

폭발위험지역의 화재예방대응을 위한 방폭형 휴대용 정전기 측정기술에 관한 연구

이후동*, 태동현*, 강환석**, 최승규**

*한국기술교육대학교 전기공학과, **건양대학교 재난안전소방학과

e-mail:skchoi@konyang.ac.kr

A Study on Explosion-proof Portable Static Electricity Measurement Technology for Fire Prevention Response in Explosion Hazard Areas

Hu-Dong Lee*, Dong-Hyun Tae*, Hwan-Seok Kang**, Seung-Kyou Choi**

*Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

정전기는 산업현장의 화학공정설비 등의 폭발위험지역에서 최소발화에너지 이상으로 방전되면 가연성가스, 분진을 착화시키고 화재·폭발로 이어져 대형재해가 발생한다. 산업현장의 폭발위험지역에서 발생하는 대형 화재·폭발사고는 지속적으로 증가하고 있으며, 주요한 사고 원인이 정전기로 밝혀졌다. 폭발위험지역의 정전기는 단 한번의 작은 방전에너지로도 점화원으로 작용, 착화하여 대형 화재·폭발사고로 이어지고 많은 인명과 큰 재산피해를 발생시킬 수 있어 체계적인 관리와 화재예방대응이 필요하다. 이에, 본 논문에서는 폭발위험지역에서 정전기로 인해 발생하는 화재, 폭발 사고 예방대응을 위하여 스마트폰 어플리케이션과 연동으로 정전기를 시각적으로 확인할 수 있는 정전기 측정장치를 제안한다. 또한 기존 정전기측정기의 성능과 기능을 개선하여 화재 감식, 감정용 기기로 사용할 수 있도록 경량화한 휴대용 몰드방폭형으로 구현하여 시험한 결과 측정값이 오차범위 이내이고 어플리케이션에서도 시각화되어 유용함을 확인하였다.

1. 서론

정전기는 두 종류 이상의 물질이 접촉한 후 떨어질 때 발생하는 마찰전기의 일종으로 전압이 1,000~10,000[V] 정도이며 방전 시 스파크가 발생한다. 정전기 전압에 의한 스파크는 가연성 가스나 인화성 액체 및 분진 등의 가연물을 착화시켜 화재·폭발을 일으킬 수 있다. 이러한 정전기는 산업현장의 화학공정설비 등과 같은 폭발위험지역에서 최소발화에너지 이상으로 방전되면 가연성가스를 착화시켜 화재·폭발로 이어져 대형재해가 발생한다. 전 세계 산업현장의 폭발위험지역에서 발생하는 대형 화재·폭발사고는 2010년에서 2020년 사이 31건에서 150건으로 무려 5배가 증가하였고 일본에서 분석한 45년간의 주요 폭발 원인 중 정전기가 최소 17.1%이고, 원인이 밝혀지지 않은 폭발 사고 또한 정전기일 것으로 조사·발표하면서 정전기를 주요한 화재원인으로 지목하였다[1].

국내에서도 석유화학 등의 산업현장에 산재하여 존재하는 폭발위험지역에서 발생하는 화재·폭발사고의 주요 원인으로 착화원이 정전기에 의한 사고로 밝혀지고 있다. 또한, 폭발위험지역의 정전기로 인한 화재·폭발사고는 석유화학산업 등의 대형공장에서도 증가하고 있으며, 주유소나 충전소 등 일

반인들이 매일 이용하는 장소에서도 증가하고 있어 그 피해가 심각해지고 있다.

폭발위험지역의 정전기는 단 한번의 작은 방전에너지로도 점화원으로 작용할 수 있으며, 착화하면 대형 화재·폭발사고로 이어져 많은 인명과 큰 재산피해를 발생시킬 수 있어 체계적인 관리와 대응이 필요하다.

이에 본 논문에서는 정전기 재해분야에 대한 인식이 낮은 현실에서 석유화학 생산공정 등의 폭발위험지역에서 정전기 발생으로 인한 화재, 폭발 예방대응을 위하여 스마트폰 어플리케이션과 연동하여 정전기를 눈으로 볼 수 있는 정전기 측정장치를 제안한다. 또한, 화재 감식과 감정용 기기로 인증 가능하고 휴대하기 용이한 초경한 몰드방폭형으로 구현하여 기존 정전기 측정기의 성능과 기능을 개선하고자 한다.

