

필름제조 공정의 착화 위험성에 관한 연구

A Study on Firing Risk Assessment of Film Manufacturing Process

민세홍[†] · 허원일*

Se-Hong Min[†] · Won-Il Heo*

경원대학교 공과대학 소방방재공학과, *경원대학교 환경대학원 소방방재공학과
(2011. 4. 8. 접수/2011. 6. 10. 채택)

요 약

본 연구에서는 대전방지필름 제조공장에서의 화재위험성 등을 고찰하였다. 대전방지필름 제조공정에서는 에탄올, 메탄올, 이소프로필알콜 같은 인화점이 낮은 용제가 사용되며 이들 용제의 최소점화에너지는 0.16 mJ~0.65 mJ로 낮은 방전에너지에도 쉽게 착화할 위험성이 있다. 제조공정 각 부분에서 발생하는 정전기 전위를 측정된 결과, 합지 과정의 필름에서 17 kV~20 kV의 전위가 측정되었다. 이는 화재·폭발 방지를 위한 부도체의 대전 목표 값인 5 kV를 초과하는 것이다. 따라서 대전방지필름 제조공장에서 정전기 방전에 의한 화재위험성이 높다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We have considered the fire hazard by the static in anti-static film manufacturing factory on this study. Solvents that the flash point as ethanol, methanol, and iso-propyl alcohol is low are used on the manufacturing process of anti-static film, and the minimum ignition energy of these solvents is ignited easily despite less discharge energy form 0.16 mJ to 0.65 mJ. After the static electric potential produced on each of the manufacturing plants was measured, electric potential on films of paste board is measured form 17 kV to 20 kV. But this exceeds 5 kV, which is electrifiable objective of nonconductor for fire & explode protection. Therefore, We figure out the fire hazard was high by a static discharge in anti-static film manufacturing factory.

Key words : Antistatic film, Electrostatic discharge, Minimum ignition energy, Coating

1. 서 론

1.1 연구목적 및 범위

필름은 플라스틱 제품 중 40%에 이르는 최대시장을 차지하고, 그 중 약 75%가 식품 및 음료 용기, 기타 산업용 포장재로 사용되고 있다.

필름에 사용되는 플라스틱에는 PE(Polyethylene), PP(Polypropylene)와 같은 일반 범용 플라스틱에서부터, 초고내열성 플라스틱인 폴리이미드(Polyimide)에 이르기까지 산업이 발달함에 따라 다양한 종류의 필름이 사용되어지고 있다.¹⁾

최근에는 고기능성 필름의 요구가 증가하여 다양한 플라스틱 필름 제품이 개발되고 있다. 고기능성 필름

은 필름원단에 코팅, 증착, 연신, 래미네이션(Lamination) 등의 방법을 통하여 제조된다. 그러나 코팅이나 래미네이션을 통한 제조공정에서 사용되는 인화성 유기용제는 인화점이 낮고 최소점화에너지도 낮아 쉽게 착화될 수 있다.

정전기로 인한 화재 발생은 환경적요인의 영향이 크므로 화재원인을 파악하는데 어려움이 있다. 이는 정전기에 기인하는 재해의 중요성을 더욱 증가시키고 있으며 재해 방지를 위해서 발생기구, 방전, 착화에 이르는 과정을 분석하고 대책을 수립하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 대전방지필름 제조공장의 현장조사를 통해 발화원인 중 정전기에 의한 유기용제의 화재 위험성 중심으로 화재 안전성평가를 실시하였다. 생산설비에서 정전기 발생량을 측정된 후, 필름제조 시 사용되는 유기용제의 폭발한계, 인화점, 최소점화에너지를

[†] E-mail: shmin@kyungwon.ac.kr

Table 1. Dangerous Accidents by Cause of Fire Ignition³⁾

연도	직화	고온 표면열	용접용단 불꽃	정전기 불꽃	전기 불꽃	총격 불꽃	자연 발열	화학 반응열	마찰열	기타	불명	계
2005	4	3	4	10	12	5	2	-	2	18	11	71
2006	10	6	14	19	22	11	4	2	9	31	7	135
2007	9	14	7	11	7	5	4	6	8	52	17	140
2008	1	4	12	9	11	5	2	3	5	63	6	121
2009	2	4	4	13	11	2	4	4	8	31	6	89
2010	1	2	2	2	6	3	-	2	4	29	10	61
건수	27	33	43	64	69	31	16	17	36	224	57	617
비율	4.4	5.3	7.0	10.4	11.2	5.0	2.6	2.8	5.8	36.3	9.2	100

측정값과 비교하여 정전기로 인한 위험요인을 파악하고 대책방안을 제시하고자 한다.

