

# 옷감 종류별 인체대전 정전기 방전에 의한 인화성물질 점화능력

현종수<sup>1†</sup>

## Ignition Ability of Flammable Materials by Human Body's Electrostatic Discharge by Type of Fabric

Jong Soo Hyun<sup>1†</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Jong Soo Hyun

Tel : \*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\*

E-mail : hjongsoo0817@naver.com

Received : February 2, 2024

Revised : March 24, 2024

Accepted : March 28, 2024

**Abstract** : Unwanted effects of electrostatic phenomena occur in various industries. Electrostatic problems originating from the human body in flammable atmospheres in the industry are especially concerning. A substantial volume of experimental data on the electrostatic charging voltages created on the human body owing to the rubbing of apparel were generated and reviewed during this study. The data were reviewed to determine whether the resultant charging levels of the human body are hazardous in flammable atmospheres. This study was conducted under several conditions, such as different fiber types used in apparel, shoe types, and relative humidities (RHs). The following conclusions were drawn in this study. ① The electrostatic charging levels of the human body owing to the rubbing of apparel increase with the increase in the surface resistances of apparel; however, the electrostatic charging levels may be different depending on the condition of the cloth surface. ② The discharging energy of 1.98-18.5 [mJ] from the human body exceeds the minimum ignition energy of most flammable materials, when removing an overcoat made of polyester, cotton and wool under severe conditions such as wearing height-raising shoes for men. ③ When removing antistatic apparel, the maximum discharging energy of 0.128 mJ from the human body is dangerous if the minimum ignition energy of the flammable material is between  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  [J] Grade; however, a minimum ignition energy of  $10^{-3}$  J Grade of the flammable material is considered safe. ④ While wearing antistatic shoes, the electrostatic charging voltage generated in the human body when removing an overcoat is 30 V; therefore, wearing such shoes is a suitable countermeasure when handling flammable materials. However, the antistatic abilities of shoes reduce when thick socks are worn. ⑤ As RH increases, the electrostatic charging levels of the human body decrease. ⑥ The electrostatic charging levels of the human body from removing a cotton overcoat can ignite the majority of flammable materials when RH is less than 30% under severe conditions such as wearing height-raising shoes for men.

Copyright©2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : electrostatic, electrostatic energy, ignite, human body, flammable atmosphere

## 1. 서론

정전기는 전자사진, 공기청정장치 등의 기본 기술로서 응용되고 있는 반면, 가연성 물질의 화재·폭발, 전기충격, 원재료·제품의 오손 등 산업재해·장해의 원

인이 되는 무서운 흉기로 작용하기도 한다<sup>1,2)</sup>. 산업이 고도화되어 갈수록 산업현장은 복잡·대형화되어, 화학공장의 화재·폭발은 대규모 사업장의 명운과 직결됨은 물론 인근 주민들에게까지 막대한 피해를 줄 수 있다<sup>3)</sup>.

<sup>1</sup>서울디지털대학교 소방안전학부 산업안전공학전공 교수 (Department of Industrial Safety Engineering, Seoul Digital University)

정전기 장·재해는 원재료, 설비 측면에서 분석·관리해야 하는 측면도 있으나, 장·재해의 많은 부분을 제공하고 있는 것이 인체이다<sup>4)</sup>. 인체의 정전기 대전현상은 마찰 등으로 인하여 발생하는 전하와 주변의 대전체로부터 유도전하가 상승 또는 상쇄된 결과로 관측되며, 인체 대전전위는 인체의 대전전하량과 정전용량에 따라 결정되기 때문에 앉은 자세, 신발 종류, 발을 놓는 방법 등에 따라 변화한다<sup>5)</sup>. 인체의 저항은 수 k $\Omega$ ~수백 k $\Omega$ 이어서 정전기적으로는 완전한 도체라고 볼 수 있으며, 인체가 신발과 바닥 때문에 대지로부터 절연된 상태에서는 대지와 사이에 일종의 축전지를 형성하여 도체상의 정전기는 정전용량이 커지기 쉬울 뿐만 아니라 전체의 전하가 한 곳에서 일시에 방전해 버리기 때문에 큰 방전에너지로 되어 장·재해의 원인이 되기 쉽다<sup>6)</sup>.

