

# 개인보호장비의 아크등급을 결정하는 ATPV에 영향을 미치는 요인에 대한 연구

## A Study on the Factors Affecting ATPV in Determining the Arc Rating of Personal Protective Equipment

김재춘<sup>1</sup> · 이경복<sup>2</sup> · 노광현<sup>3\*</sup>Jaechun Kim<sup>1</sup>, Kyungbok Lee<sup>2</sup>, Kwanghyun Ro<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Ph.D. Candidate, Department of Smart Convergence Consulting, Hansung University, Seoul, Republic of Korea<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Future Mobility, Hansung University, Seoul, Republic of Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Applied Artificial Intelligence, Hansung University, Seoul, Republic of Korea\*Corresponding author: Kwanghyun Ro, [khrho@hansung.ac.kr](mailto:khrho@hansung.ac.kr)

### ABSTRACT

**Purpose:** This study purposes to analyze the factors affecting the arc rating of personal protective equipment and the effect of these factors on the determination of arc thermal performance value(ATPV) in arc flash tests. **Method:** Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) method was used to simplify the complex relationships among individual variables such as environmental conditions (Duration Time, Duration Cycle), electrical conditions(ARC Voltage, Current Total RMS), and peak conditions(ARC Voltage Peak, Peak Current), and to group them into high-dimensional secondary latent variables to increase the validity of the concept and clearly verify the research hypothesis. **Result:** ARC energy acts as an important parameter affecting the Heat Attenuation Factor(HAF), Stoll Curve Deviation(SCD), and ultimately the ATPV. Among the relationships among the examined variables, the incident energy showed a moderating effect between ARC Energy and ATPV, and it was confirmed that the incident energy had an indirect effect through the interaction of ARC energy and HAF and SCD in determining the ATPV value. **Conclusion:** The need for continuous technological development of PPE to protect workers from arc flash and prediction of arc flash accidents is raised, and furthermore, it is suggested that selection of appropriate PPE, continuous safety education, and establishment of a solid safety culture are essential for the safety of workers in industrial sites.

**Keywords:** ARC Flash, PPE, ATPV, Incident Energy, HAF, SCD

### 요약

**연구목적:** 본 연구는 개인보호장비의 아크등급에 영향을 미치는 요인과 이러한 요인이 아크 플래시 테스트에서 아크열적 성능값(ATPV) 결정에 미치는 영향을 분석하는 것을 목표로 한다. **연구방법:** 부분최소제곱 구조방정식 모델링(PLS-SEM)의 연구방법을 사용하여 환경 조건(Duration Time, Duration Cycle), 전기 조건(ARC Voltage, Current Total RMS), 피크 조건(ARC Voltage Peak, Peak Current)과 같은 개별 변수간의 복잡한 관계를 단순화 하고 개념의 타당성을 높이며 연구가설을 명확하게 검증하기 위하여 고차원의 이차 잠재 변수로 그룹화하여 연구의 타당성을 높이고 연구가설을 명확히 하였다. **연구결과:** ARC 에너지는 HAF(Heat Attenuation Factor), SCD(Stoll Curve Deviation), 궁극적으로 ATPV에 영향을 미치는 중요한 매개 변수로 작용한다는 것이 확인되었다. 검토된 변수들 간의 관계 중에서 입사에너지(Incident Energy)는 ARC Energy와 ATPV 사이에서 조절 효과를 보였으며, ARC 에너지가 HAF와 SCD를 통해서 ATPV 등급을 결정하는데 입사에너지가 상호작용을 통한 간접적인 영향을 확인하였다. **결론:** 아크 플래시로부터 작업자를 보호를 위한 PPE의 지속적인 기술개발과 아크플래시 사고예측의 필요성을 제기하고 있으며, 더 나아가 산업현장에서 근로자의 안전을 위해 적절한 PPE의 선택과 지속적 안전교육, 견고한 안전문화의 확립이 필수적임을 제안한다.

**핵심용어:** 아크플래시, 개인보호장비, 아크열적 성능 값, 입사에너지, 열감쇄 계수, 화상임계편차

Received | 17 February, 2025

Revised | 4 April, 2025

Accepted | 4 April, 2025



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

### 연구의 배경 및 목적

현대 사회에서 전기에너지는 전 산업분야에서 필수적인 에너지원으로 자리 잡았지만, 동시에 중대재해를 일으키는 원인이 되기도 한다(Bae, 2019). 수·배전반에서의 아크플래시 사고는 전기적 요인(과부하, 단락, 모선의 접속불량, 트래킹), 물리적 요인(진동, 충격, 접속부 이완, 작업자 실수, 동물 등의 침입)에 의해 다양하게 발생한다(Kim et al., 2015). Bae(2019), LEE(2020)는 아크 플래시 사고는 10,000~20,000℃의 극심한 고온과 일반 광량의 약 2,000배에 달하는 강렬한 빛, 높은 음압(2,160psi), 강력한 폭발음(1,400dB)을 동반하며, 작업자에게 심각한 화상, 연기흡입, 시력 손상, 청력 상실, 폐 허탈, 골절, 자상, 의식불명 등 심지어 사망에 이르게 할 수 있는 중대산업재해를 일으키는 주요 원인 중 하나로 제기하고 있다. 이와 관련하여 Jeong(2024)은 사업주와 경영책임자 및 법인, 기관장 등을 처벌함으로써 근로자와 시민의 안전권을 확보하고 중대산업재해와 중대시민재해를 사전에 방지하기 위해 「중대재해 처벌 등에 관한 법률」이 2021년 1월 26일에 제정되었지만, 지금까지 선고된 중대재해처벌법 위반 판결에서 가장 많은 위반사항으로 지적된 부분은 유해·위험요인을 확인하여 개선하는데 초점을 맞추고 있으며, 이는 Bae(2019)가 아크 플래시 발생 시 방출되는 에너지는 단락 전류, 전압 크기, 보호계전기 동작특성 및 아크 지속 시간에 의해 결정되며, 특히 아크 지속 시간이 100ms를 초과할 경우 cable fire/copper fire/steel fire 등의 원인으로 충전비 시설장치가 손상이 되고, 500ms를 초과할 경우 모든 설비가 전소될 가능성을 제기하였고, Qi(2023)에 따르면 미국산업안전보건청 OSHA의 전기사고에 대한 데이터를 기준으로 통계된 1,400건 중 전기아크(709), 아크플래시(471), 아크폭발(139)로 대부분의 사고가 아크사고로 통계되고 있음을 제시 하였는데, 이는 전기아크 사고가 근로자에게 전기배전공사현장에서 중대산업재해로 확대될 수 있는 심각성을 명확히 보여주고 있는 것이다.

Oh(1994), Lee(2020)는 최근에는 산업 발전과 국민생활의 향상에 따라 전기의 품질이 무엇보다 중요시되면서 무정전으로 활선상태에서의 전기작업이 증가하면서 아크 플래시 사고의 위험 역시 증가하고 있다. 이러한 상황에서 작업자의 안전을 확보하기 위한 효과적인 보호 대책이 필수적인데, 개인 보호 장비(Personal Protective Equipment, PPE)는 아크 플래시 사고로부터 작업자를 보호하는 가장 중요한 수단 중 하나로 작업 환경과 작업 내용에 따라 NFPA 70E(2018)의 국제 기준에 따른 적절한 등급의 PPE를 착용하도록 권고하고 있다. 국내에서는 KOSHA E-162-2017 규정에 의거 PPE에 대한 분류가 되어 아크플래시에 대한 안전인식, 절연보강, 접근제한 등과 같이 인체의 감전보호를 위주로 하고 있으며, 이는 아크플래시에 대한 위험성 과 안전대책 수립의 필요성을 기술하고 있다. 국내 인증 받은 아크플래시 보호를 위한 소재와 PPE가 고가이면서 해외수입품이 많고 실제 착용 시 불편한 점 등으로 현장 작업자들이 아크 플래시의 위험을 인지하고 실제 현장에서 아크플래시 보호/관리를 어떻게 해야 하는지에 대한 방법은 제시되지 않아서 적절한 PPE를 선택하는 데 어려움이 있는 것이 현실이며, 또한 전기작업현장에서 PPE에 대한 불편함에 따른 작업성 저하, 현장작업의 어려움, 안전의식 부족 등과 함께 실제 현장에서 어떻게 운영하는지에 대한 수준이 미흡한 상태로 이는 PPE의 활용을 저해요인으로 작용하고 있다(Kim, 2022; Bae, 2019). Jo(2023)는 체험교육과 스마트 안전보건활동을 접한 근로자는 모든 작업에서 의도된 안전 행동을 한다는 분석이 가장 높게 나타남을 제시하였고, 이는 결국 작업 중에 근로자의 불안전 행동이 줄어들므로 안전사고가 감소할 수 있다는 결과를 확인하였다. 이에 따라 Lee(2020)는 저압전기작업에서 아크플래시로부터 작업편의성과 작업자의 안전을 고려할 필요성이 있으며, 이와는 별개로 국내 산업 현장의 안전 수준을 향상시키기 위해서는 아크 플래시 보호에 대한 국제기준에 부합되는 규정의 보완과 전기작업자들에게 아크플래시의 위험성을 알리고 적절한 PPE 착용의 필요성을 인식시키는 작업자의 인

식개선이 병행되어야 할 필요성을 제기하고 있다.

## ATPV 시험과 요인분석의 필요성

NFPA 70E(2018), IEEE 1584(2018)에서 ATPV(Arc Thermal Protective Value, 아크열적 성능 값)는 아크 플래시 시험에서 재료가 2도 화상을 유발하기 직전까지 견딜 수 있는 최대 입사에너지 값을 측정하는 시스템으로 국제적으로 ASTM International(2023), ASTM International(2013)의 시험표준에 의거 PPE의 ATPV 등급을 평가하고 아크등급을 결정하는 중요한 지표이다. IEEE(2018), NFPA 70E(2018)은 ATPV를  $\text{cal/cm}^2$  로 표시되며, PPE가 아크 플래시로부터 작업자를 보호할 수 있는 정도를 나타낸다. KOSHA E-162-2017에 따라 PPE 등급을 결정하는 데 있어, ATPV는 PPE의 아크 등급(Arc Rating)을 결정하는 핵심 요소이며, 작업자는 이러한 ATPV 수치를 기준으로 적절한 등급의 PPE를 선택해야 한다. 하지만, 실제 현장에서는 아크 플래시 발생 시 다양한 요인(환경, 전기적 조건 등)이 입사에너지에 영향을 미치기 때문에, 이러한 요인과 실제 현장의 안전율을 고려하여 PPE를 선택해야 한다(Shin et al., 2018).