2. 폭발위험지역의 정전기 화재·폭발 특성

2.1 폭발위험지역의 정전기 화재·폭발 현황분석

정전기로 인한 폭발 및 화재 사고는 인화성 물질, 산소, 점화원이 결합되어 발생하는 것으로 석유화학 산업현장 등의 폭발위험지역에서 해마다 증가하여 인명과 재산피해를 발생시

키고 있다. 정전기로 인한 산업재해는 국내에서 표 1과 같이 재산피해 뿐만 아니라, 재해자 수에서도 2013년부터 2020년 9월까지 4,474명(0,617%)으로 심각해지고 있다[2]. 이와 같이 매해 수 백명이 폭발위험지역에서 화재·폭발로 인한 산업재해를 당하고 있는 현실에서 산업현장의 재해예방을 위하여 정전기에 대한 체계적인 관리와 대응이 요구된다.

[표 1] 정전기 화재·폭발로 인한 폭발위험지역의 재해자 통계

년 도	2013	2014	2015	2016	2017
총 재해자 수(명)	84,197	90,909	90,192	90,656	89,848
화재·폭발 재해자	744	648	589	566	439
비 율(%)	0.884	0.713	0.654	0.62	0.489
년 도	2018	2019	2020.09	-	총 계
총 재해자 수(명)	102,305	109,242	68,192	-	725,478
화재·폭발 재해자	569	490	429	-	4474
비 율(%)	0.556	0.449	0.629	-	0.617

2.2 폭발위험지역의 정전기 화재·폭발 특성분석

폭발위험지역의 각종 설비에서 발생하는 정전기 화재·폭발사고는 수많은 인명과 재산피해를 유발하기 때문에, 이를 예방할 수 있는 수단을 강구해야 한다. 하지만 현재 정전기를 포함한 자연발화 등의 예방이 어려운 화재·폭발 요소에 대해서는 특별한 예방 수단이 없는 것이 현실이다. 또한, 정전기에 의한 화재·폭발 사고는 동일 장소에서 재차 발생되고 원인 파악이 어려워 자연재해로 인식하고 있을 정도이다.

[표 2] 국내 석유화학공장의 화재·폭발 사고

일 자	사고 개요 및 원인
2019.02.14	H사 대전공장, 추진제 연료 용기 분리 중 폭발, 정전기 원인 추정, 3명 사망
2019.02.13	시흥 우레탄 제조공장 화재, 정전기 원인, 7700만원 재산피해
2018.11.12	원주화학공장, 액체 원료 가공 중 발생한 스파크, 1명 부상, 800여만원 재산피해
2018.08.15	K사 서산공장 반응기 내 물질 연소하면서 재산피해
2018.08.08	P시 열병합발전소 석탄 분진 폭발사고, 정전기 원인 추정, 5명 사상
2018.05.29	H사 대전공장, 로켓 연료 주입 중 원인미상 폭발사고, 9명 사상
2018.05.17	대전 K연료 지지 격자제조실 분진 폭발 사고, 스파크 원인 추정, 6명 부상
2017.09.25	광주 포장완충재공장, 정전기 원인, 26명 부상
2017.08.20	진해 S조선 폭발 사고 탱크 도장작업, 원인 불명, 4명 사망
2017.07.11	여수 L사 화학공장, 원인미상 발화, 재산피해
2017.05.30	여수 H사 에틸렌 회수 공정 내 고압분리기, 정전기 추정
2016.10.14	울산 K공사 신설 배관 연결 과정, 정전기 원인 추정, 6명 사상

정전기로 인한 화재나 폭발은 인화성 액체나 가스 또는 가연성 분진 등과 같이 인화성 및 폭발성이 매우 강한 물질을 사용하는 석유화학공장, 차량용 연료 충전소, 화약공장 등에서 주로 발생하기 때문에 표 2와 같이 사고의 확산이나 피해가 크다[3-5].

국내 석유화학공장의 화재·폭발 사고원인을 분석하면, 건조한 환경에서 정전기가 잘 발생하기 때문에 주로 여름철을 제외한 계절에 폭발 사고가 많이 발생하는 것이 특징이다. 정전기로 인한 폭발 사고는 원인 규명이 어렵기 때문에, 폭발 발생 원인을 밝히지 못하는 경우가 많아 정전기가 원인으로 추정하고 있다.

