Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 39, No. 1, pp. 16-26, February 2024
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2024.39.1.16

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

식료품제조업 전기설비의 전기화재방지를 위한 위험우선순위 분석

이승구[1] · 김두현[2†] · 김성철[3]

Risk Priority Analysis for Preventing Electrical Fires in Food Manufacturing Electrical Facilities

Seung Ku Lee[1] · Doo Hyun Kim[2†] · Sung Chul Kim[3]

†Corresponding Author
Doo Hyun Kim
Tel : +82-43-261-2463
E-mail : dhk@chungbuk.ac.kr

Received : November 1, 2023
Revised : December 5, 2023
Accepted : December 29, 2023

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

Abstract : This study aims to introduce a method for risk assessment analysis aimed at preventing electrical fires within the manufacturing industry. Initially, we provided a functional block diagram illustrating the electrical equipment employed in various processes within a food manufacturing company in Chungcheongbuk-do. Subsequently, we categorized the components of each machine outlined in the functional block diagram and determined the priority of failure for each classified component. Upon implementing the model in the frying process of the food manufacturing company, specific components, including MC, motor, mixer heater, electric wiring, and terminal block, exhibit a risk priority number (RPN) of 40 or higher. This identified an electrical issue within the manufacturing process and environment. Consequently, we propose a methodology to identify latent failure modes that could escalate into fires or systemic issues if not promptly addressed. It is essential to note that while the FMEA presented in this study may not immediately impact food manufacturing, its applicability extends to various workplaces.

Key Words : electrical fire, food manufacturing company, risk assessment, FMEA

1. 서 론

충청북도 소재의 A사는 2019년에 원인불명의 전기화재가 발생하였고 이 화재로 공장동 건물 1층과 2층이 전소되었다. A사는 화재 이후 2020년부터 전담 안전관리자를 고용하였고 2021년 안전관리전문기관을 통해 전 직원이 참여하는 위험성평가를 실시하였다. 추가적으로 신축한 공장동에 대해서는 유해위험방지계획서를 작성, 제출하여 승인받았다. 이런 노력에도 불구하고 2022년 2월에 또다시 전기화재가 발생하여 2개 동이 전소되었다. 정부에서는 전기화재뿐만 아니라 감전, 기타 재해에 대하여 KOSHA(한국산업안전보건공단)에서 제공하는 KRAS(Korea Risk assessment system, 위험성평가)[1]를 의무적으로 시행하고 있다. 또한 설계단계에서의 예방을 바탕으로 한 유해위험방지계획서를 작성하고 있다. 특히 KRAS에서 제시하고 있는 전기적 요인은 감전, 아크, 정전기, 화재/폭발로만 분류하고 있으며, 유해위험방지계획서상에는 전기와 관련된 내용은 전기단선도의 확인과 접지 및 피뢰설비 설치계획에 대한 적정성 확인만을 하고 있어 전기화재를 방지하기 위한 구체적이고 객관적인 요구사항이 없는 실정이다[2].

현재 국내 제조업은 제조를 위한 다양한 전기설비와 제조상에 발생하는 환경이 각각 다르게 나타난다. 특히 식료품제조업의 경우 고온 및 다습으로 인하여 전기설비의 절연열화를 촉진하고 있다[3]. 따라서 고위험 환경에서 전기설비를 포함한 제조공장에 대하여 현재 유해위험요인을 발굴하는 위험성 평가는 다소 한계가 있다. 다양한 제조환경에서 전기화재에 대한 구체적인 방지대책을 제시하기 위해서는 표본이 될 수 있는 위

[1]대한산업안전협회 국장 (Korea Inderstrial Safety Asossiation)
[2]충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)
[3]충북대학교 안전공학과 초빙교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

험성평가 분석 방법이 요구된다. 제조환경에 적합한 위험성평가 분석 표본을 만들기 위해서는 우선 공정별 사용 부하의 전기적 문제점과 해당 설치환경에서 발생 가능한 환경적 요소 등의 분석이 우선시되어야 한다[4]. 이러한 분석을 통하여 제조 환경이 전기설비에 미치는 영향 분석과 그 영향으로 파급되는 위험성을 도출하여야 한다. 이러한 영향을 분석하고 파급 효과를 분석하는 방법으로는 FMEA(Failure modes and effects analysis)와 FTA(Fault tree analysis)가 있다. 두 기법의 차이는 FMEA는 개개의 구성요소의 고장우선순위를 정하는 것이고 FTA는 전체 시스템에서 가장 열악한 MCS (Minimal cut sets)를 찾는 것이다[5]. 우선 제조업의 어떤 환경에서도 적용할 수 있는 위험성평가를 개발하기 위해서는 제조환경에서는 구성부품에 대한 영향 분석부터 이루어져야 한다. 공정과 환경에 의하여 구성 부품에서 발생될 수 있는 고장모드를 발굴하여야 하며 고장모드를 통하여 전체공정에 영향과 파급효과를 분석하여 관리 우선순위를 정할 수 있는 위험성평가가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 제조환경에서의 전기화재를 방지할 수 있는 위험성평가 분석 방법을 도입하는 것이 목적이다. 이에 첫째로 충청북도 소재의 식료품제조업인 A사를 대상으로 이전 위험성평가에 대하여 문제점을 분석하였다. 둘째로 분류된 공정을 바탕으로 공정마다 사용되는 전기설비에 대하여 기능적 블록 다이어그램을 제시하였다. 마지막으로 기능적 블록 다이어그램에서 제시한 기계 기구에 대하여 각각에 대한 구성부품을 분류하였고 분류된 구성부품에 대한 고장 우선순위를 도출하였다.

