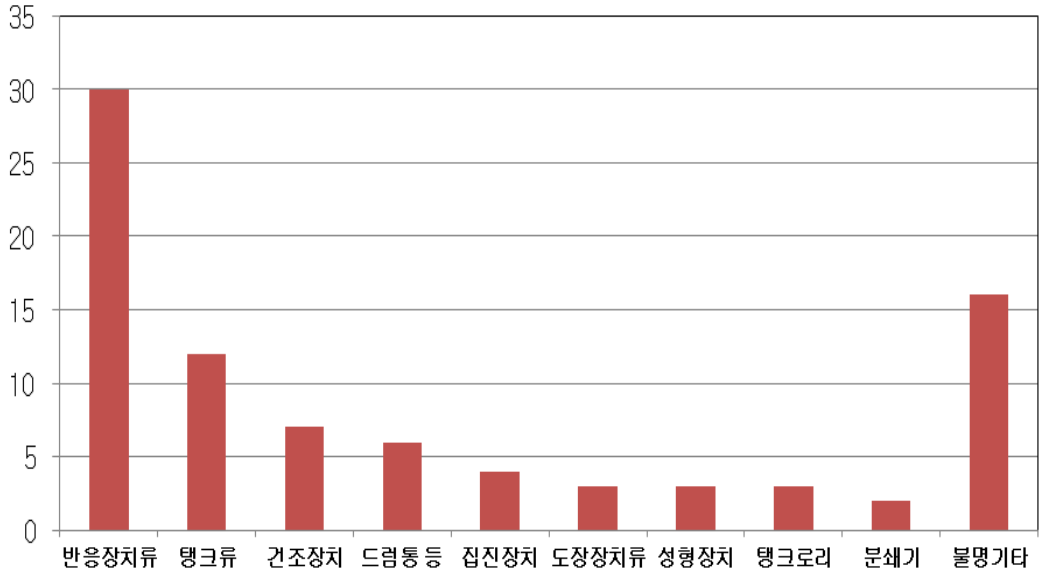
[그림 2-8]~[그림 2-10]까지는 1995년부터 2004년까지 일본에서 발생한 공정별, 물질별, 장치별로 정전기에 의한 화재·폭발 건수를 나타낸 것이다. 산업현장에서 정전기에 의한 폭발·화재는 분체 투입 공정, 인화성 액체, 반응장치류에서 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.



[그림 2-8] 공정별 건수-일본



[그림 2-9] 물질별 건수-일본



[그림 2-10] 장치별 건수-일본

3. 주요 발생형태 및 특징

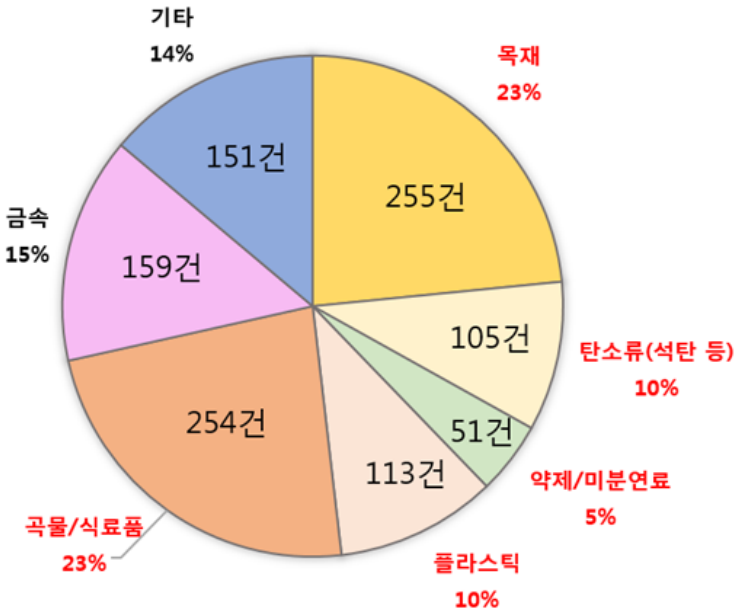
종종 인적 재해나 큰 물적 재해를 초래하는 화재·폭발 재해는 사회적 영향도 크고, 그 예방은 산업안전의 중요한 문제이다. 화재·폭발의 끊을 수 없는 요인으로서 시설의 노후화나 안전기술 전달의 부재 등이 전부터 지적 되어오고 있다. 화재·폭발은 인화성 물질이 점화원으로부터 에너지를 받게 되어 연소반응을 개시하고, 이것이 연쇄 반응적으로 확장되어 발생된다. 점화원으로서는 열, 기계적 에너지, 전기적 에너지 등 여러 가지가 있으나 그 중에서도 정전기 방전은 인화성 물질에 대한 점화원의 대표적인 것이다.

산업재해 통계 2000년부터 2017년까지에 의하면, 동 기간에 발생한 정전기 방전으로 추정되는 255건의 재해는 세척/세정/코팅 공정에서, 인화성 액체/증기 물질에서, 반응장치류 및 세척기에서 많이 발생되었다. 정전기의 불꽃방전에 의한 화재·폭발사고는 인적·물적 피해가 크다는 것과 정전기 대전에 의한 방전현상 재현이 매우 어렵다는 것이다. 그래서 정전기 방전사고는 원인규명보다는 화재·폭발 사고가 일어나지 않도록 전기설비와 작업자 신체에서 대전되는 정전기를 안전한 수준으로 유지하는 것이 매우 중요한 사항이다.

산업재해 통계에 대한 비교 고찰 결과, 우리나라의 정전기 방전에 의한 화재·폭발 사고는 세척/세정/코팅 공정에서, 인화성 액체/증기 물질에서, 반응장치류 및 세척기에서 많이 발생되었으나, 일본의 경우에는 분체투입 공정, 인화성액체 물질에서, 반응장치류에서 많이 발생되고 있었다. 또한 우리나라의 경우, 겨울철 건조시기(10월에서 다음해 2월)에 발생되는 정전기 방전에 화재·폭발사고는 107건으로 전체의 37 %를 차지하였으며, 5월에 33건으로 가장 많이 발생하였다.

아울러 안전보건공단, 산업안전보건연구원 등 국내 관계기관에서 발행하거나 제공되는 사고보고서 등과 미국(CSB, Chemical Safety Board), 영국(DEI, Dust Explosion Info), 독일(Dust Explosions in the Process Industries), 프랑스(ARIA, Analysis, Research and on

Accidents)에서 분진폭발 관련 사고를 정리하였다. 국내와 국외의 사고사례에 따른 국내·외 분진폭발 사고는 1965년부터 2016년까지 총 1,088건으로, 원인 물질별 통계는 [그림 2-11]과 같다.



[그림II-11]국내·외 분진폭발 사고통계

분진폭발 사고의 원인 물질은 금속분진, 목재분진, 탄소류, 약제·미분연료, 플라스틱분진, 곡물·식료품 분진 등으로 대부분이 가연성 분진에 속한다. 구체적으로 살펴보면, 총 1,088건의 분진폭발 사고 중 인화성 고체를 제외한 가연성 분진에 의한 사고가 778건으로, 전체 분진폭발 사고의 71 % 이상을 차지하고 있다.

Ⅲ. 정전기 발생이론 및 대책

1. 정전기의 발생원리[3)]

가. 원자의 구조와 전기

정전기라는 단어 자체에 이미 ‘전기’라는 이름이 붙어 있으므로 전기의 일종인 것은 다 알 것이다.

물질의 최소 단위는 원자다. 이 원자에는 중심에 (+) 전기를 갖는 원자핵이 있고 그 주위를 원자핵과 같은 양의 (-) 전기를 띠는 전자가 돌고 있다.

원자핵의 (+) 전기와 전자가 갖는 (-) 전기는 서로 상쇄되어 0이 되므로 보통 원자 즉, 보통의 물체는 외부로부터 보는 한 전기적으로는 (+)도, (-)도 아닌 중성으로 전기적 성질은 전혀 나타나지 않는다. 그러나 어떤 방법으로 든 전자를 원자핵으로부터 떼어내고 전자와 원자핵을 갈기갈기 찢어 내면 전자는 본래 갖고 있는 (-) 전기의 성질을, 원자핵은 (+) 전기의 성질을 나타내게 된다. 즉 물질이 (+)나 (-)의 전기를 띠게 되는 것이다.

원자핵의 주위를 돌고 있는 전자의 일부가 외부에서 주어지는 물리력 등에 의해서 전자가 이탈하게 되면 전기를 띠는 형태로 변하게 되는 것이다. 전자를 잃은 원자는 (+) 전기를 띠게 되며 이를 (+) 전하, 전자 단독체 또는 다른 원자에서 이탈된 전자를 추가적으로 얻은 원자는 (-) 전기를 띠게 되며 이를 (-) 전하라 한다.

이처럼 원자의 입장에서 생각하면 전기는 발생한다기 보다는 원래 물질에 숨어 있다가 여기에 무엇인가의 작용이 가해지면 나타나게 된다고 생각하는 편이 정확할 것이다.

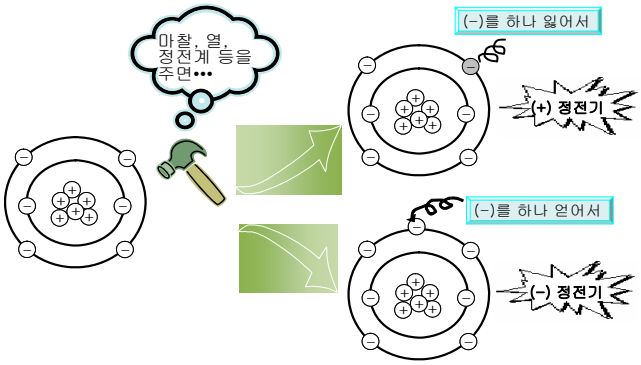
나. 정전기와 동전기

물질이 (+)나 (-)의 전기를 나타내는 즉, 전기를 띠는 것을 대전(帶電)이라고 하는데 물질을 대전시키려면 여러 가지 방법이 있다. 그 중에서 가장 간단하고 널리 알려져 있는 방식이 마찰대전이다. 두 개의 물체를 서로 세게 문지르면 한쪽 물체는 (+)로, 다른 쪽 물체는 (-)로 대전한다. 이것은 마찰에 의해 한쪽 물체에 있었던 전자들이 다른 한쪽의 물체로 이동하여 한쪽 물체에는 (+) 전하가, 다른 한쪽 물체에는 (-) 전하가 쌓여있기 때문이다.

그런데 스커트 등에 대전한 전기를 왜 정전기라고 하는 것일까? 그 대답은 간단하다. 스커트에 대전한 전기는 축적되어 있으며 거의 움직이지 않는다. 즉 이동하지 않는다는 것이다. 움직이지 않는 정(靜)전기가 있다면 움직이는 전기, 즉 동전기가 있을 터이다. 동전기란 산업체나 가정에서 쓰여지는 우리들에게 익숙한 ‘전류’로 대표되는 이동하는(흐르는) 전기를 말한다.

정전기와 동전기는 형태도 성질도 상당히 다르지만 전기라는 점에서는 같다. 이것은 물에 비유하면 쉬울 것이다. 즉, 정전기는 물이 고여있는 댐이나 호수에 해당하며 동전기는 흐르는 시내나 강에 해당한다. 호수와 강은 그 모습이나 역할은 다르지만 그 자체는 같은 물이다.

정전기란 문자대로 정의하면 ‘공간의 모든 장소에서 정지되어 움직이지 않는 전하에 의한 전기’로 정의할 수 있다. 또한, 일반적으로 주변에서 흔히 발생하는 정전기 현상이나 정전기 응용사례, 정전기 장해와 재해에서는 반드시 미소전하의 이동, 즉 굉장히 큰 저항을 통한 매우 작은 전류와 전압을 가지고 있다.



[그림 3-1] 정전기 발생

2. 정전기의 발생 메카니즘[3)]

가. 물질의 접촉만으로도 대전이 일어난다.

서로 성질이 다른 두 물체를 마찰하게 되면 물체의 두 표면에 정전기가 발생하므로 이 정전기를 마찰전기라고 부르기도 하며, 기본적인 발생원리는 서로 다른 종류의 물질이 접촉된 후 급격하게 분리되면서 정전기가 발생하며, 마찰현상은 이와 같은 접촉과 분리과정을 조금 더 명확하게 해주는 것에 불과하다.

두 종류의 물체가 접촉하고 나서 분리될 때 발생하는 정전기 대전현상은 밸트와 풀리, 로울러와 비닐 및 섬유로 된 천 등의 사이, 또한 유리면에 붙여진 테이프 등이 분리할 때 등 여러과정에서 나타나고 있다.

서로 다른 두 물질이 접촉 후 분리될 때 두개의 물체 표면에 정전기가 발생하는 데 그 이유는 아래와 같다. 전자는 원자핵과의 인력에 의해 원자핵 주위를 돌고 있다. 그러나 물체에 빛을 쬐거나 가열하는 등 물리적인 힘이 가해지면 이 전자는 원자외부로 방출되는 데 이 상태에서 요구하는 최소한의 에너지를 '일함수'라 하며 물체의 종류에 따라 고유값을 가지며 전자볼트(eV) 단위가 적용된다.

일함수가 큰 물질은 전자를 흡착하는 힘이 일함수가 작은 금속보다 더 크다. 따라서 두가지 서로 다른 물체를 접촉시키면 그 접촉 부분에는 낮은 일함수의 물체에서 전자가 나오게 되며 이 전자는 높은 일함수를 가진 물체로 이동한다. 이 전자의 이동은 일함수의 차이가 없어질 때까지 계속되고 그 결과 일함수가 큰 쪽 금속은 접촉 전에 비해서 전자의 양이 많아짐으로 (-) 전기적 성질을 나타내게 된다. 한편 일함수가 작은 쪽의 금속은 접촉 전보다도 전자가 부족해서 (+) 전기의 성질을 나타내게 된다. 이렇게 하여 접촉한 두 물체는 (+)와 (-)로 대전되어 전기 이중층을 만들고 이 두 물체가 분리되면 정전기가 생성되는 것이다. 그러나 마찰대전은 위의 설명과 같이 일함수에 차이에 의한 것만으로 발생되는 현상은 아니며, 마찰에 의한 압력과 열 등의 에너지 효과가 포함된 종합적인 현상이다.

정전기 현상에서 발생하는 (+), (-) 대전을 살펴보면 접촉한 후 분리하는 상대방 물질의 종류에 따라 양전하 또는 음전하가 발생된다. 이 물질들을 나열하여 보면 <표 3-1>과 같이 나타나며, 이를 대전계열(Triboelectricity series)이라 한다.

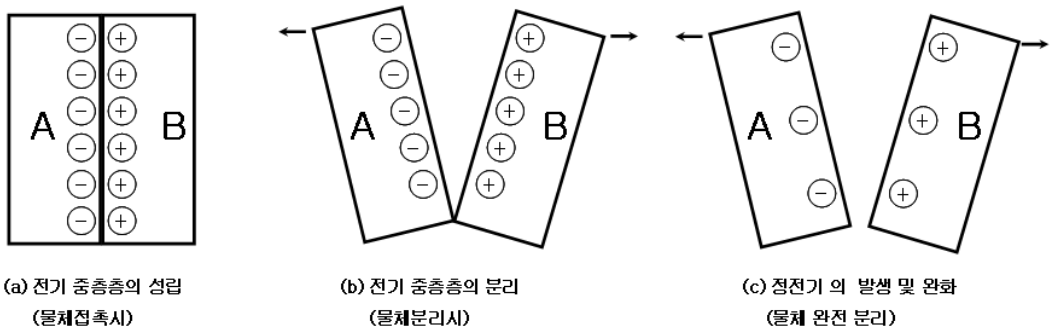
<표 3-1> 대전계열

금속	섬유	천연물질	합성수지
(+)	(+)	(+)	(+)
		아스베스트	
		인모, 모피	
		유리	
		운모	
	양모		
	나일론		
	레이온		
납			
	견		
	목면	면	
	마		
		목재	
		사람 피부	
	유리섬유		
아연	아세테이트		
알루미늄			
		종이	
크롬			
			에보나이트
철			
동			
니켈			
금		고무	폴리스틸렌
	비닐론		
백금			폴리프로필렌
	폴리에스테르		
	아크릴		
			폴리에틸렌
	폴리염화비닐	셀룰로이드	
		셀로판	
			염화비닐
			폴리 테트라플로로 에틸렌
(−)	(−)	(−)	(−)

※ 표의 대전계열 중 두개의 물질을 마찰 또는 박리할 때, 위쪽의 물질이 정극성(+)으로 대전하고, 아래쪽의 물질이 부극성(−)으로 대전한다. 이 대전량은 대전계열 중의 위치가 멀리 떨어질수록 커진다.