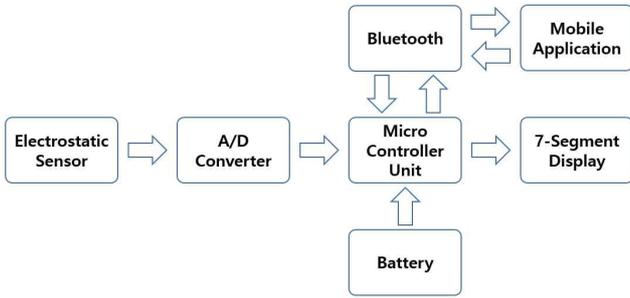
정전기로 인한 화재·폭발은 사고가 매년 반복되는 이유는 정전기를 제거하기 위한 대책으로 접지나 본딩, 제전 복장 착용, 질소 퍼지 등에만 의존하였기 때문이다. 이는 정전기가 눈에 보이지 않고, 사람들이 실생활에서 느끼는 정전기가 폭발 위험지역에서 어떠한 사고를 일으킬 수 있는지에 대한 인식이 명확하지 않기 때문으로 정전기를 수치화하고 스스로 인식할 수 있도록 그래프로 시각화하여 보여주는 방법을 강구해야 한다.

3. 정전기 측정장치의 구현 및 시험

3.1 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 구현

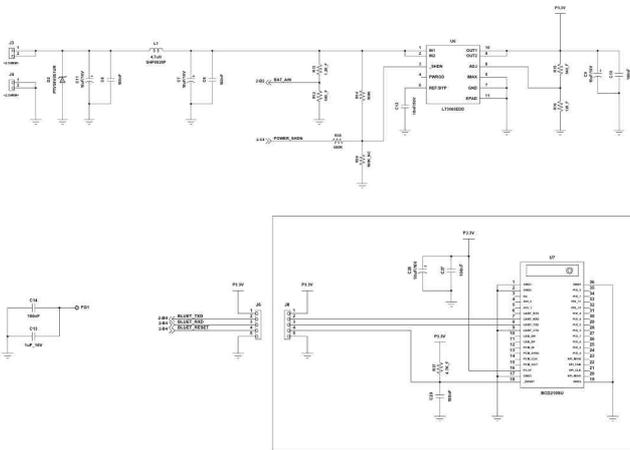
가연성 분진, 가스 등에 의해 폭발 위험성이 상시 내재되어 있는 산업현장의 폭발위험지역에서 점화원인 정전기에 의한 화재·폭발 사고를 예방하기 위해서는 정전기를 수치화하고 시각화하여 예측할 수 있는 측정장치가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 기존 측정기의 기능과 성능을 개선하고 정전기 수치 데이터를 수집할 수 있는 중앙 관제 시스템을 구축함으로써, 화재 및 폭발 사고 통계 분석에 필요한 백데이터를 제공할 수 있는 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치를 제시한다.

몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치의 Hardware는 그림 1과 같이 정전기 감지센서(Electrostatic Sensor), Analog 정전기 측정 데이터를 Digital 신호로 변환하여 MCU 전달하는 A/D Converter, Digital로 변환된 정전기 측정 데이터를 분석하고 7-Segment와 Bluetooth 통신으로 정전기 측정 데이터를 전달하는 Micro Controller Unit(MCU), MCU에서 측정된 정전기 측정 데이터 실시간 표시하는 7-Segment Display, 정전기 측정기와 Mobile Application 간의 데이터 송수신 통신 수단인 Bluetooth와 전력 공급원으로 리튬이온배터리 3.7[V] / 320[mAh] Battery, 정전기 측정 실시간 데이터와 트렌드 확인 및 관리, 정전기 위험 경고 알림 등의 기능사용을 제공하는 Mobile Application으로 구성된다.