이와 같이 아크 플래시 사고는 다양한 원인으로 발생할 수 있으며, 그 위험성은 매우 심각하며 아크 플래시 사고를 예방하고 작업자의 안전을 확보하기 위한 지속적인 연구가 필요하며 기존의 연구는 아크 플래시 발생 메커니즘 및 관련 시설장치 및 장비 개발에 초점을 맞추었지만, 현실적인 작업 환경에서 발생하는 다양한 요인들이 아크 플래시 사고에 미치는 영향을 고려해야 할 것이다. 본 연구에서는 ATPV 시험을 통해서 얻어진 ATPV 데이터를 PLS-SEM 구조방정식 모델링을 통해 아크 플래시 사고에 영향을 미치는 독립변수들 간의 관계를 분석하고, 이를 통해 아크등급에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고자 하였다.

## 연구의 모형의 결정과 연구방법

본 연구는 PLS-SEM(Partial Least Squares - Structural Equation Modeling)을 활용하여 ATPV 시험에 영향을 미치는 다양한 요인들 간의 상관관계 분석을 목표로 한다. Jang(2021), Hair et al.(2011)에서 PLS-SEM는 복잡한 구조적 관계를 분석하는 데 유용한 통계 기법으로, 잠재 변수 간의 인과관계를 파악하는 데 효과적으로 연구모형으로 증명하고 있으며 이를 바탕으로 Fig. 1과 같이 연구모형을 선정하였다.

Fig. 1의 연구모형을 기준으로 각각의 변수를 다음과 같다.

① 독립변수는 ARC Energy의 결정요인으로 환경적 조건, 전기적 조건, PEAK 조건으로 설정하였다

a) 환경적 조건: 온도, 습도, 기압 등 작업 환경의 변화가 ATPV 데이터에 영향을 미치게 되지만 ATPV 실험실 테스트 환경에서 제공된 이러한 환경조건은 균일하게 제공이 되며 실험실에서 아크에너지에 직접적으로 영향을 미칠 수밖에 없는 아크플래시에 노출되게 되는 노출 시간(Duration Time)과 아크플래시의 크기(Duration Cycle)을 환경조건으로 정하였다. 습도, 온도, 기압 등 다양한 환경조건이 존재하지만 ATPV 시험 조건이 동일한 실내 환경조건으로 수행되는 관계로 기타 환경조건은 독립변수에서 모두 제외하였다(AITEX, 2018a; 2018b; 2019; 2020a; 2020b; 2021a; 2021b; 2022a; 2022b; 2022c).

b) 전기적 조건: IEEE 1584(2018)에서는 아크플래시 발생 시 전류와 전압이 ARC Energy의 1차적인 에너지 공급원 역할을 함으로 이를 주요변수로 고려하고 있으며 전류는 교류신호를 보다 정확한 에너지 값의 반영을 위하여

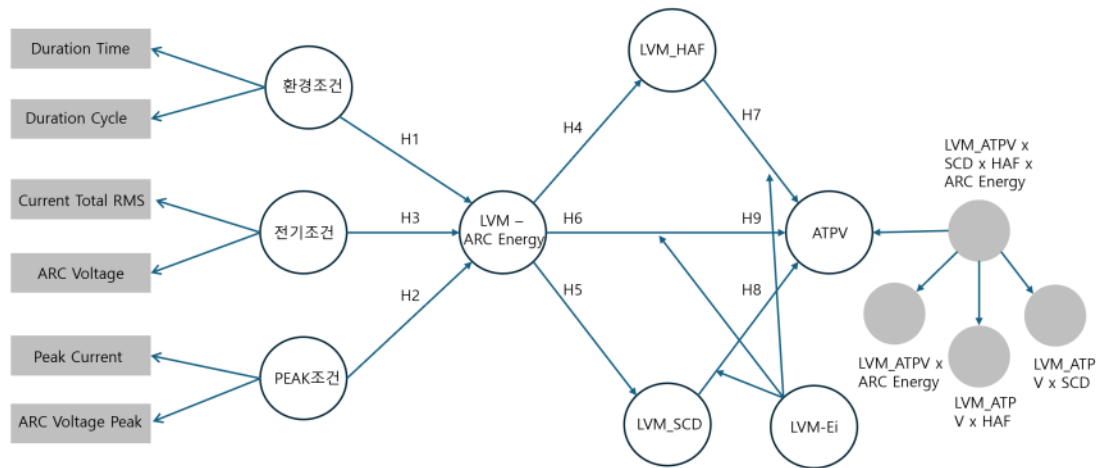


Fig. 1. Research model for ATPV

RMS(Root Mean Square) 값으로 사용하였다.

- c) PEAK 조건 : Wu(2006)는 아크플래시에 노출이 되면 순간적으로 과도한 PEAK 전류 및 서지전압이 발생하게 되며 이러한 과도한 전류와 서지전압이 ARC Energy에 미치는 영향을 크다는 분석을 하였으며 이를 참고하여 PEAK Current와 ARC Voltage Peak를 PEAK 조건의 주요변수로 설정하였다.
- ② Doughty(1998)의 연구에 따라 ATPV에 가장 큰 영향을 미치게 되는 통제변수는 ARC Energy로 선정하였으며 독립변수인 환경적 조건, 전기적 조건, PEAK 조건의 영향을 받아서 생성된 값으로 ARC Energy를 연구모형의 통제변수로 설정하였다. ARC Energy는 ATPV 시험을 통해서 얻어지는 ATPV에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수로 연구모형의 중심을 분석하였다.
- ③ ASTM International(2023)의 ASTM F1959/F1959M-12의 시험기준에서 ATPV 시험에서 중요하게 다루어지고 있는 Heat Transmission과 Stoll Curve를 고려하여 HAF(Heat Attenuation Factor, 열 감쇄 계수) 및 SCD(Stoll Curve Difference, 스톨커브편차)를 조절변수로 설정하였다. HAF와 SCD는 ARC Energy와의 상호작용으로 ATPV에 큰 영향을 미칠 가능성이 높다.
- ④ 입사에너지(Ei, Incident Energy)는 실제 시험결과 값을 개별 변수들 간의 상관관계를 사전에 실시한 결과 전체적으로 변수들간의 상관관계가 통계적으로 유의미성이 낮은 점을 고려하여 ATPV 등급을 결정하는데 ARC Energy와 ATPV 간의 관계를 매개하면서 동시에 HAF와 SCD를 조절하고 종속변수와 조절변수 상호작용효과를 검증하는 변수로 설정하였다.
- ⑤ Doughty(1998)는 ATPV가 아크플래시 발생시 PPE가 열에너지로부터 작업자를 보호할 수 있는 성능을 나타내는 핵심 지표로 연구하고 있다. 이러한 선행 연구결과를 바탕으로 ATPV를 ARC Energy, Ei, HAF, SCD의 영향을 받아 결정되는 핵심변수로 아크플래시 보호성능을 평가하는 중요한 지표이며, 본 연구에서는 이를 ATPV x ARC Energy x Ei x HAF x SCD의 다중 상호작용 효과를 포함하여 아크플래시의 위험성과 보호성능 간의 관계를 보다 정밀하게 평가하고자 하였다.

Fig. 1의 연구모형을 바탕으로 Table 1의 10개의 연구가설을 설정하였다. 연구모형은 ATPV 시험을 통해 얻어지는 위한

측정된 개별변수들이 많고 복잡하여 일차 변수(First Order)를 이차잠재변수 (Second-Order Latent Variable)로 구조를 단순화하여 연구모형을 구성하고 PPE의 보호등급을 결정하는 ATPV의 새로운 변수를 종속변수로 지정하여 연구모형을 지정하여 연구모형을 바탕으로 10개의 연구가설을 설정하였으며 이를 이차잠재변수로 연구모형을 선정하여 PLS-SEM을 통하여 ATPV에 미치는 요인을 분석하였다.

**Table 1.** Research hypothesis

| 연구모형의 구분                            | 연구모형별 세부 연구가설                                                                                          |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARC Energy 결정 요인에 대한 독립변수 간의 가설     | H1: 환경조건(Duration Time, Duration Cycle)은 ARC Energy(LVM_ARC Energy)에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                  |
|                                     | H2: 전기조건(Current Total RMS, ARC Voltage)은 ARC Energy(LVM_ARC Energy)에 유의미한 영향을 미칠 것이다..                |
|                                     | H3: PEAK조건(Peak Current, ARC Voltage Peak)은 ARC Energy(LVM_ARC Energy)에 유의미한 영향을 미칠 것이다.               |
| ARC Energy와 종속변수 및 통제변수 간 관계에 대한 가설 | H4: ARC Energy는 HAF에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                                  |
|                                     | H5: ARC Energy는 SCD에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                                  |
|                                     | H6: ARC Energy는 ATPV에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                                 |
| 종속변수 ATPV의 결정 요인에 대한 가설             | H7: HAF는 ATPV에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                                        |
|                                     | H8: Ei는 ATPV(LVM_ATPV)에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                               |
|                                     | H9: SCD는 ATPV에 유의미한 영향을 미칠 것이다.                                                                        |
| 상호작용 효과에 대한 가설                      | H10: ARC Energy, HAF, SCD 및 ATPV 간의 다중 상호작용(LVM_ATPV x SCD x HAF x ARC Energy)은 ATPV에 유의미한 영향을 미칠 것이다. |

## 선행논문 및 연구동향

아크 플래시에 대한 선행논문의 연구동향은 아크플래시 발생의 물리적 메커니즘을 규명하고, 사고 발생 조건과 전기적 특성(전류, 전압, 시간)의 관계를 분석하는 데 초점을 맞추었다. Stokes et al.(2004)는 아크 플래시의 발생 조건으로 Arc Voltage, Current ARC의 전기적 변수의 상호작용을 연구하여 아크 에너지와 전기적 특성 간의 비선형 관계를 제시하였으며 전기적 파라미터 변화가 사고 위험성에 미치는 영향을 정량화하였다. 이러한 PPE의 성능을 평가하는 선행연구는 ATPV 등급기준의 중요성을 강조하며 지속적으로 발전해 왔다. Rossi et al.(2008)은 다양한 PPE의 열 보호 성능과 기계적 강도를 반복적인 고온 및 화염 노출 후 평가를 실시하여 반복적인 열 노출은 PPE의 열 보호 성능과 기계적 강도에 부정적인 영향으로 인한 성능저하를 검증하였고, Doan(2003)은 이러한 PPE와 아크플래시의 상관관계를 통하여 적절한 방호등급의 방호복의 ATPV 등급을 결정하는 데 중요한 기초자료를 다양한 데이터 분석을 통하여 분석하였다. 특히, 아크플래시 사고로부터 작업자 안전에 관한 지침을 KOSHA E-162-2017에서 제시하고 있지만 국제 기준에 부합하도록 아크플래시에 대한 위험분석과 대책방안이 충분한 제시하는 데는 부족하며, 이러한 상황에서 국내에서는 전기작업자의 아크사고는 여전히 다수 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다(Kim, 2022; Kim et al., 2012).