나. 정전기의 발생

물체의 접촉과 분리에 의해 발생하는 정전기는 두 물체의 접촉에 의한 전기 이중층의 성립, 전기 이중층의 분리 및 전압 상승, 정전기의 발생 및 완화 등 3단계로 나누어 고찰할 수 있으며 [그림 3-2]로 나타내었다.



[그림 3-2] 정전기 발생

1) 전기 이중층의 성립

[그림 3-2]의 (a)와 같이 두 물체가 접촉시에 물체의 일함수 차이 또는 마찰에 의한 에너지 등에 의한 전자의 이동에 의하여 두 물체가 접촉하는 면에 전기 이중층이 성립된다.

2) 전기 이중층의 분리 및 전압 상승

다음으로 [그림 3-2]의 (b)와 같이 전기의 이중층 분리로 보여지는 현상에 대해 살펴보면, 전기의 이중층이 기계적으로 분리되어지는 상태는 평판전극의 정전용량계 극판 간격이 크게 되는 것과 등가이다. 이때 평판전극의 정전용량 크기 C[Farad]와 전극 사이의 전압 V[Volt]는 다음과 같다.

$$C = \frac{\epsilon S}{d}[F] \quad \cdots\cdots (식\ 3-1)$$

$$V = Q/C\,[V] \quad \cdots\cdots (식\ 3-2)$$

여기서 ε은 극판사이의 유전율이며 S[㎡]는 극판면적, d[m]는 극판거리, Q[Coulomb]는 전하량을 나타낸다.

(식 3-1)에서 보면 전기적 이중층이 분리된 상태에서 간격이 넓어지면 극판의 간격 d가 커지는 결과가 되어 정전용량이 줄어들게 된다. (식 3-2)에서 보는 바와 같이 정전용량이 감소하면 접촉전위는 정전용량과 반비례이기 때문에 두 물체가 분리되어서 정전용량이 감소하면 접촉면의 전위는 수 mV ~ 수 kV로 올라간다. 두 물체를 분리시킬 때 이 전위차에 의해 접촉부분의 접촉저항을 통해 전자가 이동하여 전하가 소멸되는 역류현상, 그리고 두 물체사이의 절연내력(여기서는 공기의 절연내력)보다 더 큰 전위차가 발생하게 되면 방전에 의한 전하의 역류현상이 생겨 최초 발생된 전하의 일부분을 소멸시킨다.

3) 정전기의 발생 및 완화

[그림 3-2]의 (c)와 같이 두 물체가 완전히 분리된 상태에서는 분리과정에서 소멸되고 남은 전하가 축적된 상태로 존재하며 완화된다. 정전기의 완화는 물체상에 발생한 정전기가 잃어버려지는 현상으로 주로 방전 또는 도전(전기전도)에 의해 일어난다.

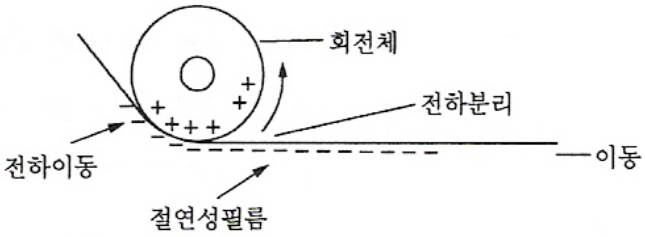
방전에 의한 완화는 주로 물체의 분리시에 발생하는 기중방전 혹은 대전물체의 전위가 높게 된 경우에 발생하는 기중방전에 의해서 일어난다. 대전물체의 최대 대전량은 이 방전에 의해 제한되어지고, 일반적으로 표면전하밀도의 최대값은 약 3×10^{-5}C/㎡으로 된다. 제전복의 대전방지를 위해서 사용되는 도전성 섬유는 낮은 전위에서도 방전이 발생해서 정전기의

완화가 일어나기 쉬운 성질을 이용하고 있다. 도전에 의한 완화는 주로 대전물체와 대지간의 전기전도에 의해 이루어진다. 접지된 금속 물체는 누설저항이 극히 적어서 완화가 빠르기 때문에 정전기가 발생해도 축적하지 않으므로 대전되지 않는다. 또한 부도체의 대전방지를 위해서는 체적저항율(또는 표면저항율)을 적게하는 것이 일반적인 방법의 하나이다.

3. 정전기 대전[3)]

가. 마찰대전

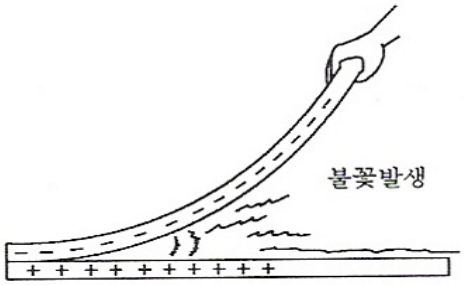
마찰대전은 [그림 3-3]과 같이 물체가 마찰을 일으킬 때, 마찰에 의해서 전기 이중층의 성립, 전기 이중층의 분리(전하분리)에 의하여 정전기가 대전되는 현상이다. 마찰대전은 접촉과 분리라는 발생과정을 거치면서 정전기가 발생되는 대표 사례이고 고체, 액체, 분체류에 정전기가 발생하여 대전되게 된다.



[그림 3-3] 마찰대전

나. 박리대전

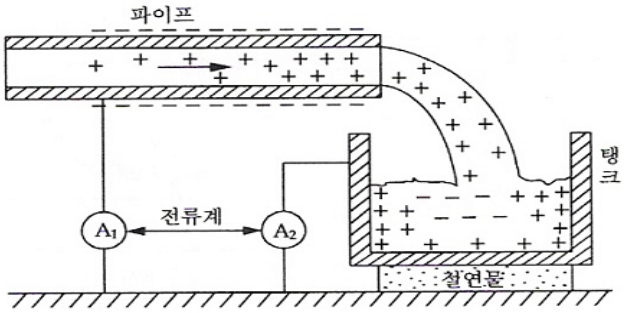
박리대전은 [그림 3-4]와 같이 밀착되어 있던 물체가 급격하게 분리되었을 때 전하분리가 일어나서 정전기가 대전되는 현상을 말한다. 박리대전은 접촉하는 면적과 접촉면의 밀착력, 박리속도 등으로 정전기 발생량이 변한다.



[그림 3-4] 박리대전

다. 유동대전

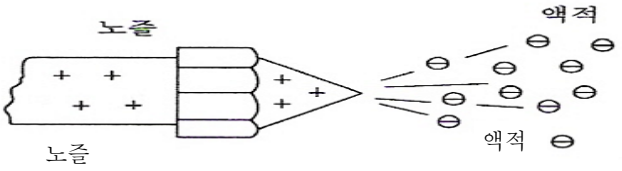
유동대전은 [그림 3-5]와 같이 액체류가 파이프를 통해서 이동할 때 정전기가 발생하는 현상을 말한다. 액체류의 파이프의 고체부분과 접촉하게 되면 액체류와 고체부의 경계면에 전기이중층이 형성되고, 이 이중층을 구성하는 전하가 액체류의 유동과 함께 흐를 때 정전기가 발생하는 현상이며, 이때 액체류의 유동속도가 정전기 대전현상 발생에 큰 영향을 주게된다.



[그림 3-5] 유동대전

라. 분출대전

분출대전은 [그림 3-6]과 같이 분체류와 기체류 그리고 액체류 등이 작은 관부분을 통해서 분출할 때 발생하는 정전기 대전현상을 말한다. 분출대전에 의한 정전기 발생은 분출과정에서 관 사이의 마찰, 액체·분체류끼리의 충돌, 가늘게 비산해서 비말(물보라, Spray) 상태가 되는 것 등에 기인한다.



[그림 3-6] 분출대전

바. 기타

그 외의 정전기 대전현상으로 진동대전(교반대전), 충돌대전, 파괴대전, 유도대전 및 비말대전 등이 있다.

4. 정전기 발생에 영향을 주는 요인[3)]

정전기의 발생량 및 발생하는 전하의 극성은 ① 물체의 특성, ② 물체의 표면상태, ③ 물체의 이력, ④ 접촉면적 및 그 압력, ⑤ 분리 속도 등의 요인에 의해 매우 큰 영향을 받는다.

가. 물체의 특성

<표 3-1>의 대전서열의 예시에 나타낸 것처럼 접촉·분리하는 두 가지 물체의 종류 및

조합에 따라 발생하는 정전기의 크기 및 극성이 영향을 받는다.

나. 물체의 표면상태

정전기의 발생현상은 표면 또는 경계면에서의 현상이므로, 물체의 표면상태가 정전기의 발생에 크게 영향을 미친다. 일반적으로 표면이 거칠 때와 오염, 산화물 등이 표면에 존재할 때 정전기의 발생이 증가한다.

다. 물체의 이력

물체의 정전기 발생 또는 대전 이력은 물체표면에 물성변화, 대전 상태 등에 따라 정전기의 발생이 영향을 받는다. 일반적으로 첫 회 및 초기에서 발생이 크고, 대전의 반복 및 지속에 의해 발생이 작아진다.

라. 접촉면적 및 압력

접촉면적은 정전기의 발생범위에 관계되기 때문에, 접촉 면적이 크면 클수록 정전기의 발생이 증가한다. 접촉압력도 크면 정전기의 발생이 증가한다.

마. 분리속도

접촉 후에 물체가 분리되는 속도는 전하분리에 부여되는 에너지에 관계되기 때문에, 분리속도가 크면 정전기의 발생이 증가한다.

5. 정전기로 인한 장・재해[3)]

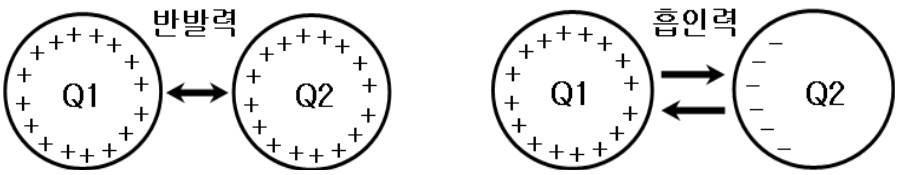
가. 정전기 대전에 따른 물리현상

1) 역학현상

정전기의 전기적 작용인 쿨롱(Coulomb)력에 의해 [그림 3-7]에 표시된 바와 같이 대전물체 가까이 있는 물체를 흡인하거나 반발하게 하는 성질이 있는데, 이를 정전기의 역학현상이라 한다. 같은 종류의 전하끼리는 반발력이 발생하고 다른 종류의 전하끼리는 흡인력이 발생하는 데 이 현상은 일반적으로 대전물체의 표면전하에 의해 작용하기 때문에 무게에 비해 표면적이 큰 종이, 필름, 섬유, 분체, 미세 입자 등에 많이 발생되기 쉬워 각종 생산장해의 원인이 된다. 2개의 전하 간에 작용하는 정전력 F[N]는 각각의 전하량 Q_1, Q_2[C]에 비례하고 양전하간의 거리 r[m]의 제곱에 반비례한다.

여기에서 ε 은 매질의 유전율이다.

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2}[N] \quad \cdots\cdots (식\ 3\text{-}3)$$



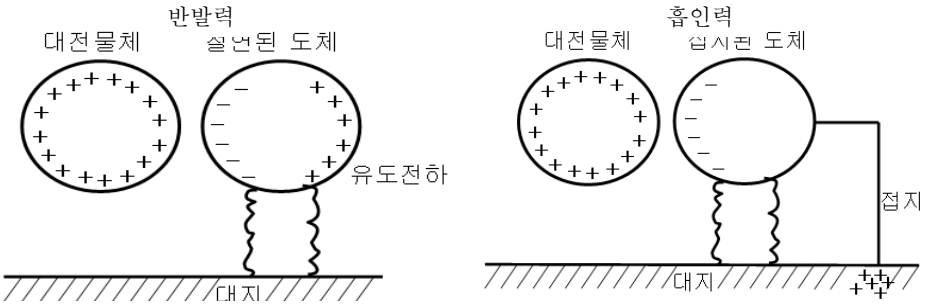
(a) 같은 극성의 전하　　(b) 다른 극성의 전하

[그림 3-7] 정전유도현상

2) 정전유도현상

정전유도현상은 이미 대전물체의 근처에 대지와 절연된 도체가 있는 경우 [그림 3-8]에 표시한 바와 같이 정전계에 의해 대전물체에 가까운 도체 표면상에 대전물체의 전하와 반대 극성의 과승전하가 나타나고, 이것과 극성이 다른 동량의 과승전하가 대전물체로부터 먼 표면상에 나타나는 현상이다. 물체(절연된 도체) 전체로는 정전하량과 부전하량은 같지만 전하의 불균일 분포에 기인해서 물체의 전위가 상승해서, 대전한 것과 등가로 된다. 정전유도의 크기는 전계의 크기에 비례하기 때문에 정전유도에 의한 전위상승, 즉 유도전위의 크기는 정전유도를 받는 도체의 형상 및 대전물체로부터의 거리에 관계하고 거리가 가까울수록 대전물체의 전위가 높게 된다.

정전유도현상은 정전기 재해·장해의 원인이 되지만 한편, 대전전위의 측정, Faraday-cage을 이용한 전하의 측정 등의 측정원리로서 이용되기도 한다.



(a) 정전유도에 의한 겉보기 대전　(b) 접지에 의한 유도대전의 방지

[그림3-8] 정전유도현상

3) 방전현상

정전기의 방전은 정전기의 고전압 작용에 의해 일어나는 전리작용으로 일반적으로 대전물체에 의해 정전계가 공기의 절연파괴 전계강도(약 30㎸/㎝)에 달한 경우에 일어나는 기체의 전리 현상이다. 정전기 방전이 일어나면 대전물체에 축적되어 있는 정전기 에너지가 방전에너지로서 방전공간에 방출되어 열, 파괴음, 발광, 전자파 등으로 되어 소비된다. 이 방전 에너지가 크면 가연성 물질의 점화 등을 일으켜 화재 등 정전기 장해, 재해의 원인으로 된다.

낙뢰도 정전기 방전의 일종이다.

가) 불꽃방전

불꽃방전은 대전물체 및 접지체의 형태가 비교적 평활하고 그 간격이 적은 경우에 그사이의 공간에서 돌연 발생하는 방전으로서 강한 발광, 파괴음을 동반한다. 이 방전은 전극사이 한 점에서의 전계강도가 절연내력(공기의 경우 약 30㎸/㎝)에 도달할 때 발생하며 방전 Energy가 크고, 이것이 순간으로 방출하기 때문에 점화원 및 전격의 원인이 될 확률이 높다.

불꽃방전은 대전물체가 금속 등 도체일 때 그것과 접지체와의 사이에서 발생하기 쉬우며, 지면으로부터 절연되어 있는 대전인체로부터도 발생할 수 있다. 공기의 최소 불꽃방전 개시전압은 327V로 알려져 있다.

나) 코로나방전

공기 중에 놓인 전극간의 전위차가 불꽃방전 전압에 도달하면, 불꽃방전에 의하여 양전극이 단락된다, 그러나 전극의 형상이 침의 뾰족한 부분, 가는 선 등과 같이 국부적으로 전계가 집중되기 쉬운 경우에는 불꽃전압에 도달하기 전에 전계가 집중되어 있는 부분에만 먼저 절연성이 파괴되고 다른 부분은 절연이 파괴되지 않는 상태가 생긴다. 이러한 방전을 코로나 또는 국부파괴, 부분방전이라고 한다.

코로나 방전은 시간적 및 공간적으로 방전에너지의 집중이 낮기 때문에 수소 가스와 같이 최소착화에너지가 아주 낮은 물질을 제외하면 착화원으로 작용하지 않는다. 섬유제품의 대전방지용으로 사용되는 도전성섬유는 도전성섬유에서 발생되는 코로나방전을 이용한 것으로서, 코로나방전에 의해 발생된 주변 공기의 이온이 주변 섬유의 전하를 중화시켜준다.

다) 스트리머방전

스트리머 방전은 브러쉬방전이라고도 하며 코로나방전의 일종이지만 코로나방전보다 진전하여 브러쉬상의 발광을 수반하는 것을 구별하여 말한다.

라) 뇌상(雷狀) 방전

분말의 투입과 탱크 세정공정 등에서는 대전된 분진 또는 액체방울, 미스트가 공간을 떠 다녀 공간전하를 형성하게 된다. 공간 전하 규모가 크고 공간 전하밀도가 크면 전하구름에서 주위의 돌기된 부분을 향하여 낙뢰와 같은 불꽃방전현상이 나타나기도 한다. 이 방전 에너지가 커서 인화성 가스·증기 뿐만 아니라 가연성 분말의 착화원이 될 수도 있다.

