

# 도전성 고무 매트를 이용한 수소 기반 시설에서 제전 신뢰성 향상

이수운<sup>1</sup> · 고재환<sup>1</sup> · 송지원<sup>1</sup> · 김찬우<sup>1</sup> · 김충일<sup>1</sup> · 김해술<sup>2</sup> · 허만억<sup>3</sup> · 정재형<sup>4</sup> · 송형준<sup>5†</sup>

## Conductive Rubber for Enhanced Safety in Hydrogen-based Facilities from Electrostatic Discharge

S. Lee<sup>1</sup> · J. Ko<sup>1</sup> · J. Song<sup>1</sup> · C. Kim<sup>1</sup> · C. Kim<sup>1</sup> · H. S. Kim<sup>2</sup> · M. E. Hur<sup>3</sup> · Chung J. H.<sup>4</sup> · H. J. Song<sup>5†</sup>

### †Corresponding Author

Hyung-Jun Song

Tel : +82-2-970-6387

E-mail : hj.song@seoultech.ac.kr

Received : October 24, 2023

Revised : December 5, 2023

Accepted : February 5, 2024

**Abstract** : Hydrogen-based electricity and transportation systems are widely recognized as sustainable power sources. However, the low ignition energy of hydrogen, only 1/10<sup>th</sup> that of conventional fossil fuels, poses a safety concern involving the risk of ignition due to electrostatic discharge from facility workers. Therefore, anti-static systems are imperative for hydrogen-based electricity facilities. To address this, we propose a reliable conductive rubber mat (CRM) to ensure the safety of these facilities. Unlike conventional anti-static floors that utilize conductive paint (CP), the CRM features a uniform distribution of conductive components in chemically and mechanically stable rubber. As a result, the CRM is unyielding to polar solvents (such as ethanol and hydrosulfuric acid) and non-polar solvents (like mineral oil) without increasing its resistance. Moreover, the CRM can withstand mechanical stress. Consequently, the human-body voltage of workers on the CRM would be sufficiently low enough to protect them from hydrogen explosions, thereby enhancing overall safety.

**Key Words** : electrostatic discharge, conductive floor, conductive rubber, antistatic, hydrogen

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

## 1. 서론

기후 변화에 대응하기 위해 전력설비에서는 친환경 연료나 재생에너지 기반 발전소, 생산된 에너지를 저장하기 위한 저장 설비, 효율적인 송배전 설비 구축을 통한 기술 개발과 연구가 꾸준히 이루어지고 있다<sup>1,4</sup>. 특히 발전 영역에서는 기존의 탄화수소 기반의 연료들을 재생에너지와 신에너지 같은 새로운 형태의 연료로 변경하는 연구들이 많이 이루어지고 있다<sup>5,6</sup>. 이 중 수소는 가볍고 저장이 가능하며 온실가스 저감 효과가 크기에 수소자동차(Fuel on Electric vehicle), 선박, 항공기 등의 교통수단에도 많은 연구 개발과 시장 진입이 이루어지고 있다<sup>7,8</sup>.

하지만 수소 기반 시스템 구현에 가장 큰 문제점은

폭발 안전성이다. 수소의 최소 점화 에너지(Minimum Ignition Energy, MIE)는 0.02mJ 이하로 발전소의 연료와 차량의 연료로 많이 사용되는 메탄, 천연가스, 휘발유의 MIE(0.2-0.3mJ)대비 1/10로 낮은 수준이다<sup>9,10</sup>. 즉 기존 발전 및 차량 설비보다 1/10 수준의 에너지로도 폭발할 수 있기에 수소 기반 설비의 안전 강화를 위해 새로운 방폭 설비들의 도입이 매우 시급한 상황이다. 또한 수소 충전소의 경우, 화재 및 폭발 사고의 피해를 최소화하기 위한 연구는 지속적으로 진행 중이지만, 주된 연구는 누출된 수소를 안전하게 제거하는 방법을 중심으로 이루어지고 있고, 주변 점화원을 제거하는 부분에 대해서는 더 많은 연구가 필요한 상황이다<sup>11</sup>.

특히 여러 가지 점화원 중 제전되지 않은 작업자의 일상 행동이나 계획되지 않았던 부도체들의 마찰에 의

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 안전공학과 학사과정 (Department of Safety Engineering)

<sup>2</sup>(주)스타닉스 대표이사 (Stanix Inc.)

<sup>3</sup>(주)알엠 대표이사 (RM Ltd.)

<sup>4</sup>유세이프 대표이사 (Usafe Inc.)

