

정전기 화재 · 폭발 위험성평가 및 사고조사에 필요한 발생원인 변수 도출

변정환¹ · 박현곤^{2†}

Derivation of Cause Variables necessary for Electrostatic Fire/Explosion Risk Assessment and Accident Investigation

Junghwan Byeon¹ · Hyeongon Park^{2†}

[†]Corresponding Author

Hyeongon Park
Tel : +82-51-629-6469
E-mail : hyeongon@pknu.ac.kr

Received : February 6, 2024

Revised : February 15, 2024

Accepted : March 27, 2024

Abstract : Static-electricity-induced fires and explosions persistently occur every year, averaging approximately 80 and 20 cases annually according to fire statistics provided by the National Fire Agency and industrial accident statistics provided by the Ministry of Employment and Labor, respectively. Despite the relatively low probabilities of these accidents, their potential risks are high. Consequently, effective risk assessment methodologies and accident investigation strategies are essential for efficiently managing static-electricity hazards in fire- and explosion-prone areas. Accordingly, this study aimed to identify the causal variables essential for accident investigations, thereby facilitating risk assessments and the implementation of effective recurrence prevention measures to mitigate static-electricity hazards in fire- and explosion-prone regions. To this end, industrial accident statistics recorded over the past decade (2012 to 2021) by the Ministry of Employment and Labor were analyzed to identify major fire and explosion incidents and related industrial accidents wherein static electricity was identified as a potential ignition source. Subsequently, relevant investigation reports (63 cases) were thoroughly analyzed. Based on the results of this analysis, existing electrostatic fire and explosion risk assessment techniques were refined and augmented. Moreover, factors essential for investigating electrostatic fire and explosion disasters were delineated, and the primary causal variables necessary for effective risk assessments and scientific investigations were derived.

Key Words : fire and explosion, electrostatic, risk assessment, accident investigation, cause variable

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

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

재현성이 낮은 정전기 대전·방전 특성을 고려한다면 정전기 화재·폭발의 발생원인은 주로 확률적 요인이 작용한다. 특히 정전기 화재·폭발은 인화성 물질의 물리적 조건과 정전기 대전, 축적 및 방전 조건이 시·공간적으로 일치되어야 발생할 수 있기 때문에 발생 확률은 아주 낮다고 볼 수 있다¹⁾. 그러나 최근 정전기 화재·폭발은 평균적으로 매년 소방청(일본) 화재

통계 기준 약 80(100)여건, 고용부 산업재해통계 기준 약 20여건 정도로 지속하여 발생하고 있기 때문에 정전기 화재·폭발 발생 확률이 낮다고 해서 안전관리 및 위험성 통제 방안을 마련·시행하지 않을 수는 없다^{2,4)}. 또한 정전기 화재·폭발 중대재해·중대산업사고의 발생 확률이 낮지만 잠재적 위험성이 크기 때문에 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 관리하기 위해서는 효과적인 위험성평가 및 과학적 재해·사고 조사가 필요하다.

따라서 정전기 화재·폭발을 예방하기 위해서는 앞

¹안전보건공단 산업안전보건연구원 연구위원 (Occupational Safety and Health Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency)

²부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

서 언급한 정전기의 잠재적인 위험성을 인식하는 것이 가장 중요하며, 가장 효과적인 방법이 과거 중대재해 및 중대산업사고의 발생원인 분석을 통해 시사점을 도출하는 것이다. 즉 유사한 형태로 정전기 관련 화재·폭발이 지속·반복적으로 발생하기 때문에 유사한 다른 공정·작업 및 기계·설비 등에서의 잠재적 위험성을 부각시키는 것이 필요하다. 이를 위해 정전기 화재·폭발 중대재해 및 중대산업사고 사례를 분석하여 효과적인 위험성평가 및 사고조사에 필요한 주요 발생원인 주요변수에 관한 고찰이 필요하다.

이에 본 연구에서는 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 통제하기 위한 위험성평가와 실효적인 재발방지대책 수립을 위한 사고조사에 필요한 발생원인 변수를 도출하고자 한다.

1.2 선행연구

반도체·전자 산업분야에서는 품질관리 목적으로 다양한 연구⁵⁻⁷⁾가 수행되고 있지만, 정전기 화재·폭발 관련 선행연구는 제한적으로 수행되고 있음을 확인하였으며 주요 내용을 다음 Table 1과 같이 정리하였다⁸⁻¹²⁾.

선행연구 분석결과, 정전기 화재·폭발 관련 연구는 주로 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가 절차 및 방법, 사고사례 분석(Case Study) 또는 정전기 현상과 관련하여 이론적 고찰 중심으로 수행되었습니다.

이에 본 연구에서는 위험성평가 또는 사고조사 시 정전기 안전관리 또는 발생원인 규명을 위해 정전기 발생 특성 및 인화성 물질과의 시·공간적 일치 조건 등을 고려하여 다양한 데이터 즉 원인변수 항목에 대한 도출 방법 그리고 상호 연관성에 대하여 검토하고자 한다. 기존 선행연구와의 큰 차이점은 재해조사 의견서(63건, 최근 10년간) 분석을 통해 시사점을 도출하여 정전기 위험성평가 및 사고조사에 활용했다는 것이다.

1.3 연구내용 및 방법

정전기 화재·폭발 위험성평가 및 사고조사에 필요한 발생원인 변수 도출을 위해 고용노동부 산업재해통계를 활용하여 최근 10년간(2012년~2021년) 접화원을 정전기로 추정하는 화재·폭발 중대재해 및 중대산업사고 조사의견서(63건)의 심층 분석하였다²⁾.

분석결과를 토대로 정전기 화재·폭발 위험성평가 기법을 수정·보완 제안하고 정전기 화재·폭발 관련 재해·사고 조사에 필요한 방법과 절차를 마련하였다. 그리고 효과적인 위험성평가와 과학적인 조사에 필요한 주요 발생원인 변수를 도출하였다.

Table 1. The list of previous studies related to static electrostatic fire explosion

Authors	Reason for improvement
M.Glor(1999)	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical considerations for assessing the risk of ignition due to static electricity for flammable liquids, gases, and combustible dust in industrial settings
Kiyoshi OTA(2008)	<ul style="list-style-type: none"> Electrostatic charging and discharging phenomena, countermeasures against static electricity, and several methods for assessing static electricity hazards are described.
Kiyoshi OTA(2018)	<ul style="list-style-type: none"> Case study on application of risk assessment techniques in chemical plants linked to classification of explosion hazard areas
Ioana Sandu (2021)	<ul style="list-style-type: none"> NFPA summarized and analyzed major fire and explosion incidents. It also provides evaluation methods for each incident.
Ehsan Ramezaniifar (2023)	<ul style="list-style-type: none"> We evaluate storage tank fire risk based on FTA-based SPA (Set pair Analysis) established through expert derivation.

세부적으로는 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 관리하기 위해 정전기 화재·폭발 발생원인 변수를 적용할 수 있도록 위험성평가 기법을 수정·보완 하고 효과적인 재발방지대책 수립에 필요한 사고조사 결과의 정당성·객관성 등을 확보하기 위한 필수 확인항목을 제시함으로써 개선방안을 제시하였다.

그리고 정전기 화재·폭발 위험성평가 및 사고조사 관련 발생원인 변수를 도출하기 위해 분석모형을 설계하였다. 이 분석모형은 정전기 발생(대전 → 축적 → 방전) 매커니즘을 토대로 조사의견서 분석결과(분석체계 정립 → 분석내용 유형화 → 변수도출)를 반영하여 고도화 하였다.

마지막으로 분석모형을 활용하여 정전기 화재·폭발 사례(63건)별로 조사의견서의 세부내용(발생 내용, 과정 및 원인 등) 확인 및 발생원인 변수 정리를 통해 정전기 화재폭발 관련 중대재해 및 중대산업사고 예방을 위한 한계점(시사점)을 도출하였다.