2. A 식료품제조업의 공정에 대한 분석

2.1 A사의 튀김 공정분석

공정분석은 A사에서 대형화재가 재발한 공장동을 대상으로 하였고, 생산 공정은 튀김 제품을 제조하고 있다.

Fig. 1은 튀김 라인으로 혼합기(Mixer), 성형기(Forming), 튀김기(Fryer), 탈유기(Deoiler), 냉각기(Cooler) 및 포장기(Packing), 6개의 설비와 단선도를 제시하였다. Fig. 1 a)는 혼합기로 각종 재료를 혼합하기 위한 기계이며 특히 밀반죽을 중점적으로 하고 있다. Fig. 1 b)는 성형기로 튀김을 만들기 위해 식품 페이스트를 원하는 모양으로 성형하는 기계이며 압출기, 금형, 사출장치로 구성되어 있다. 주요 센서는 온도, 압력, 금형감지 센서, 금형 온도 센서가 있다. Fig. 1 c)는 튀김기에 식용유를 넣고 전기로 가열하는 공정이다. 튀김기 온도는 온도 센서와 운전/정지 버튼으로 설정되어 있으며 일반적인 튀김기 온도는 160~180℃ 정도로 유지하고 있다. 센서는 온도센서와 기름의 압력을 측정하는 압력센서가 있다. Fig. 1 d)와 e)는 탈유기/냉각기로 탈유기는 기름을 제거하는 기계이며 냉각기는 탈유기와 비슷한 역할을 한다. 냉각기는 물이나 공기를 이용하여 튀김의 온도를 빠르게 낮추어 식품의 신선도와 안전성을 유지한다. Fig. 1 f)는 포장기로 제품을 안전하게 운송하고 보관하기 위해 포장재로

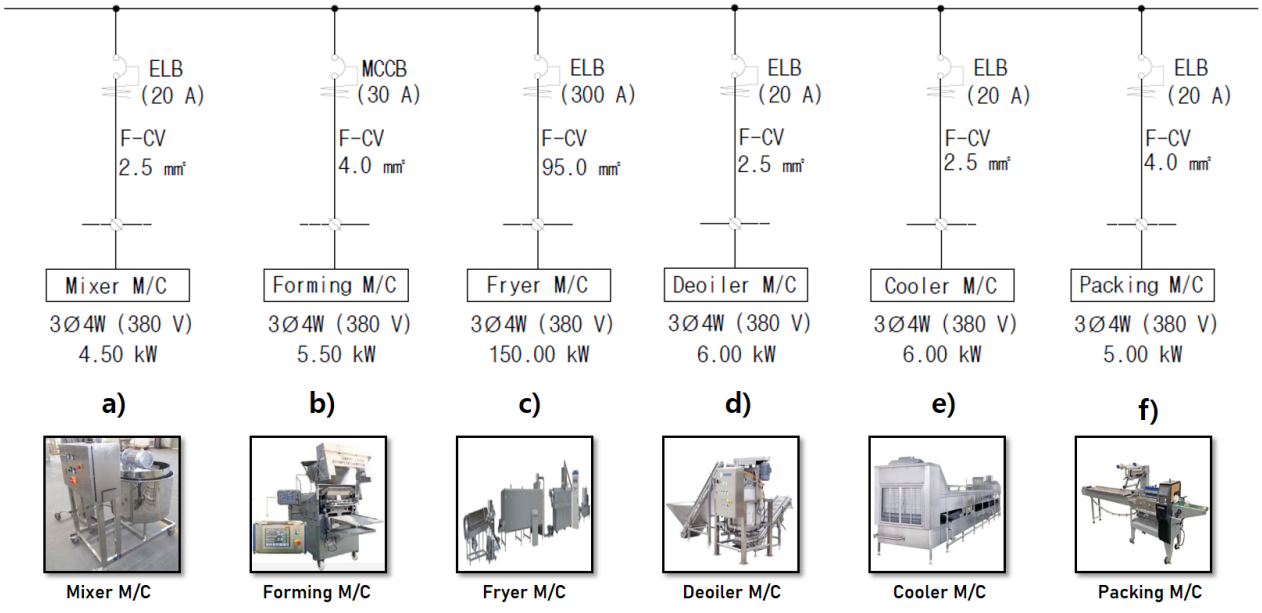

Fig. 1. Equipment and circuit diagram of frying lines.