6. 정전기 재해 예방대책[3)]

가. 도체의 대전방지

금속 등의 도체에 대한 대전방지 대책은 접지이며, 접지와 등가적인 대책으로서 접지된 도체와 다른 도체를 전기적으로 접속(본딩)하는 대전방지 대책도 실시되고 있다. 본딩을 포함한 접지의 목적은 대전방지의 대상이 되는 도체와 대지를 전기적으로 접속하여 이들을 등전위 또는 전위차를 최소로 하여 정전유도에 기인한 도체간 또는 도체와 접지물 사이에서의 정전기 방전(주로 불꽃방전)을 방지하는 것이다. 또한 대상이 되는 도체에 발생한 정전기(전하)를 접지선을 거쳐 빨리 대지로 누설시켜서 대전방지를 도모하는 것도 목적이 된다.

1) 접지의 대상이 되는 물체

정전기적인 도체는 체적저항율이 $10^6\Omega\cdot m$ 이하 또는 표면 저항율이 $10^9\Omega$ 이하인 물체이다. 접지의 대상이 되는 도체는 정전기의 발생이나 정전기의 유도현상에 의한 대전이 문제가 되며, 예를 들어 정전기를 착화원으로 한 가연성 물질의 착화폭발 등 정전기에 의한 장해와 재해를 초래할 위험성이 있는 것이다.

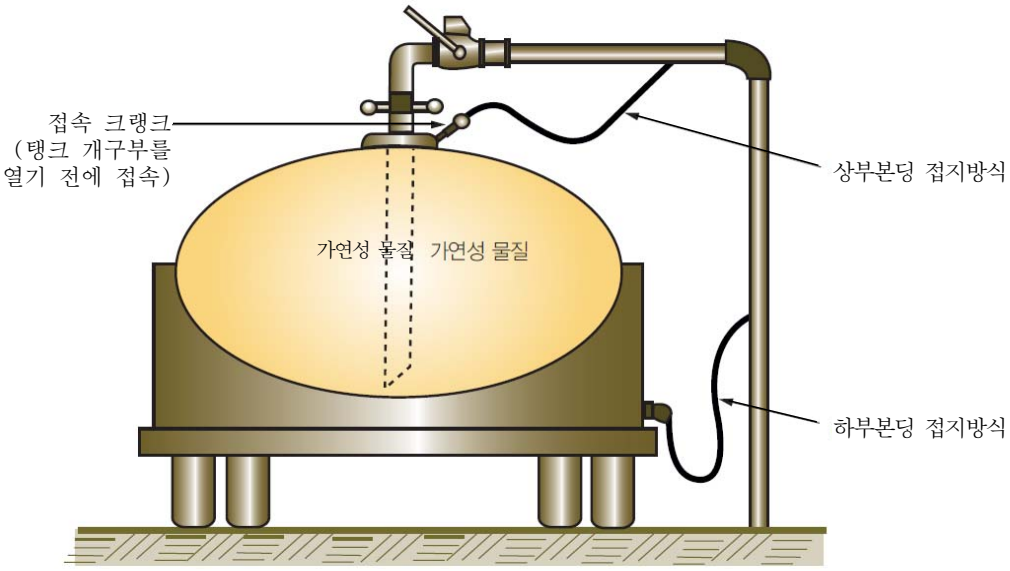
특히, 장치 내부에 있는 도체, 부도체에 접속된 도체, 도장에 의하여 절연된 도체, 액면 계측용의 플루트 등은 보지 못하고 지나치기 쉬우며 정전기 장해나 재해의 원인으로 될 가능성이 높기 때문에 주의를 요한다.

또한 정전기적 도체로서 제시한 체적·표면저항률 보다 큰 저항률의 물체에 대해서는 접지에 의한 대전방지 효과는 너무 기대할 수 없기 때문에 다른 대책(제전기, 대전방지 재료, 계면 활성제, 가습 등)이 필요하다.

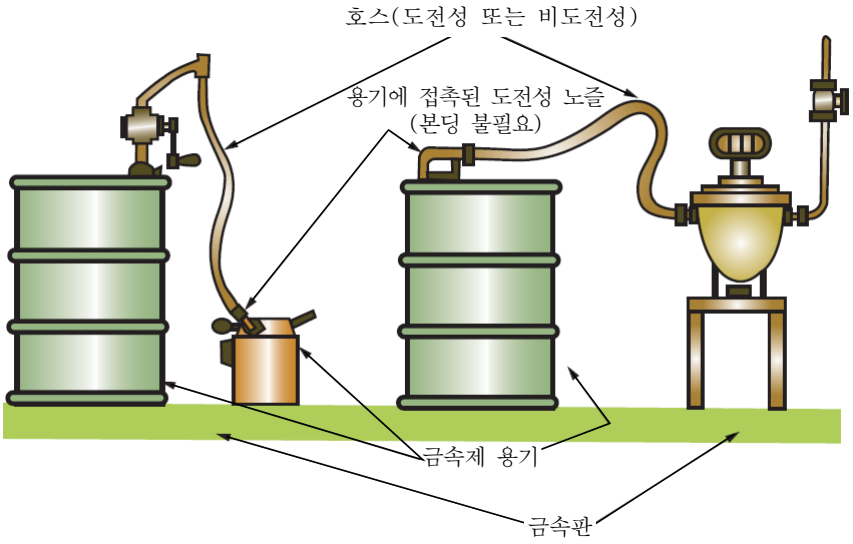
2) 접지저항

정전기 대전을 억제하기 위한 접지저항은 어떠한 경우에도 $1M\Omega$ 이하로 유지되면 충분하다는 것이 경험적으로 알려져 있다. 접지 대상설비부터 대지까지의 전체 저항을 $1M\Omega$ 미만으로 유지하기 위하여 접지극과 대지간의 접지저항은 $1,000\Omega$ 이하가 권장되고 있다.

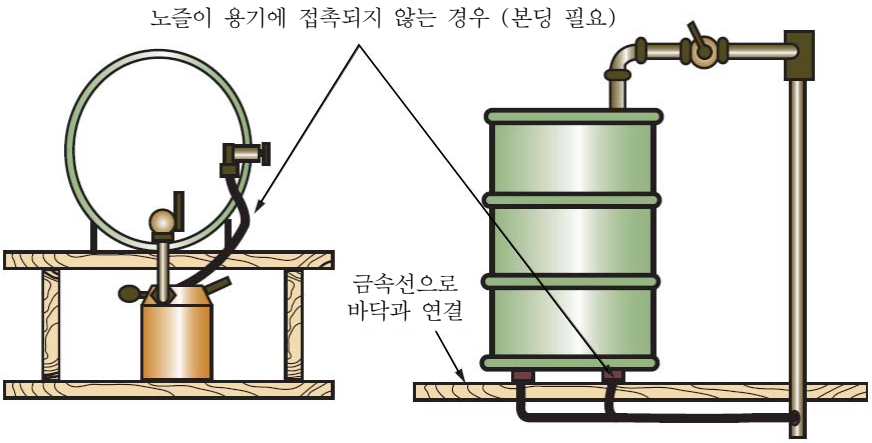
금속 이외의 도체로서 전체 접지저항(누설저항)이 $1M\Omega$ 이하로 되어 있는 것은 새로운 접지가 필요없다.



[그림 3-9] 탱크로리의 접지방법(상부 주입방식)



(a) 본딩이 불필요한 경우



(b) 본딩이 필요한 경우

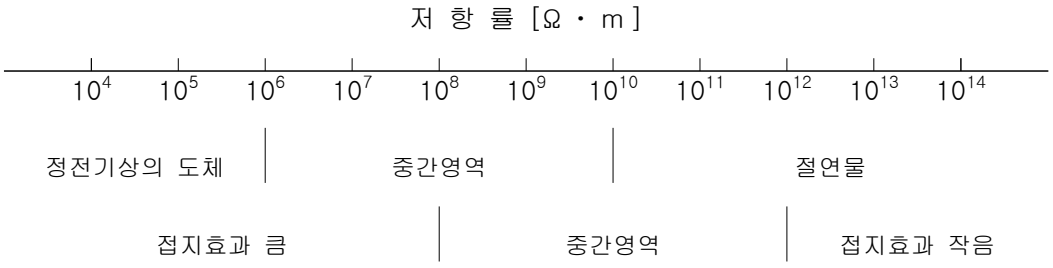
[그림 3-10] 이동용 용기에 인화성 액체를 주입하는 경우의 본딩 방법

나. 절연물의 대전방지

고무, 플라스틱과 같이 저항률이 높은 물질은 정전기가 이동하기 어렵기 때문에 부도체 또는 절연물이라고 한다. 한편, 저항률이 낮고, 정전기가 이동하기 쉬운 물체는 도체라 한다. 정전기적으로 도체인가 절연물인가는 그 저항률에 따른다.

[그림 3-11]은 정전기에 따른 장재해의 방지면에서 본 정전기상의 도체, 절연물 등의 지표이다. 그림에 나타낸 바와 같이, 정전기상의 도체를 포함하여 저항률이 $10^8 \Omega \cdot m$ 이하의 물체는 접지에 의해 거의 완전하게 대전방지 할 수 있다, 한편, 저항률이 $10^{12} \Omega \cdot m$ 이상의 물체는 접지를 하여도 전혀 대전방지가 되지 않는다.

저항률이 10^8~$10^{12} \Omega \cdot m$ 범위의 중간영역 물체는 접지의 효과가 불완전하기 때문에 접지에 따른 대전방지 효과는 정전기 발생조건 등 여러 가지 요인에 의존한다. <표 3-5>에 각종 물질의 저항률을 예로 들었다.



[그림 3-11] 물질의 저항률과 접지에 따른 대전방지 효과

<표 3-5> 주요 물질의 저항률

물질명	체적 저항률 (Ω・m)	물질명	체적 저항률 (Ω・m)
공 기	거의 무한대	등 유	10^{11}~10^{13}
수 돗 물	30	가황천연고무	10^{13}~10^{15}
아 세 톤	2×10^{6}	나 일 론	10^{10}~10^{13}
메 탄 올	7×10^{6}	폴리에틸렌	10^{13}~>10^{14}
벤 젠	3×10^{11}	테 플 론	>10^{16}
톨 루 엔	10^{12}		

이상과 같이 절연물은 단순히 접지하여도 대전방지가 곤란하므로, 대전방지를 위해서는 다음과 같이 정전기 발생방지, 대전을 완화하기 위한 정치시간, 환경의 다습화, 도전성재료의 첨가 등에 따른 도전성의 부여, 미약한 코로나 방전을 일으키는 도전성섬유의 사용, 대전전하를 중화하기 위한 제전기의 사용 등의 방법이 사용되고 있다.

1) 정전기의 발생방지

절연물에 발생한 정전기는 접지로서 제거할 수 없기 때문에 가능한 정전기의 발생 자체를 억제하는 것이 바람직하다. 정전기 발생방지를 위한 일반적인 방법은 접촉면적・접촉압력의 감소, 접촉횟수의 감소, 접촉・분리 속도의 저하, 급속한 박리의 방지, 표면상태의 청정・원활화, 불순물 등 이물의 혼입 방지, 정전기발생이 적은 재료의 선정 및 사용 등이 있다.

실제에는 과대한 정전기 발생을 방지하기 위하여

① 가연성액체를 취급할 때 수송배관중의 초기유속과 최대유속의 유속제한, 탱크에 주입방법으로서 미스트의 대전을 억제하기 위하여 스프레이 로딩의 회피, 물・공기 등의 이물 혼입을 방지한다.
② 분체를 취급할 경우에는 대규모 대전운(帶電雲)이 형성되지 않도록 입경을 크게하고, 취급규모를 가능한 작게하고, 분진의 비산을 억제한다.
③ 종이, 필름을 취급할 경우에는 속도를 제한하고 장력과 속도의 급속한 변화를 피한다.
④ 가연성 액체와 기체의 누설로 인한 분출을 방지하고, 노즐을 통해 분출시 압력을 제한한다.

2) 정치시간(자연완화)

절연물이라고 해도 저항률은 무한대가 아니기 때문에 접지된 용기 등에 접촉된 상태로 대전물체를 놓아두면 도전에 의하여 시간이 지남에 따라 전하가 완화된다. 이 경우 대전량은 일반적으로는 지수함수적으로 감쇄하며 실용적으로 정전기 장・재해를 방지하기 위한 정치시간은 <표 3-6>과 같은 값이 추천된다. 절연성 탱크 또는 글라스라이닝 용기를 사용하는 경우는 벽면 부근의 전하축적의 영향에 따라 완화가 억제되어 대전감쇄시간이 길게되고, 또한 고체액체를 함께 교반・혼합하는 경우에는 교반 정지후에 분산된 물질의 침강・부상에 따라 정

전기가 많이 발생한다. 이 경우에는 통상의 정치시간을 3배 정도 길게 하는 것이 추천된다.

<표 3-6> 정치시간의 추천값

대전물체의 저항률 (Ω・m)	정치시간(분)			
	대전물체의 용적(㎥)			
	< 10㎥	10~50㎥	50~5,000㎥	> 5,000㎥
$< 10^{8}$	1	1	1	2
$10^{8} \sim 10^{12}$	2	3	10	30
$10^{12} \sim 10^{14}$	4	5	60	120
$> 10^{14}$	10	10	120	240

3) 다습화

환경의 습도가 높으면 물체에 충돌하여 흡착되는 수증기의 양이 많아져 물체의 표면에 물분자의 도전층이 형성되기 때문에 표면저항률이 저하되어 대전이 억제된다. 반대로 습도가 낮으면 물체 표면에서의 수분 증발이 촉진되고 표면 저항률이 상승하여 대전성이 증가한다. 장・재해를 방지하기 위한 가습 목표값으로는 65% 정도의 상대습도가 바람직하다. 그러나 인체 건강을 고려한 경우에는 50% 정도의 상대습도가 추천된다. 가습의 방법은 실내 또는 국소적인 대전방지에 유효하다.

4) 도전성의 부여

고무, 플라스틱 등 절연성재료에 도전성을 부여하는 방법은, 표면의 도전화와 내부 도전화의 2가지 방법이 있다. 표면을 도전화하는 방법에는 대전방지제(계면활성제)의 첨가, 도전성 도료, 도금 등이 있으며 내부를 도전화하는 방법으로는 금속물질・카본블랙 등의 혼입, 도전성 폴리머의 사용 등이 있다.

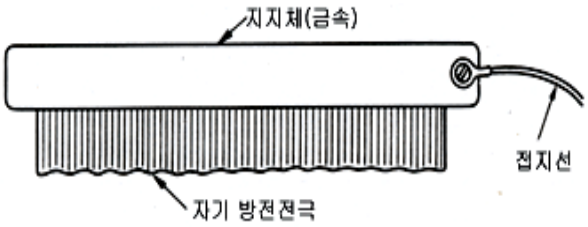
대전방지제의 대표적인 것은 계면활성제이며 이것이 공기중의 수분을 흡착하여 물체 표면의 도전성을 증가시킨다. 표면을 도전화하는 대전방지제의 일반적인 특성은 습도 의존성이 커서 상대습도가 40% 정도 이하에서는 대전방지성능이 저하되는 것과, 물세척이나 닦아내기에 의하여 표면의 계면활성제가 제거되어 대전방지효과가 오래 지속되지 않는다는 것이다.

5) 정전기 대전방지용 제전기 사용

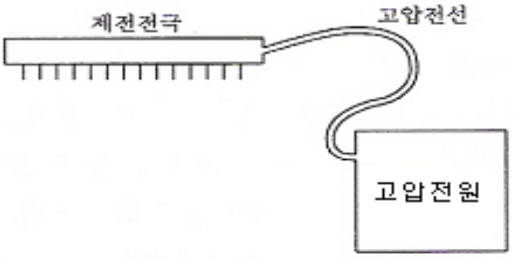
대전된는 물체 주변에 대전전하의 극성과 반대극성의 이온을 공급하면, 쿨롱의 힘이 작용하여 이 이온이 대전전하에 흡수되어 중화됨에 따라 정전기 대전의 소멸이 이루어진다. 제전장치는 일반적으로 제전용의 공기이온을 생성・공급하는 장치로서 코로나방전, 방사선에 따른 전리작용와 X선과 자외선을 조사하는 방식이 활용된다. 가장 많이 사용되는 것은 침상전

극에 교류 고전압을 인가하여 코로나 방전에 의한 양·음이온을 교대로 생성 공급하는 교류전압인가식 제전기이다. 인화성물질 사용장소에서 사용하는 교류전압인가식 제전기는 제전기 자체로 인한 착화원 제공 위험성을 없애기 위하여 방폭형이 사용되어야 한다.

자기방전식 제전장치는 도전성섬유를 혼입한 천·실, 도전성 필름 등을 접지한 금속제 홀더에 부착한 간단한 구조로서 대전물체와 도전성섬유로 된 자기방전전극 사이에 발생되는 전위차에 따라 자기방전에서 코로나방전이 발생되고 주위의 공기를 이온화시켜 정전기 중화용 공기이온을 대전물체에 공급하는 방식이다.