## 이론적 배경

### 국내 아크방호 관련 안전규정

‘산업안전보건기준에 관한 규칙’에서 사업주는 전기적 불꽃 또는 아크에 의한 화상의 우려가 있는 고압 이상의 충전전로 작업에 근로자를 종사시키는 경우에는 방염처리 된 작업 복 또는 난연 성능을 가진 작업복을 착용시켜야함을 규정하고 있으며, Lee(2020)는 국내 규정 KOSHA(E-162-2017), KOSHA (E-166-2017)에서 전기작업자의 안전 보호장구와 아크섬락 위험성 방지를 위한 가이드를 제시하고 있지만 이 기술지침은 600V 이상의 활선작업 및 활선근접 작업 시 착용하는 작업복에 대하여 적용한다고 적용범위를 규정하고 있어서 저압 전기작업자의 아크플래시 위험에 대한 보호가 충분하지 않다는 것을 지적하고 있다. 따라서 Shin et al.(2018)에서 국내 법규 및 제 규정에서 아크 플래시 위험을 정확히 평가하고 적절한 PPE를 전기공사 현장에서 선택하는 데 어려움이 있는 상태로 규정했다.

### 국제표준(IEEE 1584, NFPA 70E) 분석

IEEE 1584(2018)는 다양한 실험과 통계 분석을 통해 개발된 계산식을 제공하여 아크 플래시 사고 에너지를 예측하고, 이를 통해 플래시 보호 경계(FPB)와 PPE 등급을 결정하며 고장 전류 계산, 아크 지속 시간, 작업 거리, 설비 간격 등 다양한 요소를 고려하여 아크 플래시 위험을 평가하며, 대규모 전력 계통에서 널리 활용되고 있다. 또한, NFPA 70E(2018)는 산업현장 내 전기 안전 요건에 대한 합의된 기준을 제공하며, 작업 유형에 따른 재해 위험 범주(Hazard Risk Category)를 분류하고, 아크 플래시 경계 거리(Arc Flash Boundary)와 PPE 관련 지침을 제공하고 있다. NFPA 70E(2018)는 아크 플래시 발생 지점으로부터 접근 한계 및 경계를 분류하여 각 경계별 지침을 제시하고, 작업장 및 작업 유형별 필요한 PPE 선정 기준을 제공하며 현장 중심의 실용적인 개념과 방법을 제공하는 데 중점을 두고 있다. IEEE 1584(2018), NFPA 70E(2018)에서는 PPE는 아크 플래시 사고로부터 작업자를 보호하는 데 필수장치로 보호복, 보안경, 안전모, 절연 장갑, 안전화, 안전후드 등으로 구성되어, 아크 플래시의 사고에너지 크기에 따라 Graham et al.(2008)은 적절한 등급의 PPE를 선택하도록 다음과 같이 등급별로 규정하고 있다:

- ✓ 0등급( $0 \sim 1.2 \text{ cal/cm}^2$ ): 비 용융, 불연성 소재의 작업복
- ✓ 1등급( $1.2 \sim 4.0 \text{ cal/cm}^2$ ): 방염 셔츠와 방염 바지
- ✓ 2등급( $4.0 \sim 8.0 \text{ cal/cm}^2$ ): 1등급+면내의류+안전모자·안면 가리개
- ✓ 3등급( $8.0 \sim 25 \text{ cal/cm}^2$ ): 2등급 보호구 + 방열 가슴받이
- ✓ 4등급( $25 \sim 40 \text{ cal/cm}^2$ ): 3등급 보호구 + 전체 방열복

이상과 같이, IEEE 1584(2018) 표준에서는 아크 플래시 보호 경계(FPB)를 계산하고, 작업 거리에 따라 필요한 PPE를 제시하며, PPE의 성능은 ATPV 시험으로 얻어진 ATPV 등급을 기준으로 아크 플래시로부터 작업자를 보호할 수 있는 정도의 PPE를 선정하는 표준지표이다. 또한, 작업자는 NFPA 70E(2018)에서는 ATPV 시험을 통하여 얻어진 ATPV의 수치는 PPE가 50% 확률로 2도 화상을 방지할 수 있는 최대 에너지 수준을 의미로 설정하고, 작업자는 작업 환경과 예상되는 아크 플래시 에너지에 따라 적절한 아크등급의 PPE를 선택해야 한다.

## 아크플래시의 위험요소 및 아크종류

아크 플래시 사고는 다음과 같이 열, 빛, 압력 과 같은 다양한 위험 요소를 수반한다.

① 열(Heat): Kim et al.(2022)은 아크 플래시 발생 시 순간적으로 최대 20,000°C의 고열이 발생하여 심각한 화상을 유발할 수 있으며 이는 일반적으로 피부화상은 피부재생이 가능한 2도 이하의 화상과 피하조직의 손상으로 회복할 수 없는 3도 이상의 화상으로 구분하는데, 아크플래시 발생시 2도 이하의 화상기준 1.2 Cal/Cm<sup>2</sup> 이하로 노출되도록 제한하며 이는 PPE의 적합성의 기준으로 서술한다. ② 빛(Light): 아크 플래시 발생 시 자외선, 가시광선, 적외선이 방출되는데 일반 광량의 약 2000배의 강렬한 빛이 방출되어 시력 손상을 초래할 수 있다. 특히 강한 자외선은 눈의 각막과 수정체에 직접적인 상해를 가함으로 시력을 손상시킬 위험에 노출될 수 있다(Lee, 2020). ③ 압력(Pressure): 아크 플래시 발생 시 공기의 약 1,670배에 이르는 강한 압력파가 발생하여 고막 파열, 폐 손상, 내부 장기 손상 등 심각한 부상을 유발할 수 있으며, 아크 플래시 사고 시의 2,160psi의 음압과 1400dB 이상 고음은 청력 상실을 유발할 수 있다(Lee, 2020).

Lee(2002)는 아크 플래시를 비접촉성 아크와 접촉성 아크로 구분했다. 비접촉성 아크는 도체에서 아크가 발생할 때 직접 물리적인 접촉에 관계없이 발생하는 것으로 절연되어 있는 도체의 종류나 절연물에 따라 영향을 받는다. Lim(2019), Lee et al.(2002)은 접촉성 아크는 도체나 전극사이에 직·간접적인 접촉에 의해 발생하는 것으로 전류가 흐르는 경로 상에 도체사이의 불완전한 접촉이나 단선으로 발생되며, 전압·전류에서 높은 주파수 잡음을 나타내며 아크에 의한 전압강하가 나타나게 되는 직렬아크, 두개 이상의 도체사이에서 절연파괴로 발생하는 것으로 상도체와 중성선 사이에 단락 같은 고장이 발생한 경우로 사고시 급격한 전류가 흐르게 되는 병렬아크, 그리고 전류가 공기를 통해 활선과 접지 사이를 흐르는 경우 발생하는 아크로 절연 파괴나 습기로 인해 발생하는 접지 아크로 분류된다.

본 연구에서는 ATPV시험이 실험실 공간의 한정된 장소에서 수행되어지는 결과 값에 대한 분석으로 이어지는 만큼 Duration Time, Duration Cycle의 환경적 조건, Current Total RMS, ARC Voltage의 전기적 조건, Current Peak, Voltage Peak의 PEAK 조건을 주요 독립변수로 선정하였다.

IEEE 1584(2018), NFPA 70E(2018), Australian Energy Council.(2019), ABB Inc.(n.d.), Walsh(2008)의 이론적인 계산에서  $E_i$ 는 시간에 비례하고 거리에 반비례함을 확인할 수 있으며(Wi, 2014), 정규화된 입사에너지( $E_n$ )는 아크전류( $I_a$ )와 지수함수적 관계로 아크전류가 증가할 경우 입사에너지는 지속적으로 증가되며, 또한 변압기, 스위칭기어 등 장치의 용량에 따라 작업자의 안전거리 또한 증가됨을 확인할 수 있었다. 이는 아크플래시 사고가 발생했을 때 전류( $I_a$ ,  $I_{bf}$ ) 및 변압기 용량(kVA) 등에 따라 아크에너지( $E_n$ , E)가 커지게 되며 아크에너지 원을 신속히 차단할 수 있는 차단장치(t)와 작업자는 발생한 아크로부터 방호가 가능한 PPE를 갖추고 규정에서 정해진 적절한 아크플래시 방호경계( $D_c$ )를 준수하는 것이 무엇보다 중요하다는 것을 확인할 수 있다.

Australian Energy Council.(2019), Vähämäki(n.d.)에서 계산된 이론에도 불구하고 아크에너지를 확산시키는 가장 큰 요인은 회로차단기의 차단동작에 따라 제어되는 아크지속시간이 가장 큰 원인을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이론을 배경으로 산정된 계산식의 예제로 검토된 배전용 차단기 동작특성을 산정한 Lee(2011)의 선행연구에서는 아크지속시간을 0.04초로 산정하였을 때 아크에너지 기준이 2.5cal/cm<sup>2</sup>로 PPE 등급 1등급에 해당되지만 이론적으로 아크지속시간이 6초로 증가될 경우 아크에너지는 9 cal/cm<sup>2</sup>로 PPE카테고리 3등급에 해당되는 에너지로 보호계전기의 회로차단기가 동작지연에 따라 아크에너지는 지수함수로 증가가 되면서 작업자의 안전에 직접적인 큰 위험요인으로 작용하게 되는 것을 확인할 수 있

다. 이러한 이론적 배경을 바탕으로, 본 연구에서는 ATPV시험을 통해서 얻어진 실측된 결과 값을 PLS-SEM 모델링을 통해 아크 플래시 사고에 영향을 미치는 원인조건들의 관계를 분석하고, 이를 통해 아크등급에 영향을 미치는 요인의 분석과, 궁극적으로 산업 현장에서 작업자의 안전을 확보를 위하여 개발되는 PPE의 핵심지표를 설정하는데 기여하고자 한다.