<sup>5</sup>서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering)

해 발생할 수 있는 정전기 방전(Electrostatic discharge)은 안전한 수소 기반 시스템 구현에 매우 치명적인 위협이다. 특히 적절한 제전 장치가 제공되지 않은 작업자의 경우 작업 중에 정전기가 몸에 누적되어 인체 전위가 수 천 V 이상으로 높아질 수 있다<sup>12)</sup>. 일반적으로 제전 처리가 되지 않은 작업자의 capacitance(C)가 약 200pF 이기에, 인체에 대전된 정전기가 한 번에 주변 물체에 방전되는 경우 그 에너지가 수소 MIE의 수십 배 이상이 되어 화재 폭발이 발생할 가능성이 매우 높아진다. 또한 정전기 방전 시 발생하는 에너지는 수소 연료의 폭발 이외에도 주변 전기, 전자 설비의 파손으로 연결되어서 다른 사고의 영향을 줄 가능성도 매우 높다<sup>13-15)</sup>. 수소를 이용하는 시설의 경우 다수의 작업자가 다양한 작업을 하여 정전기 방전에 의한 사고 위험성이 높으며, 수소 기반 전기 자동차 충전소의 경우 충전 작업자 이외에도 운전자를 포함한 불특정 다수가 자유롭게 출입을 할 수 있어서 관리가 필요하다. 기존 가솔린(Gasoline)과 디젤(Diesel)을 주로 취급하는 주유소에서 폭발 방지를 위한 시스템이 구축되어 있으나, 앞에서 언급된 바와 같이 수소의 낮은 MIE로 인해 새로운 형태의 보호 설비가 필요하다<sup>16)</sup>.

정전기 방전으로 인해 폭발 위험이 있는 공간에 한정된 작업자만 출입하는 공간의 경우 제전화(Antistatic shoe)나 제전복(Antistatic clothes) 등을 이용하여 위험을 제거할 수 있다. 하지만 불특정 이용자가 출입하는 현장에서는 모두 출입자에게 제전화나 제전복 착용이 어려워서, 전도성 페인트로 바닥면의 표면을 처리하여 저항을 감소시키는 방식을 널리 사용하고 있다<sup>17-18)</sup>. Fig. 1과 같이 Acryl 계열의 고분자에 전도성 입자를 넣어 저항을 낮춘 페인트(Conductive paint, CP)는 작업자의 행동으로 축적된 전하가 바닥을 통해 빠르게 제거되어 인체전위(Humanbody voltage)를 감소시킬 수 있다. 이로 인해 정전기 방전 가능성을 낮추어 위험을 제거한다. 전도성 페인트의 전도도가 낮으면 낮을수록 인체 전위 저감 효과에서는 유리하나, EN 100015-1에 따르면 감전 위험을 고려하여 면저항은  $10^4$ - $10^9 \Omega$ 을 유지하는 것이 바람직하다<sup>19)</sup>. 이를 통해 수소를 비롯한 가연성 가스(Flammable gas)가 있는 환경에서 정전기에 의한 인체 전위를 수백 V 이하로 낮추어 정전기 방전으로 인한 폭발 방지에 기여하고 있다. 하지만 전도성 페인트 기반 방식의 가장 큰 문제점은 바닥면의 표면이 기계적 마모되거나, 화학물질에 의해 페인트가 박리되는 경우, 충분히 낮은 저항을 제공하지 못하는 문제점이 있다. 표면에 전도성 페인트가 손상되는 경우 역시 제전 효과가 떨어져서 위험에 노출되게 된다.

기존 석탄, 석유, 천연가스 등을 연료로 사용하는 설비의 경우 MIE가 높아서 저항이 충분히 낮지 않아도 정전기 방전에 의한 화재폭발 가능성이 낮았지만, 수소 기반의 전기, 운송설비의 경우 바닥의 저항이 높아지면 정전기 방전에 의한 화재폭발 가능성이 높아진다. 이에 기존의 전도성 페인트 방식보다 신뢰성 높은 제전 바닥재의 도입이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 전도성 페인트 기반 대전 처리 보다 안정성이 높은 도전입자가 함유된 전도성 고무 바닥재(Conductive Rubber Mat, CRM)를 이용하여 다양한 환경에서 특성 변화를 분석하고, 이를 기반으로 실제 동작 환경에서 제전 효과에 대해 분석하였다. 표면 뿐만 아니라, 전체에 도전성 입자가 함유된 고무 바닥재는 전기설비나 운송설비에 사용되는 다양한 화합물에 장시간 노출되어도 저항의 증가가 크게 나타나지 않았다. 또한 기계적 마모가 발생하여도, 전체에 고무 분포된 도전성 입자로 인해 저항 값을 유지할 수 있다. 따라서 작업 환경에서 인체전위를 분석한 결과 수소기반 전기 및 운송 설비 시설에 적용 시 안전성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 전도성 고무의 기계적 화학적 특성 분석