[그림 3-12] 자기방전식 제전기



[그림 3-13] 전압인가식 제전기

다. 작업자의 대전방지

작업자의 대전방지 대책으로는, 작업자의 인체에 붙이는 물건, 작업중에 접촉하는 물질과 재료·도구 및 작업장 바닥에 적당한 도전성을 주어 대전전하가 신속히 확산·누설되도록 하는 것이다. 정전기 대책용품은 착화방지대책용과 전자디바이스·전자기기에 대한 대책용으로 대별되지만, 양자는 목적과 사용환경이 다르므로 종류와 형태가 크게 다르다.

현재 사용되고 있는 대부분의 정전기대책용품의 기본원리는 도전의 원리로 인체전위를 대지전위값에 가까이 되도록 하는 것으로 인체로부터 대지까지 도전경로가 확보되어야 한다. 특히 안전대책의 경우는 최악의 조건을 가정하여 대책을 수립할 필요가 있으며, Fail-safe, 이중안전 등의 대책이 바람직하다.

한편, 전자 디바이스를 취급하는 작업에서는 보호 레벨에 적합한 용품·자재를 사용하면 좋다. 즉, 대책의 목적과 대상에 따라 적절한 대책을 시행함으로서 과도한 비용을 억제할 수 있는 것이다. 자재의 대전방지효과에 대해서는 영구적이지 않고 경년변화하는 것이 있으므로 주기적인 체크 등 유지관리도 고려하여야 한다. 정전화나 손목밴드(Wrist strap)용의 도전체크, 작업장바닥저항측정기 등을 사용하여 대전방지상태를 정기적으로 관리할 필요가 있다.

다음은 착화방지대책 용품과 그 활용에 대한 사항이다.

1) 제전복 및 정전화의 대전방지

도전성섬유가 혼입된 제전복은 저습도 환경에서도 속옷소재, 신발의 도전성에 관계없이 대전방지효과가 발휘된다. 석유계 탄화수소를 상정한 최소착화에너지 0.2mJ 이하를 제전복만으로는 커버할 수 없으나 정전화 병용에 의하여 해결할 수 있다. 따라서 인화성물질 착화방지를 위한 인체대전 방지에 대해서는 제전복과 정전화의 병행 사용이 요망된다. 면 작업복은 상대습도가 낮은 장소에서 제전효과가 떨어지므로 위험한 장소에서의 작업복으로서는 바람직하지 않다.

인체의 정전기를 소멸시킬 목적이라면 신발 바닥의 전기저항은 낮으면 낮을수록 좋지만 저압전기회로의 활선에 접촉했을 경우의 감전 위험성을 고려하여 정전화의 저항은 10^5~$10^8\Omega$이 바람직하다. 즉, 인체가 저압 등 활선에 접촉되었을 경우 인체에 흐르는 전류값이 커짐에 따라 위험도가 커지므로 신발바닥의 전기저항이 낮으면 감전에 의한 위험성이 커진다. 따라서 감전위험성을 적절히 낮추면서 정전기는 충분히 대지로 방류할 수 있는 적당한 저항값의 채용이 필요한 것이다.

2) 작업장 바닥의 영향

장판 등 절연성이 높은 바닥재질은 인체에 대전된 정전기를 땅으로 내보내게 하는데 장해가 되고 또한, 바닥을 걸어다닐 때 바닥면과 신발 밑창과의 마찰에 의하여 정전기 마차대전에 의하여 인체가 대전된다는 문제점이 있다.

정전화를 착용하여도 바닥이 절연성이면 인체는 접지된 것이 아니기 때문에 유의하여야 하며, 콘크리트 바닥 그대로라면 문제가 없으나 플라스틱 바닥재는 정전화의 효과를 무산시킨다. 최근에는 플라스틱 바닥재에도 대전방지가 시공된 것이 만들어지고 있어서 사용이 가능하다.

안전면에서 보면 바닥재의 전기저항이 $10^8\Omega$ 이하로 하는 것이 바람직하지만 정전화 착용을 할 때는 $10^{10}\Omega$ 정도라도 충분히 안전을 확보할 수 있다.

이 정도의 저항값을 유지하기가 어려워 바닥에 물기를 뿌릴 수 있는 경우에는 바닥면에 수막을 형성할 정도의 물을 뿌리는 것으로 바닥의 도전성은 유지될 수 있다. 바닥의 저항도 정전화와 같이 정기적으로 전기저항을 측정하여 도전성이 유지되고 있는 것을 확인 할 필요가 있다.

라. 인체대전에 의한 정전기 장・재해[3)]

정전기에 의한 생산 공정에서의 장해 및 재해는 크게 정전기의 역학현상에 의한 것, 방전현상에 의한 것으로 나눌 수 있다. 역학현상은 대전한 정전기에 의해 반발, 흡인력이 발생하는 것이고, 이로 인한 생산 공정상의 장・재해는 분말의 응집으로 구멍 또는 망의 막힘, 실의 엉킴, 인쇄불량, 섬유의 보푸라기 일기, 의복의 휘감아 달라붙기, 제품오염 등이 있다.

방전현상으로 인한 장・재해는 인체에의 전기 충격, 가연성 물질의 화재・폭발, 사진・X선 필름의 감광, 반도체 소자 등의 파괴, 전자 노이즈로 인한 전자설비 오동작 등이 있다.

1) 인체에의 전기 충격

날씨가 건조한 추운계절에 카펫 위를 걸어가서 도어부분에 손을 접촉할 때나 자동차를 타고나서 내리려고 자동차 문을 잡을 때 전기 아크가 발생하면서 충격을 받을 때가 있다. 이는 대부분 인체에 축적된 정전기가 손끝 등이 접지체와 닿기 바로 전에 방전됨에 따라 일어나는 현상이다. 그때의 인체부분의 전위와 전기 아크충격에 대하여 생각해 보면 <표 4-2>와 같다. 인체가 정전기현상으로 대전되어 전격을 느끼는 것은 대략 3,000V를 넘는 상태라고 볼 수 잇다. 정전기는 전위 즉, 대전전압은 아주 높지만 전체 보유 에너지가 작아 전류가 적고 짧은 시간에 모두 흐르기 때문에 감전사고 등으로 진행되는 사례는 없지만 전기 충격에 의한 추락 등 2차재해 발생에 주목할 필요가 있다.

<표 4-2> 인체 대전과 전격과의 관계

인체 대전 전위 (kV)	전격의 정도	비 고
1.0	전혀 느끼지를 못한다.	
2.0	손가락 바깥쪽은 느끼지만 통증은 거의 없는편이다.	미소한 방전음 발생(감지전압)
2.5	방전한 부분이 바늘에 살짝 찔린 느낌, 깜짝 놀라는 정도	
3.0	따끔한 통증을 느끼나 아프지는 않지만 확실하게 느낀다.	
4.0	손가락에 미소한 통증을 느끼고 바늘에 찔린 통증을 느낀다.	방전의 발광을 볼수 있다.
5.0	손바닥 또는 팔뚝부분까지 쇼크를 느껴 아픔을 느낀다.	손가락 끝에서 방전 발광이 뻗는다.
6.0	손가락에 강한 통증을 받고 쇼크 후 팔이 무거움을 느껴진다.	
7.0	손가락과 손바닥 부분에 강한 통증과 저릿한 느낌을 받는다.	
8.0	손바닥과 팔뚝부분까지 저릿한 느낌을 받는다.	
9.0	손목에 강한 통증과 손이 저리며 무거운 느낌을 받는다.	
10.0	손 전체부분에 통증과 전기가 흘러나간 느낌을 받는다.	
11.0	손가락에 강한 저림과 한께 손 전체에 강한 쇼크를 느낀다.	
12.0	강한 쇼크로 인하여 손 전체를 강타당한 느낌을 받는다.	

(주)인체의 정전 용량 90㎊

2) 화재 및 폭발

가연성 가스, 인화성 액체 증기, 분진 등 가연성 물질이 공기과 같은 지연성(支燃性) 가스와 섞여 그 혼합농도가 폭발범위 내에 있으면 정전기 방전이 착화원이 되어 화재・폭발을 일으킨다.

가) 화재・폭발의 발생한계

정전기에 의한 화재, 폭발은 다음의 조건이 만족할 때 일어날 수 있다.

① 가연성 물질(가연성 가스・증기, 분진)이 공기 등과 혼합해서 그 농도가 폭발한계 내에 있을 것(폭발성 분위기를 형성하고 있다)

② ①의 폭발성 분위기에 착화시키기 위해서는 최소착화에너지를 초과하는 충분한 방전에너지를 방출하는 정전기 방전이 있어야 한다.

정전기의 방전에너지는 일반적으로 대전상태가 같더라도 대전물체가 도체인 경우와 절연체인 경우가 다르므로 폭발, 화재의 발생한계를 나타내는 가늠도 대전물체가 도체 또는 절연체의 어느 것인지에 따라 다르게 이를 고려해야 한다.

<표 4-3> 가연성 물질의 최소착화에너지 예시

등급	가연성 가스명	최소착화 에너지농도 (%)	최소착화에너지 (10^{-3}J)	
			공기 중	산소 중
10^{-5}J grade	이황화탄소	6.52	0.015	
	수소	29.5	0.019	0.0013
	아세틸렌	7.73	0.02	0.0003
	비닐아세틸렌	4.02	0.082	
	에틸렌	6.52	0.096	0.001
10^{-4}J grade	옥시 에틸렌	7.72	0.105	
	메틸아세틸렌	4.97	0.152	
	1, 3 부타디엔	3.67	0.17	
	옥시 프로필렌	4.97	0.215	
	메탄올	12.24	0.225	
	메탄	8.5	0.282	
	프로필렌	4.44	0.31	0.031
	에탄	6.0	0.376	
	프로판	4.02	0.38	
	아세티알데히드	7.72	0.376	
	n-부탄	3.42	0.38	
	메틸에틸케톤	3.67	0.53	
	벤젠	2.71	0.55	
	암모니아	21.8	0.77	
10^{-3}J grade	아세톤	4.97	1.15	
	트리에틸아민	2.10	1.15	
	이소옥탄	1.65	1.35	
	톨루엔	2.27	2.5	

<표 4-4> 분말의 최소착화에너지 예시

물질명	폭발하한계 농도 (g/㎥)	최소착화에너지 (10^{-3}J)	물질명	폭발하한계 농도 (g/㎥)	최소착화에너지 (10^{-3}J)
알루미늄	30	10	폴리에틸렌	20	10
유황	35	15	폴리프로필렌	20	25
석탄	40	30	소맥	40	40
에폭시수지	20	9	설탕	35	30
합성고무	30	30	목재	20	20

※ 위 값은 상온, 상압하에서 얻어진 값이며, 분말 입자의 지름이 100㎛ 이하인 경우 최소착화에너지는 더 낮아질 수 있음.

나) 대전물체가 도체인 경우의 발생한계

대전물체가 도체인 경우 이것에서 방전이 발생했을 때 일반적으로는 이것에 축적되어 있는 정전기에너지의 거의 전부가 방전에너지로 되어 방출된다. 따라서 도체의 경우는 이것에 축적되어 있는 정전기에너지가 최소착화에너지 이상이면 폭발·화재가 발생하는 일이

있다고 해석된다.

대전물체가 도체인 경우 이것에 축적되어 있는 정전기에너지 W는 (식 4-4)와 같이 주어진다.

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C}[J]$$ ·································(식 4-4)

단, C는 도체의 정전용량, V는 대전전압, Q는 대전 전하량으로 각각의 MKS계 SI단위이다. 발생한계를 대전전위 V로 표시하면 (식 4-5)와 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2W}{C}}\,[V]$$ ···(식 4-5)

또, 이것을 대전 전하량 Q로 표시하면 (식 4-6) 및 (식 4-7)과 같다.

$$Q = CV[C]$$ ···(식 4-6)

$$Q = \sqrt{2CW}[C]$$ ···(식 4-7)

다) 대전물체가 절연체인 경우 발생한계

대전물체가 절연체인 경우는 이것으로부터 방전이 발생해도 일반적으로 절연체상에 축적되어 있는 전 에너지가 방전에너지로 되어 방출되지 않는다. 따라서 절연체에서의 방전에 의한 폭발, 화재의 발생한계는 일반적으로 도체와 같은 방법으로 구해지지 않는다. 대전물체가 절연체인 경우의 폭발, 화재의 발생한계를 나타내는 가늠은 일반적으로는 얻을 수 없지만 대전전위가 30㎸로 되어있는 대전물체가 있으면 그것에서 기중방전이 발생했을 때 수십 μJ의 방전에너지가 방출되어 착화원이 될 수 있다. 이 결과를 참고하여 폭발, 화재의 발생한계로서는 다음과 같은 대전상태가 하나의 가늠 이 된다고 판단된다.

① 착화에너지가 수 십 μJ인 가연성물질에 대해서는 대전전위가 1㎸이상, 또는 대전전하 밀도가 약 1×10^{-7}C/㎡ 이상인 대전

② 착화에너지가 수 백 μJ의 가연성물질에 대해서는 대전전위가 약 5㎸ 이상, 또는 대전전하 밀도가 약 1×10^{-6}C/㎡ 이상인 대전

③ 대전하여 있는 절연체에 작업자가 접근할 때 방전에 따라 인체가 전격을 느끼는 대전

④ 대전하여 있는 절연체에 접지한 직경 3㎜ 이상의 금속구를 접근시켰을 때 부도체와 금속구 사이에서의 파괴음 발광을 동반한 방전이 발생하는 대전

절연체의 표면 대전전하밀도가 약 1×10^{-4}C/㎡ 이상인 때에는 연면방전이 발생, 수 백 μJ의 방전 energy가 방출된다. 따라서 이 대전량도 폭발, 화재의 발생한계를 나타내는 하나의 가늠이 된다고 생각되고, 정전기 대전이 된 부도체가 위험분위기 중에서 예상되는 조건에 있어서도 과거에 착화원이 되는 방전을 일으키지 않았으면 그 대전은 경험측면에서 폭발, 화재의 발생한계 이하의 대전으로 판단된다. 즉 공장, 사업장 등에서 폭발, 화재의 발생한계를 검토할 때 과거의 자료를 조사하여 이것으로부터 얻은 착화원이 되지 않는 대전을 폭발, 화재의 발생한계를 정하는 기준으로 하면 좋다. 따라서, 부도체의 대전은 도체의 대전과는 다르게 대단히 복잡하므로 폭발, 화재의 발생한계에 대해서는 다음과 같은 경우에는

충분히 주의하지 않으면 안된다.

① 대전 상태가 대단히 불균일할 경우

② 부도체중에 국부적으로 도전율이 높은 부분이 있고 이것이 대전되어 있을 경우

③ 대전되어 있는 부도체의 후면 혹은 부근에 접지된 도체가 있을 경우

④ 대전량 혹은 대전극성이 크게 변화할 경우

라) 액체대전의 발생한계 및 위험성

석유류에 속하는 고절연성 액체가 배관 중을 고속으로 이동할 때 관벽과의 마찰 등에 의한 유속의 불균형, 계량장치, 필터를 통할 때 흐름의 흐트러짐 또는 파이프, 노즐 등에서의 분출, 용기 내에서의 혼합, 교반 및 탱크에서 주입 등에서 대량의 정전기가 발생한다. 한편 정지상태의 액체 중에서 기포가 상승하든가 불순물이 침하할 때에도 정전기가 발생한다.

한편 대전액체가 탱크 등에 주입될 때 전하 상호간에 척력에 의하여 표면에 퍼지는 데, 표면 중심과 탱크에 유도된 전하와의 사이 또는 탱크 외벽과 대지사이에 고전압이 발생되어 방전을 일으키는 원인이 되기도 한다. 특히 파이프 속을 흐르는 절연액체에 유발되는 정전하는 유속과 파이프의 종류에 따라 큰 차이가 있는 데 경유는 유속의 1.75에 비례하는 정전하가 발생하므로 유속을 적당히 취할 필요가 있다.

액체의 절연성이 높을수록 마찰에 의한 대전전하가 집중하므로 고전압이 발생되어 방전에 의한 인화폭발의 위험성이 높아진다. 액체의 경우는 일반적으로 도전율이 10^{-8}S/M 이상이면 정전기 대전이 문제가 되지 않는다.