## PLS-SEM 분석과 데이터 전처리

Jang(2021)은 PLS-SEM은 기존의 회귀분석 모델과 달리 구조방정식 모델로 지칭이 되며 요인분석, 경로분석, 그리고 회귀 분석을 결합하여 변수들 사이의 의존성 및 인간관계를 해석하는 통계적 기법으로 비슷하거나 상관관계가 높은 변수들을 그룹화하여 잠재변수를 생성하며 잠재변수의 경로계수 추정을 통해 간접적인 영향을 주는 요소도 파악이 가능하며 여러 개의 독립변수 뿐만 아니라 여러 개여 종속변수를 구성할 수 있기 때문에 복잡한 모형을 구축하고 해석하는데 용이하며 잠재변수 간의 상관관계를 정량적으로 분석하고 각 변수간의 영향력 크기와 방향성을 파악하는데 중요한 역할을 한다고 정의하였다.

실험 데이터는 PLS-SEM 분석을 위해 Jang(2021), Hair et al.(2011)은 데이터 정제->데이터표준화->데이터변환의 전처리 과정을 정의했다.

- ① 데이터 정제 : PLS-SEM은 Jang(2021)에서 부분최소자승법 기반으로 결측치 보완이 가능함으로, 측정변수로는 ARC Voltage, Peak Current, Current Total RMS, Duration Time, Duration Cycle로, VM\_ARC Energy, LVM\_ATPV, LVM\_HAF, LVM\_SCD, LVM\_Ei는 잠재변수(Latent Variable) 로 데이터 정제가 수행되었으며 LVM\_HAF, LVM\_Ei에서 일부 결측치(NaN)가 존재하지만 선행논문을 바탕으로 별도의 이상치 제거 없이 진행하였다.
- ② 데이터 표준화 : Jang(2022)은 PLS-SEM 모델에서 회귀분석의 일관성을 높이기 위하여 수행하는 단계로 데이터표준화를 정의했으며, 초기 가중치를 1.0으로 표준화된 방식으로 처리되어 상대적으로 중요성이 유지되도록 수행하였다.
- ③ 잠재변수 측정항목 선정

Jang(2021)은 2차 잠재변수(Second-Order Latent Variable)는 1차 잠재변수(관측변수)와 연결되며 1차 잠재변수를 묶어서 상위개념의 다층구조로 2차 잠재변수를 사용하여 개념적으로 구조를 단순화하고 다양한 하위차원을 통합하여 연구모형의 해석력을 향상시킨다고 정의되었으며 이를 참조하여 Table 2와 같이 잠재변수를 생성했다.

**Table 2.** Second order LV list

| Second order LV | First order LV 구성요소      |
|-----------------|--------------------------|
| LVM_ARC Energy  | 환경조건, 전기조건, PEAK조건       |
| LVM_ATPV        | ARC Energy, Ei, SCD, HAF |

Hair et al.(2011)는 Factor Loading값이 0.7 이상이면 유효하며 ARC Voltage와 ARC Voltage Peak값은 0.4~ 0.7로 잠재변수와 측정변수 간 상관관계가 허용은 가능하지만 신뢰성은 다소 부족한 것으로 확인되었다. Valdes et al.(2023)은 실제 ARC Energy에 미치는 영향이 전압에 대한 영향 보다는 전류와 관련성이 높다는 것을 예측할 수 있었는데 PLS-SEM의 수행으로 Table 3과 같이 개별 독립변수들의 First Order LV의 Factor Loading값을 다음과 같이 구하였다.

**Table 3.** First order LV relationship

| Latent Variable | Observed Variable | Factor Loading |
|-----------------|-------------------|----------------|
| LVM_환경조건        | Duration Time     | 1.000(0.000)   |
|                 | Duration Cycle    | 1.000(0.000)   |
| LVM_전기조건        | Current Total RMS | 0.910(0.000)   |
|                 | ARC Voltage       | 0.428(0.108)   |
| LVM_PEAK조건      | Peak Current      | 0.780(0.079)   |
|                 | ARC Voltage Peak  | 0.531(0.222)   |

Table 3에서 First order LV의 Factor Loading값이 모두 >0.4로 나타났으며 특히 LVM\_환경조건은 1.000으로 독립변수를 매우 강한 설명력으로 설명하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

#### ④ 데이터 변환

다중상호작용효과 분석을 위해 상호작용 항목으로 통제변수와 종속변수 및 조절매개변수를 PLS-SEM 모델링에서 연속형 변수로 적용하여 LVM\_ATPV × SCD × HAF × ARC Energy, LVM\_ATPV × ARC Energy, LVM\_ATPV × HAF, LVM\_ATPV × SCD로 생성하였다.

#### ⑤ 신뢰도 및 타당성 검증

- a) 신뢰도 분석: Hair et al.(2011)는 신뢰도 분석의 대표 값으로 Cronbach's Alpha 값을 적용하였으며, Table 4의 분석결과에서 Cronbach's Alpha 값 독립변수, 통제변수, 종속변수가 모두 >0.7의 값으로 모두 높은 신뢰도를 확인하였으며 조절변수인 SCD와 HAF는 < 0.7로 낮아 이는 Ei를 통한 조절매개변수의 적용과 다중 상호작용 변수를 적용하였다.

**Table 4.** Cronbach's alpha analysis results

| 잠재변수           | Cronbach's Alpha | 잠재변수     | Cronbach's Alpha |
|----------------|------------------|----------|------------------|
| LVM_환경조건       | 1.000            | LVM_ATPV | 0.987            |
| LVM_전기조건       | 0.796            | LVM_HAF  | 0.474(신뢰도 낮음)    |
| LVM_PEAK조건     | 0.712            | LVM_SCD  | 0.087(신뢰도 낮음)    |
| LVM_ARC Energy | 0.998            | LVM_Ei   | NaN              |

- b) 타당성 분석 : 먼저 수렴타당성 (Convergent Validity) 측면에서 각 변수 간 상관관계를 분석한 결과 Factor Loading 값이 LVM\_전기조건(0.428), LVM\_PEAK 조건(0.531)로 낮아서 보완이 필요해 보였지만, 판별 타당성 (Discriminant Validity) 측면에서는 Heterotrait-Monotrait (HTMT) 기준 < 0.85로 모든 변수가 각 변수 간 명확한 구분이 이루어지고 있으며 변수 간 차별성이 확보되었음을 확인하였다.

#### ⑥ 통제변수 및 종속변수의 역할과 의미

- a) LVM\_ARC Energy : ARC Energy는 아크플래시가 발생했을 때 방출되는 에너지 총량을 나타내며 이는 환경조건 (Duration Time, Duration Cycle), 전기조건(Current Total RMS, ARC Voltage), PEAK 조건(Peak Current, ARC Voltage Peak)에 의해 결정되며 연구모형에서 핵심적인 매개변수 역할을 수행한다.

b) LVM\_ATPV : ARC Energy가 PPE와 상호작용하면서 얼마나 효과적으로 열 에너지를 완화할 수 있는지를 나타내는 값으로 First-order LV에 LVM\_ARC Energy(ARC Energy), LVM\_Ei(입사에너지, Incident Energy), LVM\_HAF(Heat Attenuation Factor, 열 감쇄 계수), LVM\_SCD(Stoll Curve Difference, 스톨커브편차)가 포함된다. Second-order LV로서 ARC Energy, Ei, HAF, SCD가 복합적으로 ATPV에 영향을 미치는 중요변수로 본 연구의 연구모델에서 핵심 성과지표의 역할을 수행한다.

## 데이터 수집

본 연구에서는 아크 플래시 사고 에너지와 ATPV 시험 데이터를 Table 5와 같이 수집하였으며 수집된 데이터는 스페인에 위치한 AITEX(Plaza Emilio Sala, 1 - E-03801 ALCOY SPAIN)에서 수행한 ATPV 데이터를 기준으로 하였다.

**Table 5.** ATPV data source

| Applicant                                | Reference                                              | Testing Date | Standard                                                                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------|
| TEXTIL COHEN Y GOMBEROFF LTDA.           | TEJIDO TEXCOSAFE FR 240 RS (AITEX, 2018a).             | 07/06/2018   | ASTM F1959/F1959M-14<br>AATCC 135:2015                                    |
| OBERON, PARAMOUNT GROUP.                 | JSP EVO 5 (DUALSWITCH/E-XTRA) HARD CAP (AITEX, 2018b). | 14/11/2018   | ASTM F2178-17<br>AATCC 135:2015<br>ASTM F1959/F1959M-14                   |
| ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. | ARMID D1 210 RB(AITEX, 2021a).                         | 11/03/2021   | ISO 6330:2012<br>EN 12127:1997;pto. 8.3<br>IEC 61482-1-1:2009, Panel Test |
| ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. | ARMID D2 260-EL(AITEX, 2021b).                         | 21/06/2021   | ISO 6330:2012<br>EN 12127:1997;pto. 8.3<br>IEC 61482-1-1:2009, Panel Test |
| ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. | ARMID D2 260-4845(AITEX, 2019).                        | 04/11/2019   | ISO 6330:2012<br>EN 12127:1997;pto. 8.3<br>IEC 61482-1-1:2009, Panel Test |
| JK Glotech Co., Ltd.                     | 2023EP2977-S01(AITEX, 2022a).                          | 19/09/2023   | ASTM F2178/F2178M:2023 Met.A                                              |
| JK Glotech Co., Ltd.                     | 2023EP2137-S01(AITEX, 2022b).                          | 19/06/2023   | ASTM F2178/F2178M:2023 Met.A                                              |
| JK Glotech Co., Ltd.                     | 2022EP0703(AITEX, 2022c).                              | 23/09/2022   | ASTM F2178/F2178M:2023 Met.A                                              |
| BULLET STOPPER                           | FEBRIC 9812 6 OZ(AITEX, 2020a).                        | 22/03/2021   | ASTM D3776/3776M-20<br>AATCC 135:2018<br>ASTM F1959/F1959M-14e1           |
| BULLET STOPPER                           | FEBRIC 9814 7 OZ(AITEX, 2020b).                        | 22/03/2021   | ASTM D3776/3776M-20<br>AATCC 135:2018<br>ASTM F1959/F1959M-14e1           |

시험표준은 사용되는 소재의 적용되는 보호장구에 따라 시험기준이 다양하게 수행이 되었지만, 시험조건은 ARC Current:  $8\pm 1\text{kA}$ , Gap of Electrode:  $300\pm 5\text{mm}$ , Distance between the electrode and sample:  $300\pm 5\text{mm}$ , Fuse Wire: 0.5mm, Temperature:  $20\pm 2^\circ\text{C}/21\pm 1^\circ\text{C}$ , Humidity:  $65\pm 2\%$ , Number of sample test: 21/22 times의 조건으로 동일한 실내 시험환경에

서 수행이 되었다(AITEX, 2018a; 2018b; 2019; 2020a; 2020b; 2021a; 2021b; 2022a; 2022b; 2022c).