Table 1. Electrical risk assessment table at frying lines

Risk assessment(Elecrical part)									
Process subject to evaluation				Frying line					
Investigation of harmful risk factors			Related evidence	Current safety and health measures	Current risk			Reduction measures	
Division	Causation	Harmful risk factors	Laws/exposure standards		Possibility	Importance	Risks	No	Improvement plan
2. Electrical factors	2.1Electric shock (exceeding safe voltage)	There is a potential risk of electric shock if electrical machinery is handled with wet hands on the fry line.	Safety and Health Rules Article 317 [Electrical work using mobile and portable devices, etc.]	Protective measures for live parts, Ground connection	1	4	4	-	-
2. Electrical factors	2.1Electric shock (exceeding safe voltage)	There is a risk of electric shock if contact with exposed live parts of electrical equipment in the frying line.	Safety and Health Rules Article 301 [Protection of live parts of electrical machines and appliances, etc.]	Protective measures for live parts, Ground connection	1	4	4	-	-
2. Electrical factors	2.1Electric shock (exceeding safe voltage)	There is a risk of electric shock if a short circuit occurs in the electrical equipment of the frying line.	Safety and Health Rules Article 302 [Grounding of Electrical Machines and Appliances]	Ground connection Installation of earth leakage circuit breaker	3	1	3	-	-
2. Electrical factors	2.1Electric shock (exceeding safe voltage)	Risk of electric shock due to failure to ground the mixer control panel enclosure.	Safety and Health Rules Article 302 [Grounding of Electrical Machines and Appliances]	-	2	4	8	A-4	Grounding to the control panel.
2. Electrical factors	2.1Electric shock (exceeding safe voltage)	The charging part is partially exposed inside the distribution board, so there is a risk of electric shock when touched.	Safety and Health Rules Article 301 [Protection of live parts of electrical machines and appliances, etc.]	Protective measures for live parts	2	4	8	A-5	Additional installation of insulation protection plate within the distribution panel charging section.

감싸는 기계이다. 보통 진공포장을 주로 함으로 압력센서와 근접센서로 구성되어 있다.

2.2 A사의 튀김공정 및 제조 환경

튀김류의 생산 및 청결 유지 등을 위하여 물이 빈번하게 사용하고 있으며, 이로 인하여 습도가 약 60% 이상 지속되고 있다. 또한 튀김라인 상의 튀김기의 히팅부에 의해 기름이 가열되는데 튀김 기름의 온도는 170~190℃ 정도로 올라가는 경우도 있다. 이때 튀김기 라인 전체에 열이 발생하는데 가장 가까운 벽면의 온도는 70~80℃까지 발생되며 전기설비 및 전선 등에 지속적으로 열에 대하여 노출되어 있다. 노출시간은 제조시간으로 교대로 운영되며 제조시간이 하루 평균 15시간이다. 또한 히팅부와 같은 특정 전기기계기구에서는 이 이상의 온도가 상시 유지된다.

2.3 튀김공정의 위험성평가

Table 1은 2019년 11월(전기화재가 발생한 후) KRAS로 작성한 위험성평가표이며, Table 2와 3은 2020년도에 유해위험방지계획서의 공정별 위험요인 분석표의 내용이다.

Table 1에서 보면 전기화재가 발생된 후에도 전기화재에 관한 내용은 없으며, 감전에 관한 내용으로만 국한되어 작성되어 있다.

Table 2와 3에서는 전기화재가 발생되어 재건축함에도 불구하고 공통설비의 전기적 위험요인은 감전뿐이며, 전체 공정에서 화재는 구이 공정밖에 없으나 이마저도 전기화재가 아닌 가스에 대한 위험요인이다. 따라서 기존의 KRAS와 유해위험방지계획서만으로는 전기화재를 예방하기는 적합하지 않다. 제조환경의 공정과 그 해당되는 기계기구와 설비들의 구성부품에 대한 위험성과 시스템적 관점의 분석이 필요하다. 제조공정 기계·기구에서 발생 가능한 원인 및 그 원인으로 인한 시스템의 미치는 영향 등을 고려한 고장모드를 식별하는 작업을 수행해야 한다.

Table 2. Analysis of risk factors by process in the hazard prevention plan in 2020

	Common facilities	Storage tank	Stacking and Storage	Freezer
Risk factors	Stricture, Fall down, Electric shock, Disorders	Stricture, Fall down, Electric shock	Electric shock, Crash	Electric shock, Fall, Addicted crash

Table 3. Risk factors by manufacturing process(Manufacturing Risk Prevention Plan)

Process / Product	Raw material	Molding	Frying	Cooling	Packaging
Fryer	Stricture, Fall down, Crash		Burn, Fall down, Electric shock, Stricture, Crash	Electric shock, Stricture, Crash	
Rolled seaweed	Stricture, Fall down, Crash	Musculoskeletal disorders, Stricture, Electric shock	Burn, Fall down, Electric shock, Stricture, Crash		Fall down, Addicted crash, Musculoskeletal disorders
Molded fries	Stricture, Fall down, Crash	Cut, Burn, Fall down, Stricture, Electric shock, Crash, Musculoskeletal disorders			Fall down, Addicted crash, Musculoskeletal disorders
Other fries		Cut, Stricture Electric shock Crash, Musculoskeletal disorders	Stricture Fall down, Burn Electric shock Crash Musculoskeletal disorders		
Pork cutlets		Cut, stricture, Electric shock, Crash, Musculoskeletal disorders	Stricture, Fall down Electric shock, Crash, Musculoskeletal disorders		
Cheese	Stricture, Electric shock				Musculoskeletal disorders, Stricture, Electric shock, crash
Roast		Fire, Explosion Electric shock, Stricture, crash			