2. 정전기 화재·폭발 위험성평가 및 사고조사

2.1 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가

화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성 평가는 인화성 물질의 존재 여부에 따라서 전하의 분리·축적이 발생하는 장소를 확인하고 해당 장소에서 정전기로 인한 접화 위험성을 평가하는 것으로 정전기 위험성평가의 기본절차를 다음의 Fig. 1과 같이 개선·제시하였다. Fig. 1의 기존 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가 기법에서 주요 개선부분을 점선으로 표시

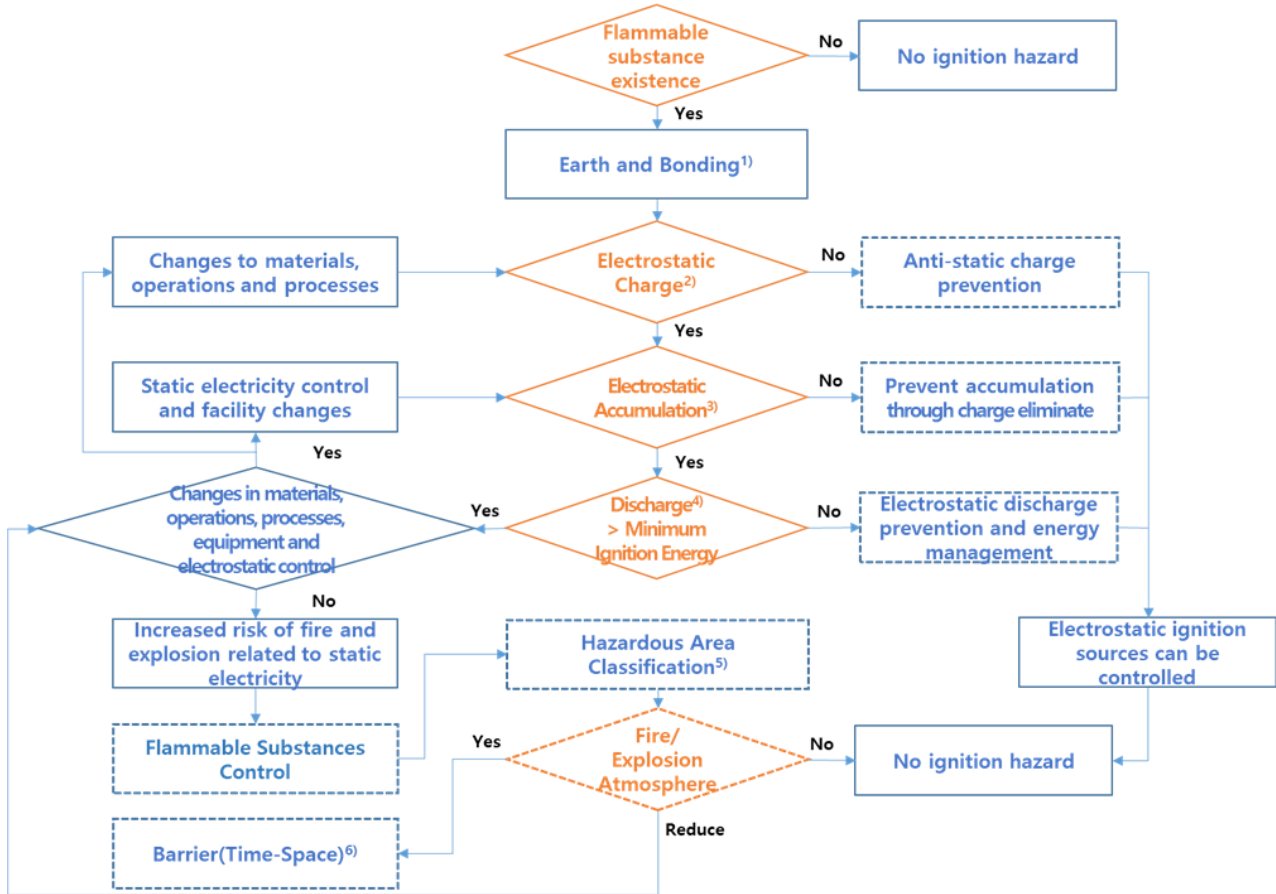


Fig. 1. The basic procedures for conducting risk assessment.

하고 주요 개선내용은 다음 Table 2와 같이 정리하였다. 그리고 Fig. 1의 기본절차의 주요 내용은 다음 Table 3과 같다¹³⁾.

Table 2. The improvement of risk assessment technique

Item	Reason for improvement
Hazardous area classification	<ul style="list-style-type: none"> When handling flammable materials, the classification of explosion hazard areas must be considered, so related procedures have been added.
Flammable materials control	<ul style="list-style-type: none"> Prepare specific action plans to manage flammable substances, such as classifying explosion hazard areas and creating barriers.
Barrier	<ul style="list-style-type: none"> Establishment of barrier procedures utilizing spatial and temporal distinctions considering electrostatic characteristics
Anti-static charge prevention	
Prevent accumulation through charge eliminate	<ul style="list-style-type: none"> Even if unreproducible electrostatic charging, accumulation and discharge phenomena do not occur immediately, establish continuous management and precautionary measures
Electrostatic discharge prevention and energy management	

Table 3. Basic contents of major in the risk assessment procedure

Step	Check-List
1)	<ul style="list-style-type: none"> Check for ungrounded conductive objects, including materials, equipment, or workers, that may impede grounding and bonding functions.
2)	<ul style="list-style-type: none"> Check the physical state(phase, conductivity), handling conditions(moving, stirring, spraying, filtration, sedimentation, etc.), and environmental conditions(temperature, humidity) of flammable substances
3)	<ul style="list-style-type: none"> Check the conductivity of materials and equipment and the isolation of workers from materials and equipment. If the measuring equipment approaches an object or place where electric charges have accumulated, static electricity may be discharged into the measuring equipment, so approach it slowly while monitoring the response speed of the measuring equipment.
4)	<ul style="list-style-type: none"> To determine the risk of fire explosion, compare the discharge energy of electrostatic charged objects with the minimum ignition energy of flammable materials.
5)	<ul style="list-style-type: none"> Based on the results of classification of explosion hazard areas considering the leakage characteristics of flammable substances, availability of ventilation, and dilution level, the presence or absence of static electricity discharge in a fire or explosion hazard atmosphere is determined.
6)	<ul style="list-style-type: none"> Check whether a barrier is implemented to separate time and space between the electrostatic discharge energy source and the fire or explosion hazard atmosphere.

2.2 정전기 화재 · 폭발 사고조사

화재 · 폭발 발생원인을 정전기로 추정하는 경우의 재해 · 사고조사는 물리적 현상에 대한 기술적 측면, 조작 및 운전 오류 등의 인적 측면과 작업방법 · 절차 등의 관리적 측면을 다양하게 확인한다. 그리고 다음 Fig. 2와 같이 직 · 간접 원인 그리고 근본 원인과 관련된 정보(데이터)를 현장조사, 측정 및 실험 그리고 서류 확인과 인터뷰를 통해 각각 수집 한다¹⁴⁾.

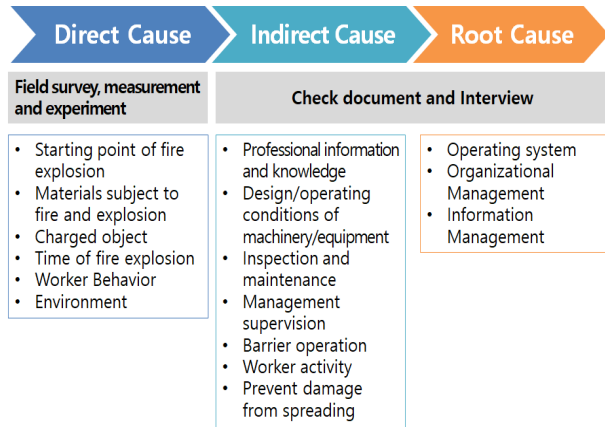


Fig. 2. The method and item of accident investigation.

그리고 직접원인, 간접원인 및 근본원인 도출을 위해 필수적으로 확인이 필요한 주요 항목에 대한 세부내용을 다음 Table 4~6과 같이 정리하였다. 직접원인 관련 주요 항목으로는 정전기 화재 · 폭발 시점, 대상물체, 점화원으로 작용한 대전물체, 작업자 행동 등이 있다.

2.3 시사점

본 장에서는 화재 · 폭발 위험장소에서의 정전기 안전관리를 위한 위험성평가 기법 개선(안) 및 정전기 화재 · 폭발 관련 중대재해 · 중대산업사고 원인조사 절차 및 방법 등을 제시하였다.

위험성평가 기법의 주요 개선 내용은 인화성물질 취급에 따른 폭발위험장소 구분¹⁵⁾, 시 · 공간성을 고려한 방호벽 사용 및 정전기 재현성을 고려한 정전기 발생 매커니즘 단계별 안전조치 사항 추가 등이다. 여기서 정전기 화재 · 폭발 위험성의 효과적인 도출을 위해 평가 단계별로 필수사항을 확인하였다.

또한 정전기 화재 · 폭발 원인조사를 위한 방법 · 절차를 제시하고 직접 · 간접 원인 및 근본원인 도출을 위한 주요 착안사항을 제시하였다. 그리고 정전기 위험성평가 및 사고조사에 필수적으로 확인이 필요한 사항은 3장에서 정전기 화재 · 폭발 발생원인 변수 도출을 위한 모형설계에 활용하고자 한다.