Ⅳ. 마찰 정전기 측정

1. 정전기 측정장치

가. 정전기 대전전압 측정장치

마찰식 정전기 측정기

나. 장치 구성 및 주요 사양

구 성 부 분	기 능	주 요 사 양	비고
power supply assembly	신발 바닥에 일정한 압력을 가할 수 있고 특정 속도, 가속도, 접촉시간 및 수직하중을 조절할 수 있는 동력 공급부 및 인조발과 연결된 AC 서보모터 및 수평이동 LM가이드로 구성 PC, PLC 기반으로 구동하되 PC에서 기능을 통제할 수 있도록 구성.	- 속도 : 0-1.2 ㎧ - 가속도 : 0-10㎧² - 접촉시간 : 0-1.0s - 압력 : 0.2 -1.0 ㎫ - 하중 built up rate : 10 kN/s - 하중 : 100-1500N - 속도, 가속도 및 토크를 동시 제어 가능	
Frame	본체를 구성하고 수직 및 수평 방향 하중 지지부 작동하중에 의해 구조부의 변형 뿐만 아니라 변위가 발생하지 않는 구조	STS 304 or AL 6061 국부 모멘트 10kN·m를 견딜 수 있는 재질 및 치수로 구성	
Angle measure	미끄러짐 저항 값 또는 미끄러짐 지수 값 표시부.	디지털 각도계 내장 형태로 0 ~ 45 ° 구간 에서 최소 읽음값 0.01°로 하되 출력 값은 미끄러짐 저항 값으로 PC 출력	

구 성 부 분	기 능	주 요 사 양	비고
Artificial foot	2 자유도 이상으로 측면 굴곡이나 전면 굴곡이 가능하며 안전화의 탈부착이 용이한 형태	표준 인조발(BS EN 13287)에 준하는 바닥면적으로 갖고 자동으로 신발치수에 적합하게 변형 가능한 형태. 발목 관절부위에 해당하는 부위는 전후로 약 18로 정도 변형 가능하고 실험시 고정될 수 있는 형태	
position transducer	인조발의 위치, 각도, 속도 등을 측정하여 본 측정장치에 신호 전달	NI 보드나 이에 준하는 신호처리 장치와 포토센서 등으로 위치와 이동거리를 동시에 측정하는 형태	
Dead weight	서보 시스템으로 가압하는 하중을 일부 보정할 수 있는 중량추	표준분동 및 class 2급 정밀 분동 사용	

다. 기술 사양

1) Power supply assembly

- 서보시스템(Variable System)

. Slip(horizontal moving) velocity : 0.0 ~ 1.2 ㎧.

. Slip(horizontal moving) acceleration : 0.0 ~ 10㎧²

. Contact time : 0.0 ~ 1.0 sec.

. Contact pressure : 0.2 ~ 1.0 ㎫

. Normal force built up rate : at least 10kN/s

. Normal force : 100 ~ 1500N

. Torque and movement should be simultaneously controlled

※ 상기 제어조건은 범위 내에서 만족해야하는 것이 아니라 상기 범위 내에서 제어가 가능하여야 함을 나타냄. 즉, 본 시스템은 속도가 0.0㎧에서 1.2 ㎧사이의 어떠한 값에서도 조절이 가능하여야 함을 나타냄. 또한 상기 범위의 명시된 값은 최대오차가 ±2.5% 이내어야 함. 즉, 만일 속도 1.0㎧가 명시된 값이면 0.975㎧에서 1.025㎧ 사이의 정밀도를 가져야함을 나타냄. 속도,토크 동시 제어. 모든 제어는 펄스 제어를 기본으로 함.

- LM 가이드

. 조립면의 가공도 : 20㎛ 이하

. 리그정도 : 12㎛

. 백래쉬 : 5㎛

. 싱글예압 : 가능

. 압쇼바 포함

2) Frame

- Material : STS 304, AL 6061, 듀랄루미늄, 폴리카보나이트, 엔지니어링 플라스틱, 테프론 등 혼합사용

- 강도가 높고 변형이 적은 소재를 사용하되 본체의 하중이 크지 않도록 소재를 선정하여 각 연결부위는 기계가공이 용이하며 쉽게 구할 수 있는 재료로 사용할 것(일부 부품은 직접 제작 대체 가능할 것)
- 국소적인 모멘트가 10kN・m에서도 최대 변형이 측정결과에 영향을 미치지 않는 구조
- 모든 연결부는 철사나 와이어가 아닌 금속 봉으로 연결되어야 하며 실제로 측정될 최대 마찰력보다 20배 정도 큰 하중 용량을 가지는 고강직도로 제작
- 각 측정 후에 인공발이 초기 위치로 복원할 경우 표면과 마찰되지 않게 복귀할 수 있는 형태
- 각 부위의 도장(일반 도색, 분채도장, 아도다이징 등)은 내식성을 가지며 1년 이내에 도장과 관련된 문제가 발생하지 않도록 할 것.
- 조립부에 사용되는 각종 나사 등도 물 등에 의한 부식이 없는 재질을 이용하여야 하며 모든 나사는 KS가 정하는 metric 단위로 사용할 것.
- 조립부는 쉽게 풀 수 있는 구조로 되어 있어야 하며 조립부에 특정 접착제를 사용하지 않을 것.
- 측정 시 장치의 진동에 따라 측정 결과에 영향을 주지 않도록 측정 장치의 전체 강성 및 진직도, 평활도를 유지할 것.
- 전체 측정 장치는 이동 가능한 테이블 위에 설치하고 테이블은 이동 후 고정된 형태를 가지며 상부에 놓인 측정 장치의 작동에 따른 변동이 없을 것.

4) Angle measure
- Device : 디지털 타입, PC 및 기타 제어 보드와 인터페이스를 형성하여 실시간으로 각도 변화 및 제어 가능토록 할 것. 각도 변화는 자동으로 설정된 값으로 이동하거나 수동 스위치로 작동하며 한계각도(0 ° 나 50 °)에서 자동을 정지 또는 스토퍼를 설치하고 실험시 백래쉬 없는 feedback 회로 구성
- Range : 0 ~ 50 °
- Resolution : 0.01 °

※ PLC 사양 : panasonic (position unit外) 및 이와 동등성능
향후 증설대비 입출력 여유접점 확보(1.5배 이상 확보)

※ servo motor 사양 : panasonic 및 동등성능(specification 확인)

5) Artificial Foot
- 안전화 고정용 취부는 고정 기능이 있을 것
- 고정부에서 좌우 10도의 조절 가능한 곡선 LM가이드 형태를 가질 것
- 고정 기능은 앞뒤의 두 부분으로 하되 각기 조절 가능 타입으로 할 것
- 보통 사람의 발에 준하는 모양과 바닥면적(sizekorea.or.kr)으로 갖고 자동으로 신발 치수에 적합하게 변형 가능한 형태.
- 인조발 발목부분은 장력및 각도조절 가능할 것
- 안전화와 내부에서 상대운동을 하지 않을 정도의 하중으로 신발을 고정하고 고정을 위해 가한 하중으로 인한 신발의 변형이 없을 것.

2. 정전기 전압측정기

	모 델 명 : KSD-0108 측정범위 : ±0.1~19.9kV 치수 크 기 : 158X95X34(mm) 중 량 : 약 520g (건전지 포함) 제 조 사 : KASUGA

3. 마찰정전기 측정방법

가. 정전기 대전전압 측정 방법

1) 신발 종류별 측정
- 안전화, 운동화, 정전기대전화, 구두, 슬리퍼 등 5종

안전화	운동화	정전기대전화	구두	슬리퍼

2) 마찰 바닥 재질 : 인조잔디, 유리, 목재, 절연판, 타일, 비닐돗자리, 장판 등 7종

인조잔디	유리	목재	절연판	타일	비닐 돗자리	장판

3) 측정조건
- 신발의 바닥 착지속도 : 5m/sec
- 신발의 바닥 착지각도 : 85도
- 바닥 착지횟수 : 5회, 10회, 15회

4) 측정방법
- 실내 온·습도에 따른 정전기 대전전압 변화 측정
- 각각의 신발과 바닥의 착지횟수에 따른 정전기 대전전압 측정

나. 마찰정전기 대전전압 측정 장면

인조잔디-안전화	인조잔디-구두	인조잔디-슬리퍼	인조잔디-정전기대전화	인조잔디-운동화
유리-안전화	유리-구두	유리-슬리퍼	유리-정전기대전화	유리-운동화
목재-안전화	목재-구두	목재-슬리퍼	목재-정전기대전화	목재-운동화
절연판-안전화	절연판-구두	절연판-슬리퍼	절연판-정전기대전화	절연판-운동화
타일-안전화	타일-구두	타일-슬리퍼	타일-정전기대전화	타일-운동화
비닐돗자리-안전화	비닐돗자리-구두	비닐돗자리-슬리퍼	**비닐돗자리-정전기대전화**	비닐돗자리-운동화
장판-안전화	장판-구두	장판-슬리퍼	장판-정전기대전화	장판-운동화

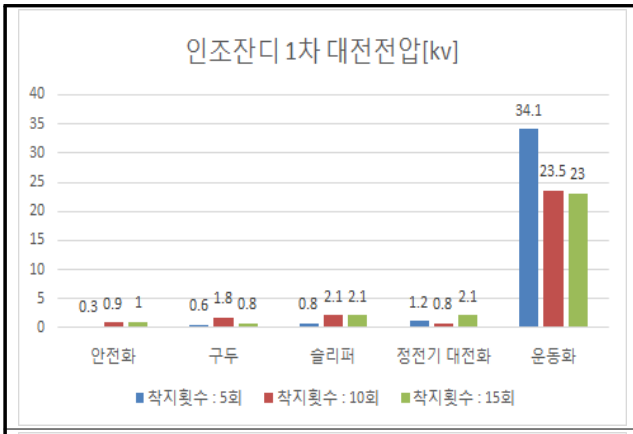
4. 마찰정전기 측정결과

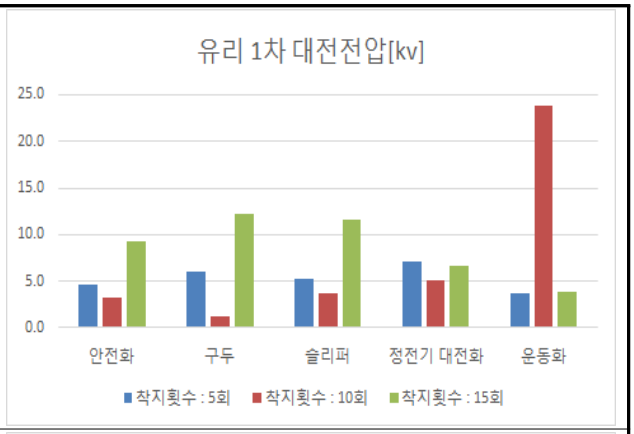
가. 1차 측정결과

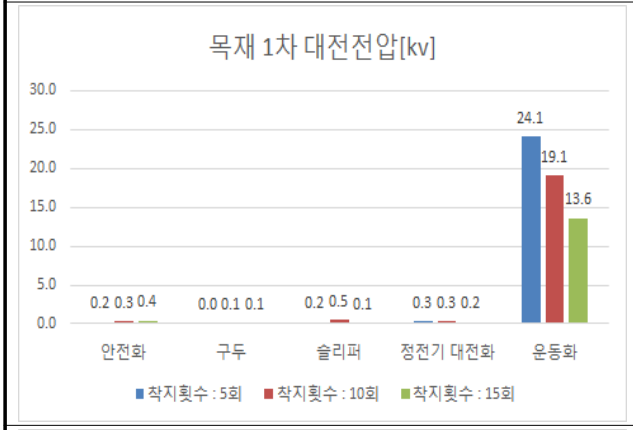
1) 1차 측정결과표

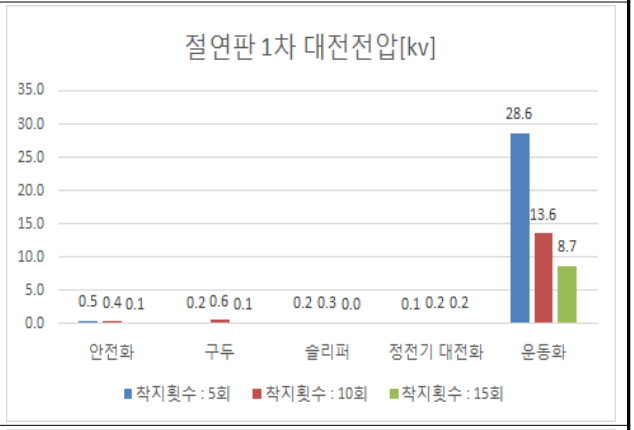
구분		착지횟수 : 5 회	착지횟수 : 10 회	착지횟수 : 15 회
바닥재질	신발종류	대전전위차[kv]	대전전위차 [kv]	대전전위차 [kv]
인조잔디	안전화	-0.3	-0.9	-1
	구두	-0.6	-1.8	-0.8
	슬리퍼	-0.8	-2.1	-2.1
	정전기 대전화	1.2	0.8	2.1
	운동화	34.1	23.5	23
유리	안전화	-4.7	3.2	-9.3
	구두	-6.1	1.3	-12.2
	슬리퍼	-5.2	3.7	-11.6
	정전기 대전화	-7.1	5.1	-6.7
	운동화	3.7	23.8	-3.9
목재	안전화	0.2	0.3	0.4
	구두	0	0.1	0.1
	슬리퍼	0.2	0.5	0.1
	정전기 대전화	0.3	0.3	0.2
	운동화	24.1	19.1	13.6
절연판	안전화	-0.5	-0.4	-0.1
	구두	-0.2	-0.6	-0.1
	슬리퍼	-0.2	-0.3	0
	정전기 대전화	-0.1	0.2	0.2
	운동화	28.6	13.6	8.7
타일	안전화	0.4	-0.5	0.7
	구두	0.3	0.6	0.3
	슬리퍼	0.3	0.9	0.4
	정전기 대전화	0.3	0.4	0.2
	운동화	33.1	31.7	12.9
돗자리	안전화	-4.4	-2.4	-2.5
	구두	-1.3	-1	-0.2
	슬리퍼	0.7	-1.1	-0.1
	정전기 대전화	-1.4	-0.3	-0.7
	운동화	2.6	16.9	12.5
장판	안전화	1.2	0.1	2.4
	구두	2	1.3	3
	슬리퍼	0.7	1.4	2.7
	정전기 대전화	4	3.9	7.7
	운동화	44.9	40.1	28.6
측정일시	**2018-03-30, 2:12 PM**			
온도/습도	**16.2 도/47.7%**			
측정조건	**착지속도 : 5m/sec, 착지각도 : 90 도**			

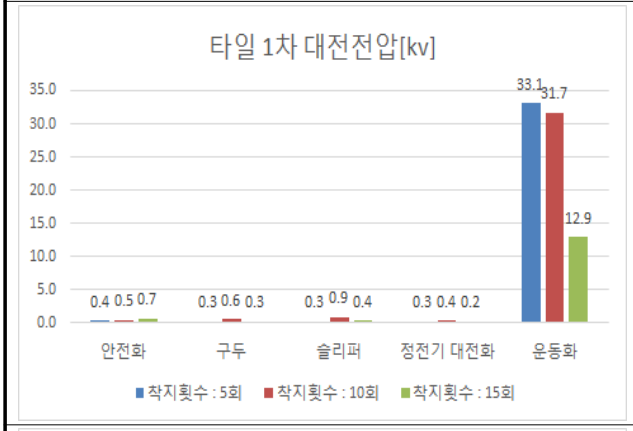
2) 1차 측정결과 그래프

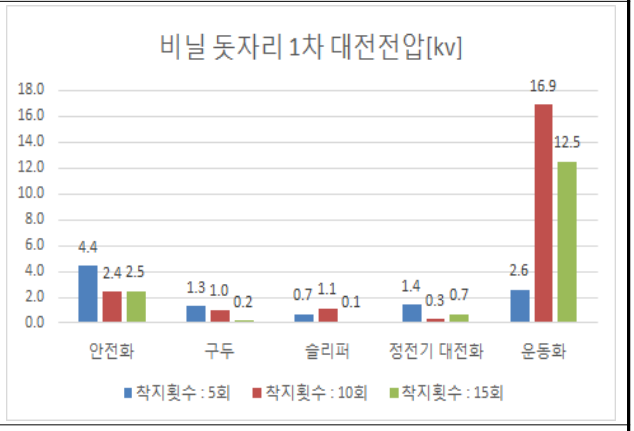


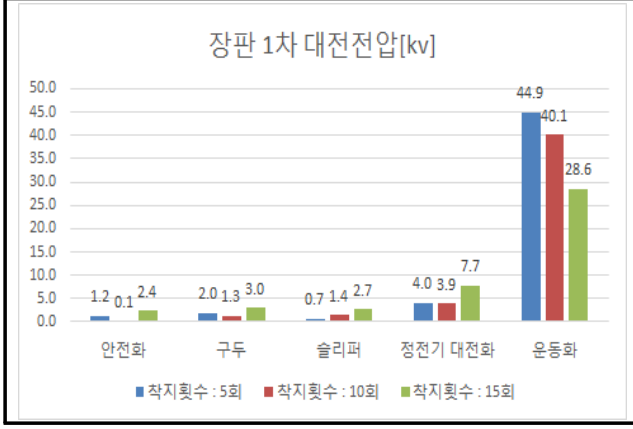












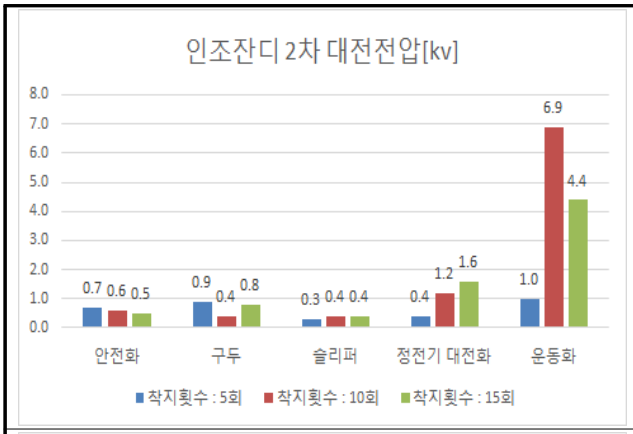
▶ **측정일시 : 2018.3.30. 14:12**
▶ **온/습도 : 16.2도/47.7%**
▶ **착지속도 : 5m/sec**
▶ **착지각도 : 85도**