정전기에 대한 국내 선행연구의 대부분은 옷감의 시료를 통한 실험연구, 사고사례 및 통계를 통한 정전기 안전관리방안 연구, 특정 위험물질에 대한 정전기 관련 폭발 거동 또는 위험성에 관한 연구 등이다<sup>7-9)</sup>. 이금환·정재희는 실제 인체에 의한 실험을 통해 정전기 대전특성과 방전에 의한 위험성을 고찰하였으나, 가스충전소에서 착용하는 작업복(동복)과 일반복 2가지로 한정하여 실험하였고, 위험성 검토 또한 가스충전소로 한정하였다<sup>10)</sup>. 모든 현장에서 실제 발생할 수 있는 다양한 상황을 고려하여 인체 대전 정전기에 의한 화재·폭발 위험성을 평가할 수 있는 선행연구는 부족하다. 현재 산업현장에서는 제전복, 제전화, 도전성 바닥 시공 등 작업자를 둘러싼 많은 정전기 대책을 강구하고 있으나 각 부분에 대한 실험적 데이터가 부족하여 과잉 또는 부족하게 투자되거나 관리되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 현대사회에서 제조·시판되고 있는 종류별로 옷(옷감), 신발 등의 시료를 선정하고, 각종 실험 조건을 작업자가 실제 작업 시 착용할 수 있는 모든 조건을 모의하여 외부의 마찰로 인해 발생하는 인체 대전전위를 측정하였다. 실험 결과치로서 인체의 방전에너지를 산출하여 각 조건에서의 인화성 물질별 착화 능력을 검토함으로써 산업현장에서 정전기 대책 수립 시 최적 대책을 수립할 수 있는 기초 데이터를 제공하고자 한다.

본 연구에서 중점을 둔 사항은 다음과 같다.

첫째, 옷, 신발 등의 시료 선정은 현대사회에서 제조·시판되는 종류별로 수집하여 분류 선정함으로써 작업자가 착용할 수 있는 모든 조건을 고려하였다.

둘째, 인화성물질 착화능력 검토 시 납성용 키높이 구두를 신고 측정한 인체대전전위를 활용하여 가혹한

조건을 고려함으로써, 정전기대책 수립 시 활용이 가능하도록 하였다.

셋째, 사업장에서 잘못 인식되어지고 있거나, 정전기 대책 관리 시 오류를 범할 수 있는 부분을 실험을 통해 확인함으로써 정전기 대책 수립 시 활용하도록 하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 인체 대전전위 측정장치

인체 대전전위 측정은 검출전극에 유기되는 전위가 측정대상물의 전계강도에 비례하는 것을 이용하는 비접촉형 정전기 전위 측정기(Electrostatic Fieldmeter, FMX-002, SIMCO JAPAN, INC.)를 사용하였으며, 측정 시 최대의 평면을 만들기 위하여 양손을 나란히 붙여 펴므로써 손바닥 평면을 만들고, 손바닥 평면에 측정기를 측정거리(25 mm)만큼 접근시켜 측정치를 고정(Hold)시킨 후 그 지시 값을 읽었으며, 매 측정 전에는 접지판을 이용하여 영점을 조정하였다. Fig. 1은 본 연구의 인체대전전위 측정장치의 개략도와 실험 사진이다.

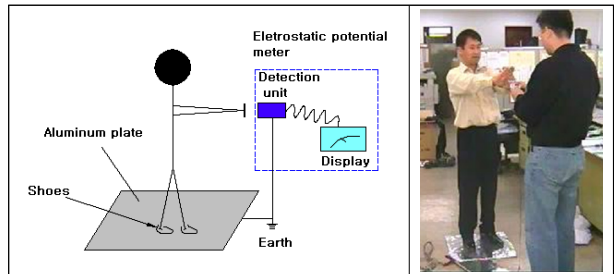


Fig. 1. Experimental apparatus to measure the charging potential of the human body.

### 2.2 신발 대지누설저항 및 섬유 표면저항률 측정장치

신발의 대지누설저항 및 섬유의 표면저항률은 동일한 측정장비(Surface Resistance Checker, SRM-100,

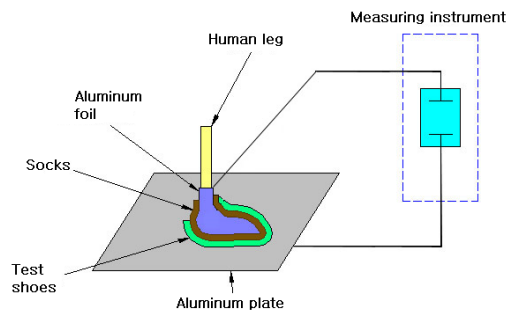


Fig. 2. Experimental apparatus to measure ground leakage resistance of shoes.

SIMCO JAPAN, INC.)로 측정하였으며, ASTM Standard D-257 method를 적용한 장비이다. 신발 안에는 평상시 근로자의 상태를 모의하기 위하여, 면/폴리에스터/폴리우레탄으로 된 시중품 성인용 겨울양말을 착용하였다. Fig. 2는 본 연구의 신발 대지누설저항 측정장치의 개략도이다.

### 3. 연구 방법

본 연구는 남자를 대상으로 상의 외투 벗을 때(마찰) 옷의 섬유종류별 인체 대전전위, 신발 종류별 인체 대전전위, 상대 습도에 따른 인체 대전전위를 측정하였다. 피 실험자와 측정자는 각 1인이 전 실험을 수행하였다.