Table 4. Required items to check for direct cause analysis

Step	Check Items
① Static fire explosion starting point	<ul style="list-style-type: none"> Check the deformation, destruction, and damage of manufacturing/production machinery, equipment, and structures. The direction of the starting point of fire or explosion is specified in connection with the direction of destructive force action.
② Gas subject to fire explosion	<ul style="list-style-type: none"> Estimate the type and amount of flammable substances constituting the explosive mixture system, the type of retardant gas, and the volume size of the gaseous mixture system. Investigate environmental conditions such as temperature, pressure, and ventilation to determine the likelihood that electrostatic discharge may serve as an ignition source.
③ A charged object that acts as an ignition source	<ul style="list-style-type: none"> Check the electrical properties, size, shape, installation location, handling method, etc. of the charged object. Review the grounding condition and the positional connection between the grounding body and the charged object to determine whether electrostatic discharge acts as an ignition source.
④ When fire explosion occurs	<ul style="list-style-type: none"> The time of occurrence of a disaster or accident has an important meaning in time series analysis, as it confirms the connection between processes, operations, and machines and facilities at the time of occurrence. Determine the environmental conditions that caused fire or explosion, the creation of flammable substances, and the possibility of the presence of an ignition source. Collect information from stake holders from various perspectives and match it with the physical phenomena at the disaster or accident site to determine the time of occurrence of fire or explosion.
⑤ Worker behaviour	<ul style="list-style-type: none"> Identify the behavior of workers at the scene of a disaster or accident, and check compliance with safe work procedures and rules when operating, operating, manufacturing, producing, or maintaining mechanical equipment.
⑥ Etc	<ul style="list-style-type: none"> Since static electricity generation conditions are greatly influenced by atmospheric environmental conditions, check the temperature and humidity at the disaster or accident site.

Table 5. Required items to check for indirect cause analysis

Factor	Check Items
Physical phenomenon	<ul style="list-style-type: none"> Professional information and knowledge such as guidelines, manuals, and disaster cases. Operating conditions of equipment and equipment, including design and operation standards and specifications, as well as inspection, maintenance, and supervision details.
Barrier	<ul style="list-style-type: none"> A barrier installed to separate time and space between energy sources, people or objects and energy sources, or between people or objects. Whether or not a barrier is installed/implemented, reasons for non-installation/non-implementation, operational effectiveness, etc.
Worker activities in hazardous area	<ul style="list-style-type: none"> Necessity of activities such as work and walking for workers in fire and explosion hazard areas Appropriateness of worker behavior for risk avoidance/reduction Reasons for unnecessary actions by workers in places with a risk of fire or explosion
Prevent damage from spreading	<ul style="list-style-type: none"> Safety measures in the event of an abnormal situation to prevent disasters/accidents and the appropriateness of response/measures to prevent the spread of damage after an accident/disaster occurs

Table 6. Required items to check for root cause analysis

Factor	Check Items
System and organizational management	<ul style="list-style-type: none"> Safety-related policies, guidelines, standards, budget, line-staff responsibilities, and information delivery/instruction system
Risk management	<ul style="list-style-type: none"> Risk assessment, technical information management, classification/identification of potential risks, safety management plan (manuals, procedures, guidelines), etc.
Information Management	<ul style="list-style-type: none"> Internal and external acquisition and delivery system of technical information Monitoring and reporting system such as safety monitoring to identify risks, accident/disaster and dangerous situation reporting, improvement suggestions and patrol, etc. Summary of problems, interpretation of statistical data, and member competency information collection system. Risk management system, including setting safety systems and safety requirements and responding to expected or unexpected changes through data updating. Independent audit, review and documentation system

3. 정전기 화재 · 폭발 발생원인 변수 도출

3.1 발생원인 변수 도출을 위한 모형 정의

정전기 화재 · 폭발 발생원인 변수 도출을 위한 모형 정의를 위한 설계는 다음 Fig. 3과 같은 절차로 수행되었다.

첫 번째, 정전기 화재 · 폭발 중대재해 및 중대산업 사고 조사의견서를 토대로 분석 체계를 정립하고 피드백을 통해 고도화하였다. 두 번째, 조사의견서의 데이터(정보) 부족 문제를 해결하기 위해 전문가의 시나리오 구성을 통해 데이터(정보)를 정형화 하였다. 세 번째, 조사의견서에서 사고발생 관련 개요 · 과정과 공정

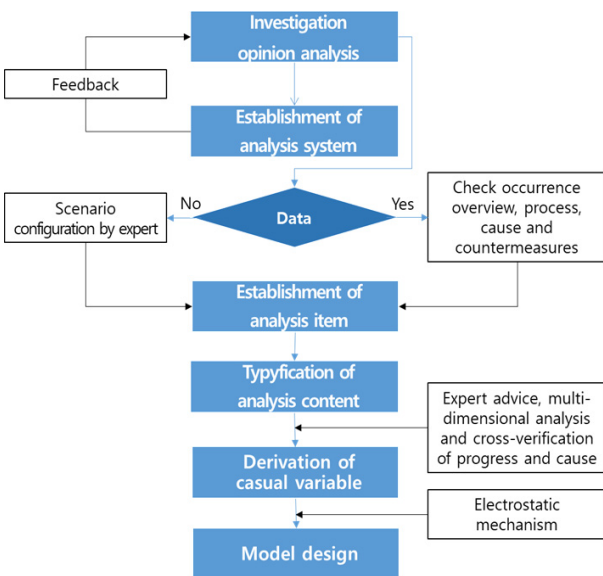


Fig. 3. The model design procedure for deriving variables causing static electricity fire explosions.

· 작업, 발생원인 및 방지대책 등을 분석하였다. 그리고 분석결과를 토대로 2. 정전기 화재 · 폭발 사고조사 기법을 활용하여 사고발생 관련 직접원인, 간접원인 그리고 근본원인을 종합적으로 검토하고 원인별 실제 영향요인을 확인하여 실제 원인변수 도출에 필요한 분석 항목을 구성하였다. 네 번째, 분석 항목을 토대로 재해조사 의견서를 재분석 하였다. 다섯 번째, 전문가 자문, 다차원 분석, 기술문서 검토^{5,8)} 그리고 발생 과정 · 원인의 교차분석을 통해 분석내용을 유형화하고 발생원인 변수를 도출하였다¹⁶⁻¹⁸⁾.

마지막으로, 정전기 발생 매커니즘(Mechanism)¹⁹⁾을 토대로 순주기에 걸쳐서 발생원인 변수와 연계시켜 설계 모형을 다음 Fig. 4와 같이 완성하였다.

3.2 발생원인 변수 도출을 위한 모형 적용

Fig. 4의 정전기 화재 · 폭발 발생원인 변수 도출을 위한 설계 모형에서는 정전기 발생 매커니즘을 토대로 순주기에서 발생할 수 있는 원인변수 항목을 제시하였다. 여기서 원인변수 항목은 조사의견서와 기술문서를 토대로 전문가 자문 및 다차원 분석 등을 통해 도출하였다. 그리고 모형을 통해 정전기적 현상 규명에 필요한 직 · 간접원인 및 근본원인 변수 항목을 확인할 수 있고, 이를 통해 화재 · 폭발 위험장소에서 정전기로 인한 점화 가능성을 판단할 수 있는 과학적 · 객관적 근거를 제시할 수 있다.

첫 번째, 정전기 대전 현상에서는 취급물질과 공정 · 작업 관련 작업자와 기계 · 설비의 특성을 정전기 대전조건과 연계함으로써 정전기 대전 여부와 종류를 결정할 수 있다. 정전기 대전현상에서의 원인변수 세부 내용은 다음 Table 7과 같다. Table 7에서의 취급물질 관련 발생원인 변수로는 인화성, 도전성, 최소점화에너지 및 취급 상태, 취급량 및 취급조건 등이 있다. 또한 공정 · 작업 관련 발생원인 변수는 작업자의 작업 매뉴얼 및 절차, 보호구 및 작업상황과 기계 · 설비의 재질, 접지 · 본딩 및 운전조건 그리고 위험성평가, 안전작업 관련 표준, 절차 및 가이드라인 등이 있다.

두 번째, 정전기 축적현상에서의 원인변수 세부내용은 다음 Table 8과 같다. Table 8에서는 정전기 제거를 위한 안전조치 즉, 대전물질 또는 설비에 대한 접지 · 본딩, 차폐, 제전 등의 이행여부와 온 · 습도 관련 발생원인 변수를 고려하여 방전현상으로의 연계 가능성을 검토한다.