1.2 정전기 이론 및 화재사례

1.2.1 정전기 화재 이론

정전기는 둘 이상의 물체가 마찰, 충돌, 분리하는 과정에서 전하의 이동에 의해 발생한다. 생성하는 전하가 소멸하는 전하보다 많으면 축적되는데 축적된 전하는 중성상태로 복귀하려는 전기적 힘이 작용하여 불꽃, 브러시, 코로나, 전파 브러시 방전 등의 유형으로 방전이 일어날 수 있다.

방전 에너지 W 는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV(J)$$

C: 정전용량(F)

V: 대전 전위(V)

Q: 대전 전하량(C)

폭발·화재가 발생하기 위해서는 방전에너지가 가연성혼합물의 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy)보다 커야 한다. 또한, 가연성 액체 및 기체와 공기의 혼합비인 폭발한계가 하한치~상한치 범위에 포함되면 접화원에 의해 폭발 위험성이 증가한다.

1.2.2 정전기 화재사례

1997년부터 2006년의 한국전기안전공사 전기재해통계보고서를 참고하였다. 정전기에 의한 화재 및 폭발 사고는 전체 화재건수의 약 0.13%로 낮은 점유율을 보이고 있다.²⁾ 그러나 일반화재와는 달리 정전기에 의한 화재는 인화성 및 폭발성이 매우 강한 물질을 적재 또는 사용하는 장소에서 화재가 발생하므로 화재

의 확산이나 피해가 매우 큰 것이 특징이다. Table 1은 2005년부터 2010년까지 지난 6년간 위험물 화재시 착화원인별 화재현황을 나타냈다. 이 중 정전기 불꽃에 의한 화재발생이 전체 화재건수 중 10.4%로 기타 및 원인불명의 화재건수를 제외하면 발생률이 가장 높다.

Figure 1은 필름제조공장에서 발생한 정전기에 의한 화재 이미지이다. 2007년 김포 필름 제조공장 배합실에서 톨루엔을 금속용기에 담은 과정에서 정전기 방전으로 체류해 있던 인화성 증기에 착화하여 화재가 발생한 사례이다. 이 화재로 인해 공장은 전소하여 1명이 사망하고 3억 2천만원의 재산피해를 입었다.⁴⁾

최근에는 2010년 포천시 단열필름 제조공장화재를 비롯하여, 공주시 통기성필름 제조공장 등에서 정전기로 인한 화재가 발생하였다.

일부 공장에서 많이 사용하는 외단열시스템 외장재의 연구결과 중 콘칼로리미터 실험결과 50 kW/m²의 복사강도에서 약 30초 정도의 빠른 시간 내에 착화되었다.⁶⁾ 이는 화재 발생 시 급격한 연소성상으로 인해 공장 전체로 화재가 확산되어 심각한 인명피해의 위험성도 우려된다.



Figure 1. Burn down film manufacturing plants and toluene vessel.⁵⁾

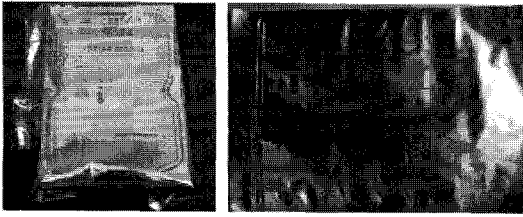


Figure 2. Antistatic film bag.

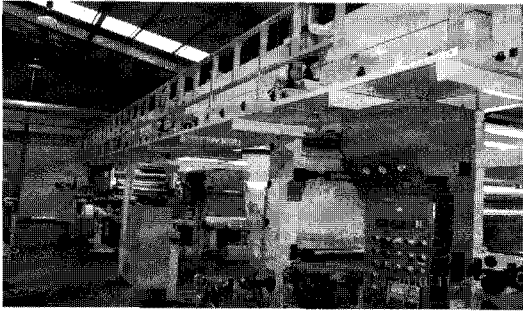


Figure 3. Plant view.