### 2.1 실험 방법

바닥재의 기계적, 화학적 특성 분석을 위해 CP와 CRM 시료를  $2 \times 4 \text{ cm}^2$  크기의 작은 시편으로 만들어서 평가하였다. CP는 부도체인 아크릴 (PMMA) 기관 위에 수용성 아크릴 계열 전도성 페인트 (S1250, 미국 Statico 사)를 붓을 이용하여 칠하였다. 이때 전도성 페인트의 두께는 0.2 mm 이상을 전면에서 유지하도록 골고루 도포하였으며 도포 후 24시간 이상 실내( $25^\circ\text{C}$ , 상대습도 50% 이하)에서 건조하였다. 한편 대전입자가 첨가된 CRM은 색상구현이 가능한 극성고무인 Nitrile butadiene rubber(NBR)를 주원료로 만들어졌다. 여기에 전도성 기능을 확보하기 위해 리튬이 함유되고 Phosphoric acid alkyl esters, sodium salts 와  $\alpha$ -Hydro- $\omega$ -hydroxypoly[oxy(methyl-1,2-ethanediy)] 구성된 물질을 고무 전체에 혼합하여 장기적인 전도성 기능을 부여하였다.

CP가 처리된 바닥면과 CRM의 저항은 고저항측정기 (APPA 605)를 사용하여 측정하였다. 이때 작은 크기의 시편의 경우, 전극을 악어 집게를 이용하여 단단하게 고정하였으며,  $1 \text{ m}^2$  이상 되는 바닥재의 경우 5 파운드 프루브(5 pounds probe)를 이용하여 측정하였다. 측정의 정확성을 높이기 위해 각 시료를 5번의 반복 측정

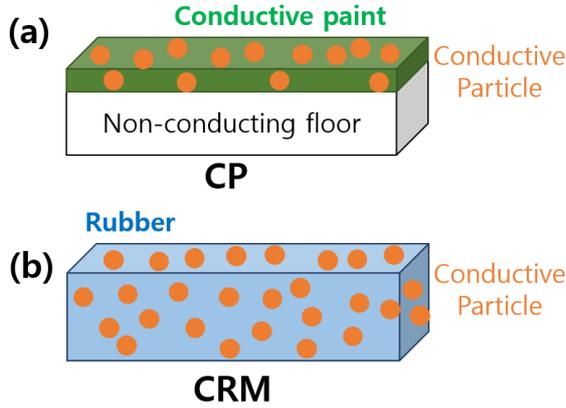


Fig. 1. Schematic of Antistatic floor with CP and CRM.

하고 평균값을 도출하였다.

초기 상태의 평균 저항은 두 바닥재 모두  $10^7 \Omega$  수준 (CP:  $4.9 \times 10^7 \Omega$ , CRM:  $7.2 \times 10^7 \Omega$ )으로 나타났다. 초기에는 두 바닥재 모두 충분히 낮은 저항을 보이고 있어, 바닥면 위의 작업자에게 제전효과를 줄 수 있을 것으로 예상된다. 인체 전위 감소 효과 실험에서는  $1 \times 1 \text{ m}^2$  크기의 기관을 제작한 후 장시간 화학물질과 기계적 마모가 일어난 상황을 묘사하여서 실험을 진행하였다.

## 2.2 제전 바닥재의 내화학 특성

제전 바닥재가 안정적인 성능을 발휘하기 위해서는 화학적, 기계적 안전성이 매우 필요하다. 널리 사용되고 있는 CP와 새롭게 개발되고 있는 CRM의 비교를 위해 전기 설비나 운송 설비에 많이 사용되는 화학물에 대한 안전성을 비교해 보았다. 연료의 혼합재 및 자동차 세정에 많이 사용되어 충전소 환경에서 노출될 수 있는 에탄올(Ethanol), 운송기기 및 전동기의 윤활유로 많이 사용되는 광유(Mineral oil), 납 기반 배터리 저장 설비에 사용되는 묽은 황산(Dilute sulfuric acid) 등에 대한 각 바닥재의 저항 변화를 분석하였다. 실험 중 증발하지 않은 용액에 의한 면저항 오차를 최소화하기 위해 시료를 용액에서 꺼낸 후 24시간 동안 건조한 후 면저항을 측정하였으며, 실험 환경은 온도  $20^\circ\text{C}$ , 상대 습도 60%로 설정하여 일관된 조건에서 실험을 진행하였다.

에탄올에 장시간 노출된 경우 CRM의 저항은 유지되었으나, CP는 녹아내려 바닥재의 저항이 100배 이상 높아졌다. Fig. 2(b)는 CP와 CRM을 에탄올 용액에 넣은 후 60, 90, 120, 180분 간격으로 측정된 면저항이다. 3시간 이상 에탄올에 노출될 경우 CP가 에탄올에 의해 벗겨져서 바닥재의 저항의 평균값이  $10^{10} \Omega$ 을 초과하게 된다. 일부 샘플의 경우 에탄올이 CP 사이로 녹아들어