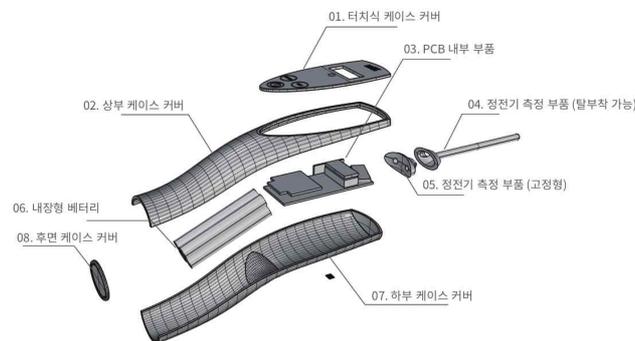
[그림 1] 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 블록도

정전기 측정장치의 기능 작동을 위한 최적 회로설계는 그림 2와 같이 Voltage Regulator, Bluetooth Module Circuit, Micro Controller Unit Circuit, Analog-to-Digital Converter Circuit, 7-Segment Display, Touch Menu Button Circuit 회로부분으로 회로를 구성하여 측정장치에 적용한다.



[그림 2] 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 회로도

몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 디자인은 기존 측정장치에 비해 소형화하고, 사용자의 편의성을 고려해 손잡이 타입으로 외형을 그림 3과 같이 설계한다. 또한, 몰드 방폭에 대한 국내 표준 KS C IEC 60079-18를 적용해 인증을 받아 소방관서의 화재조사전담부서 화재감식 감정용으로도 사용할 수 있도록 측정장치를 제작한다.



[그림 3] 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 외형도

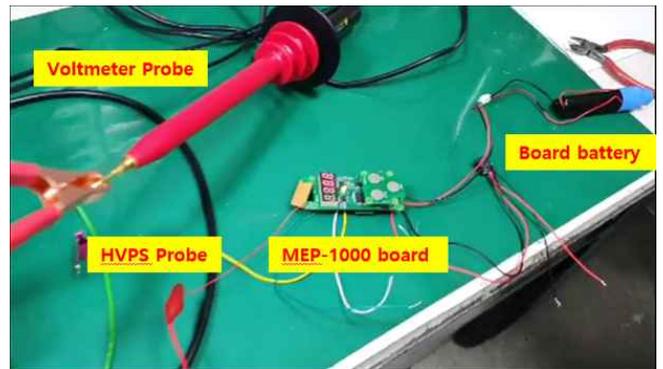
한편, 폭발위험지역의 화재예방대응을 위한 스마트폰 어플리케이션은 정전기 측정 데이터와 함께 실시간 트렌드를 함께 나타내도록 하고 위험 수치의 정전기 발생 측정 시에 스마트폰에 정보 및 푸시 알림 메시지를 발송한다. 측정 데이터 및 트렌드는 스마트폰 어플리케이션 내에 축적되어 수시로 확인되며, 정전기 측정 로우 데이터는 클라우드, 메일 등 엑셀 파일로 업로드 가능하고, PC에서 가공하여 사용할 수 있다.

3.2 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 시험

본 논문에서 구현한 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치가 폭발위험지역의 화재예방대응에 적합한 기능을 발휘하고 성능이 유지되는지 확인하기 위하여 시험을 실시한다.

시험의 목적은 High Voltage Power Supply(HVPS), Digital Multimeter, PCB 전원 인가 Battery 등의 시험장비를 이용하여 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 PCB가 측정된 정전기 값의 정확성과 동일한 값의 High Voltage를 반복 인가하였을 때도 측정된 값이 정밀한지 확인하는 것이다.

시험방법은 그림 4와 같이 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 PCB에 Battery 연결, 측정장치 PCB와 HVPS 연결, Digital Multimeter의 Probe를 HVPS Probe와 연결한 후 고전압 인가해 측정장치 PCB 7-Segment에 표시되는 정전기 수치를 확인한다.



[그림 3] 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 시험

상기 시험방법에 따라 High Voltage를 반복 인가하여 정전기 측정장치의 측정치, 정확도, 정밀도를 시험한 결과는 표 3과 같다. 시험결과를 분석하면, 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치 PCB 기능 시험은 정확도는 오차 120[V], 2.5% 이내, 각 인가 전압에서 다수 측정 시 얼마나 동일하게 측정되는지를 나타내는 지표인 정밀도는 0.5% 이내로 측정되어 오차범위 이내임이 확인되었다. 또한, 추가로 시험한 정전기 측정장치 보드와 스마트폰 어플리케이션 블루투스 연동 시에 보드에서 표시되는 측정값이 어플리케이션에 표현되고 보드의 정전기 수치를 일치함을 확인하였다.