3. 튀김공정에 대한 FMEA 개발

3.1 A사의 튀김공정 FMEA 방법

A사의 튀김제품공정의 전기화재를 방지하기 위한 FMEA의 개발 순서는 IEC-60812, SAE-ARP5580, MIL-1629a를 참조하였고 다음과 같다[6-8]. Fig. 2 a)에서는 튀김공정에서 요구되는 사항 및 튀김공정과 관련된 전기설비와 관련된 용량, 회로도 등을 분석하는 방법은 참고문헌 9)를 참조하였다. Fig. 2 b)에서 튀김공정에 사용되는 전기설비에 대한 구성부품을 분류하는 과정을 거쳤다. 이 단계가 가장 중요하며 중복되는 설비를 제거하고 복잡한 회로를 간소화 한다. Fig. 2 c) 에서는 구성부품에 대하여 전력(Power), DC에 대한 전원

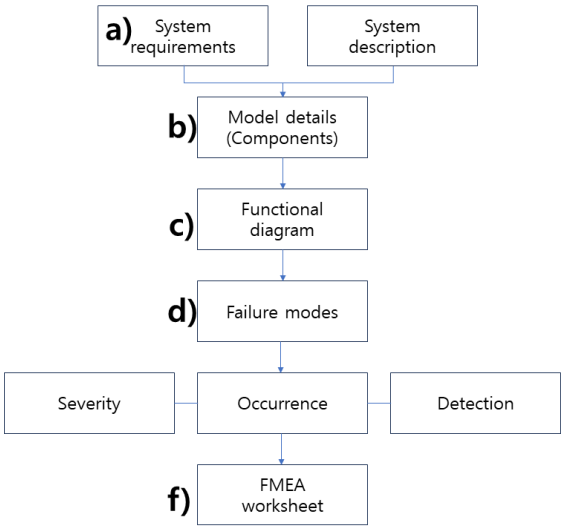

Fig. 2. Company A's frying line FMEA process.

공급(SMPS, Voltage), 데이터 흐름(Data)으로 구성된블록다이어그램을 구성한다. Fig. 2 d)에서 국내외 기준을 적용한 FMEA 모드를 작성 한다. Fig. 2 f)에서는 전기전문가(전기화재), 현장전문가, 위험성평가 작성자들의 의견을 수렴하여 최종적으로 FMEA 시트를 제안하였다. Fig. 2 a)~f)는 A사의 튀김공정 FMEA 구축방법에 대한 프로세스를 나타내었다.

3.2 튀김공정시스템의 기계기구 및 구성부품

튀김공정의 설비는 전압방식은 3상4선식으로 380 V를 사용하고 있다. 사용된 전선은 F-CV로 2.5~95 ㎟였으며, 최소 4.5 ㎾에서 최대 150 ㎾를 사용하고 있다.

튀김공정의 설비는 혼합기, 성형기, 튀김기, 탈유기/냉각기 및 포장기로 구성되어 있다. 이 설비들의 모듈들은 크게 3부분으로 구성되어 있으며 그 구성은 전기부분, 기계부분, 센서부분으로 구분하였다. 전 설비의 전기부분에서는 공통적인 부품이 사용되고 있으나 그 용량 및 크기는 다르다. 가장 중요한 부품으로는 전동기가 있으며, 전동기의 기능과 전동기의 안전을 유지하기 위한 장치들로 구성되어 있다. 기계부분은 기계성능 즉 기능에 적합하도록 설계되어 있으며, 센서부분은 제조 공정에 따라 필요한 부분을 자동 제어하기 위하여 설치되어 있다.

Table 4는 튀김공정을 위한 설비별로 모듈과 구성부품을 제시하였다. Table 5는 설비별 모듈에 전기부분에서 사용되는 부품이 중복되는 경우를 구분하고 있다. 이런 중복되는 부분은 배제하고 하나의 구성부품으로 하여 고장모드를 나타내었다.

Table 4. Modules and sub-components for each facility

Facility	Module	Components
Mixer	Electric parts	MCCB
		MC
		EOCR
		Timer
		On/off switch
		Motor
	Machine parts	Mixing bin
		Axis of rotation
	Sensor parts	Temperature Sensor
Forming	Electric parts	MCCB
		MC
		EOCR
		On/off switch
		Timer
		Motor
	Machine parts	Extruder
		Mold
		Injection device
	Sensor parts	Temperature Sensor
		Pressure sensor
		Mold detection sensor
		Sensor board
		HMI
Fryer	Electric parts	MCCB
		MC
		EOCR
		Timer
		On/off switch
		Heating Element
		Motor
	Machine parts	Frying pan
		Strainer
	Sensor parts	Temperature Sensor
		Pressure sensor
		Sensor board
		HMI
Deoiler /Cooler	Electric parts	MCCB
		MC
		EOCR
		Timer
		On/off switch
		Motor
	Machine parts	Cylinder
		Vibrator
Packing	Electric parts	MCCB
		MC
		EOCR
		Timer
		On/off switch
		Motor
	Machine parts	Packing
		Conveyor
	Sensor parts	Pressure sensor
		Proximity sensor
		Counter
		Sensor board
		HMI
Others	Electric wiring	Wiring
		Crimp terminal
		Connectors
	Grounding	Grounding