2. 대전방지필름 제조공정

2.1 대전방지필름 활용

대전방지필름은 필름에 도전성 대전방지제를 첨가하거나 코팅하는 방법을 통하여 제조하며 PCB, 하드디스크, 전자제품 등 정전기 쇼크에 민감한 제품의 포장재로 사용되고 있다. 대전방지제는 필름 표면에 전도성을 부여하여 정전기 축적을 방지한다. 종류로는 전도성카본, 전도성고분자, Nano Size Metal, 계면활성제 등이 있다. Figure 2는 PCB용과 하드디스크 포장지용 대전방지 필름이다.

2.2 대전방지필름 제조공정

플라스틱에 일반적으로 이용되는 대전방지법은 대전방지제를 내부에 첨가하거나 표면에 도포하는 방법이다. 본 연구에서는 제조공정에서 유기용제가 많이 사용되어 화재위험성이 높은 표면도포법에 의한 제조공정을 대상으로 하였다.

Figure 4는 표면도포법에 의한 일반적인 대전방지필름 제조공정이다.

표면도포법에 의한 제조공정은 나일론필름, 알루미늄호일, LLDPE(Linear Low Density Polyethylene) 필름을 합지하거나, PET(Poly EthyleneTerephthalate)필름과 LLDPE필름을 합지, 경화시킨 후 대전방지제를 코

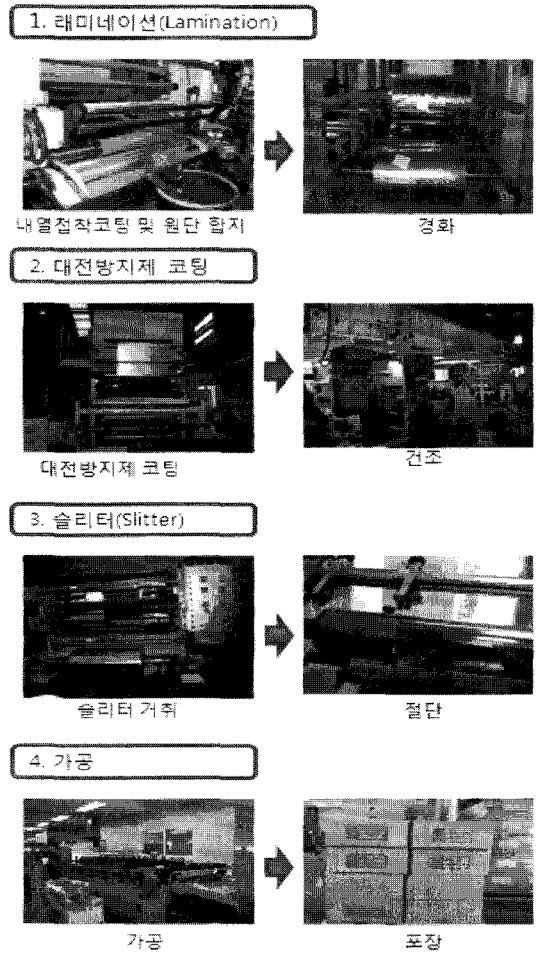


Figure 4. Antistatic film manufacturing processes.

팅하고 건조로를 통과시켜 건조시킨다. 이후 슬리터로 필요한 크기로 절단한 후 Shield-Bag 형태로 가공하여 출하한다. 이 과정을 거쳐 플라스틱 필름 표면에 정전기의 축적을 방지하기 위하여 표면고유저항을 $10^{10-12} \Omega$ 이하로 유지시켜 전하이동을 용이하게 한다.

제조공정에서 접착제는 폴리우레탄접착제를 사용하고 용제로 에틸아세테이트를 사용하며, 대전방지제 용제로 에탄올, 메탄올, 이소프로필알콜 등의 인화성 물질을 사용하고 있다.

대전방지필름의 제조공정 중 정전기에 의한 화재위험성이 가장 높은 곳은 대전방지제 코팅 과정이다. Figure 5는 일반적인 코팅작업에서 사용되는 코팅헤드이다. 대전된 플라스틱 필름은 코팅헤드를 통과하면서 인화성 용제의 증기와 접촉하게 되고 이때 작업자의 신체나 전도성 도구에 의해 방전의 위험성이 있다.