세 번째, 정전기 방전현상에서의 원인변수 세부내용은 다음 Table 9와 같다. Table 9에서는 방전대상, 대전전위, 정전용량 및 전하량 등의 발생원인 변수를 정전기

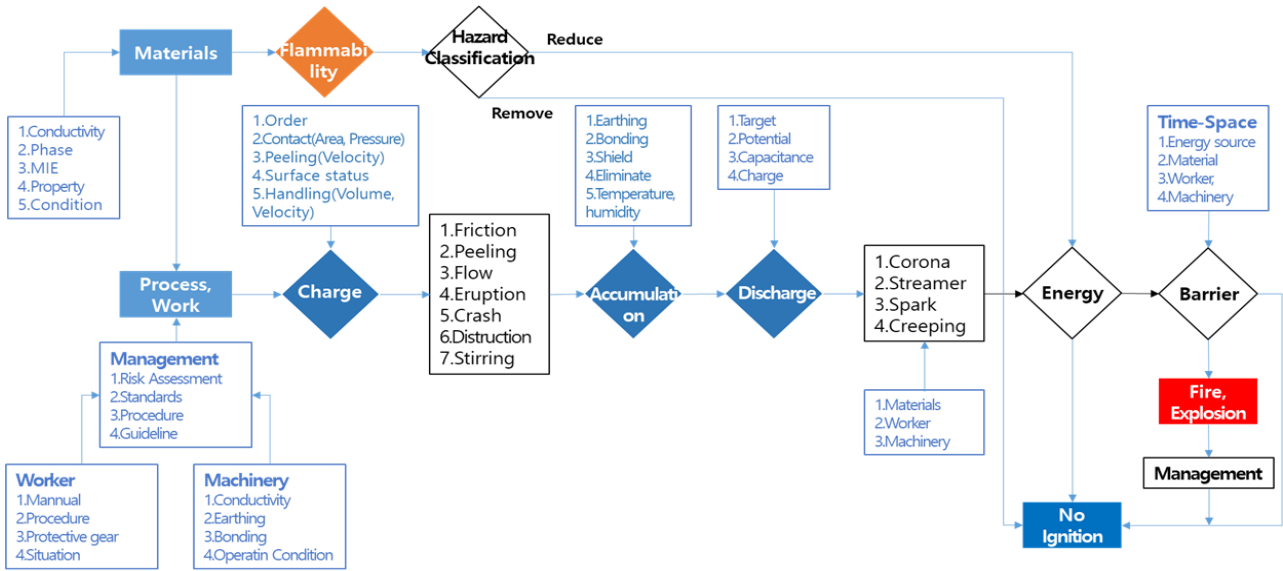


Fig. 4. The variable derivation model for causes of static electricity fire explosions.

Table 7. Details of causal variables in electrostatic charging phenomenon

Variable	The details
Substances handled	<ul style="list-style-type: none"> • (Flammability) The flammability of the handling material must be considered as a top priority in a fire explosion. • (Conductivity) Confirmation is necessary to determine the possibility of electrostatic generation in the handling substances. • (Minimum ignition energy) Confirmation is necessary when examining the possibility of fire explosion due to electrostatic discharge. • (Related to handling) Handling status, handling amount, and handling conditions affect whether or not electrostatic is generated and its generation characteristics.
Process/ Work (Worker)	<ul style="list-style-type: none"> • (Work manual and procedures) This is a necessary item to reduce risks related to electrostatic hazardous work, and manuals and procedures that workers can follow are required. • (Protective gear) Worker's protective gear is an effective means of preventing electrostatic charging and discharge during static electricity hazardous work. • (Situation) The worker's behavior just before the accident is a major clue in the electrostatic charging and discharging phenomenon.
Process/ Work (Machinery)	<ul style="list-style-type: none"> • (Material) This is a necessary item to reduce risks related to electrostatic hazardous work, and manuals and procedures that workers can follow are required. • (Earth and Bonding) Worker's protective gear is an effective means of preventing static electricity charging and discharge during static electricity hazardous work. • (Operation condition) The worker's behavior just before the accident is a major clue in the electrostatic charging and discharging phenomenon.
Process/ Work (Management)	<ul style="list-style-type: none"> • (Risk assessment) It can reduce the possibility of electrostatic acting as an ignition source in a fire/explosion hazard location. • (Standard) For electrostatic hazardous work, safe work procedures and standards are necessary to prevent ignition in hazardous locations. • (Guideline) Technical guidelines are needed to prevent electrostatic ignition in places with a risk of fire or explosion.

Table 8. Details of causal variables in electrostatic accumulating phenomenon

Variable	The details
Charging substance	<ul style="list-style-type: none"> • (Earth and Bonding) Grounding and bonding to charged objects are effective in preventing electrostatic charging and the accumulation of static electricity. However, if an electrically isolated charged object is connected to ground, the risk may increase due to rapid discharge. • (Shielding) It is a necessary measure to prevent electrostatic induction of charged objects and is an effective means of preventing electrification. • (Eliminating) If the charged object is a non-conductor, static electricity cannot be removed through grounding and bonding, so static electricity elimination devices such as ionizers are mainly used.
Temperature Humidity	<ul style="list-style-type: none"> • The generation of electrostatic is greatly affected by environmental factors, among which temperature and humidity are greatly affected. • However, just because the humidity in the environment surrounding a charged object is high, the possibility of static electricity generation should not be unconditionally ruled out. Depending on their physical properties, some objects generate static electricity even at 100% humidity.

방전조건과 연계함으로써 정전기 방전 여부와 종류를 결정할 수 있다. 이때 앞서 언급한 취급물질과 작업자, 기계·설비 특성을 고려하여 추가적으로 결정한다.

마지막 단계로 인화성 물질을 취급하는 화재·폭발 위험장소에서 정전기 방전 위험성이 있는 경우 인화성 물질의 최소점화에너지와 방전에너지를 비교하여 최종적으로 화재·폭발의 점화원을 정전기로 판단한다.

추가적으로 시·공간 개념의 방호벽과 안전관리 수단 적용을 통해 정전기 위험성의 감소 여부에 대한 판단도 필요하다. 방호벽은 위험성평가를 통한 정전기

Table 9. Details of causal variables in electrostatic discharging phenomenon

Variable	The details
Discharging target	<ul style="list-style-type: none"> The discharge energy value varies depending on the discharge target of the electrostatic charged object. For example, if the discharge target is a non-conductor, the discharge phenomenon occurs slowly, but if the discharge object is a conductor, the discharge phenomenon occurs rapidly, which can lead to a more dangerous situation.
Electrical properties	<ul style="list-style-type: none"> (Brief) In order to determine whether electrostatic acts as an ignition source, it is necessary to compare the discharge energy with the minimum ignition energy of the flammable material. And the variables needed to calculate discharge energy are charging potential, capacitance, and charge amount. (Potential) Due to the electrostatic surface phenomenon, the charging potential of the surface of a charged object can be measured using a measuring instrument. And it is the easiest variable to measure among the three variables for calculating discharge energy. (Capacitance) The electrostatic capacity of a charged object is a factor that determines the size of the amount of static electricity. If the electrostatic capacity is large, the discharge energy can increase when electrostatic charging occurs. (Charge) The amount of charge is a number that indicates the size and amount of static electricity, and having a large amount of charge also has a major effect on the size of the discharge energy.
Energy	<ul style="list-style-type: none"> A fire explosion due to static electricity occurs when the discharge energy is greater than the minimum ignition energy of the material in question. However, since the discharge energy varies depending on the discharge target and electrode shape, and the minimum ignition energy varies depending on the mixing ratio, etc., it should not be judged based solely on literature data.

위험성 감소조치가 불가능한 조건에서 정전기 방전에너지가 인화성물질이 최소점화에너지보다 큰 경우 정전기 발생특성을 고려하여 인화성물질 사용·취급과 정전기 방전 조건을 시간적·공간적으로 분리함으로써 가연물과 점화원의 연계성을 차단하게 된다.

4. 변수 도출 모형을 활용한 조사의건서 분석

변수 도출 모형 기반 조사의건서 분석의 주요점은 위험성평가 및 사고조사 절차·방법의 정당성과 함께 평가·조사 결과의 신뢰성·객관성을 확인하고 개선방안을 모색하고자 하는 것이다. 이를 위해 3.1의 既설계 정전기 화재·폭발 발생원인 변수 도출 모형을 활용하여 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고 조사의건서의 세부내용(발생 과정·내용 및 원인 등)을 분석하고 발생원인 변수를 원인물질, 발생공정·작업, 발생 매커니즘과 폭발위험장소로 구분하여 다음과 같이 정리하였다²⁾.