[표 3] 몰드방폭형 휴대용 정전기 측정장치의 시험결과

인가전압[kV]		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
측정횟수 측정치[kV]	1	0.50	0.99	1.50	2.01	2.52
	2	0.50	1.00	1.51	2.01	2.52
평균		0.50	1.00	1.51	2.01	2.52
표준편차		0.000	0.005	0.005	0.000	0.000
정확도(%)		0.000	0.503	-0.332	-0.498	-0.794
정밀도(%)		0.000	0.503	0.332	0.000	0.000
인가전압[kV]		3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
측정횟수 측정치[kV]	1	3.04	3.54	4.10	4.61	5.10
	2	3.04	3.55	4.10	4.62	5.10
평균		3.04	3.55	4.10	4.62	5.10
표준편차		0.000	0.005	0.000	0.005	0.000
정확도(%)		-1.316	-1.269	-2.439	-2.492	-1.961
정밀도(%)		0.000	0.141	0.000	0.108	0.000

6. 결 론

정전기는 산업현장의 화학공정설비 등과 같은 폭발위험지역에서 최소화화에너지 이상으로 방전되면 가연성가스를 착화시켜 화재·폭발로 이어져 대형재해가 발생한다. 산업현장의 폭발위험지역에서 발생하는 대형 화재·폭발사고는 지속적으로 증가하고 있으며, 주요한 사고 원인이 정전기로 밝혀졌다. 폭발위험지역의 정전기는 단 한번의 작은 방전에너지로도 점화원으로 작용할 수 있으며, 착화하면 대형 화재·폭발사고로 이어져 많은 인명과 큰 재산피해를 발생시킬 수 있어 체계적인 관리와 화재예방을 위한 대응이 필요하다.

이에, 본 논문에서는 석유화학 생산공정 등의 폭발위험지역에서 정전기 발생으로 인한 화재, 폭발 예방대응을 위하여 스마트폰 어플리케이션과 연동으로 정전기를 눈으로 볼 수 있는 정전기 측정장치를 제안한다. 또한 기존 정전기측정기의 성능과 기능을 개선하여 화재 감식, 감정용 기기로 시험기관의 인증이 가능한 휴대용 초경한 몰드방폭형으로 구현하여 시험한 결과 측정값이 오차범위 이내이고 스마트폰 어플리케이션에서도 표현되어 유용함을 확인하였다.

본 논문의 주요 연구성과와 기대효과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 폭발위험지역의 폭발사고 원인인 정전기 데이터를 실시간 측정하여 파악할 수 있는 방폭형 휴대용 정전기 측정기술을 제시하였다.

(2) 정전기 측정 시, 제공되는 데이터를 파악하여 이벤트 발생 즉시 경고하는 시스템을 구현하고 스마트폰 어플리케이션

을 연동하여 정전기 화재·폭발사고예방과 대응을 할 수 있는 측정장치를 구현하였다.

(3) 향후, 소방관서에 소방방재장비, 위험물안전관리대행업체, 산업안전보건공단, 화재보험협회, 가스안전공사 등 재해사고 조사부서의 안전진단, 시설물관리자의 설비진단장비로 활용되어 산업재해 중 정전기 화재 및 폭발사고로 발생 하는 대형 인명 및 재산피해 예방에 기여할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 (사)한국산업기술진흥협회의 지원을 받아 수행한 “기술에로해결 지원사업” 연구(No. 2021-036)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한국산업안전보건공단, 산업재해 통계, 2020
- [2] 한국산업안전보건공단, 산업재해 원인분석 보고서, 2019
- [3] 김윤희, “Case investigation and forensics techniques of static electricity fire”, 한국화재조사학회 학술대회 논문지, pp.45-57, 2016
- [4] 이기훈, 김용필, 조용선, 남성우, “폴리에틸렌(PE) 폼 제조 공정상 정전기에 의한 화재위험성 연구”, 한국화재감식학회 학회지, 8:3, 53-70, 2017
- [5] 최광석, 최상원 . “정전기 방전에 의한 화재폭발 방지”, 조명전기설비 학회지, 3-7(5 pages), 2015.3