## 연구의 내용

### PLS-SEM 연구조건의 설정

PLS-SEM의 분석은 SmartPLS GmbH사에서 공급하는 SmartPLS 4.0 Version을 삼성전자 NT960XGL-XD94G의 H/W 모델에서 PLS-SEM을 Table 6과 같이 설정하여 PLS 알고리즘과 Bootstrapping 조건으로 수행하였다.

**Table 6.** PLS-SEM settings

| PLS 알고리즘의 설정                     |              | Bootstrapping Condition    |                        |
|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------|
| 항목                               | Setting      | 항목                         | Setting                |
| Initial weight                   | 1.0          | Complexity                 | Most important(faster) |
| Max. number of iterations        | 3000         | Confidence interval method | Percentile bootstrap   |
| Stop criterion                   | $10^{-7}$    | Parallel processing        | Yes                    |
| Type of result                   | Standardized | Samples                    | 5000                   |
| Use Lohmoeller setting           | No           | Save results per sample    | No                     |
| Vary copula by binary categories | Yes          | Seed                       | Fixed seed             |
| Weighting scheme                 | Path         | Significance level         | 0.05                   |
|                                  |              | Test type                  | Two tailed             |

### 연구모형의 수행결과

연구모형의 PLS-SEM을 수행한 분석결과는 다음과 같으며 개별 변수간의 상관관계 분석의 오류로 2차 잠재변수를 독립 변수에 환경조건(Duration Time, Duration Cycle), 전기조건(Current Total RMS, ARC Voltage), PEAK 조건(Peak Current, Voltage Peak)으로 반영하였으며, Ei는 변수간의 경로계수 보안을 위하여 조절매개변수로 적용하였고 실제 아크등급을 결정하게 되는 ATPV와 통제변수/조절변수/통제변수간의 상호작용(ATPV x ARC Energy, ATPV x HAF, ATPV x SCD)을 잠재변수로 적용하여 PLS-SEM의 구조방정식을 SmartPLS 프로그램을 통하여 연구모형의 수행결과를 Fig. 2와 같이 구하였다.

### 연구모형의 수행결과 분석

#### 변수 간 직접 경로계수 분석

Table 7과 같이 연구모델의 경로계수 분석 결과, 각 변수 간의 관계에서 유의미한 경로와 그렇지 않은 경로를 명확히 구분할 수 있었다. LVM-HAF에서 LVM-ATPV로의 경로는 경로계수 값이 0.025, p-value = 0.631로 나타나 통계적으로 유의미하지 않았다. 이는 HAF가 ATPV에 직접적인 영향을 미치지 않는다는 것을 시사하지만, 상호작용 효과를 통해 간접적으로 영향을 미칠 가능성이 있다. 반면, LVM-ARC Energy와 LVM-SCD는 LVM-ATPV에 유의미한 영향을 미치는 주요 변수로 확인되었으며, p-value < 0.05로 통계적 유의성을 확보하였다.

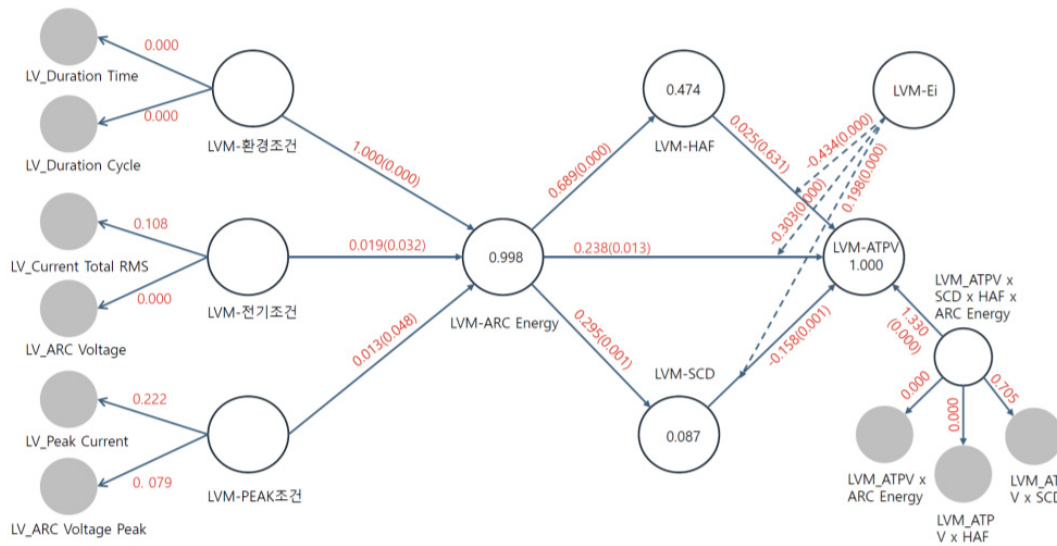


Fig. 2. The result of PLS-SEM on research model for ATPV

Table 7. Path coefficient analysis by variables

|                                      | 경로 계수 (O) | T 통계량  O/STDEV | p-value |
|--------------------------------------|-----------|----------------|---------|
| LVM-환경조건 → LVM-ARC Energy            | 1.000     | 373.562        | 0.000   |
| LVM-전기조건 → LVM-ARC Energy            | 0.019     | 2.142          | 0.032   |
| LVM-PEAK조건 → LVM-ARC Energy          | 0.013     | 1.974          | 0.048   |
| LVM-ARC Energy → LVM-ATPV            | 0.238     | 2.488          | 0.013   |
| LVM-HAF → LVM-ATPV                   | 0.025     | 0.481          | 0.631   |
| LVM-SCD → LVM-ATPV                   | -0.158    | 3.216          | 0.001   |
| LVM_ARC Energy → (LVM_Ei) → LVM-ATPV | -0.303    | 5.259          | 0.000   |
| LVM_HAF → (LVM_Ei) → LVM-ATPV        | -0.434    | 3.619          | 0.000   |
| LVM_SCD → (LVM_Ei) → LVM-ATPV        | 0.198     | 4.103          | 0.000   |

특히 LVM-환경조건은 LVM-ARC Energy에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 분석되었으며, 이는 PPE의 물리적 조건이 아크 에너지에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. LVM-Ei는 조절 변수로서 ATPV에 대한 상호작용 효과를 통해 유의미한 영향을 미쳤으며( $p\text{-value} < 0.05$ ), 조절변수로서의 역할이 중요함을 시사한다. 다만, LVM-HAF의 경우 직접적인 경로에서는 ATPV에 대한 영향이 미미하기 때문에, 향후 연구에서는 조절효과 또는 비선형적 관계에 대한 추가적인 검증이 필요한 것을 확인했다.

### 결정계수 분석

ARC Energy의 결정계수가 Table 8에서와 같이  $R^2 = 1.000$ 으로 매우 높아 독립 변수(환경, 전기, PEAK 조건)에 의해 완전히 설명되고 있으며 Ei의 결정계수  $R^2$ 값이 1.000으로 매우 높아 ATPV에 대한 완벽한 변동성을 설명해주고 있는 것을 Table 8에서 확인할 수 있다. ATPV( $R^2 : 0.474$ ), SCD( $R^2 : 0.295$ )는 중간 정도의 설명력으로 이 변수에 대하여 추가적인 다른

변수와의 관계를 통한 분석이 필요함을 나타내고 있으며 을 가지며, HAF의  $R^2$ 값이 0.689로 높아 ARC Energy가 HAF를 상당 부분 설명하고 있음을 보여주고 있으며 높은 설명력으로 ARC Energy가 HAF에 강한 영향을 미치고 있으며, 반면 2차 잠재변수로 설정한 LVM\_ATPV x SCD x HAF x ARC Energy의  $R^2$ 값은 통계적으로는 매우 유의미하지만 경로계수가 0.087로 낮아 다중 상호작용 변수가 ATPV의 변동을 설명하는 데 제한적인 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

**Table 8.** Analysis of coefficient of determination by variable

|                                   | 결정계수 ( $R^2$ ) | 비고             |
|-----------------------------------|----------------|----------------|
| LVM-ARC Energy                    | 1.000          | 완벽한 설명력        |
| LVM-Ei                            | 1.000          | 완벽한 설명력        |
| LVM-ATPV                          | 0.474          | 47% 중간의 설명력    |
| LVM-HAF                           | 0.689          | 68.9%의 높은 설명력  |
| LVM-SCD                           | 0.295          | 29.5%의 중간의 설명력 |
| LVM_ATPV x SCD x HAF x ARC Energy | 0.087          | 매우 낮은 설명력      |

Table 8의 결과에서 HAF는 경로계수를 기준으로 ATPV에 유의미한 영향을 미치지 않지만 ARC Energy에 영향을 받아서 간접적으로 ATPV에 중요한 영향을 미치고 있음을 시사하고 있으며 이는 또한 SCD의 경우 ATPV에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이지만 독립적으로 ATPV의 전체 변동성을 설명할 수 없음을 나타내고 있으며 이는 ARC Energy, Ei 값 등과 상호 작용의 관점에서 분석과 해석이 필요할 수 있음을 나타내고 있다.

## 2차 잠재변수의 활용의 의의

- ① 구조의 단순화: Jang(2022), Hair et al.(2011)는 여러 개의 독립변수를 직접 연결하는 대신, Second-order LV를 이용하여 복잡한 개념을 계층적 구조로 표현함으로써 연구모형의 구조가 단순해지며 이는 연구의 해석력을 높이고, 변수 간의 관계를 직접적으로 분석이 가능하다고 기술되었다.
- ② 잠재변수간의 관계분석 강화: 이러한 구조 단순화를 통하여 First-Order LV들 간의 단순 관계를 분석하는 것보다, 상위 개념을 설정하여 변수 간 종합적인 영향력을 측정하는 것이 가능하며 이는 환경적 요소, 전기적 요소, 피크 요소가 ARC Energy에 미치는 영향을 개별적으로 보는 것이 아니라, 이를 LVM\_ARC Energy라는 Second-Order LV로 통합하여 종합적 영향의 평가가 가능하다.
- ③ 조절매개 효과 분석: HAF와 SCD는 ARC Energy와 ATPV 사이에서 조절 역할을 수행하며, 이를 반영하기 위해서는 다층 구조의 Second-Order LV가 필요하다. Ei는 조절매개(Moderated Mediation) 역할을 수행하면서 Second-Order LV 구조에서 이 관계를 보다 정밀하게 측정이 가능하게 된다.
- ④ PLS-SEM 모델의 적합성 향상: Hair et al.(2011)은 SmartPLS 기반 PLS-SEM 모델에서는 First-Order LV만으로는 구조적 적합성(Structural Model Fit)을 높이기 어렵기 때문에, Second-Order LV를 사용함으로써 전체 모델의 적합성이 개선되었으며, 특히, 구조 방정식 모델(SEM)에서는 AVE(Average Variance Extracted), CR(구성신뢰도, Composite Reliability), HTMT (Heterotrait-Monotrait) 등 타당성 평가를 보다 정확하게 할 수 있게 설명하고 있다.