4.1 정전기 화재·폭발 관련 원인물질

정전기 화재·폭발 원인물질 관련 도전성, 최소점화

에너지 및 취급조건 원인변수에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 5와 같다. 여기서 ① 원인물질의 도전성은 정전기 대전 및 축적 가능성을 판단할 수 있는 중요한 단서로, 도전성 여부에 따라 발생원인과 재발방지대책은 상이하다²⁰⁾. ② 원인물질의 최소점화에너지는 대전물체의 방전에너지와 비교를 통해 정전기의 점화원 작용 여부를 판단할 수 있다. ③ 정전기적 현상은 상호간의 물리적 현상으로 발생하기 때문에 원인물질의 취급조건 파악을 통해 정전기 대전여부를 판단할 수 있다.

Fig. 5에서 정전기 화재·폭발 원인물질의 전기적 특성이 비도전성인 경우가 도전성인 경우보다도 높았다. 그리고 0.2 ~ 0.5 mJ 최소점화에너지 값을 가지는 원인물질 비율이 50%로 가장 높았다. 취급조건에서는 원인물질의 이송 비율이 28.5%로 가장 높았고, 저장 및 투입 순으로 높았다.

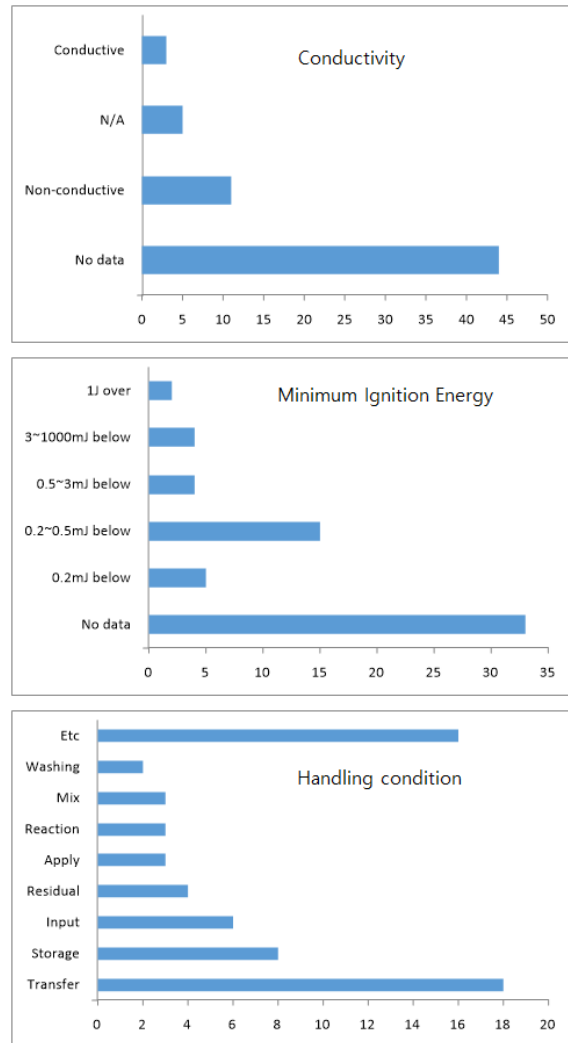


Fig. 5. The analysis status of causative substances related to electrostatic fire explosions.

4.2 정전기 화재·폭발 관련 공정·작업

4.2.1 제조·생산설비

정전기 화재·폭발 발생과정·작업 관련 제조·생산설비에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 6과 같다. 여기서 ① 공정 내 제조·생산설비의 도전성은 정전기 대전 및 축적 현상을 규명할 수 있는 중요한 근거로, 위험성 평가 또는 사고조사 시 접지 또는 본딩 실시여부와 연계하여 검토한다. ② 제조·생산설비의 운전조건과 작업내용은 정전기 발생 매커니즘과 화재·폭발 발생원인 규명을 위해서 간접사항이지만 필수적으로 확인이 필요하다.

Fig. 6에서는 제조·생산설비의 전기적 특성이 비도전성인 경우가 도전성인 경우보다도 높았다. 그리고 전기적 특성과 연계하여 확인이 필요한 접지는 미실시한 경우가 실시한 경우보다도 높았다. 또한 제조·생산설비의 운전여부는 미운전시보다 운전시에 더 많이 발생하였고, 작업내용에서는 혼합작업 비율이 14.3%로 가장 높았고, 이송 및 저장 순으로 높았다.

4.2.2 작업자

또한 정전기 화재·폭발 발생과정·작업 관련 작업자에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 7과 같다. 여기서 ① 작업자의 정전기 관련 보호구는 인체대전으로 인한 방전을 방지하기 위한 용도로 착용한다. 즉, 인체 정전기 대전 및 축적 시 보호구의 도전성 특성을 활용하여 발

생 정전기를 소멸시키는 성능을 가진다. ② 작업자의 작업내용·상황 특히 행동거동은 정전기 대전, 축적 및 방전 주 주기에서 주요 발생원인 변수가 될 수 있다. ③ 작업 매뉴얼 및 교육은 작업자가 정전기 발생 전 주기에서 기술적 한계를 극복할 수 있는 유일한 수단이다. 또한 위험성평가를 통해 화재·폭발위험장소에서 인화성물질을 취급하는 경우 위험성을 감소시킬 수 있다.

Fig. 7에서는 정전기 관련 보호구의 작업자 착용 비율은 12%로, 부분착용 또는 착용하지 않은 비율이 88%로 더 높았다. 그리고 정전기 발생 당시 작업내용·상황은 투입작업 비율이 32.5%로 가장 높았고 인력 작업 순으로 높았다. 또한 작업 매뉴얼 및 교육은 정전기 화재·폭발 위험성 감소에 특화된 매뉴얼 제정 및 교육 실시 상태는 기술적 한계로 다소 미흡하였다.

4.3 정전기 화재·폭발 관련 발생 매커니즘

4.3.1 정전기 대전

정전기 화재·폭발 발생 매커니즘 관련 대전현상에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 8과 같다. 여기서 ① 정전기 대전 대상 확인은 화재·폭발의 점화원을 추정하기 위한 중요한 근거이자 시작점이다. 따라서 정전기 축적과 방전현상과 연계하여 검토한다. ② 대전서열은 정전기 대전 여부와 에너지를 결정하는 요인으로 정전기 방전에너지에 영향을 미친다. ③ 대전 조건 및 종류는



Fig. 6. The analysis status of mechanical equipment related to electrostatic fire explosion.

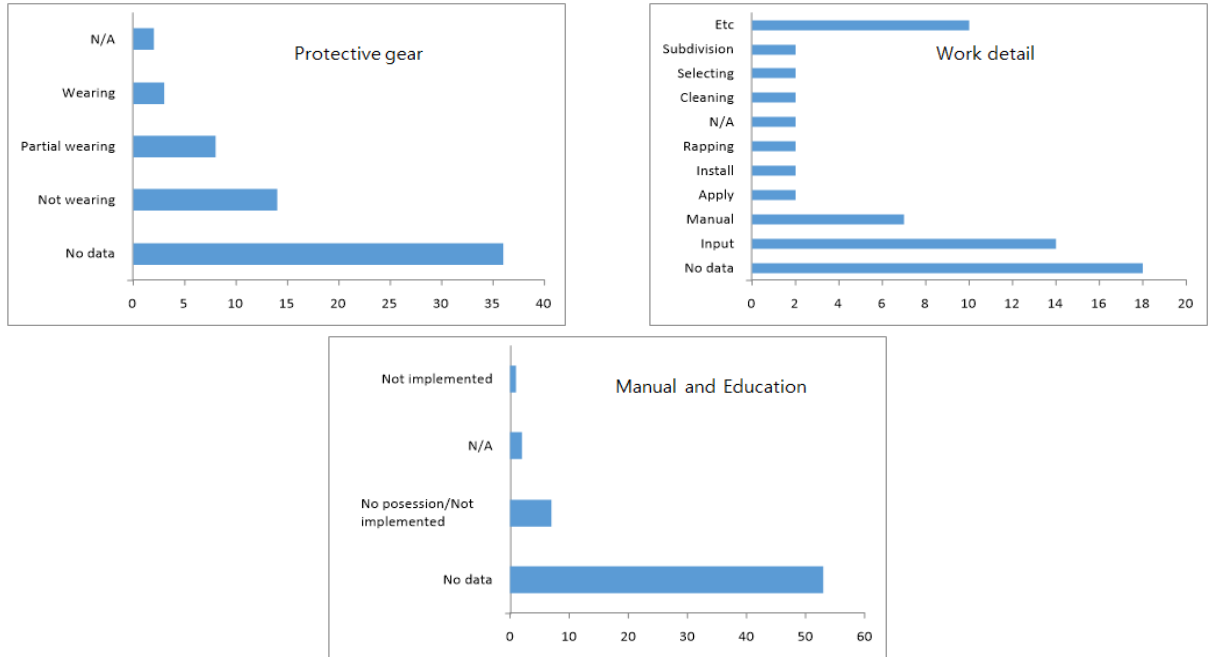


Fig. 7. The analysis status of workers related to electrostatic fire explosion.