#### 3.1 옷감 섬유 종류별 상의 외투 벗을 때 인체 대전전위 측정

이금환·정재희(2009)<sup>10</sup>의 실험방법과 같이 옷을 벗을 때 발생하는 마찰효과를 얻기 위하여 상의 외투의 앞면은 개방한 채 양손으로 옷의 앞부분 가장자리를 잡고 좌·우 각각 5회씩 당겨 문질렀으며, 옷을 벗어 던진 후 즉시 인체 대전전위를 측정하였다. 시료남자는 런닝을 입지 않고 속옷은 팬티만 입었다. 발은 고정된 상태이다.

섬유 종류별로 실험하기 위하여 폴리에스터, 모, 면으로 된 셔츠를 입고 각 조건에서 폴리에스터, 모, 면, 제전복의 외투를 벗는 실험을 하였다. 긴 외투일 경우 바지와의 마찰로 인하여 발생하는 효과를 감안하기 위하여 바지도 셔츠와 같은 섬유의 것으로 착용 하였다.

각 실험은 동일조건에서 각 3회 실시하였다. 인체를 대상으로 하는 실험은 재현성이 없고 측정결과에는 오차가 따른다. 또한 실험의 목적이 화재·폭발사고 예방을 위하여 수행되었기 때문에 각 조건에서 실험실시한 3회의 측정값 중 가장 높은 값을 실험값으로 선택하였다. 각 실험 후 축적된 전하를 방류시키기 위하여 인체는 Wrist-strap을 활용하여 접지하였으며, 각 실험 사이에 외투는 접지판 위에 놓고 3분간 방치하였다. 실험 장소는 실내에서 실시하였다.

#### 3.2 신발 종류별 인체 대전전위 측정

3.1항의 실험결과중 인체대전전위가 가장 높게 발생한 셔츠, 외투조건으로 신발 종류별로 발생하는 인체 대전전위를 측정하였다. 모든 실험에서는 신발 대지누설 저항 측정방법에서 제시한 바와 같이 신발 속에 일반 시중품 양말을 착용하였으며, 외투의 문지르는 방법, 실험횟수 등은 3.1항과 동일하다.

#### 3.3 상대습도에 따른 인체 대전전위 측정

3.1항과 3.2항의 실험 결과 중 인체대전전위가 가장 높게 발생한 셔츠와 신발을 착용한 상태에서, 섬유 종류별 외투로 상대습도를 변경하면서 실험하였다.

실험장소는 실내에서 실시하였으며, 상대습도 23%, 33%, 43%, 53%, 63% 조건에서 실시하였다. 상대습도 43% 이하는 실내온도(바닥 난방방식)에 의해 습도를 조절 하였으며, 53%와 63%는 가정용 가습기를 통하여 조절 하였다. 실험은 상대습도 도달 후 10분 이상 경과 후 실시하였다. 외투의 문지르는 방법 등은 3.1항과 동일하다.

### 4. 실험 시 사용한 시료

실험 시 사용한 시료는 현대사회에서 널리 제조되고 유통·사용되는 제품을 활용하였으며, 상세제원 및 실물 사진은 Table 1에서 Table 3까지 표시한 것과 같다.

Table 1. Shirts to experiment with

No.	Fiber mixing ratio (%)	Note
1	Polyester 100	Dress shirt
2	Wool 100	T-shirt
3	Cotton 100	Dress shirt

No. 1	No. 2	No. 3
		

Table 2. Coats to experiment with

No.	Fiber mixing ratio (%)		Note
	Coat lining	Coat outer fabric	
1	Polyester 100	Polyester 100	Gym suit
2	Polyester 55, Cupra 45	Wool 100	Suit (Full lining)
3	Cotton 100	Cotton 100	Denim jacket
4	Polyester 100, Anti-static clothing injected with vertical conductive yarn at 5 mm intervals	Polyester 100, Anti-static clothing injected with vertical conductive yarn at 5 mm intervals	One-piece top and bottom clothing





No. 1	No. 2
	
No. 3	No. 4
	

Table 3. Shoes to experiment with

No.	Type	Nominal size (mm)	Sole thickness (mm) [front/back]	Average sole thickness (mm) [(front+back)/2]
1	Height-raising shoes	250	14.0 / 54.0	34.0
2	Safety shoes	260	11.5 / 31.0	21.25
3	House shoes (slipper)	260	4.0 / 4.0	4.0
4	Anti-static shoes (slipper)	260	19.0 / 34.0	26.5
5	Anti-static shoes + climbing socks	-	(sock thickness 1.3)	(sock thickness 1.3)

No. 1	No. 2	No. 3
		
남자신발 1	남자신발 2	남자신발 3

No. 4	No. 5
	
남자신발 4	남자신발 5

### 5. 실험결과 및 고찰

#### 5.1 상의 외투 벗을 때의 인체 대전전위

RH 53%, 주위온도 13.4°C에서 측정한 외투의 표면 저항률은 Table 4와 같다. 제전복은 합성섬유 원단에 5 mm 간격으로 세로방향으로만 도전사를 삽입한 것으로서 표면저항률이 도전사 방향은 10<sup>6</sup> Ω/□이나 도전사와 수직방향은 10<sup>12</sup> Ω/□ 이상으로 측정되었다. 면 외투는 10<sup>11</sup> Ω/□, 울 외투의 겉면과 내부의 합성섬유 라이닝은 모두 10<sup>12</sup> Ω/□, 폴리에스테르 외투는 10<sup>12</sup> Ω/□ 이상으로 측정되었다.