### 조절변수에 대한 변수 간의 상관관계 분석

- ① Table 9, HAF의 개별변수 간 상관관계 :조절변수인 HAF 값에 대한 독립변수 및 조절변수 전체 간의 직접적인 관계를 확인하기 위해 PLS-SEM을 수행한 결과 변수 중에서 ARC Energy, ATPV, ARC Voltage Peak, Peak Current가 HAF 값에 정(+)의 영향을 미치고 있으며 ARC Voltage, Duration Time, Incident Energy (Ei), SCD가 부(-)의 영향을 확인했다. 특히 이 변수들 중 ARC Energy는 강한 정(+), Duration Time은 HAF에 강한 부(-)의 영향을 미치고 있다.

**Table 9.** Correlation analysis for HAF variables

|                          | Original sample<br>(O) | Sample mean<br>(M) | Standard deviation<br>(STDEV) | T statistics<br>( O/STDEV ) | P-values |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
| ARC Voltage -> HAF       | -0.309                 | -0.328             | 0.062                         | 5.009                       | 0.000    |
| ARC Voltage Peak -> HAF  | 0.246                  | 0.245              | 0.035                         | 7.084                       | 0.000    |
| Current Total RMS -> HAF | 0.019                  | 0.007              | 0.053                         | 0.355                       | 0.723    |
| Duration Cycle -> HAF    | 21.012                 | 17.431             | 14.546                        | 1.444                       | 0.149    |
| Duration Time -> HAF     | -28.502                | -25.561            | 14.590                        | 1.954                       | 0.051    |
| Peak Current -> HAF      | 0.117                  | 0.120              | 0.046                         | 2.542                       | 0.011    |
| ARC Energy -> HAF        | 8.335                  | 8.987              | 1.509                         | 5.524                       | 0.000    |
| ATPV -> HAF              | 0.335                  | 0.327              | 0.098                         | 3.408                       | 0.001    |
| Ei -> HAF                | -0.450                 | -0.453             | 0.197                         | 2.277                       | 0.023    |
| SCD -> HAF               | -0.197                 | -0.202             | 0.046                         | 4.331                       | 0.000    |

이 결과를 통해 HAF는 ARC Energy와 ARC Voltage Peak 변수에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 Duration Time과 Ei의 부(-)의 영향이 강하게 작용하여 HAF를 저하시키는 주요 요인으로 작용하고 있다. HAF는 아크 플래시로부터 인체가 착용한 PPE가 외부 열로부터 신체에 도달하는 에너지를 차단 또는 감소 정도를 나타내는 계량적 지표로 PPE의 열 저감 성능을 정량적으로 평가하는 기준으로 HAF가 높을 수록 PPE가 높은 수준의 열차단 효과를 발휘함을 의미하며, 이는 곧 열로 인한 상해위험으로부터 작업자를 보다 효과적으로 보호하고 있음을 나타내는 중요한 성능지표 중 하나이다. HAF는 ATPV와 정(+)의 상관관계를 나타냈다(경로계수 = 0.335,  $p < 0.01$ ). 이는 이론적으로도 타당한 결과이며, ATPV는 PPE가 견딜 수 있는 최대 열에너지를 수치화한 것임으로 ATPV 값이 높을수록 PPE의 열 저항 능력이 우수하다는 것을 의미함과 동시에 고성능의 보호구가 높은 열차단 효과를 발휘하고 있다는 것을 입증하는 것이다. 반면에 Duration Time과 HAF 간에는 경로계수 -0.285,  $p \approx 0.05$ 로 강한 음(-)의 상관관계가 나타났는데, 이는 Duration Time이 아크 발생시 노출되는 시간 변수로 아크 노출시간이 길수록 증가하는 변수이기 때문에 장시간에 걸친 열 노출은 PPE의 방열 한계를 초과하게 만들어 HAF 성능을 저하시킬 수 있다. 결과적으로 HAF는 ATPV와 같은 열 방호 성능 지표와 정비례 관계를 가지며, 열 노출 지속시간의 증가는 열 누적 효과(cumulative thermal load)로 인한 방호소재의 열차단 구조손상으로 인해 HAF를 저하시키는 부(-)의 작용을 하고 있으며, 이는 본 연구 결과는 실험적 수치뿐 아니라 열역학적 관점에서도 PPE의 효율성을 평가하는 데 있어 중요한 기준이 될 수 있음을 시사하고 있다.

- ② Table 10, SCD의 개별변수 간 상관관계 :조절변수인 SCD 값에 대한 독립변수 간의 직접적인 관계를 확인하기 위하여 PLS-SEM을 통해 모든 변수들과 SCD에 대한 상관관계를 수행한 결과 ARC Energy, ATPV, Ei, HAF, Duration Time,

Duration Cycle은 SCD 값에 정(+)의 영향을 미치고 있으며, Duration Time, ARC Voltage, Current Total RMS, ATPV는 SCD에 부(-)의 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, Duration Time은 정(+)과 duration은 부(-)으로 강력한 영향을 미치고 있으며 ARC Energy가 SCD에 가장 유의미한 정(+)의 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

**Table 10.** Correlation analysis for SCD variables

|                          | Original sample<br>(O) | Sample mean<br>(M) | Standard deviation<br>(STDEV) | T statistics<br>( O/STDEV ) | P-values |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
| ARC Voltage -> SCD       | -0.249                 | -0.261             | 0.086                         | 2.901                       | 0.004    |
| ARC Voltage Peak -> SCD  | 0.091                  | 0.089              | 0.054                         | 1.680                       | 0.093    |
| Current Total RMS -> SCD | -0.023                 | -0.020             | 0.036                         | 0.624                       | 0.532    |
| Duration Cycle -> SCD    | 23.717                 | 22.523             | 9.845                         | 2.409                       | 0.016    |
| Duration Time -> SCD     | -29.712                | -28.941            | 10.978                        | 2.706                       | 0.007    |
| ARC Energy -> SCD        | 6.446                  | 6.842              | 2.336                         | 2.760                       | 0.006    |
| ATPV -> SCD              | -1.208                 | -1.222             | 0.200                         | 6.047                       | 0.000    |
| Ei -> SCD                | 1.113                  | 1.155              | 0.296                         | 3.758                       | 0.000    |
| HAF -> SCD               | -0.310                 | -0.314             | 0.064                         | 4.843                       | 0.000    |
| Peak Current -> SCD      | 0.034                  | 0.027              | 0.063                         | 0.531                       | 0.596    |

이 결과에서 SCD는 ARC Energy, Duration Cycle, Ei 변수들에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 ARC Energy와 Duration Cycle이 SCD를 증가시키는 강한 정(+)의 효과를 나타내는 반면 ATPV와 HAF는 SCD를 감소시키는 부(-)의 효과를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 여기에서 SCD는 Stoll 기준곡선으로부터의 편차를 수치화한 지표로, 인체 피부가 아크플래시와 같은 고온 환경에 노출되었을 때 2도 화상을 입을 가능성을 평가하는 데 활용되는 지표로 구조방정식 모델(PLS-SEM) 분석 결과, SCD는 ATPV에 대해 유의미한 음(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다(경로계수 = -0.158,  $p < 0.01$ ). 이는 ATPV는 PPE가 차단할 수 있는 최대 열에너지 수준을 나타내는 반면, SCD는 인체에 실제 도달한 에너지로 인한 화상 가능성의 편차를 반영하므로, 이 두 지표는 개념적으로 상호 반비례 관계에 있다. 즉 SCD 값이 증가한다는 것은 보호장비가 기준 이하 성능을 보이면서 Stoll 커브 허용한계를 초과해서 인체에 아크에너지에 노출될 가능성이 높음을 시사하는 것으로 결과적으로 SCD 값이 높다는 것은 PPE가 열을 충분히 차단하지 못했다는 반증을 나타내며 이에 따라 ATPV 수치 역시 낮게 산정된다는 의미를 의미한다. 이는 SCD 값이 음(-)의 경로계수인 경우 SCD가 ATPV 값에 저하에 영향을 미친다는 이론적 근거를 뒷받침하며 PPE의 열차단 성능을 정밀하게 평가하는데 SCD가 중요한 지표 중의 하나임을 확인할 수 있었으며, 이와는 별개로 ARC Voltage->SCD는 ATPV->SCD의 영향과 같이 부(-)의 요인으로, 전압 관리도 SCD 안정화에 기여할 수 있음을 보여준다.

## 연구모형에 대한 연구가설 검증 결과

### PLS-SEM의 분석결과

Table 11의 연구가설의 검증결과로 환경 조건(H1), 전기 조건(H2), PEAK 조건(H3)은 모두 ARC Energy에 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, ARC Energy는 SCD(H5)와 ATPV(H6)에 유의미한 영향을 미쳤으나 HAF(H4)에는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 또한, ARC Energy(H6), Ei(H8), SCD(H9)는 ATPV에 유의미한 영향을 미치지만, HAF(H7)

의 ATPV에 대한 직접적인 영향은 통계적으로 유의하지 않았다.

특히  $E_i$ 의 조절효과(LVM\_  $E_i$  x LVM\_HAF → LVM\_ATPV)는 경로계수  $\beta = -0.434$ 로,  $E_i$ 가 LVM\_HAF와 LVM\_ATPV 간의 관계를 부(-)의 방향으로 조절하는 것으로 확인되었다. 이는  $E_i$ 가 증가할수록 HAF가 ATPV에 미치는 영향이 감소함을 의미한다. 즉, HAF 값이 높더라도  $E_i$ 가 커지면 ATPV의 아크 보호 성능이 상대적으로 감소할 수 있음을 시사하며, p-value가 0.000으로 매우 높은 수준의 유의미한 조절효과를 보였다.