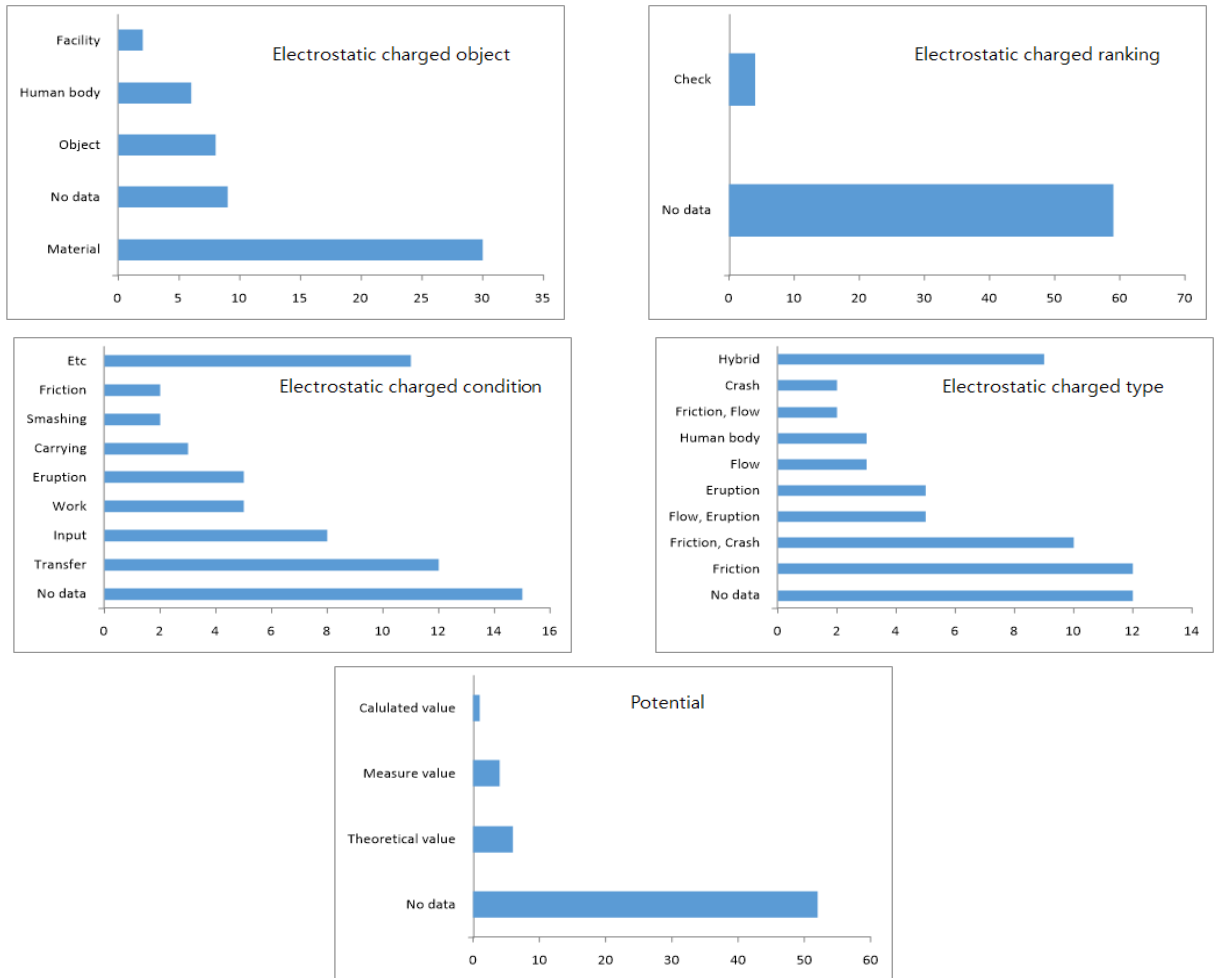


Fig. 8. The analysis status of electrification phenomenon related to electrostatic fire explosion.

대전 및 방전 대상을 결정하는 요인으로 위험성평가 또는 재해·사고 조사 시 확인이 필요한 주요 항목이다. ④ 대전전위 측정은 실제 정전기 대전여부 확인, 방전에너지 계산 그리고 위험성 감소를 위해 확인이 필요하다.

Fig. 8에서는 정전기 대전대상 비율은 인화성 액체 및 가연성 분진 등 물질이 68.5%로 가장 높았고, 물체 및 인체 순으로 높았다. 그리고 대전조건 비율은 이송이 25.0%로 가장 높았고, 투입 및 인력작업 순으로 높았다. 또한 대전종류 비율은 마찰대전이 23.5%로 가장 높았고, 마찰·충돌 및 유동·분출 순으로 높았다. 그러나 대전전위 측정은 정전기 현상의 재현성 부족으로 인해 사고발생 이후 측정은 기술적 한계가 있다.

4.3.2 정전기 축적

정전기 화재·폭발 발생 매커니즘 관련 축적현상에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 9와 같다. 정전기 축적 현상은 발생 전 주기에서 대전과 방전의 중간단계로, 정전기 대전 현상 발생이 불가피하다면 정전기 위험성평가를 통해 정전기 제거 등 축적방지 안전조치를 통해 위험성을 감소시킬 수 있다. 즉 대전대상의 전기적 특성에 따라 접지, 차폐 및 제전 등의 안전조치 수행을 통해 방전으로 연계성을 충분히 감소시킬 수 있다. 따라서 정전기 축적 방지를 위한 접지, 차폐 및 제전 등의 이행여부는 위험성감소를 위한 위험성평가 및 재해·사고 조사에서는 주요 원인변수가 된다.

Fig. 9에서는 대전대상의 전기적 특성이 도전성으로 접지 및 본딩(Bonding)을 통해 충분히 정전기 대전·축적방지를 할 수 있었음에도 불구하고 접지(본딩) 미실시 비율이 90%로 접지 실시 경우보다 상당히 높았다. 그리고 대전대상이 부도체(비도전성)인 경우 차폐 및 제전 등의 안전조치 이행이 필요하지만, 이행되지 않거나 자료 부족으로 확인이 불가능했다. 무엇보다도 정전기 화재·폭발 장소의 환경요인 중 온·습도는 정전기 발생 여부를 판단하는데 있어 주로 사용하는 중요한 근거이다. 다만, 일본 소방청 통계⁴⁾ 및 NFPA 77²¹⁾에 따라 온·습도가 높은 경우 정전기적 물리적 현상 발생을 무조건 배제하기 보다는 추가 검토가 필요하다.

4.3.3 정전기 방전

정전기 화재·폭발 발생 매커니즘 관련 방전현상에 대한 확인 결과는 다음 Fig. 10과 같다. 정전기 방전 현상은 발생 전 주기에서 마지막 단계로, 정전기 대전 및 축적 현상의 발생이 불가피하다면 정전기 위험성평가를 통해 화재·폭발 위험장소에서의 방전 방지기술 적용을 통해 위험성 감소시킬 수 있다. 또한 재해·사고 조사 시에도 정전기 대전·축적 가능성만 검토한다면 조사결과의 신뢰성·객관성을 확보할 수 없다. 방전단계에서 가장 중요한 원인변수는 방전에너지이며, 이 방전에너지의 크기에 대한 영향요인으로는 방전종류, 방전대상과 도전성 여부, 그리고 대전대상의 전위