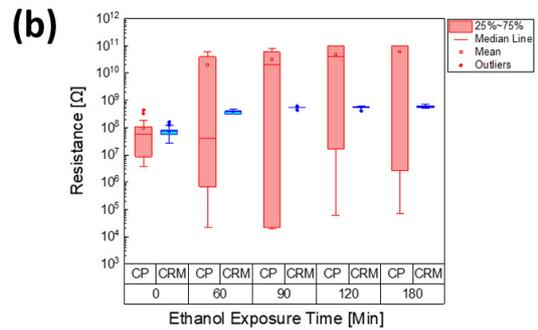
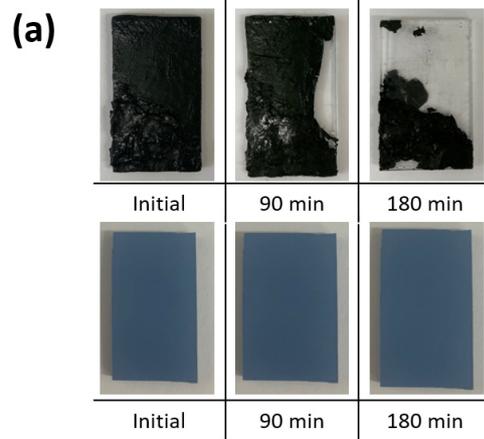


Fig. 2. (a) Photograph and (b) Resistance of CP and CRM after immersion into ethanol.

일시적인 저항이 감소가 보이지만, 장시간 노출시 완전히 녹아내려서 초기 대비 저항이 100배 이상 증가하게 된다. 즉 정전기 제전 바닥재로서의 기능을 완전히 상실하였다.

반면 CRM은 에탄올에 3시간 이상 노출되었음에도 불구하고, 저항이  $10^8 \Omega$ 으로 유지되어 화학적 안전성을 보였다. 초기 대비 저항 증가는 나타나나 시간이 지남에 따라 증가 폭이 감소하고  $10^8 \Omega$ 으로 수렴한다. 이러한 결과로부터 에탄올에 의한 CP와 CRM의 절연 특성과 화학적 안정성에서 차이를 확인하였다. 실제 환경에서 에탄올에 장시간 CP가 노출되는 경우 바닥으로부터 벗겨져서 제전효과 상실이 예측된다. 반면, CRM은 에탄올에 노출되어도 정전기 바닥재의 기능을 유지한다는 것을 확인하였다.

에탄올 이외에도 다른 화합물에 대한 안전성을 확인하기 CRM을 광유와 묽은 황산에 각각 120분 동안 담근 후 저항 변화를 분석하였다. Mineral Oil(비극성)과 Sulfuric Acid(극성)은 화학적으로 활발한 물질로 부식을 발생시킬 수 있다. 따라서 이러한 환경에서 사용되는 제품은 이에 대한 내성을 가지고 있어야 한다. CRM을 광유와 묽은 황산에 120분 동안 노출시킨 결과,

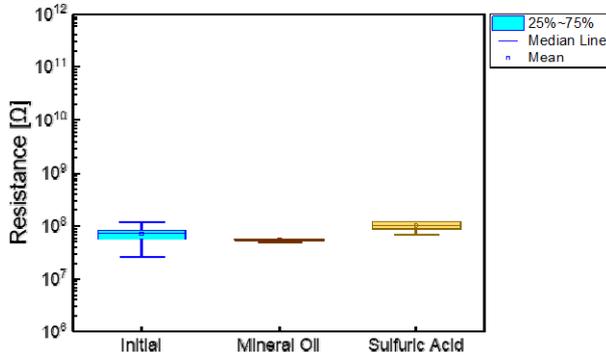


Fig. 3. Resistance of CRM after immersing into mineral oil, dilute sulfuric acid for 2 hours.

초기의 평균저항( $\sim 10^7 \Omega$ )과 비슷한 값을 나타내었다. 광유에서는 CRM의 평균저항이  $5.6 \times 10^7 \Omega$ , 묽은 황산에서는  $9.9 \times 10^7 \Omega$ 로 나타났다. 이렇게 다양한 화학물에 노출된 CRM의 저항값은 CP를 에탄올에 120분 동안 노출시킨 바닥의 평균 저항( $4.8 \times 10^{10} \Omega$ )보다 현저히 낮게 나타났다. CRM은 극성이나 비극성 화합물 모두에 대한 내성을 가지고 있어 실제 충전소나 전기 설비 사용 환경에서도 화학적 부식으로부터 안정성을 가지고 있어 제전 바닥재로서의 기능을 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

### 2.3 전도성 고무 바닥재의 기계적 안정성

제전 바닥재의 화학적 안정성 말고도 기계적 안정성 역시 매우 중요한 특성이다. 바닥재의 특성상 다양한 마찰이 사람과 장비로 인해 발생하게 된다. 장기간의 마찰은 표면부분 전도성물질의 박리가 일어나 저항이 증가하여 제전 효과 감소로 연결될 수 있다. 따라서 제전 바닥재의 경우 적절한 압력과 힘에 대한 저항성을 가지는 것이 매우 중요하다. CP와 CRM의 물리적 안정성을 확인하기 위해 그라인더(GSR 10.8V-13, BOSCH)에 금속 브러쉬를 부착하여 사용하여 두 바닥재를 50 N의 압력으로 3분, 5분 동안 마찰시키는 마모 실험을 진행하였다. 실험 중 CP와 CRM의 물리적 상태 변화를 사진을 통해 훼손 정도를 시각적으로 변형 또는 파손 여부를 확인하였다. 또한, 실험 전, 후에 각 시료의 면저항을 측정하여 물리적 안정성과 제전 특성의 변화를 평가하였다.