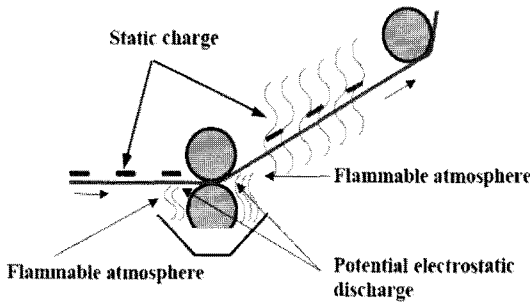


Figure 5. Typical coating head.⁷⁾

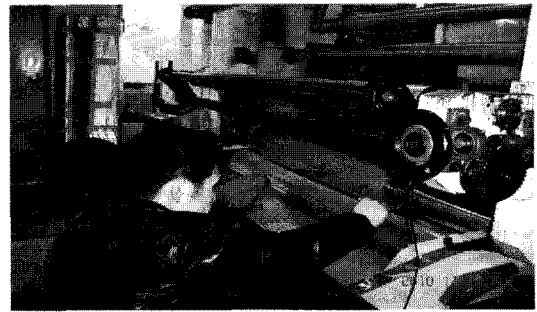


Figure 7. PET film static electricity measurement.

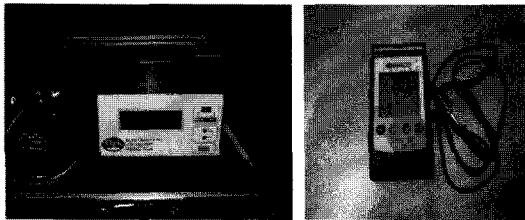


Figure 6. Electro static voltmeter.

Table 2. Electro Static Voltmeter Specification

구분	사양	
장비명	표면전위측정기	휴대용 전위측정기
제조사	TREK	SIMCO
모델	Model 542-2	FMX-003
측정범위	0~± 20 kV	0~± 20 kV
응답시간	30 mm~60 mm	1 sec 이하
정밀도	± 5 % 이하[FS]	± 10 % 이하 (지시치)
프로브	Model 542P-S	

3. 정전기 측정 및 분석

3.1 정전기 측정기 개요

Figure 6은 본 실험에서 사용된 표면전위측정기와 휴대용 전위측정기이다. 측정장치 각각의 사양은 Table 2에 정리하였다.

3.2 측정방법

휴대용 전위측정기를 이용하여 제조공정의 각 부위에서 정전기 대전 전위를 측정하였다. 측정 시 공장내부 평균 기온은 18°C이고, 습도는 28%였다. 정전기 발생부위를 찾기 위해 휴대용 전위측정기를 이용하여 주요설비 및 회전이나 마찰 등 주기적인 운동에 의해

정전기 발생이 우려되는 부위의 정전기 발생량을 측정하였다. 접착제에 의한 원단의 합지 및 건조가 이루어지는 Dry기 주요부위에서 0.5 kV~1 kV의 전위가 측정되었고 대전방지제를 코팅하고 건조하는 공정의 설비에서도 0.5 kV~0.8 kV 전위가 측정되었다. 접착제 코팅 및 대전방지제 코팅이 이루어지는 Dry기는 접지 및 본딩(Bonding) 처리 되어 있었다. 그러나, 롤러와 함께 회전하는 필름 롤에서 박리대전에 의해 높은 전위가 측정되었다. 필름종류와 장소에 따라 2 kV~20 kV 이상의 높은 전위가 측정되었다. 이를 토대로 수치가 높게 측정된 라미네이션 공정 중 접착제가 코팅되는 과정의 롤러와 함께 회전하는 PET필름과 LLDPE필름 2곳을 선정하고, 표면전위측정기를 이용하여 정전기 전위의 시간적 변화량을 측정하였다.

Figure 7은 표면전위 측정기를 사용하여 회전하는 PET필름 롤에서의 전위를 측정하는 모습이다. 회전하는 필름 바로 아래로 폴리우레탄 접착제, 에틸아세테이트 용제, 경화제를 혼합한 접착제가 있다.

3.3 측정결과

Figure 8은 PET필름에서 시간에 따른 전위의 변화 그래프이다. 회전하는 롤에서 나온 필름은 위치에 따라 17 kV에서 20 kV 이상의 높은 정전기 전위가 측정되었다. 특히 필름 롤을 바로 통과하는 시점에서 20 kV 이상이 측정되었다.