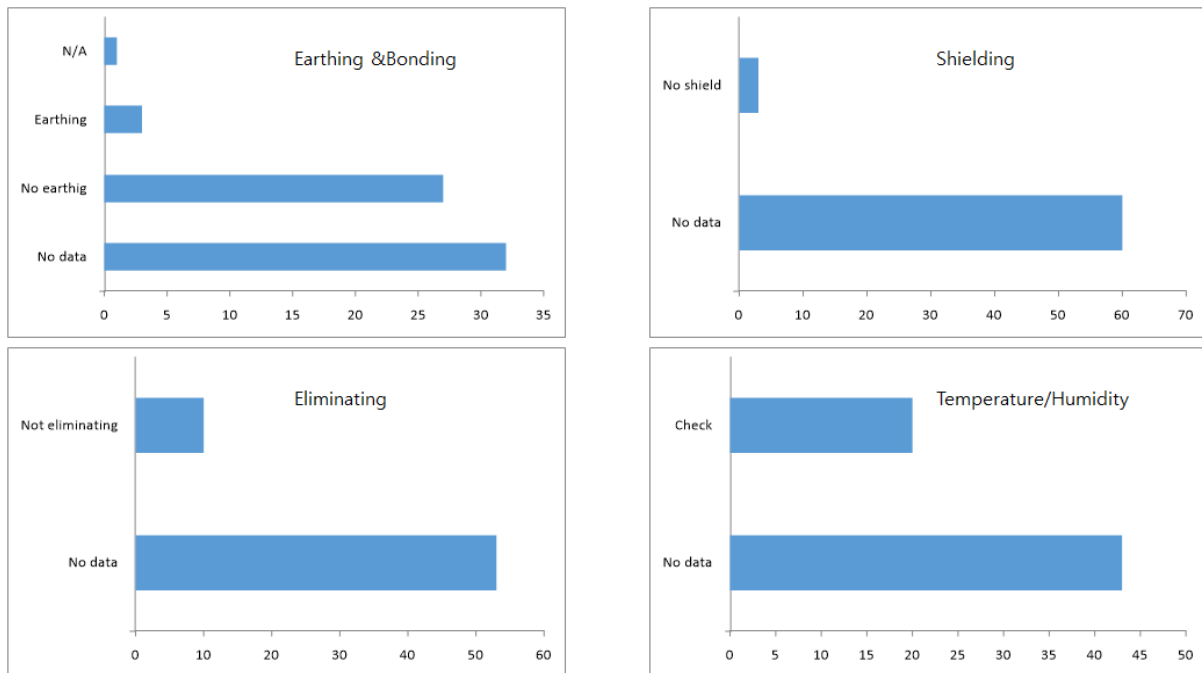


Fig. 9. The analysis status of accumulation phenomenon related to electrostatic fire explosion.

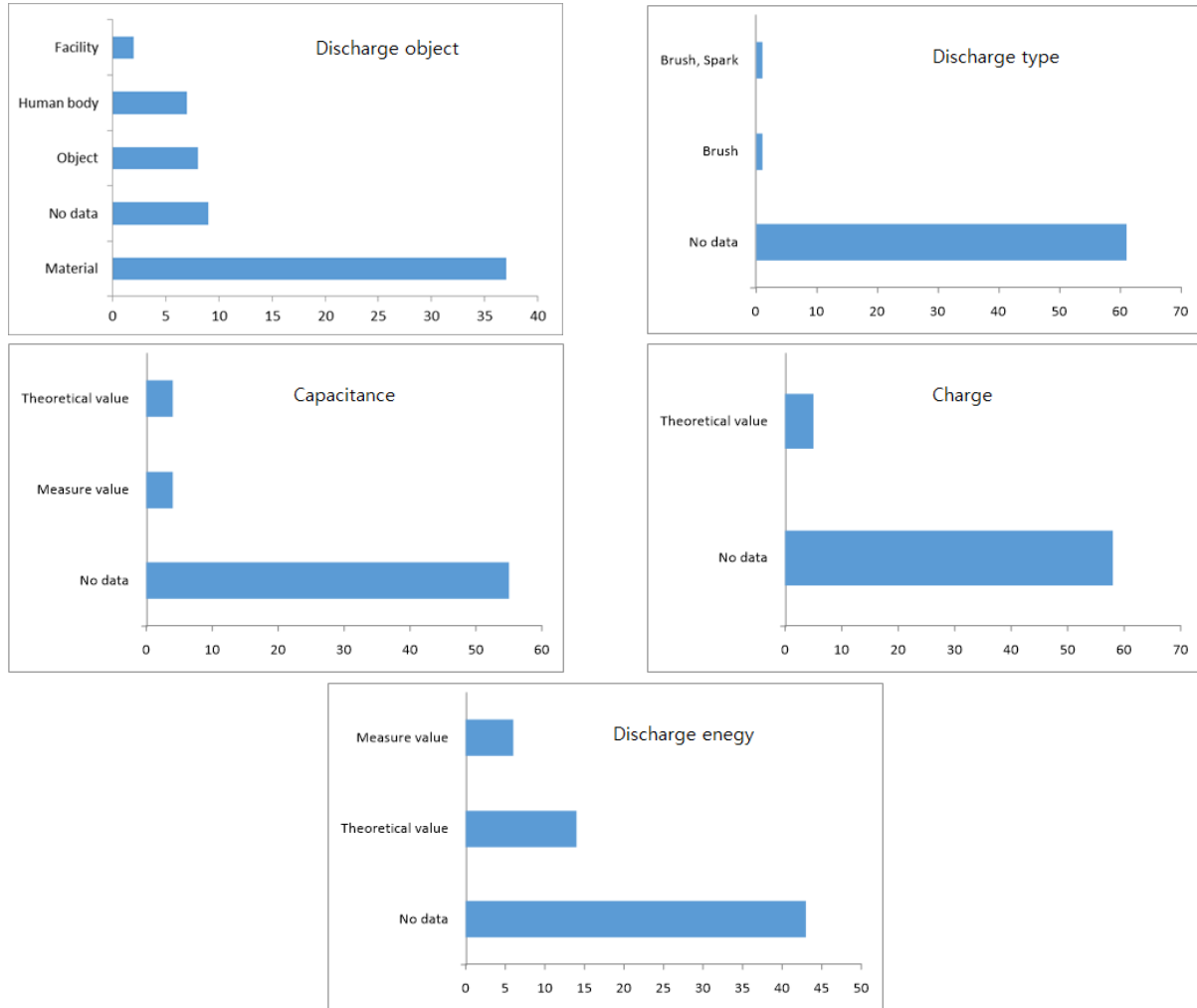


Fig. 10. The analysis status of discharge phenomenon related to electrostatic fire explosion.

(Potential), 정전용량(Capacitance) 및 전하량(Charge)이 있다.

Fig. 10에서는 방전대상 비율은 설비가 55.0%로 가장 높았고, 대전전위, 정전용량 및 전하량 측정에 대한 기술적 한계로 방전에너지 계산은 대부분 문헌조사 또는 기존 데이터를 활용한 계산치로 판단하고 있다.

4.4 재해조사 의견서 분석결과

재해조사 의견서 분석을 통해 분석모형 기반의 주기별 원인변수가 사고조사 및 위험성평가 시 적절하게 고려되고 있는지를 확인하였다. 분석 결과, 정전기 화재·폭발 예방 및 안전관리 인프라 부재에 기인하는 데이터(정보) 부족으로 발생원인 규명 및 위험성 식별·확인이 대부분 추정방식으로 이루어지고 있었다. 그리고 유사한 형태의 정전기 화재·폭발 중대재해 및 중대산업사고가 지속·반복적으로 발생하기 때문에 발생빈도가 높은 유사한 공정·작업 및 기계·설비 등에

서의 잠재적 위험성이 크다는 것을 확인하였다.

잠재적 위험성 확인을 위한 원인변수 빈도분석에서는 산업현장의 전체 모수를 고려하지는 않았지만 조사 의견서 분석을 통해 원인변수 규모를 결정하고 해당 모수에서 발생빈도가 가장 높은 원인변수 즉 잠재적 위험성이 큰 영역을 대상으로 예방대책을 수립할 수 있다.

4.5 정전기 화재·폭발 발생 관련 원인변수

정전기 관련 화재·폭발은 특정한 원인변수가 개별적·독립적으로 작용하는 것이 아니기 때문에 사고조사·위험성평가 결과의 신뢰성과 타당성을 확보하기 위해서는 정전기 발생 매커니즘의 쉼주기에서 원인변수간의 상호작용이 어떻게 이루어지는가에 대한 종합적인 판단이 필요하다¹⁾. 또한 원인변수간의 상호작용으로 정전기 화재·폭발이 발생하기 때문에 다른 원인변수와의 상호 연관성을 검토하여 발생원인 및 위험성

Table 10. The Checklist for checking essential items related to electrostatic fire explosion

Division	Items	Method	Division	Items	Method	Division	Items	Method	Division	Items	Method
	Material			Guideline	D		Charge			Eliminate	V, I
	Flammability	E, L		Machinery			Order	E, L		Temperature Humidity	E, V, I
	Conductivity	E, L		Conductivity	E, L		Contact	V, I		Discharge	
Material	Phase	V, D		Earthing	V, I		Peeling	V, I		Target	V, L
	MIE	E, L		Bonding	V, I		Surface status	V, I	Mechanism	Potential	E, L
	Property	V, D	Process, Work	Operation condition	V, I	Mechanism	Handling	V, I		Capacitance	E, L
	Condition	V, D		Worker			Sort	V, L		Charge	E, L
	Management			Manual	D		Accumulation			Sort	V, L
	Risk Assessment	D		Procedure	D		Earthing	V, I		Energy	E, L, D
Process, Work	Standards	D		Protective gear	V, I		Bonding	V, I	Hazard Classification	Remove	D, I
	Procedure	D		Situation	V, I		Shield	V, I		Reduce	D, I

※ E: Experiment, L: Literature, V: Visual, D: Document, I: Interview

에 대한 종합적인 판단이 필요하다.