Fig. 4, (a)와 (b)에서는 기계적 마찰에 따른 두 바닥재의 변화를 사진과 면저항의 값으로 나타내었다. CP의 경우 마찰이 발생하면서 표면에 도포된 페인트가 벗겨지기 시작했다. 마찰 시간이 증가하면서 기판 위 페인트의 영역이 줄어들게 되고 이로 인해 급격한 저항 상승이 나타나게 된다. CP의 평균 저항이 마찰 3분

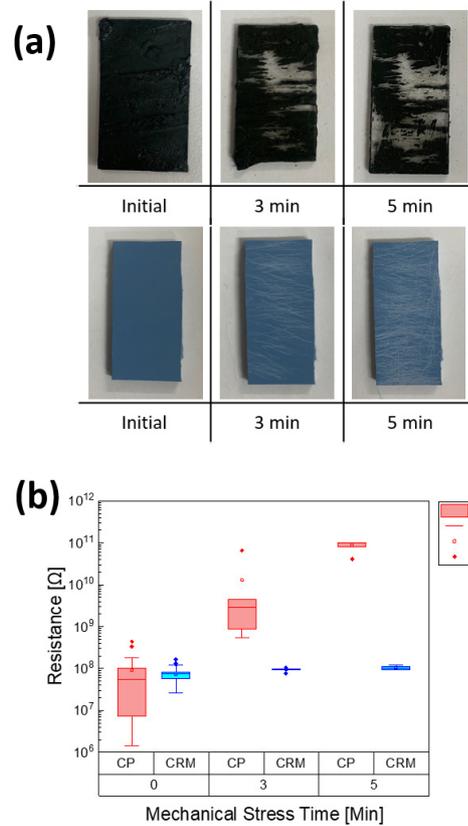


Fig. 4. (a) Photograph and (b) Resistance of CP and CRM before and after mechanical stress tests.

후  $1.2 \times 10^{10} \Omega$ , 5분 후  $8.6 \times 10^{10} \Omega$ 로 초기 대비 100배 이상 크게 증가하였다. 반면 CRM의 경우 마찰이 발생하여 표면에 손상은 일어났지만, 도전체가 바닥재 전반에 도포되어 평균 저항의 증가는 거의 나타나지 않았다. 5분간 마찰을 진행한 CRM 표면의 저항은  $10^8 \Omega$  이하로 제전능력을 계속 유지하고 있었다. 실험결과 CP와 CRM의 기계적 안정성 차이를 확인할 수 있었다. 기계적 마찰에 약한 CP가 수소 발전소나 충전소에 사용될 때 내구성의 제약으로 인해 지속적인 관리가 필요하다라는 것을 나타낸다. 반면, 저항 변화가 적게 나타나는 CRM은 기계적 마찰과 화학물에 대한 내구성이 강해서, 수소 기반 전기 설비나 충전소 환경에 제전 바닥재로서 안정적인 기능을 수행할 수 있다.

### 3. 전도성 고무 바닥재의 제전효과

앞장에서 제시된 바와 같이 CRM은 기존 CP 대비 내화학성 및 기계적 안정성에서 훨씬 우수한 특성을 보여 장기간 사용해도 제전 성능 저하가 거의 일어나지 않을 것으로 예상된다. 이를 미국 기준인 ANSI/ESD STM 97.2-2016 (Floor Materials And Footwear - Voltage

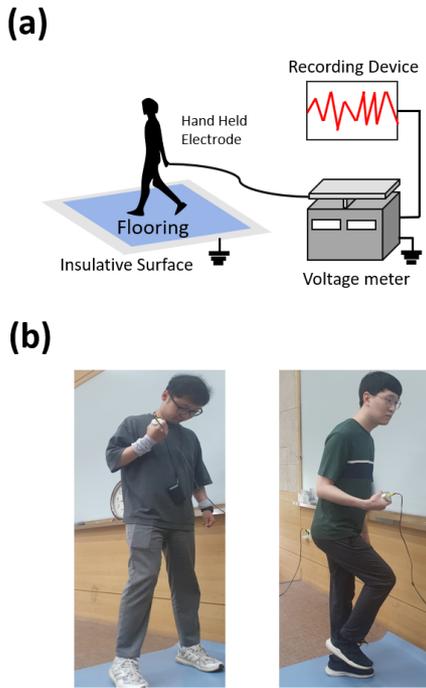
Measurement In Combination With A Person)에 기반해서 작업자의 제전효과를 검증하여 보았다. 에탄올에 180분 노출된 CP와 CRM의 상황을 모사한 환경에서 Fig. 5와 같이 한발을 번갈아 올리면서 제자리 걷기 (Waliking), 뛰기(Running) 상황에서 작업자의 인체 전위 변화를 인체 전압 측정기(TREK542A, TREK, USA)를 이용하여 측정하였다. 실험 환경은 온도 20°C, 상대습도 60%로 설정하였으며 피실험자가 CP와 CRM 위에서 인체 전위 변화를 총 1분 동안 0.05초 간격으로 측정하였다.