Figure 9는 LLDPE 필름에서 시간에 따른 전위의 변화 그래프이다. 회전하는 롤에서 나온 필름은 측정부위에 따라 11 kV에서 18 kV의 정전기 전위가 측정되었다. 구성성분 및 외부환경의 영향으로 PET필름 보다는 약간 낮은 전위가 측정되었다.

3.4 결과 데이터 분석

대전방지필름 제조공장 주요설비에서 정전기 전위를

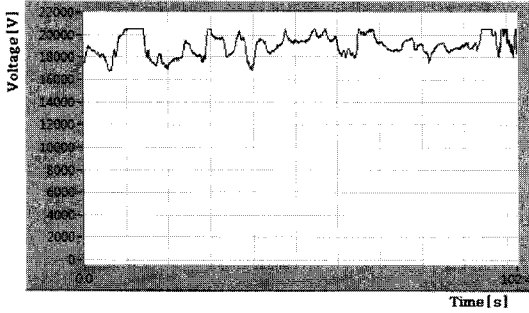


Figure 8. Static electricity potential at the PET film.

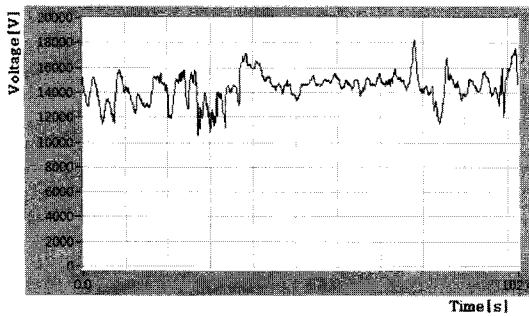


Figure 9. Static electricity potential at the LLDPE film roll.

Table 3. Average and Maximum Potential

측정 부위	Voltage (kV)	
	평균	최대
PET 필름 롤	19.0	20.5
LLDPE 필름 롤	14.4	18.2

측정한 결과 높은 수치가 측정되는 PET 필름과 LLDPE 필름에서의 전위값을 Table 3에 나타내었다. 회전하는 PET 필름에서는 평균 19.0 kV, 최대 20.5 kV의 전위가 측정되었고, LLDPE 필름에서는 평균 14.4 kV, 최대 18.2 kV의 전위가 측정되었다. 본 제조공장의 정전기 전위는 부도체인 필름에서 높은 수치가 관측되었다.

측정 결과값의 화재 위험성을 알아보기 위해 용제의 착화 위험성 데이터와 화재·폭발 방지를 위한 부도체의 대전 목표값 수치를 비교하여 분석하였다.

제조공장에서 사용되는 용제의 최소점화에너지(MIE: Minimum Ignition Energy)는 Table 4에 나타낸 바와 같이 0.14 mJ~0.65 mJ로 낮은 방전 에너지에도 쉽게 착화될 수 있다.

대전물체가 부도체인 경우 대전량을 계측하기가 용

Table 4. Risk of Ignition of Solvent^{8,9)}

물질명	인화점 [°C]	MIE [mJ]	폭발한계 [vol %]	
			하한계	상한계
Ethyl Acetate	-4	0.46	2.0	11.5
Ethanol	13	0.65	3.3	19
Methanol	12	0.14	5.5	44
Isopropyl Alcohol	11.7	0.65	2.0	12.7

Table 5. Desired Value of Electric Potential in the Insulator for Fire and Explosion Prevention¹⁰⁾

가연성 물질의 최소 점화에너지(mJ)	대전전위 (kV)	표면전하밀도 (μC/m ²)
0.1 이하	1.0 이하	1.0 이하
0.1~1.0	5.0 이하	3.0 이하
1.0~10	10 이하	7.0 이하
10 이상	10 이하	10 이하

이하지 않고 방전 형태, 시간, 면적 등에 따라 방전에너지가 다르게 되어 명확히 규정할 수는 없다. 그러나 가연성 물질의 최소점화에너지별 대전전위 데이터를 기준으로 발화의 위험성은 확인할 수 있다.¹¹⁾

가. 부도체의 최고 대전 전위가 5 kV 이상인 대전 나. 대전하고 있는 부도체에 작업자가 접근하였을 때, 인체가 전기적인 충격을 느끼게 되는 대전

다. 대전하고 있는 부도체에 접촉된 지름 약 3 mm 이상의 금속구를 접근시켰을 때, 부도체에서 파괴음, 발광을 수반하는 방전이 발생하는 대전

따라서 Table 5의 화재·폭발 방지를 위한 부도체의 대전 목표값과 필름에서 측정된 데이터를 비교하면 방전에 의한 착화 위험성이 있음을 알 수 있다.