Table 5. Component classification and numbering for FMEA

Muddle NO.	Components NO.	Components
Electric parts M1000	C1100	MCCB
	C1200	MC
	C1300	EOCR
	C1400	Timer
	C1500	On/off switch
	C1600	Motor
	C1700	Heating Element
Sensor parts M2000	C2100	Temperature Sensor
	C2200	Pressure sensor
	C2300	Mold detection sensor
	C2400	Sensor board
	C2500	HMI
Other M3000	C3100	Wiring
	C3200	Crimp terminal
	C3300	Connectors
	C3400	Grounding

3.3 튀김공정의 기능적 블록다이어그램

튀김공정의 전기설비를 체계적으로 분석하기 위해서는 기능적 블록다이어그램을 통하여 가능하다. 튀김공정의 기능적 블록다이어그램은 전기에너지 즉 전원(Power), 각종 전자 부품과 보드의 직류 전원공급장치(Voltage), 센서와 센서보드의 각종 데이터(Data) 부분의 총 3가지로 구성하였다.

전원부분은 배선용차단기 후단으로 모터와 관련된 MC(Magnetic Connector)와 EOCR(Electric Over Current Relays)을 거쳐 최종 전동기와 연결되어 있다. 전원은 혼합기, 성형기, 튀김기, 탈유기/냉각기 및 포장기 순으로 전원이 공급되는 형태이다.

직류 전원공급장치는 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 통하여 성형기, 튀김기 및 포장기의 센서보드와 HMI(Human Machine Interface)에 전원을 공급하는 장치로 구성되어 있다.

통신데이터는 성형기, 튀김기 및 포장기의 센서보드의 데이터를 HMI에 전송하는 장치로 구성되어 있다. Fig. 3은 전원, 직류 전원공급장치 및 통신데이터를 기능적 블록 다이어그램으로 나타내었다.

3.4 심각도, 발생도, 감지도의 척도

FMEA는 정성적 분석기법으로 그중에서 기능적인 면을 중심으로 튀김공정 구성품을 고유의 기능과 성능에 관한 파급영향을 평가할 수 있다. 또한 고장모드는 구성부품의 고유특성과 주변환경의 변화나 기기에 가해지는 전기적 스트레스 등의 원인에 의해 발생된다. 따라서 고장원인은 FMD 2016[10]와 RiAC[11]을 기반하였으며, 해당공정의 특성화된 설비에 대해서는 현장전문가를 활용하였다. 그리고 고장 발생 원인에 대한 메커

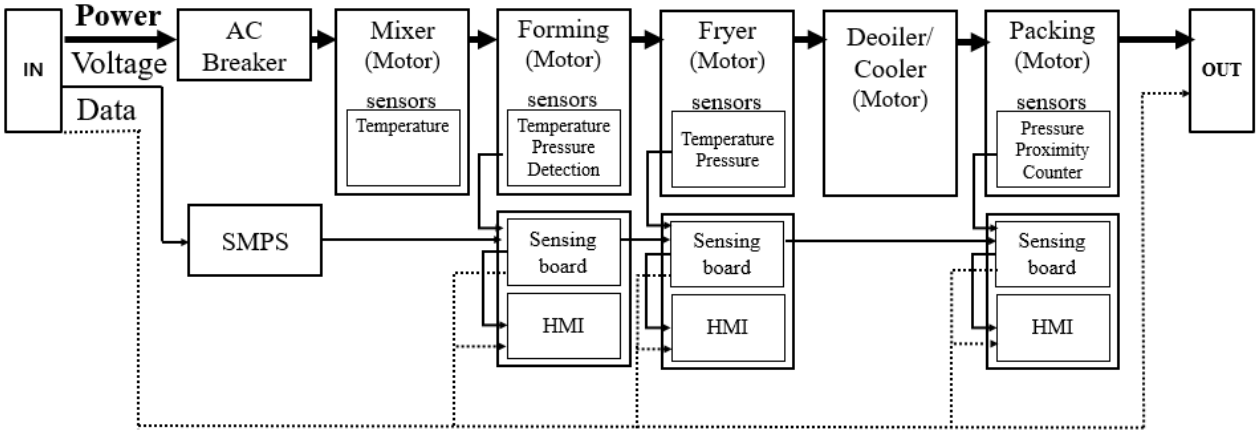

Fig. 3. Functional block diagram of frying line.

니즘을 분석하였으며 이 메커니즘을 검토함으로서 고장과 화재의 발생을 방지할 수 있다.

RPN값을 계산하기 위해서 시스템의 심각도(영향도), 고장모드의 발생도(발생빈도) 및 고장에 대한 판별의 검출도 등 모두 세 가지로 분류하여 평가하였다. 각 범주를 다섯 단계로 나누었고 각각의 수준을 1~5까지로 하였다. Table 6~Table 8은 심각도, 발생도 그리고 검출도에 대한 1~5단계 등급을 보여주고 있다. 해당 등급에 대한 기준은 국제전기표준규격인 IEC 60812와 IEEE gold book[12]에 제시된 것을 이용하였다.