이때 작업자는 제전 처리가 되지 않은 의류와 신발을 착용하였으며, 제전 바닥재와 건물의 접지 사이에는 저저항 구리선으로 연결하였다.

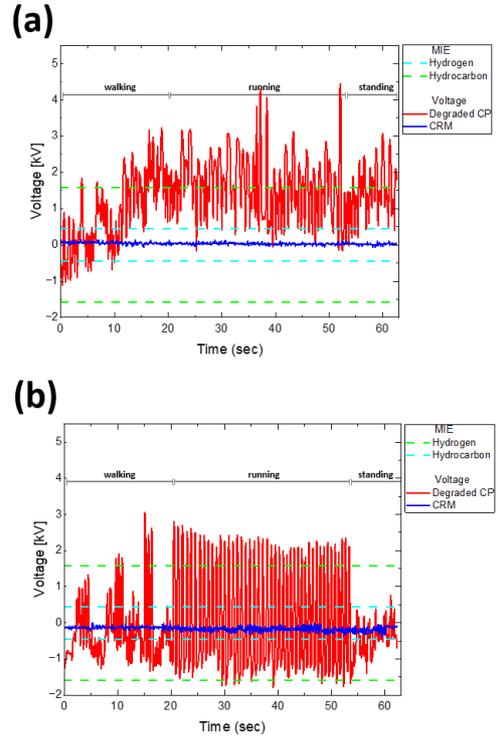
Fig. 6(a, b)과 같이 1분간 실험 결과 Ethanol에 180분 이상 노출된 CP의 경우 피실험자들의 인체 전위는 Table 1과 같이 나타났다.

**Table 1.** Humanbody voltage of two different workers on the CP and CRM exposed to ethanol for 180 min

Worker		Maximum Voltage [kV]	Minimum Voltage [kV]	Average Voltage [kV]
1	CP	4.44	-1.1	1.386
	CRM	0.15	-0.07	0.038
2	CP	3.06	-1.79	-0.102
	CRM	0	-0.39	-0.161



**Fig. 5.** (a) Schematic and (b) photographs of humanbody voltage measurement test.



**Fig. 6.** (a,b) Humanbody voltage of two different workers on the CM and the (b) degraded CP after 180 minutes of ethanol immersion test. Here the green and cyan dashed line indicate maximum allowable voltage at facilities with hydrogen and hydrocarbon, respectively.

인체 전위는 주로 인체 내부의 전기적 활동에 의해 결정되게 된다. 두 작업자의 신체 조건이 다르기 때문에 인체 전위가 차이를 보였다. 이 경우 인체 전위(V)로 인해 발생할 정전기 방전 시 에너지의 양은 일반적인 Capacitor(C)의 에너지(W) 모델을 이용하여 아래 식 (1)과 같이 간단하게 계산가능하다.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 [J] \tag{1}$$

앞에서 말한 바와 같이 작업자의 인체 캐패시턴스를 200pF이라고 가정하면, CP에서 발생할 수 있는 최대 방전에너지는 Table 2와 같다.

**Table 2.** Calculated energy of electro discharge from two different workers on the CP and CRM exposed to ethanol for 180 min

Worker		Maximum Energy [mJ]	Average Energy [mJ]
(1)	CP	1.971	0.280
	CRM	0.002	0.000
(2)	CP	0.936	0.141
	CRM	0.015	0.003

실험 결과 CP와 CRM 조건에서의 인체전위로 인해 발생하는 정전기 방전 에너지에서 큰 차이를 보였다. CP에서 두 작업자의 최대 방전에너지는 수소의 MIE (0.02mJ)와 탄화수소계열 연료의 MIE (0.2-0.3mJ)보다 높은 값을 보였으며, 60초 동안 발생한 방전에너지의 평균도 수소 MIE보다 높게 나타났다. 수소나 탄소 기반 연료들의 증기가 폭발농도 이상으로 유출되는 경우 장시간 열화된 CP 위의 작업자에 축적된 정전기는 점화원으로 작용하여 폭발 위험성이 매우 높아지게 된다.