RH 23%, 주위온도 20°C의 실내에서 상의 외투의 앞면을 개방한 채 옷의 앞부분 가장자리를 양손으로 잡고 좌·우 각각 5회씩 당겨 강제 마찰시킨 후 외투를

Table 4. Coats surface resistivity measurement results

No.	Fiber type	Surface resistivity (Ω/□)	Measuring condition
1	Anti-static clothing	- conductive yarn direction : 10 <sup>6</sup> - conductive yarn vertical direction : over 10 <sup>12</sup>	- RH 53% - Ambient temperature : 13.4°C
2	Cotton	10 <sup>11</sup>	
3	Wool (lining : synthetic fiber)	- outer fabric : 10 <sup>12</sup> - lining : 10 <sup>12</sup>	
4	Polyester	over 10 <sup>12</sup>	

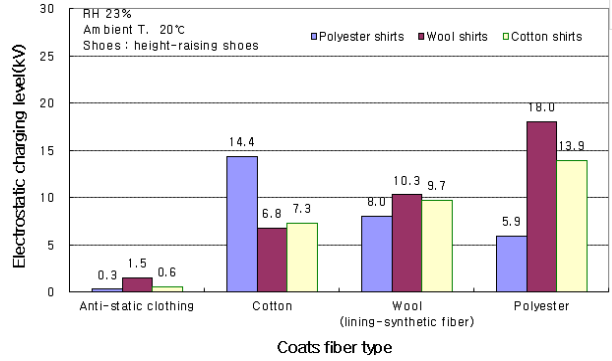


Fig. 3. The electrical potential of the human body when rubbing the top coat 5 times each left and right and then taking it off.

벗어 던지고 인체 대전전위를 측정한 결과를 Fig. 3으로 나타내었다. 시료 남자는 키높이 신발을 신었다.

실험결과 폴리에스테르 섬유 셔츠를 입은 조건을 제외하고는 외투의 표면저항이 증가함에 따라 인체 정전기 대전량(대전전위)이 증가하였다.

폴리에스테르 셔츠를 입은 조건에서는 면, 모, 폴리에스테르의 외투를 벗는 순으로 인체에 정전기가 많이 발생되어, 외투의 표면저항을 차치하고서라도 모-면-폴리에스테르로 이어지는 대전서열<sup>5)</sup>을 고려할 때 모, 면, 폴리에스테르 외투의 순으로 인체 대전 정전기가 많이 발생되어야 하나 실험결과는 그러하지 아니하였다.

또한, 면 외투를 벗는 조건에서는 대전서열을 고려할 때 폴리에스테르 셔츠, 모 셔츠, 면 셔츠를 입은 순으로 정전기량이 많이 발생되어야 하나 실험결과는 폴리에스테르 셔츠, 면 셔츠, 모 셔츠 순으로 나타났다. 이는 옷감의 종류에 따라 표면상태가 동일한 상태가 아님에 따라 마찰조건이 동일하지 않기 때문에 발생한 결과로 사료된다.

폴리에스테르 외투를 벗는 조건에서는 모 셔츠, 면 셔츠, 폴리에스테르 셔츠를 입은 순으로 정전기가 많이 발생되어 여러 연구에서 밝혀진 대전서열에 준하여 정전기가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

안감이 합성섬유(폴리에스테르 55%, 퓨프라 45%)이고 겉감이 모인 외투를 벗는 조건에서는 모 셔츠, 면 셔츠, 폴리에스테르 셔츠 순으로 정전기가 많이 발생되어, 실제 강제 마찰실험 시 주 마찰면이 외투의 안감과 셔츠였기 때문에 외투의 겉감에 비해 안감이 인체대전 정전기량을 결정하는데 크게 기여한 것으로 판단된다.

인체의 정전용량<sup>6)</sup>은 식(1)로 계산될 수 있으며,

$$C = C_s + C_g \tag{1}$$

\* C : 인체의 정전용량,

$C_s$  : 격리된 구로 간주된 인체의 정전용량,  
 $C_g$  : 인체의 발바닥과 바닥을 평행판 콘덴서의  
 양극으로 간주할 때 정전용량

$$C_s = 0.55H [\text{pF}] \quad (2)$$

\* H : 사람의 키(cm)

$$C_g = 0.088 \frac{kA}{t} [\text{pF}] \quad (3)$$

\* k : 신발바닥의 비유전율(유전상수),  
 A : 양신발의 바닥면적( $\text{cm}^2$ ),  
 t : 신발의 두께(cm)

실험 시 남자 시료의 신장 166 cm, 키높이 기능성 구두 밑바닥(재료 : EVA, 비유전율 : 2.25, 평균두께=(앞두께 + 뒷 두께)/2=34 [mm], 면적=194  $\text{cm}^2 \times 2=388 \text{ cm}^2$ )을 고려하면 시료남자의 정전용량은 113.9 pF로 계산된다.