RPN은 식 (1)과 같은 심각도, 발생도, 검출도를 모두 동일한 중요성을 두고 평가한다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

여기서 위험 우선순위의 값이 크다는 것은 해당 설비의 고장모드로 인해 시스템이나 설비에 악영향을 주는 것이며, 혹은 이런 영향, 즉 고장이 자주 발생할 수 있다는 것이며, 고장이 발생했는데도 불구하고 감지가 어렵다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 각 부품에 대한 RPN 값, 즉 식(1)에 의해 위험의 우선순위를 결정하였다. RPN 값은 최대 125지만 본 연구에서 최대 48로 나타났으며 48 초과 값은 본 연구에서 제외되었다. 이 중 40 이상으로 평가된 고장모드를 중점관리대상으로 정하였다. 이는 파레토 법칙(Pareto's principle)의 특성을 참조한 것으로 상위 20%만 보완하면 대상 시스템의 신뢰성을 80% 이상 개선 가능하다고 알려져 있다[13]. 또한 본 연구에서는 RPN 값의 20%를 다 포함하지는 않았다. 이는 현장관리자가 관리상의 어려움을 고려하여 중점관리 대상을 찾아 이것부터 먼저 개선하고 차차 중점관리 대상을 추가할 계획이다.

Table 6. Ranking criteria and levels of severity[9]

Class	Severity	Level	Criteria : severity of effect
Ⅰ	Negligible	1	No effect.
Ⅱ	Minor	2	Failure inducing unplanned maintenance but has no severe effect on system.
Ⅲ	Major	3	Inducing failure such as functional incapability on corresponding subsystem.
Ⅳ	Serious	4	Failure inducing consequence such as operable incapability of system.
Ⅴ	Hazardous	5	Failure has possibility of very severe consequence.

Table 7. Ranking criteria and levels of occurrence[9]

Class	Occurrence	Level	Criteria
Ⅰ	Almost never	1	Failure unlikely.
Ⅱ	Remote	2	Rare number of failures likely.
Ⅲ	Medium	3	Moderate number of failures likely.
Ⅳ	Moderately high	4	Frequent high number of failures likely.
Ⅴ	Very high	5	Very high number of failures likely.

Table 8. Ranking criteria and levels of detectability[9]

Class	Detectability	Level	Criteria
Ⅰ	Very high	1	It has very high effectiveness.
Ⅱ	Moderately high	2	It has moderately high effectiveness.
Ⅲ	Low	3	It has low effectiveness.
Ⅳ	Remote	4	It is unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.
Ⅴ	Very remote	5	It is very unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.

3.5 고장우선순위 분석(RPN)

Table 9에서 유의하게 판단되는 고장우선순위는 MC (Improper output), 혼합기의 전동기(Degraded Operation), 히터(Inoperative), 전기배선(Worn, Termination Failure, 2건), 단자대(Poor contact/intermittent)가 도출되었다.

MC는 전동기를 동작시키기 위한 스위치역할을 담당하고 있으며 거의 대부분이 컨트롤박스에 정착되어 있고 제조 시에 발생되는 수증기 또는 온도가 직접적으로 접촉되는 환경이다. 이런 환경에서 MC의 접점부의 부식, 그을림으로 인하여 접점 시 스파크 및 아크를 유발할 수 있으며 현장에서 교체주기가 가장 짧지만 중요한 것은 교체하지 못하고 이를 방치하면 국소화재로 진전된 경우도 있다(3건 발생).

전동기의 열화된 동작은 혼합기의 전동기에서 주로 발생되는데 밀가루 반죽 또는 혼합 시 전동기의 과부하를 초래할 수 있다. 과부하가 초래되어 전기배선에 열이 발생하면 EOCR이 이를 감지하고 차단하는 형태로 동작되고 있다. 그러나 잦은 구속 또는 구속 시 EOCR의 감지영역을 벗어나는 경우도 있다. 이는 유도전동기의 운전특성에서 구속운전을 할 때 EOCR이 동

Table 9. FMEA sheet

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	SEC	OCC	DEC	RPN
C1100 MCCB							
C1101	No operation	Faulty switch, damages to structural parts, aging, improper maintenance	No disconnection, arcs, safety, fire	4	1	1	4
C1102	Open without stimuli	Mechanical defects, construction defect, improper maintenance	No power output	5	1	1	5
C1103	Intermittent operation	Improper installation, corrosion	Thermal damage, reduced power output	4	1	2	8
C1104	Does not open	Damages to structural parts, faulty switch, aging	No disconnection, arcs, safety, fire	4	1	4	16
C1105	Mechanical failure	Damages, disconnections, improper installation	No power output reduced power output	4	1	1	4
C1106	Degraded operation	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	4	1	3	12
C1107	Induced	Mechanical defects, construction defect, improper maintenance	No power output, reduced power, safety, fire	4	1	3	12
C1108	Induced failure	Mechanical defects, construction defect, improper maintenance	Power output, reduced power output, safety, fire	4	1	3	12
C1109	Contamination	Hot spots, high voltage stress, damage from frame distortion	Contaminant entrance/humidity/water	3	1	1	3
C1200 MC							
C1201	Intermittent	Improper installation, corrosion, lightning damage	Thermal damage	4	2	2	16
C1202	**Improper output**	**Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil**	**Reduced power output, safety, fire**	**5**	**4**	**2**	**40**
C1203	Open	Disconnection, damage, pulled cables	No power output	5	1	1	5
C1204	Short	Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil	Reduced power output, safety, fire	5	1	1	5
C1205	Corrosion	High voltage stress, bad lamination, hot spots	Water/humidity/contaminant entrance, increased degradation	4	3	1	12
C1300 EOCR							
C1301	Cracked	Improper installation, damages, disconnections, animals	No energy output, reduced energy output	3	5	1	15
C1302	Electrical Failure	High voltage stress, bad lamination, hot spots, aging	Increased degradation	3	2	3	18
C1400 Timer							
C1401	Out of Specification	Defective product	Malfunction, overheat, damage	3	5	2	30
C1402	Degraded Operation	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	2	3	4	24
C1403	No Operation	Faulty switch, damages to structural parts, improper maintenance, aging	overheat, fire, arcs	5	3	1	15
C1404	Unknown	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output, safety	3	2	3	18
C1405	Intermittent Operation	Improper installation, corrosion	Reduced power output, thermal damage	4	2	3	24