**Table 11.** Results of verifying the research hypothesis

| 연구모형구분                                    | 연구가설                                               | 경로계수( $\beta$ ) | t-value | p-value | 검증결과 |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|---------|---------|------|
| ARC Energy 결정<br>요인에 대한 독립변수<br>간의 가설     | H1: 환경조건 → ARC Energy                              | 1.00            | 373.562 | 0.000   | 채택   |
|                                           | H2: 전기조건 → ARC Energy                              | 0.013           | 1.974   | 0.048   | 채택   |
|                                           | H3: PEAK조건 → ARC Energy                            | 0.019           | 2.142   | 0.032   | 채택   |
| ARC Energy와<br>종속변수 및 통제변수<br>간 관계에 대한 가설 | H4: ARC Energy → HAF                               | 0.025           | 0.481   | 0.631   | 기각   |
|                                           | H5: ARC Energy → SCD                               | 0.295           | 3.325   | 0.001   | 채택   |
|                                           | H6: ARC Energy → ATPV                              | 0.209           | 2.712   | 0.030   | 채택   |
|                                           | H7: HAF → ATPV                                     | 0.025           | 0.481   | 0.631   | 기각   |
| 종속변수 ATPV의<br>결정 요인에 대한 가설                | H8: $E_i$ → ATPV                                   | 0.553           | 4.109   | 0.000   | 채택   |
|                                           | H9: SCD → ATPV                                     | -0.158          | 3.216   | 0.001   | 채택   |
| 상호작용 효과에 대한<br>가설                         | H10: (LVM_ATPV x SCD x HAF x ARC Energy)<br>→ ATPV | 1.330           | 7.469   | 0.000   | 채택   |

### 연구가설 검증

연구 가설 검증 결과 Table 11에서 ARC Energy는 환경조건(H1), 전기조건(H2), PEAK조건(H3)에 유의미한 영향을 받으며, 외부 환경적 요인이 ARC Energy 변동에 중요한 역할을 한다는 점이 확인되었다. ARC Energy는 SCD(H5)와 ATPV(H6)에 유의미한 영향을 미쳤지만, HAF가 ATPV에 미치는 직접적인 영향(H7)은 유의하지 않아 HAF 단독으로 ATPV를 설명하기에는 한계가 있음을 보여준다.  $E_i$ 는 ATPV에 가장 중요한 결정 요인으로 확인되었으며(H8), SCD는 ATPV에 부(-)의 영향을 미쳐 아크 플래시 임계값 변화에 민감한 요소임을 시사한다. 마지막으로 ARC Energy, HAF, SCD의 상호작용(H10)은 ATPV의 변동성을 설명하는 데 강력한 설명력을 보이며, 이는 PPE 선택과 아크 플래시 보호 설계에서 다양한 요인을 복합적으로 고려해야 함을 보여주고 있다.

### 연구의 한계점

#### 데이터의 한계성

실제 아크플래시가 발생하는 원인변수는 ATPV시험으로 측정되는 변수 외에도 온도조건, 습도조건, 대기압력 조건 등의 외부 환경조건과 실제 아크가 발생하게 되는 장치의 저항 값 변화, 기기간 자계조건, 동·철·알루미늄 등 전극의 재료 조건 등의 기계적 조건, 발생된 아크의 아크방향(수평·수직 등)아크 냉각조건, 아크 안전성, 아크형상(직선·만곡), 스프레이 조건, 기체 금속 등의 혼합조건 등 아크특성 등에 따른 더욱 다양한 원인이 존재한다(Technical information of the Korean Electrical

Engineers Association(1992)). 그러나 이러한 다양한 변수에 대한 사고데이터의 확보가 현실적으로 어려움이 있는 상태에서 ATPV시험을 통해 확보된 데이터를 분석함으로써 인한 데이터의 한계성은 분명히 있다. 또한 작업 환경의 특성, 사용되는 시설장치의 종류 및 특성 등의 추가적인 변수가 존재하며, 작업자의 숙련도, 작업자의 안전 의식, 안전 교육의 효과, 관리 감독자의 역량, 안전 관리 시스템의 효율성 등과 같은 정성적인 변수를 고려하여 더욱 포괄적인 모델에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### PLS-SEM 모델 분석의 한계

ATPV시험의 특성상 국내에 시험기관이 없고 해외에서 수행되면서 시험비용이 고가이며, 국제적으로도 실제 ATPV시험이 많이 이루어지지 않는 관계로 확보된 데이터가 제한적일 수밖에 없었으며 데이터가 제한적으로 확보되기 때문에 원인조건이 변수 간의 직접적인 상관관계를 완벽히 설명하고 있지 못해서 이를 극복하고자 이차잠재변수로 연구모형을 생성해서 분석하였다. 이렇게 분석한 연구모형이 일부변수에 대한 경로계수( $\beta$ )의 설명이 부족한 변수는 개별변수별로 상관관계를 추가로 분석하여 연구모형을 설명을 보완하였다. 그렇지만 이렇게 연구실 환경에서 확보된 데이터가 특정 산업환경이나 특정 데이터와 부합되어 설명할 수는 있지만 다른 산업환경이나 특성이 다른 장비에 대해서는 이와 다른 결과가 나올 수 있어서 ATPV 시험환경의 일반화와 실제 아크사고가 발생하는 사고에 대한 현장 적용성에 대한 검증과 관련된 추가적인 연구가 필요하다.

## 결론

### 연구결과 요약

이상과 같이 분석 결과에 따르면, 통제변수인 ARC Energy는 ATPV 등급 결정의 가장 중요한 변인으로 확인되었으며, 환경적 요인(Duration Time, Duration Cycle)과 전기적 조건(ARC Voltage, Peak Current)의 복합적 영향을 받는 것으로 확인됐다. 작업자의 보호기준을 결정하는 ATPV는 ARC Energy의 변화에 민감하게 반응하며, 특히 Duration Time이 증가할수록 ARC Energy가 유의미하게 증가하였다. 이는 아크 지속 시간의 관리가 PPE 선택과 설계에 있어 필수적임을 의미한다. 반면 Duration Cycle은 ARC Energy에 부의 영향을 미쳤는데, 이는 아크사이클이 짧을수록 ARC Energy를 키우게 되고 아크 사이클이 커질수록 아크 발생이 ARC Energy를 감소시키고 있음을 시사한다.

조절변수에서는 HAF는 ARC Energy와 ATPV 간의 긍정적인 조절 효과를 보였지만 데이터가 통계적으로 유의미하지 않아서 HAF에 대한 개별변수들 간의 상관관계를 통해서 ARC Energy, ARC Voltage, ATPV에 강한 영향을 받고 있어서 ATPV와 Peak Current는 HAF를 향상시키는 긍정적인 요인으로 ATPV에 대한 조절변수로서의 의미를 확인했다. 또한, SCD는 화상 임계치와 관련된 지표로, 직접적인 효과는 미약했으나 ARC Energy와 열 응답 간의 매개 변수로서 역할을 수행하였다. 조절매개 변수인 Ei는 ARC Energy와 ATPV 간의 중요한 매개 변수로 확인되었으며, 다양한 조건에서 작업자 보호 성능의 지표로 작용하였다. 이는 작업 환경에서 발생하는 Ei를 정확히 측정하고 관리할 필요성을 강조한다.

독립변수에 대한 영향은 ARC Voltage와 Peak Current는 Ei와 ATPV에 상대적으로 낮은 영향을 미쳤으나, ARC Energy의 변화를 설명하는 보조적인 역할로 나타났다. 반면 Duration Time과 Duration Cycle은 ARC Energy에 강한 영향을 서로 반대의 방향으로 미치고 있으며, 이는 이러한 환경조건이 ARC Energy 결정에 중요한 요소로 작용함을 보여주고 있다.

## 연구의 결론

본 연구는 ATPV시험에서 ARC Energy와 환경, 전기, PEAK 조건이 ATPV 등급결정에 미치는 영향을 분석하기 위해 PLS-SEM 모델을 활용하였다. 분석 결과, ARC Energy는 ATPV 등급을 결정하는데 가장 중요한 변수로 작용하며, 특히 ARC Energy가 HAF와 SCD에 미치는 간접 효과가 확인되어 본 연구에서 제안된 연구모형이 충분히 설명이 되고 있음을 파악할 수 있었다. 이는 PPE 소재의 열 차단 성능이 작업자 보호 성능을 크게 좌우한다는 것을 의미하고 있다. 독립변수에서는 환경 조건(Duration Time, Duration Cycle)은 ARC Energy에 가장 큰 영향을 미치며, 전기 조건(Current Total RMS, ARC Voltage)과 PEAK 조건(Peak Current, ARC Voltage Peak)도 유의미한 상관관계를 보였다. 조절 변수인 Ei는 ARC Energy와 HAF, SCD의 관계를 매개하면서 ATPV에 대한 다중 조절 효과를 나타냈다.

이러한 연구 결과는 다층보호 설계와 고성능 소재가 적용된 높은 열 차단 성능 값을 가진 소재의 사용이 권장되는 것을 의미한다. 다만 SCD의 경우 연구모델의 경로계수가 HAF 보다 높은 통계적 의미성을 가지고 있는데, 이는 열 차단 성능을 유지하면서 화상임계치를 지속적으로 모니터링하는 것이 ATPV 등급을 개선하는데 핵심 전략으로 PPE의 설계 및 성능 평가에 실질적인 시사점을 제공하고 있다. 또한 ATPV 시험의 독립변수인 환경적 요소와 전기적 조건을 고려한 새로운 PPE 설계가 필요하다는 점도 확인할 수 있었으며, 작업자의 안전을 보장하기 위해 지속적인 PPE 성능 개선과 더불어 입사에너지의 정확한 측정과 화상임계치인 SCD의 관리가 필수적이다. 그러나 무엇보다도 아크플래시 사고 발생 시 아크플래시 감지를 통하여 신속한 전력을 차단하는 시스템의 도입 또한 중요한 과제 중 하나이다. 그리고 작업자는 작업현장에서 아크플래시 사고를 대비해서 적절한 PPE를 갖추고 작업을 수행해야 하며 아크플래시 사고가 발생했을 때 작업자는 신속하게 사고 현장으로부터 일정한 거리로 벗어날 수 있도록 반복적인 교육과 훈련, 나아가 작업현장의 안전 관리의 강화, 그리고 사회 전반적인 안전 문화 조성이 궁극적인 안전 목표 달성에 중요한 과제가 될 것이다.

## 연구를 통한 시사점

ATPV 시험 데이터 분석을 통한 연구결과는 다음과 같은 시사점을 제공한다.

첫째, ARC Energy가 Duration Time, Duration Cycle 등의 환경 조건이 ATPV 등급 결정에 핵심적인 역할을 한다는 점은 환경요인의 관리가 개인보호장비 성능 향상에 필수적임을 시사한다.