실험결과 및 위에서 계산된 남자시료의 정전용량으로 인화성물질 착화위험성을 검토하면, 모 셔츠에서 폴리에스터 섬유외투를 벗을 시 발생된 18,000V의 대전전위가 방전 시 방전에너지는

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 113.9 \times 10^{-12} \times 18,000^2 = 18.5 \times 10^{-3} [\text{J}] \quad (4)$$

이고, 폴리에스터 셔츠에서 폴리에스터 섬유외투를 벗을 시 발생된 5,900 V의 대전전위가 방전 시 방전에너지는  $1.98 \times 10^{-3} [\text{J}]$ 로서 폴리에스터, 모, 면의 섬유로 된 외투를 벗을 때 축적된 인체 대전 정전기가 방전 시 방전에너지는 1.98~18.5 [mJ]로 나타났다. 가연성물질의 최소 착화 에너지가 대부분  $10^{-5} \sim 10^{-3} [\text{J}]$ 로 이루어진 것<sup>11)</sup>을 고려할 때 일반섬유로 된 작업복은 대부분의 인화성 물질을 충분히 착화시킬 수 있는 정전기를 인체에 축적시킨다는 것을 알 수 있다.

또한 모 셔츠를 입고 도전성 섬유가 5 mm 간격으로 세로로 주입된 제전복을 벗을 때 발생된 인체 대전전위 1,500 V의 방전에너지는 0.128 mJ로 계산되어 제전복 내에 입는 옷의 섬유종류에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 제전복만으로 제전대책 수립 시에는 취급하는 인화성물질의 최소 착화에너지가  $10^{-5} \sim 10^{-4} [\text{J}]$  Grade인 경우에 착화위험이 있고, 최소 착화에너지가  $10^{-3} \text{ J}$  Grade인 경우에는 착화위험이 없는 것으로 판단된다.

## 5.2 신발 종류별 인체 대전전위

5.1항의 실험 결과 중 인체대전전위가 가장 높게 발생한 모 셔츠를 입은 상태에서, 신발을 바꿔 신으면서 폴리에스터 외투 앞면을 개방한 채 옷의 앞부분 가장

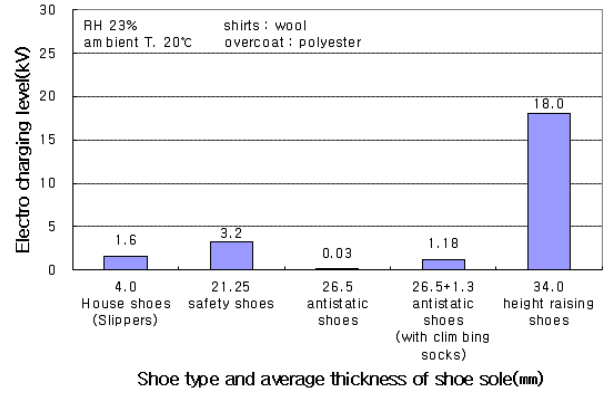


Fig. 4. The electric potential of the human body by shoe type when rubbing the top coat 5 times each left and right and then taking it off.

Table 5. Human-to-ground leakage resistance of test shoes

No.	Shoe type	Leakage resistance (MΩ)	Measuring condition
1	House shoes (slipper)	over $10^{12}$	- RH 23% - Ambient temperature : 20°C
2	Safety shoes	over $10^{12}$	
3	Anti-static shoes (slipper)	$10^7$	
4	Antistatic shoes (with climbing socks)	over $10^{12}$	
5	Height raising shoes	over $10^{12}$	

자리를 양손으로 잡고 좌·우 각각 5회씩 당겨 강제 마찰시킨 후 외투를 벗어 던지고 인체대전전위를 측정 한 결과를 Fig. 4로 나타내었다. 또한 시료 신발의 인체-대지 간 누설저항측정치를 Table 5로 나타내었다. 실험조건은 RH 23%, 주위온도 20°C이었다.