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	SEC	OCC	DEC	RPN
C1500 On/Off Switch							
C1501	Failure Not Verified	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	3	4	2	24
C1502	Binding/Sticking	Improper installation, corrosion	Reduced power output, thermal damage	3	3	2	18
C1503	No Operation	Faulty switch, damages to structural parts, improper maintenance, aging	No disconnection, arcs, safety, fire	3	2	2	12
C1504	Mechanical Failure	Damages, improper, disconnections, installation	Reduced power output, no power output	3	2	4	24
C1505	Induced	Construction, improper maintenance, defect, mechanical defects	Safety, reduced power output	2	2	3	12
C1506	Opened	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	3	2	1	6
C1507	Intermittent Operation	Improper installation, corrosion	Reduced power output, thermal damage	3	2	4	24
C1508	Out of Specification	Defective product	Malfunction, overheat, damage	3	2	2	12
C1509	Induced Failure	Mechanical defects, construction defect, improper maintenance	Fire, reduced power output, o power output, safety	2	2	3	12
C1600 Motor							
C1601	Worn	Water/particles in oil, shorting, lack of protective device, damages to structural parts, insulation breakdown, continuous overvoltage, improper maintenance, aging	Fire, no energy output, reduced energy output, safety	3	2	4	24
C1602	**Degraded Operation**	**Damages, improper installation, disconnections, water/particles in oil, Binding/Sticking**	**Thermal damage, Insulation breakdown, fire**	**3**	**4**	**4**	**48**
C1603	Unknown	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output	3	3	3	27
C1604	Opened	Damage, disconnection, pulled cables	No power output	2	2	2	8
C1605	Shorted	Damages to structural parts, Insulation breakdown, water/particles in oil	Fire, reduced power output, safety	4	2	2	16
C1606	No Operation	Faulty switch, damages to structural parts, improper maintenance, aging	No disconnection, arcs, safety, fire	2	2	2	8
C1700 Heating element							
C1701	**Inoperative**	**Improper installation, corrosion of heating coil**	**Fire, reduced power output, thermal damage, arc**	**4**	**5**	**2**	**40**
C1702	Failed To Operate	High voltage stress, bad lamination, hot spots, aging	Increased degradation	3	3	3	27
C1703	Defective	Disconnections, damages, improper installation	No power output, reduced power output	2	3	4	24
C1704	Grounded Element	Construction defect, mechanical defects, improper maintenance	electric shock, safety	2	3	2	12
C1705	Open	Damage, disconnection pulled cables	No power output	3	3	1	9
C1706	Burned Out	Damages, improper installation, hot spots	No disconnection, arcs, safety, fire	4	2	2	16
C1707	Improper Output	Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil	Fire, reduced power output, no power output, safety	3	2	4	24
C1708	Short	Cracks/ruptures, insulation failure	Arcs, degradation, fire	4	2	2	16
C2100 Temperature Sensor							
C2101	Functional Failure	Over voltage or over current, defective installation	Sensing error	2	5	2	20
C2102	Degraded Operation	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	2	5	3	30
C2103	No Operation	Damages to structural parts, improper maintenance, aging	No disconnection, arcs, safety, fire	3	2	2	12
C2104	Unknown	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output	3	2	3	18
C2105	Degraded	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	2	2	3	12
C2106	Shorted	Disconnections, damages, improper installation, animals	Fire, no energy output, safety, thermal damages	3	1	2	6
C2200 Pressure Sensor							
C2201	Degraded Operation	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs, safety, fire	2	4	3	24
C2202	Unknown	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output	2	3	2	12