최소점화에너지가 0.1 mJ~1 mJ인 가연성물질은 방전이 약 30 kV에서 착화한 실험결과를 토대로 화재폭발 발생한계는 20 kV~30 kV 정도이다.¹²⁾ 이는 필름제조공장에서 측정된 전위는 용제의 최소점화에너지 0.14 mJ~0.65 mJ와 비교할 때 Brush, Cone, Spark 방전을 통해 화재·폭발이 발생할 가능성을 가지고 있다. 또한 작업자가 일반 작업복을 착용하였을 경우 인체 대전전위는 3.98 kV이며 방전이 발생할 경우 약 0.79 mJ로 화재·폭발 위험성이 높다.¹³⁾ 따라서 화재·폭발 방지를 위한 부도체의 대전 목표를 근거로 대전전위를 5 kV 이하로 유지하기 위한 대전방지설비 및 적절한 소화시스템을 설치하여 위험성을 예방하여야 한다.

4. 결과 및 고찰

본 연구 결과 아래와 같은 내용을 알 수가 있었다.

1. 대전방지필름 제조공장에서 사용되는 용제의 최소점화에너지는 0.14 mJ~0.65 mJ이다. 주요부위에서 대전전위를 측정하여 본 결과 물러와 함께 회전하는 PET 필름에서 최대 20.5 kV, LLDPE 필름에서 18.2 kV의 전위값이 측정되었다.
2. 대전전위가 가장 높게 측정되고 인화성 용제와 접촉하여 화재·폭발 위험성이 가장 높은 코팅 헤드 부위에는 국소환기장치와 제전기 설치가 필요하다.
3. 유기용제를 이용하여 접착제 및 대전방지제를 혼합하는 작업 시 용기의 접지와 작업자의 제전복 착용 등 인체정전기 방지대책이 필요하다.
4. 또한, 폭발분위기가 조성되지 않도록 적절한 강제 환기시스템을 구축해야 한다.
5. 방재대책으로는 불꽃감지기, 화재경보기 등을 설치하여 화재 발전 속도가 빠른 현장에서 신속한 화재 감지 및 경보가 이루어져 근무자가 안전하게 대피할 수 있도록 해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 경원대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임(KWU-2011-R103).

참고문헌

1. 홍성제, “차세대 전자산업용 고기능 필름기술 및 전

- 망”, KOSEN 첨단기술보고서, 한민족과학기술자네트워크(2003).
2. 전기재해통계보고서, 한국전기안전공사(1997~2006).
3. 2006년, 2007년, 2008년, 2009년, 2010년, 2011년도 위험물통계자료, 소방방재청.
4. 중대산업사고속보, KOSHA-CCPS-0703, 한국산업안전보건공단(2007).
5. www.ytn.co.kr/_ln/0103_200704061...03580381.
6. 민세홍, 김미숙, “중소형화재실험을 이용한 외단열 시스템(EIFS) 화재위험성평가에 관한 연구”, 대한안전경영과학회 논문지, Vol.12 No.1, pp.1-9(2010).
7. Mark Blitshteyn Ion Industrial, “Electrostatic Hazard Risk Management In Coating and Printing on Moving Webs”, Prepared for presentation at the 36th Annual Loss Prevention Symposium, AIChE (2002).
8. “NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity”, 2007 Edition, National Fire Protection Association.
9. “정전기 위험성 평가 및 대책에 관한 기술 지침”, 한국산업안전보건공단(2007).
10. 정재희, 가연성 액체의 정전기 방지대책, 한국화재보험협회, 방재와 보험, pp.6-9(1996).
11. 원종수, “전기화재(IV)-가연물 취급장소에서 고려하여야 할 정전기 대책”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.2, No.3, pp.47-57(1988).
12. 이춘하, “정전기에 의한 폭발·화재 방지”, 조명·전기설비학회, Vol.10, No.6, pp.19-22(1996).
13. 이금환, “가스충전소에서 작업복의 정전기 안전관리에 관한 연구”, 서울산업대학교, 석사논문(2009).