실험결과 신발바닥의 대지누설저항이  $10^{12} \Omega$  이상인 신발에서는 제전화(+등산양말), 실내화(슬리퍼), 안전화, 키높이 구두를 신은 순으로 인체대전전위가 증가 되었다. 이는 식(5) 및 식(6)에서 알 수 있듯이 부도체의 신발에서는 신발의 바닥두께가 두꺼울수록 인체의 발바닥과 바닥(floor) 사이에 발생하는 정전용량의 값이 작아지고, 동일한 전하가 축적된 상태에서 정전용량이 작아지면 대전전위가 높아지기 때문이다.

$$C = \frac{s}{d} \quad (5)$$

\* C : 발바닥과 바닥의 정전용량  
 s : 발바닥과 바닥의 대향면적  
 d : 발바닥과 바닥 간 거리

실험 시 사용한 신발시료의 바닥 두께는 키높이 구두, 안전화, 실내화, 등산양말 순으로 두꺼우며, 등산양

말 아래의 제전화는 일부 도전성이 있어 절연체의 두께에는 기여하지 못한 것으로 판단된다.

$$V = \frac{Q}{C} \tag{6}$$

- \* V : 인체대전전위 값 [V]
- Q : 인체대전전하량 [C]
- C : 대지에 대한 인체의 정전용량

5.1항의 실험 및 검토결과, 5.2항의 실험결과 및 식(6)에서 키높이 구두를 신었을 때 인체정전용량 113.9 pF, 외투 벗을 때 18,000 V의 인체대전전위를 고려하면 인체대전 전하량은  $2.05 \times 10^{-6}$  C이다.

등산양말을 신고 제전화를 신은 상태(대지누설저항 측정치 :  $10^{12} \Omega$  이상)에서 같은 섬유질의 셔츠 및 외투조건에서 같은 양의 전하량이 인체에 축적된다고 가정하고, 그때 발생된 인체대전전위 1,180 V로서 방전에너지를 계산하면

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \approx 1.2 [m.J] \tag{7}$$

이므로, 대부분 최소 착화에너지가  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  [J]인 인화성물질 취급 작업에서는 제전화만의 제전대책 수립시에 두꺼운 양말 착용에 대한 주의가 요망된다. 그러나, 일반적인 양말을 신고 제전화를 신은 경우 대지누설저항이  $10^7 \Omega$  으로 측정되었으며, 인체대전전위가 30 V로 나타났다. 안전율을 고려하더라도 접지되지 않은 도체의 전압이 100 V 이상 되어야 스파크가 발생 가능하므로<sup>12)</sup>, 인체대전전위 30 V는 불꽃 방전이 불가하므로 두꺼운 양말에 대한 관리가 가능한 때에는 도전성 바닥이 시공된 인화성물질 취급 장소에서 제전화만의 제전대책으로서 인화성물질 착화위험을 제거할 수 있는 것으로 판단된다.

### 5.3 상대습도에 따른 인체대전전위

5.1과 5.2의 실험결과 중 인체대전전위가 가장 높게 발생한 모 셔츠와 키 높이 구두를 착용한 상태에서, 상대습도(RH %)를 10 %씩 달리하면서 각 섬유종류별 상의 외투 앞면을 개방한 채 옷의 앞부분 가장자리를 양손으로 잡고 좌·우 각각 5회씩 당겨 강제 마찰시킨 후 외투를 벗어 던지고 인체대전전위를 측정된 결과를 Fig. 5 및 Table 6으로 나타내었다.

실험결과는 RH와 관계없이 외투의 표면저항의 증가에 따라 인체 대전전위가 증가하고, RH의 증가에 따라 인체 대전전위가 감소하였다. 그러나, 폴리에스터 외투의 경우 RH의 증가에 따라 대전전위가 급격히

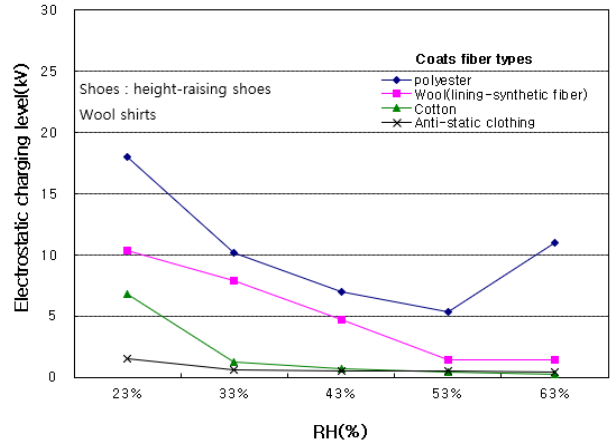


Fig. 5. The electric potential of the human body according to the change in relative humidity when rubbing the top coat 5 times each left and right and then taking it off.

Table 6. The electric potential of the human body according to the change in relative humidity when rubbing the top coat 5 times each left and right and then taking it off (Measuring condition : height-raising shoes, Wool shirts)

Coats fiber types	Electrostatic charging level(kV)				
	RH23% (25.6°C)	RH33% (21.0°C)	RH43% (20.5°C)	RH53% (13.4°C)	RH63% (9.9°C)
Polyester	18,000	10,200	7,000	5,300	11,000
Wool(lining-synthetic fiber)	10,300	7,900	4,700	1,450	1,400
Cotton	6,800	1,210	650	380	220
Antistatic clothing	1,500	590	500	460	420

감소하다가 RH 63%에서는 11,000 V의 인체대전전위가 발생되어 RH 33%에서의 값을 초과하는 전위가 발생되었다.