둘째, HAF는 ARC Energy와 ATPV 간의 긍정적인 조절 효과를 나타냈으나, 단독 변수로서의 설명력은 낮았다. 이는 PPE 소재의 열 차단 성능이 중요한 요소이지만, 다른 변인들의 복합적 고려가 필요하고, 입사에너지가 높은 상황에서는 단순히 열차단능력이 뛰어난 개인보호장비 만으로는 작업자 보호가 충분하지 않을 수 있음을 시사한다.

셋째, SCD는 ATPV에 유의미한 영향을 미치며, 정확한 입사에너지의 측정과 화상임계치의 더욱 세밀한 모니터링과 예측이 위험 평가의 중요한 지표로 활용될 수 있음을 보여준다.

넷째, 다중 상호작용 효과 분석 결과, ARC Energy와 HAF, SCD가 복합적으로 ATPV 결정에 영향을 미친다는 점은 개인 보호장비 설계 시 다양한 변수의 상호작용을 고려한 다차원적 접근이 필수적임을 나타낸다.

마지막으로, 본 연구결과를 통해서 다양한 이해관계자들이 개인보호장비의 성능을 최적화시키고 작업 환경 개선하며 궁극적으로는 아크플래시 사고로부터 작업자의 안전을 지키는데 방향성을 제공할 수 있을 것이다.

## 향후 연구 방향

본 연구는 국제기준으로 수행되는 ATPV 실험실 환경에서의 데이터를 사용하였으며, 연구에서 검토된 데이터 외에도 아크플래시 발생 시 영향을 미치게 되는 변수들에 대하여 최근의 다양한 IoT 기술을 활용하여 추가적인 데이터의 확보와 확보한 데이터를 바탕으로 다양한 환경조건과 충전부 시설장치 노후화 등을 모니터링을 통하여 작업환경에서 아크플래시가 발생 가능한 현상을 어느 정도 예측할 수 있다면 이는 아크플래시 위험으로부터 작업자를 보호하는데 크게 기여하게 될 것이다. 또한, 최첨단의 기능성 소재가 적용된 PPE의 구조적 특성의 연구와 함께, 작업자의 교육수준과 아크플래시를 인지하는 태도가 아크플래시 사고로부터 작업자를 어느 정도 보호할 수 있는가에 대한 심층적인 연구도 요구된다.

## Acknowledgement

본 연구는 한성대학교 학술연구비 지원과제입니다.

## References

- [1] ABB Inc. (n.d.). Arc Flash Hazards. Low Voltage Selectivity with ABB Circuit Breakers. Retrieved from [www.abb.com/lowvoltage](http://www.abb.com/lowvoltage)
- [2] AITEX Textile Research Institute (2018a). Test Report, No2018EP1313. TEXTIL COHEN Y GOMBEROFF LTD A. Retrieved from <https://texcosafe.com>
- [3] AITEX Textile Research Institute (2018b). Test Report, No2018US0187. OBERON, PARAMOUNT GROUP. Retrieved from <https://oberoncompany.com>
- [4] AITEX Textile Research Institute (2019). Test Report, No2019EP3144. ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. Retrieved from <https://en.ariteks.net>
- [5] AITEX Textile Research Institute (2020a). Test Report, 2020EP2855. BULLET STOPPER. Retrieved from <https://bulletstopper.com.ar>
- [6] AITEX Textile Research Institute (2020b). Test Report, 2020EP2856. BULLET STOPPER. Retrieved from <https://bulletstopper.com.ar>
- [7] AITEX Textile Research Institute (2021a). Test Report, 2021EP0528. ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. Retrieved from <https://en.ariteks.net>
- [8] AITEX Textile Research Institute (2021b). Test Report, 2021EP1867. ARITEXS BOYACCILIK TICATET VE SANAYI AS. Retrieved from <https://en.ariteks.net>
- [9] AITEX Textile Research Institute (2022a). Test Report, 2022EP2977. JK Glotech Co., Ltd. Retrieved from <https://gaon5.com>
- [10] AITEX Textile Research Institute (2022b). Test Report, 2022EP2137. JK Glotech Co., Ltd. Retrieved from <https://gaon5.com>
- [11] AITEX Textile Research Institute (2022c). Test Report, 2022EP2977. JK Glotech Co., Ltd. Retrieved from <https://gaon5.com>
- [12] ASTM International (2013). Standard test method for determining the arc rating of materials for clothing (Designation: F1959/F1959M-12). ASTM International. Retrieved from <https://www.astm.org>
- [13] ASTM International (2023). Standard Specification for Arc Rated Eye or Face Protective Products (F2178/F2178M-

- 22). Retrieved from [https://www.astm.org/f2178\\_f2178m-22.html](https://www.astm.org/f2178_f2178m-22.html).
- [14] Australian Energy Council (2019). Electrical ARC Flash – Hazard Management Guideline. Retrieved from <https://www.energycouncil.com.au>
- [15] Bae, E.S. (2019). A Study on Arc Flash Risk Analysis and Safety Equipment Test Evaluation in Low Voltage Electrical Work. Ph D. Dissertation, Chungnam National University.
- [16] Doan, D.R., Floyd, H.L., Neal, T.E. (2003). “Comparison of methods for selecting personal protective equipment for arc flash hazards.” Fifty-First Annual Conference 2004 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference(PCIC), San Francisco, pp.963-967. <https://doi.org/10.1109/TIA.2004.830796>.
- [17] Doughty, R.L., Neal, T.E., Floyd, H.L. (1998). “Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems.” IEEE Industry Applications Society 45th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Indianapolis, pp. 329-346. <https://doi.org/10.1109/PCICON.1998.728000>.
- [18] Graham, A.M., Hodder, M., Gates, G. (2008). “Current methods for conducting an arc-flash hazard analysis.” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 6, pp. 1093-1099.
- [19] Hair, J.F., Ringle, C.M., Sarstedt, M. (2011). “PLS-SEM: Indeed a silver bullet.” The Journal of Marketing Theory and Practice, Vol. 19, No. 2, pp. 139-151.
- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers (2018). IEEE 1584: Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations. IEEE, New York, NY.
- [21] Jang, Y. (2021). Effect of Traffic Volume and Commercial Area Indicators on the Spread of Infection in Seoul : Focused on the PLS-SEM (Partial Least Squares Structural Equation Modeling). Master's thesis. The University of Seoul.
- [22] Jeong, K.-O. (2024). “An analysis of research trends of domestic academic papers on the Serious Accident Punishment Act.” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 20, No. 4, pp. 871-878. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2024.12.31.871>
- [23] Jo, C.-H. (2023). “The effect of smart safety and health activities on workers' intended behavior.” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 19, No. 3, pp. 519-531.
- [24] Kim, C.M., Kim, Y.S., Gil, H.J., Shong, K.M. (2015). “A study of method to reduce arc flash hazards.” Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 46, pp. 1523-1524.
- [25] Kim, C.M., Shong, K.M., Bang, S.B., Kim, Y.S., Choi, M.i. (2012). “A study on necessary of arc-flash hazards analysis.” Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers, Summer Conference, Incheon, pp. 449-453.
- [26] Kim, J.D. (2022). Risk Assessment and Mitigation Method for Arc Flash Hazard Cases using Power System Simulation. Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- [27] Kim, J.O., Kim, S.W. (2022). “A study on mitigation of injury by arc flash in electronic watt-hour meter work.” The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71, pp. 915-920.
- [28] Lee, B.H. (2020). A Study on the Electrical Safety Work by Arc Flash Risk Analysis of Incoming Panel. Master's Thesis. Inha University.
- [29] Lee, J.J., Kim, C.J., Cha, I.H., Shin, M.C., Lee, B.K. (2002). “A study of electrical fire symptoms and detection algorithms in low-voltage distribution system.” Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference, Jeju, pp. 333-335.
- [30] Lee, S.W. (2011). “ARC flash hazard analysis.” Monthly Power Technician, October Issue, pp. 21-25.
- [31] Lim, D.S. (2019). A Study on the Improvement of the Arc Flash Detection Based on Ultraviolet of a Specific Wavelength. Master's Thesis, Hanyang University.
- [32] Lockovic, V. (n.d.). Arc Flash Calculation Methods. CDE Engineering. Retrieved from [www.cedengineering.com](http://www.cedengineering.com)

- [33] National Fire Protection Association (2018). NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace (2018 ed.). National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- [34] Oh, C.S. (1994). "Three-way movement to improve electricity quality for the advancement of the electric power industry." *Monthly Electrical Engineering*, September Issue, pp. 9-12.
- [35] Ramirex-Bettoni, E., Eblen, M.L., Nemeth, B. (2024). "Analysis of live work accidents in overhead power lines and other electrical systems between 2020-2022." In *IEEE Electrical Safety Workshop*, Tucson, pp. 124-128.
- [36] Rossi, R.M., Bolli, W. Stämpfli, R. (2008). "Performance of firefighters' protective clothing after heat exposure." *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 14, No. 1, pp. 55-60.
- [37] Shin, D.Y., Yoon, J.Y., Lee, D.Y., Bae, E.S. (2018). "Analysis of the Safety rate for the Working Distance from the hazard of Arc Flash." *Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 49, pp. 1327-1329.
- [38] Stokes, A.D., Sweeting, D.K. (2004). "Electric arcing burn hazards." *Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*, San Francisco, pp. 351-359. <https://doi.org/10.1109/PCICON.2004.1352821>.
- [39] Technical Information of the Korean Electrical Engineers Association (1992). "Arc types and applications." *Monthly Electrical Engineering*, July Issue, pp. 31-36.
- [40] Tong, Q., Gemay, T. (2023). *Arc Flash Incidents in Non-Residential Buildings: Data Analysis*. Schneider Electric USA, Technical Report, Schneider Electric SE, <https://www.se.com/us/en>.
- [41] Vähämäki, O.J. (n.d.). *Arc Protection Integrated in Protection Relays*. VAMP Ltd. Retrieved from <http://www.cigaproject.ch/>
- [42] Valdes, M.E., Karandikar, H., LaFond, M., Webb, J. (2023). "Arc-resistant equipment - A risk control perspective." In *IEEE Electrical Safety Workshop*, Reno, pp. 139-148.
- [43] Walsh, P.R. (2008). *Calculating Arc Flash Hazard*. Pure Power Winter 2008, Ferraz Shawmut Inc., pp. 10-12, [www.purepowermagazine.com](http://www.purepowermagazine.com).
- [44] Wi, K.B., Lee, D.Z., Park, K.W. (2014). "Detection technology for arc flash in switchboard." *Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, Pyeongchang, pp. 424-425.
- [45] Wu, H., Li, X. (2006). "Calculation of maximum arc energy for low voltage power systems." *2006 IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, San Francisco, CA , pp.1627-1630.