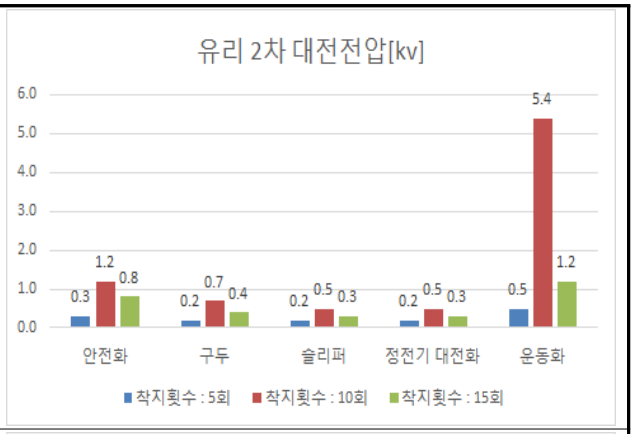
나. 2차 측정결과

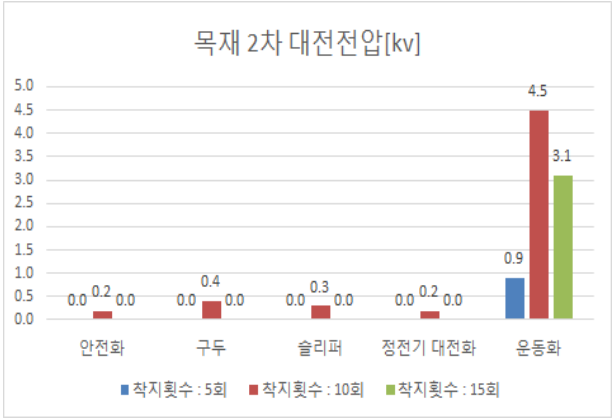
1) 2차 측정결과표

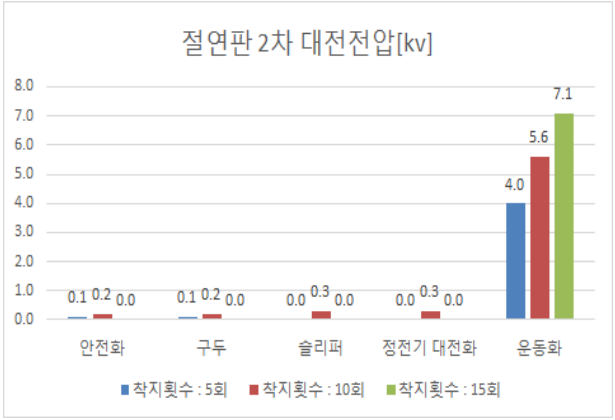
구분		착지횟수 : 5 회	착지횟수 : 10 회	착지횟수 : 15 회
바닥재질	신발종류	대전전위차[kv]	대전전위차 [kv]	대전전위차 [kv]
인조잔디	안전화	-0.7	-0.6	-0.5
	구두	-0.9	-0.4	-0.8
	슬리퍼	-0.3	-0.4	-0.4
	정전기 대전화	0.4	1.2	1.6
	운동화	-1	6.9	4.4
유리	안전화	-0.3	1.2	-0.8
	구두	-0.2	0.7	-0.6
	슬리퍼	-0.2	0.5	-0.3
	정전기 대전화	-0.2	0.5	-0.3
	운동화	0.5	5.4	1.2
목재	안전화	0	0.2	0
	구두	0	-0.4	0
	슬리퍼	0	-0.3	0
	정전기 대전화	0	0.2	0
	운동화	0.9	4.5	3.1
절연판	안전화	-0.1	-0.2	0
	구두	-0.1	-0.2	0
	슬리퍼	0	0.3	0
	정전기 대전화	0	0.3	0
	운동화	4	5.6	7.1
타일	안전화	0	-0.1	0
	구두	-0.1	-0.2	0
	슬리퍼	0	0	0.1
	정전기 대전화	0	0.1	-0.1
	운동화	3.1	3.7	2
돗자리	안전화	-0.2	-0.1	0
	구두	-0.1	-0.1	-0.1
	슬리퍼	-0.1	-0.1	0
	정전기 대전화	0	-0.2	0
	운동화	2.6	2.9	0.3
장판	안전화	0	-0.3	0
	구두	0	-0.1	0
	슬리퍼	0	0.1	0
	정전기 대전화	0.2	0.2	0.3
	운동화	6.8	3.7	5.4
측정일시	2018-06-11, 1:15 PM			
온도/습도	21.3 도/67.3%			
측정조건	착지속도 : 5m/sec, 착지각도 : 90 도			

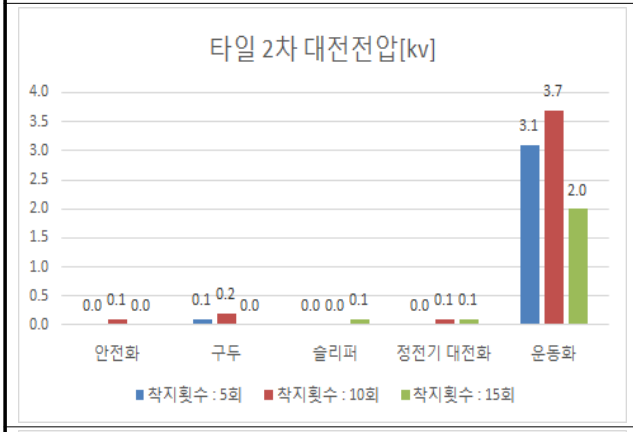
2) 2차 측정결과 그래프

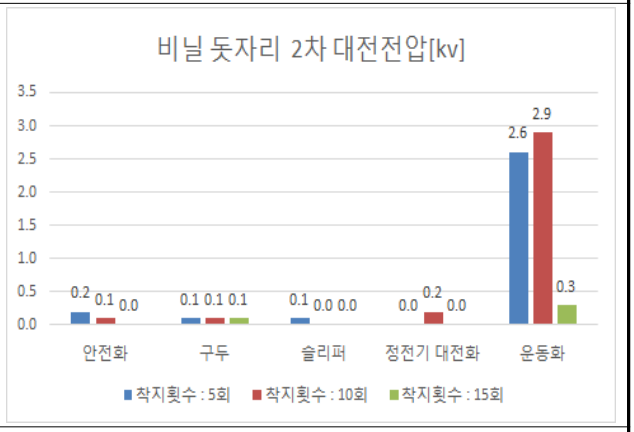


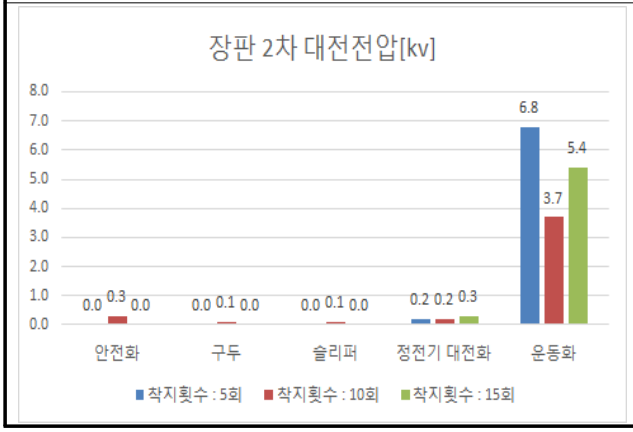










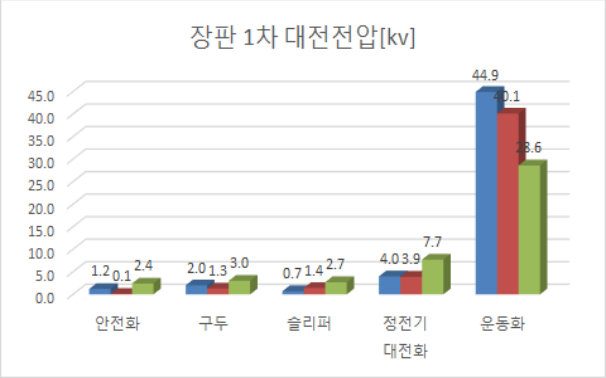


▶ **측정일시 : 2018.6.11. 13:15**
▶ **온/습도 : 21.3도/67.3%**
▶ **착지속도 : 5m/sec**
▶ **착지각도 : 85도**

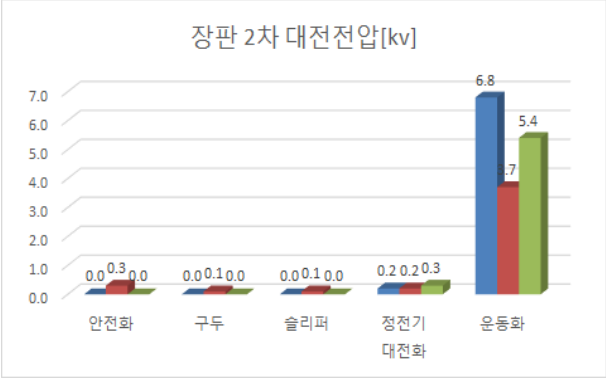
다. 측정결과 분석

1) 신발과 바닥 재질에 따른 정전기 대전전압

가) 장판의 마찰 대전전압



[그림4-1] 장판 1차 대전전압

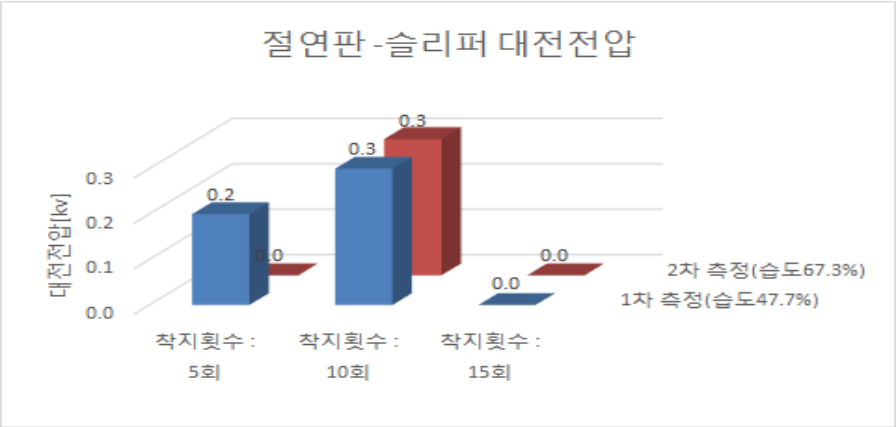


[그림4-2] 장판 2차 대전전압

❍ 바닥재질이 장판일 때 최고의 대전전압 발생

- 각 7개의 재질별로 두 차례에 걸쳐 대전전압을 측정한 결과 [그림4-1]과 같이 바닥재질이 장판인 1차 측정시(온도 :16. 2도, 습도 : 47.7%) 가장 많은 전압이 대전되었음. 특히, 장판-운동화일 때 착지횟수 5회일 때가 가장 높은 44.9[kv]의 대전전압이 측정되었음.
- 2차 측정시에는 측정조건(온도 :21.3도, 습도 : 67.3%)에서 온도와 습도가 높아짐에 따라 [그림4-2]와 같이 대전전압은 장판-운동화일 때 착지횟수 5회일 때 반대로 84.8% 낮게 측정되었음.

나) 절연판과 슬리퍼 마찰 대전전압



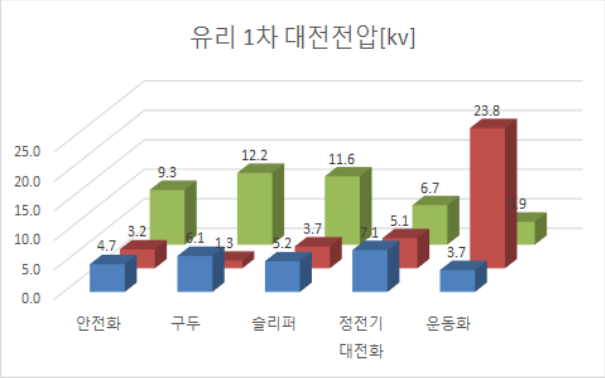
[그림4-3] 절연판-슬리퍼 대전전압

❍ 바닥재질이 절연판일 때 대전전압 가장 낮게 발생

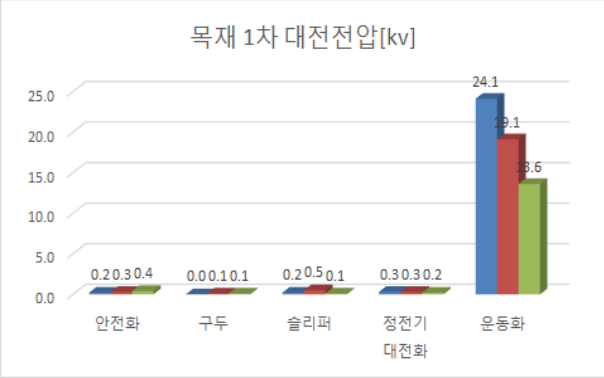
- 바닥재질이 절연판일 때 1,2차 대전전압 측정값을 착지횟수별로 합하여 평균한 결과

[그림4-3]과 같이 각 7개의 재질 중에서 가장 낮게 나타났다.

다) 기타 대전전압 분석



[그림4-4] 유리 1차 대전전압



[그림4-5] 목재 1차 대전전압

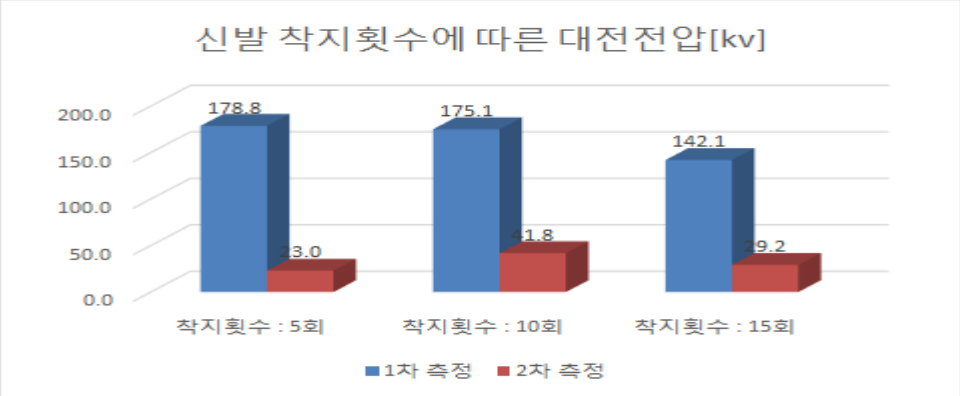
❍ 바닥재질이 유리일 때 각 신발별로 골고루 대전전압 발생

- 바닥재질이 유리일 때 각 7개의 재질별로 두 차례에 걸쳐 대전전압을 측정한 결과 1, 2차 측정 모두 다른 바닥재질에 비하여 [그림4-4]와 같이 비교적 골고루 신발별 마찰 대전전압이 발생되었음.

❍ 바닥재질이 목재인 경우에는 특정 신발에 대전전압 높게 발생

- 바닥재질이 목재인 경우에는 [그림4-5]와 같이 운동화에만 집중적으로 대전전압이 나왔으며, 안전화 등 다른 신발에서는 대전전압이 아주 낮거나 측정되지 않는 경우도 있었음.