PVC, Lucite, Bacelite 등 고분자 물질은 대전량이 습도의 증가에 따라 1차적으로 감소함<sup>13)</sup>에 비해 피복지의 경우는 대체로 지수 함수적으로 감소<sup>14)</sup>한다는 연구보고가 있으나 RH 63% 이하의 실험으로는 확인할 수 없었으며, RH 60% 부근에서 정전기 발생량이 극대점이 존재<sup>15)</sup> 또는, 대부분의 섬유 표면저항값이 RH 60~65 [%] 부근에서 마루치가 존재한다<sup>14)</sup>는 연구보고가 있으나 원인이 정확히 규명된 것은 없다. 이것은 모상(毛狀) 시료의 표면에 물 분자의 흡착으로 말미암아 공기 중 이온의 흡착에 따라 전기저항을 감소시키는 원인 이외에 RH 60~65 [%]에서 반대로 전기적인 저항을 높여주는 다른 요인이 있다는 것을 암시한다. 이는 앞으로 계속적인 연구를 필요로 한다.

모의 경우 RH의 증가에 따라 인체대전전위가 급격히 감소하여 RH 53%에서는 RH 23%에서의 대전전위 값의

1/7 값까지 감소하다가 RH 53%이상에서는 대전전위 감소율이 둔화되었다. 이는 모의 경우 RH 약 50% 이상에서 높은 흡수용량을 가진다는 것을 의미한다.

면의 경우 RH의 증가에 따라 RH 33%까지 인체대전 전위가 급격히 감소하다가 RH 33% 이상에서 감소율이 둔화되었다. 이는 면의 경우 RH 약 30% 이상에서 높은 흡수용량을 가진다는 것을 의미한다.

Table 4, Table 6 및 Fig. 5에 의하면 외투를 벗을 시 발생하는 인체 대전전위는 대체로 외투의 표면 저항값이 클수록 인체 대전전위가 높게 나타났으나, RH 53% 이상에서는 제전복보다 면 외투를 벗을 때 발생하는 인체대전 전위가 낮게 나타났다. 이는, 제전복의 경우는 합성섬유 원단에 세로방향으로만 도전사를 삽입한 것으로서 습도가 올라갈수록 면에 비해 제전복(합섬섬유)의 수분흡수율이 낮아 RH의 영향을 적게 받기 때문으로 판단된다. 섬유의 정전기 발생량은 섬유의 전기전도성에 의해 달라지며 이는 마찰 후 분리 시 Back Current의 영향 등이 원인이다.

Hearle<sup>16)</sup>은  $R \cdot M^n = K(R : \text{시료의 저항}, M : \text{시료의 흡수량}, n, k : \text{상수})$ 로 저항과 흡수량의 관계를 규정하였다. 섬유의 전기전도성은 습도 및 흡수량에 따라 달라지는데 이 밖에도 온도, 섬유의 굵기, 직물의 표면상태, 조직, 섬유 내의 불순물이나 대전방지제의 처리에 따라서도 달라진다<sup>17)</sup>. 그러나, 현재 우리가 일상으로 사용하고 있는 폴리에스터나 나일론 등 합섬섬유들은 공장에서 대전방지가공공정을 거치나 대전방지 기능은 세탁으로 인해 소멸되는 것으로 알려져 있다<sup>10)</sup>.

5.1항에서 검토한 인체 정전용량 및 Table 6의 실험 결과로서 면 작업복과 제전복에 의한 인화성 물질 착화 위험성을 검토해 보면 면 외투를 벗을 경우 RH 43%에서 인체대전전위가 650 V이므로 방전에너지는

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 113.9 \times 10^{-12} \times 650^2 = 0.024 \times 10^{-3} [J] \quad (8)$$

로서 인화성물질 최소 착화에너지가  $10^5$  J Grade인 물질을 취급하는 장소에서는 면 작업복이 착화 위험성을 제거할 수 없으며, 5.1항의 실험 및 고찰에서 언급한 바와 같이 RH 23%에서는 면 작업복을 벗을 때 최고 방전에너지(인체대전전위 14,400 V)가 11.8 mJ까지 발생 가능하므로 대부분의 인화성 물질을 착화시킬 수 있다.

일부 보고서<sup>13)</sup>에서 면의 경우 저습도 상태에서의 높은 정전기 대전량을 고려하지 않고 단지 “높은 흡수율로 말미암아 습기를 많이 내포하므로 전기전도성이 증가하고 전기저항성이 낮아져 정전기 발생량이 감소한

다”라고 표현되고 있으나 RH 30% 이하에서는 낮은 흡수율로 인해 정전기가 다량 발생되므로 겨울철 실내습도가 30% 이하인 것을 고려하면 위험물 취급장소에서 면으로 된 작업복 착용 시 장·재해를 일으킬 수 있다.