이에 정전기 화재·폭발 발생원인 변수 도출 모형을 기반으로 중대재해·중대산업사고 조사의견서(재)분석결과를 반영하여 정전기 화재·폭발을 유발할 수 있는 원인변수 항목을 검증하고 고도화하였다. 다만, 재해조사 의견서 분석결과에 따르면 정전기 화재·폭발 예방 인프라 미흡으로 재해조사 의견서 일부 항목의 데이터(정보)가 부족하였다. 그러나 체크리스트상의 원인변수 항목은 정전기 화재·폭발 발생원인 변수 도출 모형을 기반으로 도출하였으며, 모형 설계를 위한 1차 재해조사 의견서 심층 분석 시 데이터(정보) 부족 문제점은 전문가를 활용한 시나리오 구성을 통해 데이터(정보)를 정형화함으로써 해결 하였다.

그리고 다음 Table 10에서 정전기 화재·폭발 중대재해·중대산업사고 관련 위험성평가 및 사고조사 시 필수적으로 확인이 필요한 항목에 대한 체크리스트(양식)를 제시하였다. 또한 사고조사 또는 위험성평가 시 원인변수 항목에 대한 확인이 필수적으로 이루어져야 한다는 취지로 조사자 또는 평가자가 현장에서 인식할 수 있도록 가이드라인(매뉴얼) 개념으로 체크리스트(양식)를 제시하였다. 다만, 조사자 또는 평가자의 전문역량이 일정 수준 이상인 경우에만 현장에서 활용이 가능하다는 한계점이 있다.

4.6 한계점

발생원인 변수 도출 모형을 활용하여 정전기 화재·폭발 중대재해·중대산업사고 조사의견서(63건)를 분석하였다. 세부 내용은 정전기 화재·폭발 관련 ① 원인물질, ② 공정작업에서의 안전관리, 제조·생산 설비 및 작업자, 그리고 ③ 정전기 발생 매커니즘(대전→축

적→방전)에 대한 발생원인 변수 데이터 존재 여부를 확인하고 데이터에 대한 현황을 심층 분석하였다.

다만 현재 정전기 화재·폭발 예방 및 안전관리 기술 수준을 고려한다면 발생원인 변수에 대한 데이터 수집은 관련 인프라 부재로 기술적 한계가 있음을 인식하였다. 또한 정전기 화재·폭발 예방 및 안전관리 기술의 한계로 인해 정전기 화재·폭발 위험공정에서의 위험성평가, 안전작업 절차 및 가이드 라인 등 관리적 방안 수립에도 한계가 있음을 인식하였다. 따라서 기술적·관리적 인프라의 현장 작동성을 지원할 수 있는 제도적 기반도 필요하다.

이에 후행연구를 통해 인화성물질을 취급하는 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 안전관리를 위한 실효적인 위험성평가와 과학적 사고조사 수행 체계 마련이 필요하며, 이와 연계하여 정전기 발생 매커니즘 소주 기별 원인변수 도출을 위한 정전기 재해예방 및 안전관리 기술 인프라 구축도 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 통제·관리하기 위한 실효적인 위험성평가와 재발방지대책 수립을 위한 과학적·객관적 사고조사에 필요한 발생원인 주요 변수를 도출하였다.

이에 고용부 산업재해통계를 활용하여 최근 10년간(2012년~2021년) 점화원이 정전기로 추정되는 화재·폭발 중대재해 및 중대산업사고 조사의견서 63건을 수집·분석하였다. 분석방법은 조사의견서의 발생 개요, 발생과정, 발생원인 및 재발방지대책 확인·정리하여

분석내용을 유형화하고 정전기 발생 매커니즘(대전→축적→방전)을 토대로 다차원 분석 및 전문가 자문 등을 통해 발생원인 주요 변수를 도출하고 모형을 설계하였다. 그리고 설계 모형을 활용하여 정전기 화재·폭발 중대재해·중대산업사고 조사의견서를 재분석하여 발생원인 변수 관련 자료 현황을 확인하고 한계점을 도출하였다.

연구결과로는 인화성 물질을 취급하는 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가 기법을 개선·제시하고, 정전기 화재·폭발에 특화된 재해·사고 조사 절차 및 방법을 마련하였다. 그리고 설계모형을 활용한 조사의견서 분석을 통해 도출된 발생원인 주요변수에 대한 체크리스트(Check-List) 양식을 제시하여 위험성평가 및 재해·사고 조사에 활용할 수 있도록 하였다.

결론적으로 화재·폭발위험장소에서 자기규율 예방체계 확립을 위한 정전기 위험성평가 실시와 화재·폭발 점화원을 정전기로 규명하기 위해서는 앞서 도출한 발생원인 주요변수에 대한 과학적·객관적 확인·분석이 필요하다. 이를 위해 현재 정전기 화재·폭발 예방 기술 및 안전관리 수준을 고려한다면 정전기 안전 관련 인프라에 대한 개선·구축이 필요하다.

Acknowledgement: This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2022)

References

- 1) J. Byeon, "A Study on the Establishment of Safety Management Plan through Analysis of Cause of Electrostatic Fire and Explosion", OSHRI., 2023-OSHRI-820, pp. 28, 2023.
- 2) The Korea Occupational Safety and Health Agency, Industrial Accident Statistics, 2000-2017.
- 3) <https://www.nfds.go.kr/stat/general.do>, National Fire Agency
- 4) <https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/r2/chapter1/section1/para1/56559.html>, Fire and Disaster Management Agency.
- 5) J. M. Samllwood, "The ESD Control Program Handbook", John Wiley & Sons Ltd, pp. 51-88, 2020.
- 6) G. T. Danelmayer, "ESD Program management: A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control", The Springer International Series in Engineering and Computer Science, 2nd Edition, pp. 489, 1990.
- 7) The Military of america, "Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts Assembles and Equipment", The Military Handbook, MIL-HDBK-263B, pp. 29-43, 1990.
- 8) Kiyoshi OTA, "Evaluation and Prevention of Electrostatic Hazards in Chemical Plants", R&D Report, "SUMITOMO KAGAKU", vol. 2004-II, pp. 2-4, 2004.
- 9) Kiyoshi OTA, "Electrostatic Risk Assessment for Chemical Plants: Fire and Explosion Prevention", R&D Report, "SUMITOMO KAGAKU", vol. 2018, pp. 2-4, 2018.
- 10) M.Glor, "Electrostatic Ignition Hazards Associated with Flammable Substances in the Form of Gases, Vapors, Mists and Dusts", Chemistry, Engineering, Environmental Science, pp. 2-3, 1999.
- 11) Ioana Sandu, "Static Electricity Incident Review", Research Foundation, NFPA, pp. 7-16, 2021.
- 12) Ehsan Ramezanifar, "Risk assessment of methanol storage tank fire accident using hybrid FTA-SPA", PLOS ONE | <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282657>, pp. 3, 2023.
- 13) NFPA77, Recommended Practice on Static Electricity, pp. 14-15, 2019.
- 14) KOSHA "Technical guidelines for fire/explosion disaster investigation caused by static electricity", E-182-2021, pp. 6-9, 2021.
- 15) KS, "Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres", KS, Edition 2, pp. 82-85, 2015.
- 16) Japan Electrostatic Society, Electrostatic Handbook, pp. 165-186, Ohmsha, 1998.
- 17) J. Byeon, "A Study on the Development of Explosion Proof ESD Detector and Intrinsic Safety Characteristics Analysis", J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 1, pp. 1-11, 2020.
- 18) S. W. Choi and J. Byeon, "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.
- 19) NFPA77, Recommended Practice on Static Electricity, pp. 5-10, 2019.
- 20) D. H Lee and J. H. BYEON, "A Study on the Measurement and Comparison(IEC 60079-32-2) of Flammable Liquid Conductivity", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 4, pp. 22-31, 2019.
- 21) NFPA77, Recommended Practice on Static Electricity, pp. 28-30, 2019.