2) 신발과 바닥의 마찰횟수에 따른 정전기 대전전압



[그림4-6] 신발 착지횟수에 따른 대전전압

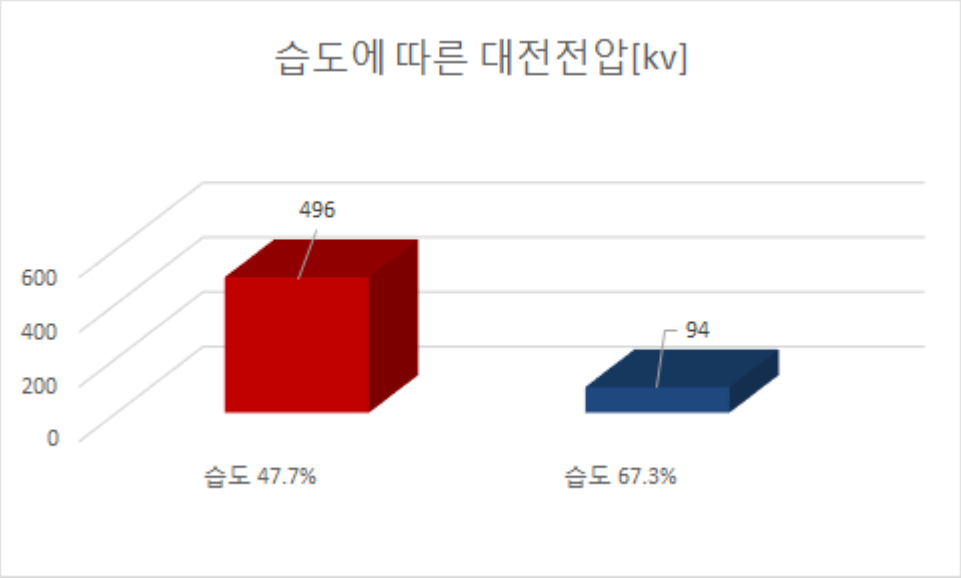
❍ 신발 착지횟수에 따른 대전전압

- 신발의 바닥 착지횟수별로 대전전압을 분석한 결과 1차 측정시에는 5회 착지 후 측정한 대전전압이 178.8[kv]로 가장 높게 나왔으며, 크게 차이는 나지 않지만 10회 착지, 15회

착지 순으로 측정되었음.

- 2차 측정시에는 10회 착지, 15회 착지, 5회 착지 순으로 대전전압이 나온 것으로 볼 때 착지횟수는 대전전압에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 볼 수 있다.

3) 습도에 따른 정전기 대전전압 상관관계



[그림4-7] 습도에 따른 대전전압 변화

❍ 습도에 따른 정전기 대전전압 변화

- 1차 측정인 습도가 47.7%일 때는 [그림4-7]과 같이 정전기 대전전압의 총합이 496[kv]였으며, 습도가 67.3% 인 2차 측정시에는 94[kv]가 측정되어 대전전압이 81.8%가 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 습도는 정전기 대전에 상당한 영향을 미친다는 것이 증명되고 있다.

※ 습도와 정전기 상관관계

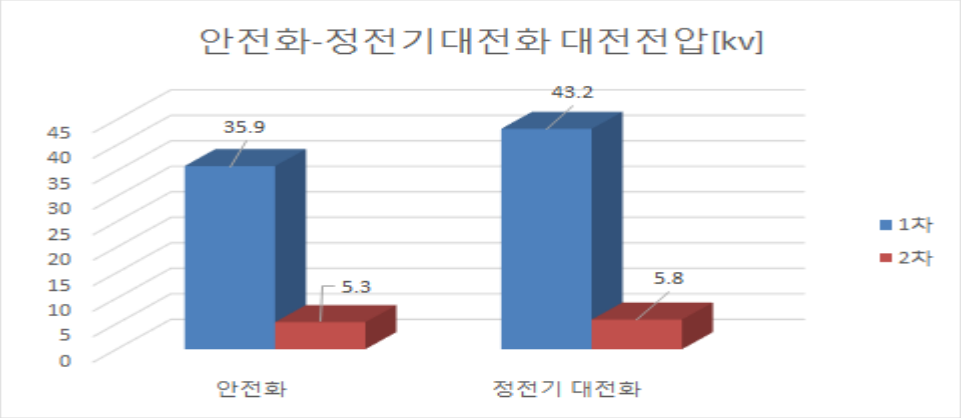
① 다수의 물질에서의 표면저항은 주위의 습도에 의하여 조절이 되어지며, 습도가 65 % 이상에서는 대다수의 물질은 정전기 축적 방지에 필요한 표면 도전율을 포함한다. 또한, 30 % 이하로 습도가 내려가면 절연체로 변화되어 정전기 전하의 축적이 올라가게 된다.

② 습도는 물질의 표면 도전율을 상승시키지만, 발생되는 전하는 대지와 연결된 도전성 경로, 즉 접지가 설치되어야 소멸된다.

③ 소수의 절연물질은 공기로부터 습기를 빨아들이지 않으며, 높은 습도에서도 그 표면저항률은 낮아지지 않는다. 이러한 절연체는 플라스틱 파이프와 용기, 오염되지 않은 폴리머성 물질, 석유류의 표면 등을 들 수 있다.

4) 보호구 대전전압 특성 분석

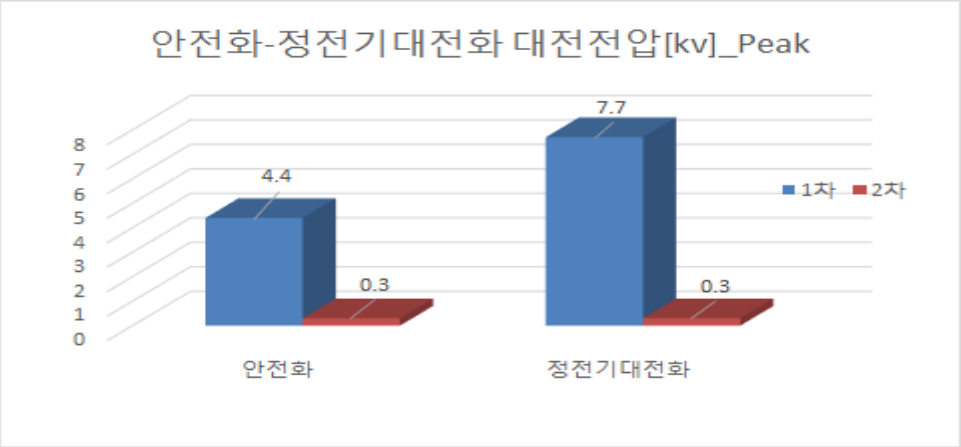
가) 안전화와 정전기 대전화 대전전압



[그림4-8] 신발 착지횟수에 따른 대전전압(합)

❍ 안전화와 정전기 대전화의 정전기 대전전압 비교

- 1차 측정결과에 따른 안전화와 정전기 대전화의 대전전압은 [그림4-8]과 같이 각각 35.9[kv], 43.2[kv]가 측정되어 오히려 정전기 대전화의 대전전압이 안전화에 비해 16.9% 높게 측정되었으며, 2차 측정시에도 역시 정전기 대전화가 8.6% 높게 나왔다.
- 따라서, 정전기 대전화는 바닥이 접지나 도전처리 되어있지 않는 경우에는 정전기 대전방지 기능을 전혀 하지 못한다는 것을 알 수 있다.



[그림4-9] 신발 착지횟수에 따른 대전전압(Peak)

- 1차 측정결과에 따른 안전화와 정전기 대전화의 대전전압의 피크(Peak)치는 [그림4-9]와 같이 각각 4.4[kv], 7.7[kv]가 측정되어 오히려 정전기 대전화의 대전전압이 안전화에 비해 22.7% 높게 측정되었으며, 2차 측정시에는 동일하게 측정되었다.
- 피크치로 비교해도 정전기 대전화는 바닥이 접지나 도전처리 되어있지 않는 경우에는 정전기 대전방지 기능을 전혀 하지 못한다는 것을 알 수 있다.

나) 작업자 인체대전의 위험성

(1) 인체 대전현상

우리 사람들의 신체 주변에는 합성섬유나 플라스틱이 많이 존재하고 있으며, 이들의 대부분은 절연물이어서 일상생활에서

① 옷을 벗을 때 … 속옷과 겉옷 사이의 마찰・박리

② 걸음을 걸을 때 … 신발과 바닥 사이의 마찰・박리

③ 앉았다가 일어설 때 … 옷이 의자와의 사이에 문질러지는 등 마찰현상에 의하여 정전기가 발생하여 마찰, 접촉 등의 운동 에너지가 전기적 에너지로 바뀌어 「역학현상」, 「방전현상」, 「정전유도현상」 등 전기적 물리현상이 나타나게 된다.

이러한 정전기 현상에 노출되는 것은 습도가 낮고 추운 겨울에 옷을 벗을 때 옷이 서로 잡아당기거나 반짝반짝하는 방전음, 자동차에 내려 도어를 잡을때 손이 「전기적 쇼크」를 느끼는 순간이다.

(2) 작업자(인체)의 대전 위험성

① 인체 대전의 방전 에너지

정전기 대전현상에서 작업자 신체의 정전기에 대하여 인체저항은 일만~수백 Ω이어서 정전기적으로 보면 도체에 가깝다고 볼 수 있는 상태이다. 작업자가 신발과 바닥 등으로 인하여 대지와 절연상태에서는 땅과 일종의 축전기를 형성하여 정전 용량이 커지기 쉬우며 도체(인체)상의 정전기는 전체의 전하가 한곳에서 순식간에 방전하는 상황에서 에너지가 높은 방전 에너지가 만들어진다.

구체적으로 보면 절연성 신발을 착용한 상태에서 작업복을 탈의했을(대전량 : 약 82×10^{-8} C) 경우, 작업복에서 대전되는 방전 에너지는 0.57mJ이지만 인체에서의 방전 에너지는 23.4mJ이어서 작업복 대전현상보다 더 작업자 신체에 대전된 정전기를 주목할 필요가 있다.

또한, 작업자의 인체대전은 작업자가 입고 있는 옷보다 신고있는 신발(신발바닥의 소재)이나 작업장 바닥재질에 의해 좌우되는 경우가 훨씬 많고 정전화(작업자 신체-접지간의 전기저항 $7\times10^{5}\Omega$)를 착용한 경우 방전에너지는 절연용 안전화를 착용했을 때보다 약 1/100로 줄어든다.

절연용 안전화를 신고 작업자(인체)가 대지와 절연된 상태에서 인체에는 정전기가 대전되면서 전위가 상승하게 되고 전위가 낮은 금속체나 접지물에 접촉되면서 인체로부터 접지물 등으로 방전이 발생하고, 작업자가 방전음과 청백색의 아크를 동반하는 정전기 방전에 의한 전격을 받을 경우, 인체에 대전된 방전 에너지는 주변의 가연성 물질로 착화 되어 폭발이나 반도체 디바이스의 오작동이나 기능불능 등에 이르게 할 수 있다.

② 인체 대전으로 인한 화재・폭발 위험

인체의 정전 용량은 약 70~200㎊, 인체 저항은 일만~수백 Ω으로 정전기적으로 볼때

는 도체에 가깝고 인체의 방전 에너지는 10~30mJ 정도로 큰 편이다. 인화성 기체로서 석유류 탄화수소의 최소 착화 에너지인 0.2mJ보다 높으며, 인체에서의 정전기 방전 불꽃이 원인으로 작용하여 폭발에 이를수 있는 가능성은 충분히 높다고 할 수 있다.

※ 정전기 방전에너지

▶ 인체 및 작업복에 대전된 정전기가 반응기 등 접지체를 통해 방전된 경우 인체 및 작업복의 정전기 방전에너지(W)

W = $\frac{1}{2}CV^2$ = $\frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-12} \times (10 \times 10^3)^2$ = 5mJ

◇ 인체 및 작업복의 대전전압[V] : 약 10 kV 적용
◇ 인체 및 작업복의 커패시턴스[F] : 약 100 pF 적용

③ 인체 대전을 인한 전자부품의 파괴와 전자 기기에 대한 정전기 장해

최근 정전기 장해로 주목받고 있는 문제로는 전자부품의 파괴나 컴퓨터의 오작동이 있다. IC 파괴의 원인은 반도체 디바이스의 고집적화에 의하여 게이트 전극과 소스 전극 또는 드레인 전극과의 사이에 두께가 매우 얇게(0.1㎛ 이하) 산화막이 끼워 있기 때문이다.

일반적으로는 산화막질의 절연 내압은 10^5~10^7V/㎝라고 한다. 이 절연내압을 두께 수 ㎛ 정도의 단위로 환산하면 수십~수천V이다. 각종 디바이스의 정전기 방전에 따른 파괴 전압은 수백V에서 수만V이지만 LSI, 초LSI에 있어서는 100V의 전압으로 위험한 것이 많고 가장 약한 것에서는 30V 정도의 전압에서도 파괴될 가능성이 있다고도 하며 컴퓨터나 CAD 등을 조립하는 현장에서는 심각한 문제이다. 한편으로는 인체 방전이나 대전된 의자가 책상에 부딪쳤을 때에 순간적으로 임펄스적으로 발생하는 전류가 있으면 주위에 강력한 전자파를 발사하는 정전기 방전(ESD : Electro Static Discharge)에 의한 컴퓨터 오작동의 원인이 될 수 있다. 이들은 컴퓨터 및 그것을 사용한 시스템으로 제어된 장치의 폭주에 의하여 중대한 사고를 일으키거나 컴퓨터내의 파일이 지워지는 등의 장해가 일어난다.

그 밖에 반도체 제작 공정에서는 정전기의 역학현상으로 인하여 반도체 제품에 이물이 부착됨에 따라 제품 불량이 발생되기도 한다.

(3) 정전기방전 방지대책

① 가연성 가스·증기·분진이 존재하여, 정전기 방전에 의한 점화폭발의 위험성이 있는 장소에서 밀착된 물체의 박리 등과 같은 점화원이 될 확률이 높은 연면방전이 일어나기 쉬운 작업이나 공정 등을 회피한다.

② 점화원으로 될 확률이 높은 뇌상방전이 발생되기 쉬운 대규모 대전분진, 미스트 등에 의해 공간 전하운이 형성될 설비·공정 등을 피한다.

③ 대전물체의 면적·체적이 크면 점화원으로 될 확률이 높은 브러시 방전이 생기기 쉬우므로, 취급 규모를 축소하거나 정전차폐 효과를 이용하여 대전물체를 정전기적으로 소면적·소체적으로 나눈다.

④ 도전성 섬유 등을 대전물체에 혼입·근접시켜, 위험한 방전이 발생하기 전에 점화원으

로 될 확률이 지극히 낮은 코로나 방전을 일으켜 안전조치를 실시한다.

다. 인체의 정전기대전 방지용 보호구에 대한 법률검토

1) 대전방지복(KOSHA GUIDE E-124-2012)

가) 대전방지복의 구조 및 재료[4)]

① 대전방지복의 옷감에 사용하는 대전방지 직편물은 7.에 따라 시험했을 때 대전전하량이 7 μC/㎡ 이하인 것이어야 한다.

② 안감 없는 대전방지복의 옷감은 모두 대전방지 직편물이어야 한다. 다만, 불가피하게 보강(補强) 편물을 댄 안감, 주머니옷감 등에 대전방지 직편물이 아닌 옷감을 사용할 경우에는 그 면적이 대전방지복의 표면 또는 속면 노출면적 각각의 20 %를 넘어서는 안 된다.

③ 안감 붙임 대전방지복(솜 넣은 방한복 등)의 옷감은 겉감 및 안감에 대해서도 대전방지 직편물을 사용하고, 통상 속 털옷감(모피)를 사용해서는 안 된다. 어쩔 수 없이 옷깃, 소맷부리 등에 대전방지 직편물이 아닌 옷감을 사용하는 경우에는 그 면적이 대전방지복 겉면 또는 속면 노출면적 각각의 20 %를 넘어서는 안 된다.

④ 금속제부속품(단추, 지퍼 등)은 사용하지 말아야 하며, 어쩔 수 없이 이들을 사용하는 경우에는 착용상태에 있어서 직접외부에 노출하지 않는 구조로 한다.

※ 정전기 대전방지복 필요성과 유의사항

1. 필요성 : 대전방지복 옷감에는 일반적으로 절연성 소재인 직편물이 사용되고 있으며, 착용 중에 작업복과 의자 겉면 등 다른 물체와 마찰· 박리 등을 반복하면 그 부분이 대전되어 전위상승이 발생된다. 전위가 수 kV 이상에 도달하고 여기에 도체가 접근되면 인체대전에 의한 정전기 방전과 반도체 소자 등에 정전유도· 정전기 방전 및 오염물 부착 등이 유발되고 각종 정전기 장·재해의 원인이 될 가능성이 있으므로 대전을 일으키지 않도록 처리한 대전방지복을 착용하여야 한다.

2. 종류 : 대전방지복에는 크게 나누어 옷감에 도전성 섬유를 혼입한 것과 대전방지제 처리를 한 것 두 가지가 있다.

전자는 옷감에 같은 간격으로 도전성 섬유를 혼입하여 도전성 섬유 인근에서 코로나 방전을 발생시킴으로써 옷감에 대전된 정전기를 인체를 통해 대지로 흘려보내어 대전을 방지하는 것이다. 그래서 대전방지복을 입는 경우에는 신발 및 마루의 도전화가 동반되어야 한다.