## 6. 결론

옷감의 섬유종류별, 신발종류별, 상대습도별로 상의 외투 벗을 때의 마찰로 인한 인체 정전기 대전 특성 및 방전 특성 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대체로 외투의 표면저항이 높을수록 마찰로 인한 인체 대전정전기량은 많아지나 옷감의 표면 상태에 따라 마찰조건이 달라 인체대전 정전기량이 다르게 나타날 수 있다.

2) 약조건의 신발(키높이 구두) 착용 시 폴리에스터, 모, 면의 섬유로 된 외투를 벗을 때 축적된 인체 대전 정전기의 방전에너지는 1.98~18.5 [mJ]로서 가연성 물질의 최소착화에너지를 초과한다.

3) 제전복을 벗을 때 축적된 인체 대전 정전기의 방전에너지는 최대 0.128 mJ로서 취급하는 인화성 물질의 최소 착화에너지가  $10^5 \sim 10^4$  [J] Grade인 경우에 착화위험이 있고, 최소 착화에너지가  $10^3$  J Grade인 경우에는 안전하다.

4) 제전화 착용 시 인체 대전전위가 30 V로 나타나 인화성 물질 취급 장소에서 정전기 대책으로서 적합하다. 단, 두꺼운 양말 착용 시 제전화의 제전 능력이 저하되므로 관리되어야 하며, 바닥은 도전성 바닥으로 시공·관리 되어야 한다.

5) 상대습도(RH)의 증가에 따라 인체 대전 전위는 감소한다.

6) 면 외투를 벗을 때 축적된 인체 대전 정전기가 방전 시 방전에너지는 RH 30% 미만에서는 대부분의 인화성 물질을 착화시킬 수 있으며, RH 43% 이하에서는 최소 착화에너지가  $10^5$  J Grade인 물질을 착화시킬 수 있다.

본 연구 결과는 인화성물질 취급 장소에서 인체 대전 정전기로 인한 화재·폭발 재해 예방을 위한 대책 수립 시 활용할 수 있다. 또한, 화재·폭발사고 원인 규명에도 활용할 수 있다.

## References

1) T. Kitagawa et al., “Safety Engineering Course 2 - Explosion”, Safety Engineering Association, pp. 247-248, 1983.

- 2) M. Naito, Fire and Explosion Science, Japan Industrial Safety & Health Association, pp. 66-68, 1987.
- 3) Y. S. Lee, Essential Safety and Safety Equipment”, Korea Industrial Safety Device Manufacturing Association, Seminar on Safety Measures for Chemical Plant Improvement, pp. 7-59, 1997.
- 4) L. Fukuyama, Fire Explosion · Mechanical Materials Edition-Safety Engineering Experiment Method, Nikkan Industrial Newspaper, pp. 231-234, 1983.
- 5) Electrostatic Handbook, The Institute of Electrostatics Japan, p. 133, p. 282, p. 322, 1998.
- 6) D. C. Lee and J. H. Chung, “Prevention of Electrostatic Disasters and Disruptions throughout the Industry”, Sungandang, pp. 37-39, p. 78, 1996.
- 7) Y. M. Chang et al., “A Study on the Electrostatic Characteristics of the Materials Treated by Antistatic Additives”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 10, No. 1, pp. 20-27, 1995.
- 8) S. W. Choi et al., “A Study on the Improvement Plan of Electrostatic Safety Management Level through Injury Analysis”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 5, pp. 37-45, 2019.
- 9) N. S. Kim and D. J. Park, “Experimental Investigations on Explosion Characteristics of LPG/Air Mixture by Electrostatic Discharge Energies”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 6, pp. 26-30, 2011.
- 10) G. H. Lee and J. H. Chung, A Study on the Safety Management of the Electrostatic in Working Clothes at the Gas Station”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 24, No. 6, pp. 39-44, 2009.
- 11) Japan LP Gas Association, LP Gas Technology Overview, KIBODANG, Japan, p. 796, 1981.
- 12) J. S. Chang, A. J. Kelly and J. M. Crowley, Handbook of Electrostatic Process, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 703-722, 1995.
- 13) B. G. Son and J. D. Moon, Contact Electrification of Some Polymeric Solid Dielectric Materials with Mercury, Industrial Development Institute of Kyungpook National University, The Research Report Vol. 3, pp. 84-89, 1975.
- 14) Y. S. Seo and J. D. Moon, “Frictional Electricity of Polyester Blended Fiber”, Industrial Development Institute of Kyungpook National University, The Research Report Vol. 4, pp. 37-42, 1976.
- 15) H. Marumo, Antistatic Agent, SAIWAI SHOBO, Tokyo, 1972.
- 16) J. W. S. Hearle, “11-The Electrical Resistance of Textile Materials : I. The Influence of Moisture Content”, Journal of the Textile Institute Transactions, Vol. 44, Issue 4, p. T117, 1953.
- 17) Y. J. Oh, “A Study on the Generation of Electrostatic by the Type of Fiber”, Industrial Arts and Applied Design Major, Master's Thesis, Sungshin Women's University Graduate School, 1992.