반면 CRM위에 있는 작업자의 정전기로 인한 최대 방전에너지는 두 작업자 모두 수소 MIE보다 낮은 수준으로 나타났다. 에탄올에 장시간 노출 되었음에도 불구하고, CRM 바닥재의 저항이 크게 변화하지 않아서, 그 위에 있는 작업자의 정전기 방전에너지는 수소와 탄화수소의 최소 점화 에너지를 넘지 않게 관리되었다. CP 상태에서는 화학적, 기계적 스트레스에 의해 손상이 발생하였을 때, 정전기를 빨리 배출해 주지 못하여 인체 전위가 올라가게 되고 제전 바닥재로서의 기능을 이행하지 못하였다. 반면 CRM은 화학적, 기계적 스트레스에 의해 손상이 거의 발생하지 않고, 작업자의 정전기를 빠르게 외부로 배출해 줄 수 있었다. 본 결과는 습도에 따라 조금 다르게 나타날 것으로 예상된다. 습도가 높을수록 바닥의 저항이 감소하여 같은 행동을 하여도 전하가 빨리 빠져나가게 되어 인체 전위는 낮아지고, 정전기 방전 시 발생하는 에너지가 감소한다<sup>20)</sup>. 따라서, 본 연구의 조건(20°C, 상대 습도 60%) 보다 건조한 겨울이나 맑은 날에는 더 높은 인체 전위와 그로 인해 발생하는 방전에너지가 예상된다. 따라서 건조한 환경에서는 CRM의 효과가 더 잘 나타날 것으로 예상된다. 한편, 습도가 높은 여름철이나 비가 내리는 경우 본 실험에서 보다 마찰에 의한 인체 전위와 방전 에너지가 줄어들 것으로 예측된다. 이 경우 CRM의 효과는 본 실험보다 조금 줄어들 것으로 예상된다. 하지만 두 경우 모두 CRM은 아무 처리되지 않은 바닥재나 기계적 화학적으로 손상된 CP 바닥재보다 작업자의 인체 전위를 낮추고, 정전기 방전 시 에너지를 낮추는 효과가 있을 것으로 예상된다.

따라서 기계적 화학적 신뢰성이 높은 CRM은 향후 수소 기반 전력설비 및 운송설비가 있는 시설에서 정전기 방전에 의한 화재 폭발을 감소하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 규정에서는 수소 기반 설비에서 폭발 방지를 위해 바닥재의 저항 값은 제시하고 있으나, 기계적 화학적 손상이 발생하는 경우를 고려한 값은 제시되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서 얻은 결과처럼 바닥재의 저항과 함께 기계적 화학

적 신뢰성에 대한 부분이 보충된다면 CRM과 같이 안전한 수소 기반 안전 설비를 구현하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

기후변화 대응 및 탄소중립 도달을 위해 수소를 기반으로 한 전력 설비 및 운송 수단에 설치가 증가하고 있다. 하지만 최소점화에너지가 낮은 수소는 폭발 가능성이 높기에 작업자 및 주변 설비로부터 발생할 수 있는 정전기 방전에 대한 엄격한 관리가 필요하다.

본 연구에서 제전효과가 뛰어난 전도성 고무 바닥재의 제전 효과에 대해 분석하였다. 도전 입자가 도핑된 CRM의 초기 저항이  $10^7 \Omega$  정도로 널리 사용되는 CP와 유사하다. 하지만 CRM은 CP 대비 내화학성이 매우 우수하여, 에탄올, 묽은 황산, 광유 등의 다양한 화합물에 장시간 노출되어도 저항이 유지되었다. 또한 고무 바닥재 전면에 도전 입자가 균일하게 도핑되어 있어서 CRM 표면에 기계적인 마모가 발생하여도 저항값을 유지하는 장점이 있다.

즉 CRM은 장시간 사용으로 인한 마모, 표면 오염 및 화합물 노출 등에 대해서 대전 효과의 신뢰성을 확보할 수 있는 바닥재이다. 장시간 사용을 모사한 CP, CRM에서의 작업자의 인체전위 측정 결과 CRM은 작업자에 축적되는 전하를 빠른 시간 내에 제전시켜서 작업자의 인체 전위를 수소를 이용한 설비의 폭발 하한치로 유지할 수 있었다. 따라서 기계적, 화학적 안정성이 높은 도전성 고무 바닥재를 수소를 이용하는 설비에 적용하는 경우 정전기 방전에 의한 위험을 줄이는데 크게 기여할 수 있다.

**Acknowledgement:** This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) through the Mid-career researcher program (NRF-2022R1A2C1092582) and “Leaders in INdustryuniversity Cooperation (LINC) 3.0” Program.

#### References

- 1) L. M. Beard, J. B. Cardell, I. Dobson, F. Galvan, D. Hawkins, W. Jewell, M. Kezunovic, T. J. Overbye, P. K. Sen and D. J. Tylavsky, “Key Technical Challenges for the Electric Power Industry and Climate Change”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 2, pp.