후자는 대전방지제 처리를 함으로서 옷감의 흡습성을 높여서 저항율을 저감시키는 것이며, 마찰과 박리가 일어날 때 정전기 발생을 억제하고 발생부분에서 다른 부분으로 전하분산을 통하여 대전방지를 하는 것이다. 그러나 이것은 대전방지제의 내구성, 습도가 낮은 경우에는 대전방지 효과가 저하되는 등의 문제전을 가지고 있다.

3. 취급상 유의사항 : 인체를 접지상태로 하려면 정전화 외에 대전방지 작업마루를 함께 시공하여야 한다. 그리고 대전방지복 상의 일부가 신체로부터 이격되거나 어깨 등 신체일부가 노출되지 않도록 대전방지복 착용을 정확히 할 필요가 있다. 또한, 탈의할 때에는 박리에 의한 정전기방전이 발생되기 쉽기 때문에 인화성물질 등과 같은 위험물이 존재할 우려가 있는 장소에서는 탈의하지 말아야 한다.

금속류의 단추와 버클 등은 정전유도에 의한 대전가능성이 있기 때문에 가능한 노출을 금지하여야 한다.

2) 정전기 대전방지화[5](일본공업규격 JIS, T 8103 : 2001)

<표4-1> 종류 및 기호

종류	갑피	기호
정전안전화	가죽	AS-P
	내유성 고무	
	비내유성 고무	
정전작업화	가죽	AS-W
	고무	
	플라스틱	
	비닐레더	
	인공 피혁	
	직물 또는 합성수지 코팅 직물	

AS : Anti-electro Static의 약자

P: Protective Footwears의 약자

W : Working Footwears의 약자

① 정전기 대전방지화의 대전 방지 성능은 1개당 전기저항(R)은 $1.0\times10^5 \leq R \leq 1.0\times10^9\,\Omega$ 이어야 한다.

② 갑피가 가죽제 및 인공피혁 재질의 정전작업화는 겉창의 박리 저항은 250N 이상이어야 한다.

③ 정전기 대전방지화는 인체에 대전하는 정전기를 안창을 도전로 삼아 겉창의 접지면 전면에서 누설시키는 구조로 한다.

④ 정전기 대전방지화의 겉창 재료는 전기저항의 변화가 적은 안정된 재료를 사용하며 물리적 성능은 <표4-2>에 따른다.

〈표4-2〉 플라스틱 또는 발포플라스틱의 물리적 성능

항목	플라스틱	발포플라스틱
인장 강도 MPa	8.0 이상	6.0 이상
신장률 %	300 이상	200 이상

3) 정전기안전화의 성능기준(보호구 안전인증 고시 제6조 관련)

❍ 정전기안전화는 대전방지성능 및 선심의 유무, 신울 등의 재질에 따라 〈표4-3〉과 같이 한다.

〈표4-3〉 정전기안전화의 구분

구 분			대전방지성능 (저항)
신울 등이 가죽제인 것	선심 있는 것	1종	0.1MΩ < R < 100MΩ
		2종	0.1MΩ < R < 10MΩ
	선심 없는 것	1종	0.1MΩ < R < 100MΩ
		2종	0.1MΩ < R < 10MΩ
신울 등이 고무제인 것	선심 있는 것	1종	0.1MΩ < R < 100MΩ
		2종	0.1MΩ < R < 10MΩ
	선심 없는 것	1종	0.1MΩ < R < 100MΩ
		2종	0.1MΩ < R < 10MΩ

비고 1종은 착화에너지가 0.1mJ 이상의 가연성물질 또는 가스(메탄, 프로판 등)를 취급하는 작업장에서 사용하는 것이어야 하고 2종은 착화에너지가 0.1mJ 미만의 가연성물질 또는 가스(수소, 아세틸렌 등)를 취급하는 작업장에서 사용하는 것이어야 한다.

❍ 정전기안전화의 일반구조

- 안전화는 인체에 대전된 정전기를 겉창을 통하여 대지로 누설시키는 전기회로가 형성될 수 있는 재료와 구조로서 대전방지성능구분은 아래와 같다.
- 겉창은 전기저항변화가 적은 합성고무를 사용해야 한다.
- 안창이 도전로가 되는 경우에는 적어도 그 일부분에 겉창보다 전기저항이 적은 재료를 사용해야 한다.
- 안전화는 착용자의 발한이나 마모로 인한 안전화내부의 흡습, 더러워짐 등에 의해서 전기저항의 변화가 적은 안정된 재료와 구조이어야 한다.

❍ 정전기안전화 사용설명서

- 바닥면의 누설저항이 매우 큰 경우(10GΩ 이상)에는 대전방지 성능을 기대할 수 없다는 것
- 안전화바닥에 절연성물질(도료, 수지 등)이 부착된 경우에는 대전방지성능을 기대할 수 없다는 것
- 인체의 대전방지를 목적으로 한 안전화이므로 충전부에 접촉하지 말 것
- 착용 후 일정기간을 경과할 때마다 별표 2의10에서 규정하는 시험방법에 의해 대전방지성능을 재확인 하도록 권장할 것
- 안전화의 대전방지성능을 유지하기 위해 내부구조의 개조 및 절연성 깔창을 사용해서는 안 된다는 것
- 양말은 두꺼운 것을 사용하지 말 것

4) 인체의 정전기 대전방지용 보호구에 대한 법률 검토

❍ 정전기 대전방지화 성능기준은 제도화되어 있으나 정전기 대전방지복 성능기준은 법적 기반이 없는 KOSHA GUIDE에 있고 인체 접지용 팔목접지는 기준자체가 없는 상태여서 그 성능을 신뢰할 수 없는 상태에서 사용되고 있는 실정이다.

❍ 이번 연구 결과에서 보듯이 일반 안전화와 정전기 대전방지화의 성능은 바닥이 도전정재질이 아닐 때는 그 차이를 확인할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 산업현장에서 작업자 인체 대전에 의한 정전기 화재·폭발 예방을 위해서는 정전기 대전방지복, 인체접용기구 등의 보호구가 산업안전보건법 시행령 제28조(안전인증대상 기계・기구 등)에 의한 안전인증 대상품에 포함되어야 한다고 볼 수 있다.

제28조(안전인증대상 기계・기구등) ① 법 제34조제2항에서 " 대통령령으로 정하는 것"이란 다음 각 호와 같다. 1. 다음 각 목에 해당하는 기계·기구 및 설비 2. 다음 각 목에 해당하는 방호장치 3. 다음 각 목에 해당하는 보호구 가. 추락 및 감전 위험방지용 안전모 나. 안전화 다. 안전장갑 라. 방진마스크 마. 방독마스크 바. 송기마스크 사. 전동식 호흡보호구 아. 보호복 자. 안전대 차. 차광(遮光) 및 비산물(飛散物) 위험방지용 보안경 카. 용접용 보안면 타. 방음용 귀마개 또는 귀덮개

Ⅴ. 결론

1. 실험의 시사점

가. 인체의 마찰정전기 대전전압에 대한 새로운 분야의 연구

- 정전기 연구는 그동안 물질과 물질간의 마찰, 박리, 유동, 분출대전 등에 의한 점화로 인한 화재·폭발에 대한 연구가 이뤄져 왔는데 이번에 신발과 바닥의 마찰에 따른 인체의 대전현상을 연구함으로써 정전기 연구분야의 다양화와 새로운 실험결과를 얻어 정전기 재해예방에 기여할 수 있음

나. 측정 결과

- 바닥 재질이 장판인 경우 운동화와 마찰하였을 때 정전기 대전전압이 가장 높았으며, 반대로 절연판과 슬리퍼 마찰 대전전압이 가장 낮은 것으로 측정되었다.
- 정전기 대전전압과 습도와의 상관관계는 반비례하는 것으로 나타났으며, 1차 측정인 습도가 47.7%일 때와 습도가 67.3%일 때는 대전전압이 무려 81.8%가 감소되었음을 실험결과로 알 수 있었다.
- 그리고 안전화 등 일반 신발과 정전기 대전방지화는 바닥이 도전성 처리되지 않은 상태에서는 대전방지 성능에서 그 차이를 별로 보이지 않는 다는 점을 주목하여 작업자의 인체 대전보호구와 작업장 바닥 도전처리 또는 접지 등의 조치가 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다.

2. 인체의 정전기대전 방지를 위한 규정 신설 필요

- 정전기 대전방지화는 산업안전보건법 제34조(안전인증)의 대상품이지만 정전기 대전방지복 성능기준은 법적기반이 없는 KOSHA GUIDE에 있고 인체 접지용 팔목 접지기구는 기준자체가 없는 상태여서 그 성능을 신뢰할 수 없는 상태에서 사용되고 있는 실정이다.
- 따라서 산업현장에서 작업자 인체 대전에 의한 정전기 화재·폭발 예방을 위해서는 정전기 대전방지복과 인체접지용 접지기구 등의 보호구는 산업안전보건법 시행령 제28조(안전인증대상 기계·기구 등)에 의한 안전인증 대상품에 포함되어야 한다고 볼 수 있다.

3. 인체의 정전기 관리

인체는 도전성이므로 대지와 분리되어 있으면 전하를 축적할 수 있으며 이러한 전하는 신발과 바닥재와의 접촉과 분리 등에 의해 발생된다. 인화성 혼합물이 존재하고 대전된 인체로부터 점화 위험성이 있는 곳에서는 정전기가 축적되는 것을 방지하는 것이 필요하다. 이러한 인체의 전하 축적을 방지하는 대책에는 다음과 같은 것이 있다.

① 도전성 바닥 및 신발 착용
② 개인용 접지 장치
③ 대전방지 또는 도전성 의류

④ 장갑
⑤ 청소용 천

(1) 도전성 바닥 및 신발관리

① 도전성 또는 대전방지 바닥은 인체에 대전된 정전기의 소멸에 큰 효과가 있다. 바닥 재료는 고체 또는 코팅제품일 수 있으며, 작은 면적이면 접지된 금속판으로 설치할 수 있다. 바닥의 접지저항은 10^8 Ω 이하여야 하며, 오물·왁스 및 기타 고저항 물질의 축적으로 인해 바닥의 도전율이 저하될 수 있으므로 주의한다.

② 도전성 바닥과 함께 사용되는 대전방지용 신발은 인체의 정전기를 소멸시킨다. 대전방지용 신발과 바닥을 통한 접지저항은 10^6 ~ 10^9 Ω이어야 하며, 아주 낮은 최소점화에너지를 가진 물질을 취급하는 장소에서의 저항은 10^6 Ω 이하여야한다.

③ 신발의 저항은 신발의 오물축적 및 접촉면적의 감소에 따라 증가하며, 신발의 도전율은 기능을 유지하기 위해 주기적으로 측정한다.

④ 도전성 신발은 신발과 바닥을 통한 접지저항이 10^6 Ω 이하가 되도록 제작하고, 폭발성 물질이나 낮은 점화에너지의 물질을 취급하는 곳에서 사용된다. 도전성 신발은 상용전원에 의해 감전의 위험이 있는 곳에서는 사용하지 않는다.

(2) 개인용 접지장치

① 대전방지용 신발만으로는 충분한 정전기 제어를 할 수 없는 곳에서는 보조접지장치, 즉 손목띠, 신발 접지기 또는 도전성 덧신을 사용한다. 이때에는 도전성의 증가로 인해 감전위험이 증가하지 않도록 선정한다. 개인용 접지장치는 피부에서 접지까지의 저항이 약 10^8 Ω 이하가 되도록 하되, 접지장치를 통한 감전을 방지하기 위하여 저항의 최소값은 10^6 Ω 이상이 된다. 무릎을 꿇는 등 신발 바닥과 바닥면이 접촉하지 않을 경우에는 접지효과가 없으므로 유의한다.

② 가장 간단한 접지장치는 감전방지를 위해 약 10^6 Ω의 저항이 내장된 접지 팔찌이다. 이 형식의 손목 띠는 정전기의 발생이 많은 환기용 후드 앞에서 작업하는 작업자 및 이동이 제한되는 장소에서 작업하는 작업자가 주로 사용하며, 비상 탈출이 필요한 곳에서는 분리되는 손목 띠를 사용한다.

③ 접지의 연속성을 확보하기 위해 제작사가 지정한 한계치가 항상 유지되도록 점검한다.

(3) 도전성 의류

① 합성 섬유로 만든 속옷에서는 정전기가 대전되어도 위험하다는 구체적인 증거는 없다. 그러나 총포 및 화약을 제조하는 장소에서는 합성섬유로 만든 작업복을 갑자기 탈의하는 것은 아주 위험한 일이다. 위의 장소에서 입고 작업하는 작업복은 정전기 대전방지 기능을 가져야 한다.

② 액체산소를 충전하는 공정 등 산소가 많은 대기에서는 냉각되어진 산소가 작업복에 들어갈 수 있는데, 이때 작업복은 보다 더 높은 인화성 물질로 되어 작업자의 인체에

축적된 정전기가 일시에 방전될 경우 점화원으로 작동될 수 있다.

4. 맺음말

이 연구는 보행 중 신발과 바닥의 종류, 온·습도 등 환경적 요인 그리고 일반 물질과 대전처리 물질의 인체대전에 대한 상관관계와 추이를 분석하였으며, 법적으로 미비한 정전기 대전방지용 보호구에 대한 법규 신설과 산업현장의 인체대전에 의한 정전기 재해예방에 도움이 될 것으로 판단된다.

Ⅵ. 참고문헌

[1] 안전보건공단 2017 연구보고서(정전기 안전용품의 안전인증기준 개발 연구) p5~16
[2] 안전보건공단 2017 연구보고서(정전기 안전용품의 안전인증기준 개발 연구) p17~25
[3] 정전기 안전(2000.2), 안전보건공단, p111~148
[4] KOSHA GUIDE E-124-2012, p2, p14
[5] 일본공업규격 정전기 대전 방지화, p2~3

감사의 글

학위과정을 시작한지 엊그제 같은데 벌써 2년의 시간이 지나 울산대학교 일반대학원 안전보건전문학과 석사과정을 마무리하고 논문을 제출하게 되었습니다. 대학을 졸업하고 안전보건공단에서 산업재해 예방을 위한 산업안전 업무에 몸을 담은지도 벌써 30년이 가까워진 시점에 늦게나마 논문을 완성하게 되어 감회가 더욱 새롭습니다.

이 논문이 나오기까지 수많은 사람들의 도움을 받았습니다. 그분들의 도움이 없었다면 논문이 나올 수 없었을 것이기에 이 자리를 빌려 감사의 인사를 드리고자 합니다.
먼저 언제나 연구에 대한 아낌없는 지도를 해주신 김종면 지도교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 항상 넓은 마음으로 받아주시고 만학도로서의 길을 가르쳐주신 덕분에 제대로 된 즐거운 석사과정과 연구 활동을 할 수 있었습니다. 그 결과 저는 무사히 이 논문을 작성할 수 있었고 석사 졸업을 할 수 있었던 것입니다. 이에 정말 감사드립니다. 그리고 석사 졸업 논문에 날카로운 지적과 따뜻한 조언을 해주신 김두석 교수님과 임기창 교수님께 감사드립니다.
더하여 논문작성에 대한 지속적 관심과 일정을 챙겨주신 김석택 교수님과 김재균 학과장님에게도 깊은 감사의 마음을 표합니다.

또한, 석사과정 동안 학업을 계속할 수 있도록 배려해 주신 박두용 이사장님, 이영순 전이사장님 그리고 공단 임직원 여러분에게도 고마운 마음을 전합니다. 학위과정을 함께하며 즐겁게 공부한 15명의 동기 여러분께도 감사를 드립니다. 업무를 하면서 때론 지치기도 하고 힘들기도 하였지만 함께하는 동기들이 있었기 때문에 서로 의지하고 정보도 교환하면서 잘 이겨나가지 않았나 생각합니다.

마지막으로 부족하지만 언제나 변함없이 저를 믿어 주시고 큰 힘이 되어주시는 어머님과 장인어른, 장모님에게도 감사의 인사를 드립니다. 그리고 곁에서 석사과정을 진학하도록 기운을 북돋아준 사랑스런 아내 이민희 여사와 세 아이들 다원, 다현, 원준에게도 고마움과 사랑의 마음을 전합니다. 곁에 항상 든든한 힘이 되는 가족들이 있었기에 저는 힘든 상황에 굴하지 않고 이겨낼 수 있었습니다.

이렇게 많은 분들의 도움으로 저는 석사 졸업을 할 수 있었습니다. 이러한 도움이 더욱 빛나도록 앞으로도 정전기 재해예방을 위하여 최선을 다하겠습니다.

마지막으로 지면을 통해서 일일이 언급을 하지는 못했지만 그동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한번 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

2018년 12월 17일 오 길 환