- 465-473, 2009.
- 2) C. Fant, B. Boehlert, K. Strzepek, P. Larsen, A. White, S. Gulati, Y. Li and J. Martinich, "Climate Change Impacts and Costs to US Electricity Transmission and Distribution Infrastructure", *Energy*, Vol. 195, p.116899, 2020.
  - 3) K. Zhang, B. Zhou, S. W. Or, C. Li, C. Y. Chung and N. Voropai, "Optimal Coordinated Control of Multi-renewable-to-hydrogen Production System for Hydrogen Fueling Stations", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 58, No. 2, pp. 2728-2739, 2021
  - 4) C. Breyer, S. Khalili, D. Bogdanov, M. Ram, A. S. Oyewo, A. Aghahosseini, A. Gulagi, A. A. Solomon, D. Keiner, G. Lopez and P. A. Østergaard, "On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 10, pp. 78176-78218, 2022.
  - 5) Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, X. Zhang and G. Wang, "Collaborative Planning for Electricity Distribution Network and Transportation System Considering Hydrogen Fuel Cell Vehicles", *IEEE Transaction on Transportaion Electrification*, Vol. 6, No. 3, pp. 1211-1225, 2020.
  - 6) X. Gong, F. Dong, M. A. Mohamed, O. M. Abdalla and Z. M. Ali, "A Secured Energy Management Architecture for Smart Hybrid Microgrids Considering PEM-Fuel Cell and Electric Vehicles", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 47807-47823, 2020.
  - 7) I. J. Kim, J. H. Kim and J. S. Lee, "Dynamic Analysis of Well-to-wheel Electric and Hydrogen Vehicles Greenhouse Gas Emissions: Focusing on Consumer Preferences and Power Mix Changes in South Korea", *Applied Energy*, Vol. 260, p. 114281, 2020.
  - 8) J. W. Kim, J. H. Ryu, H. H. Cho, Y. K. Oh and H. S. Lee, "A Study on Optimal Operation Strategy of Hydrogen Charging Facilities at Hydrogen Fuel Cell Train Depots", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 71, No. 10, pp. 1467-1473, 2022.
  - 9) D. Cirrone, D. Makarov, C. Proust and V. Molkov, "Minimum Ignition Energy of Hydrogen-air Mixtures at Ambient and Cryogenic Temperatures", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 43, pp. 16530-16544, 2023.
  - 10) A. Kumamoto, H. Iseki, R. Ono and T. Oda, "Measurement of Minimum Ignition Energy in Hydrogen-oxygen-nitrogen Premixed Gas by Spark Discharge", *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 301, No. 1, IOP Publishing, 2011.
  - 11) J. H. Lee and J. Y. Lim, "A Study on the Achievement of Required Safety Integrity Level to Reduce Risk for SMR On-Site Hydrogen Refueling Stations", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 35, No. 6, pp. 1-8, 2020.
  - 12) S. W. Choi, "A Study on the Development of an Electrostatic Eliminator and Evaluating Method of Explosion-Protection Construction", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 29, No. 6, pp. 49-54, 2014.
  - 13) J. H. Park, J. S. Byeon, J. H. Jang, M. G. Ko, N. Y. Ahn, M. S. Choi and H. J. Song, "Electrically Reliable Perovskite PhotoVoltaic Cells Against Instantaneous KiloVolt Stress", *Advanced Energy Materials*, Vol. 13, No. 3, p. 2203012, 2023.
  - 14) M. W. Ha, S. C. Lee, M. K. Han and Y. H. Choi, "Eletrostatic Discharge Effects on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor on Sapphire Substrate", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 54, No. 3, pp. 109-113, 2005.
  - 15) K. T. Moon, J. H. Chung, K. S. Choi, "Experimental Study on Electrostatic Hazards of Powder in Fluidized Bed", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 25, No. 4, pp. 19-24, 2010.
  - 16) J. H. Yoo, "A Study on Dispersed Media Formation of Hydrocarbon Fuel by an Explosive Burster", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 2, pp. 33-40, 2016.
  - 17) V. Khandelwal, S. K. Sahoo, A. Kumar and G. Manik, "Electrically Conductive Green Composites based on Epoxidized Linseed Oil and Polyaniline: An Insight Into Electrical, Thermal and Mechanical Properties", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 136, pp. 149-157, 2018.
  - 18) A. Das, H. T. Hayvaci, M. K. Tiwari, I. S. Bayer, D. Erricolo and C. M. Megaridis, "Superhydrophobic and Conductive Carbon Nanofiber/PTFE Composite Coatings for EMI Shielding", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 353, No. 1, pp. 311-315, 2011.
  - 19) A. Oshawa, "Electrostatic Characterization of Antistatic Floors using an Equivalent Circuit Model", *Journal of Electrostatics*, Vol. 51-52, pp. 625-631, 2001.
  - 20) H. S. Kim and H. J. Song, "Static Spark Discharge Risk Caused of Human Body Voltage in Flammable Atmosphere", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 70, No. 11, pp. 1743-1749, 2021.