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	SEC	OCC	DEC	RPN
C2203	No Operation	Improper maintenance, damages to structural parts, aging	No disconnection, arcs, safety, fire	4	3	2	24
C2204	Functional Failure	Over voltage or over current, defective installation	Sensing error	2	2	2	8
C2300 Detector Sensor							
C2301	Improper Output	Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil	Reduced power output, safety	3	3	2	18
C2302	No Operation	Damages to structural parts, improper maintenance, aging	No disconnection, safety	4	3	2	24
C2303	Defective Component	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output	3	2	3	18
C2304	Degraded Operation	Damages, improper installation, disconnections	No disconnection, safety	2	2	3	12
C2305	Video Faulty	Malfunction of display	Performance degradation of sensor, impossibility to control, reduced power efficiency	3	2	2	12
C2306	No Focus	Malfunction of focus	Performance degradation of sensor, impossibility to control, reduced power efficiency	3	2	1	6
C2307	Intermittent Operation	Improper installation, corrosion	Reduced power output, thermal damage	3	1	4	12
C2308	Worn	Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil	No energy output, reduced energy output, safety	3	1	2	6
C2400 Sensor board							
C2401	Induced failure	Improper maintenance, construction defect	No data output, reduced power output, safety, fire	4	4	1	16
C2402	Parametric failure	Improper installation, damages, disconnections	Reduced power output, no power output	5	1	2	10
C2403	Mechanical failure	Improper installation, damages, disconnections	No power output, Reduced power output	4	1	1	4
C2404	Short	Improper setting of protective device, inadequate protective device	Structural damages with reduced power output, arcs	4	1	3	12
C2500 HMI							
C2501	Improper output	Damages to structural parts, insulation breakdown, water/particles in oil	No power output, reduced power output, safety, fire	5	3	1	15
C2502	No output	Shorting, electric fire/burning, aging	No data output	5	3	1	15
C2503	Electrical failure	High voltage stress, bad lamination, hot spots, aging	Increased degradation	3	2	2	12
C2504	Intermittent	Corrosion, improper installation, lightning damage	Thermal damage	5	1	4	20
C3100 Wring							
C3101	**Worn**	**Improper system design, material aging, extreme environment conditions, hot spots**	**Reduced energy output, thermal damages, Insulation breakdown, fire**	**4**	**4**	**3**	**48**
C3102	Broken	Fatigue crack, external shock	Electric leakage or electric shock	4	4	2	32
C3103	Corrosion	High voltage stress, bad lamination, hot spots	Water/humidity/contaminant entrance, increased degradation	3	2	4	24
C3104	Improper Output	Improper installation, loose connection	Limited operation	3	2	3	18
C3105	Loose	Improper installation, loose connection	No operation	4	2	3	24
C3106	**Termination Failure**	**Improper installation, loose connection**	**Humidity/water/contaminant entrance, increased degradation, arcs. sparks, Insulation breakdown, fire**	**5**	**2**	**4**	**40**
C3200 Solderless terminal							
C3201	Inoperative	Improper installation, corrosion	Reduced power output, thermal damage	2	4	3	24
C3202	Burned	High voltage stress, bad lamination, hot spots	Water/humidity/contaminant entrance, increased degradation	3	2	2	12
C3203	Burned Out	Improper installation, damages, disconnections	No disconnection, arcs safety fire	3	2	1	6
C3204	Overheated	The passing of degradation, local heating	Cracking, discoloration of insulation	3	2	3	18
C3300 Connectors							
C3301	Open	Damage, disconnection pulled cables	No power output	5	1	2	10
C3302	Mechanical failure	Improper installation, damages, disconnections	No power output, reduced power output	4	1	1	4

Item No.	Potential failure modes	Potential causes	Potential effects	SEC	OCC	DEC	RPN
C3303	**Poor contact/ intermittent**	**Corrosion, improper installation, hot spots, damage**	**Reduced power output, arcs. sparks, Insulation breakdown, fire**	**5**	**3**	**3**	**45**
C3304	Induced failure	Mechanical defects, construction defect, improper maintenance	No power output, reduced power output, safety, fire	4	1	3	12
C3400 Grounding							
C3401	Broken	Fatigue crack, external shock	No operation, electric shock	2	4	1	8
C3402	Damaged	Damages, improper installation, disconnections	Structural damages, electric shock	2	4	1	8
C3403	Corrosion	Natural degradation	Reduced operation	1	2	2	4
C3404	Missing	Improper system design	Reduced operation	2	3	2	12

작하면 전동기의 전원이 차단되기 직전의 온도가 147℃ 이상도 나타난다. 이 온도는 유도전동기 내의 절연에 영향을 줄 수 있으며 전동기의 설치환경이 고온이거나 전동기의 정격용량이 크면 절연등급에 따른 온도 한계에 도달하는 시간이 더욱 짧아져 EOCR의 정상 작동 범위 내에서도 화재 위험성이 있다고 하였다[14].

히터의 부작동의 경우는 히터 자체의 고장 또는 잦은 온도상승 및 하강으로 인한 열화에 의한 경우가 있다. 보통 튀김기의 경우 온도센서가 기름 온도를 측정하는 것으로 설치되어 있는데 히터와 온도센서의 고장 시 온도가 유지되지 않을 경우 제어장치는 지속적인 전류를 공급하게 된다. 이런 경우 히터에서 고장 또는 화재가 발생한다. 히터부의 고장으로 인한 교체에 대하여 4건 정도 확인된바 있다[15].

전기배선과 단자대의 경우는 소손과 접속불량이 주원인이었다. 특히 전기배선과 단자대의 접속불량은 정상과 다른 온도특성을 보이고 있다[16]. 이는 정상에서 다르게 접속불량 시 발생되는 온도를 감안하여 트래킹을 유도했을 때 정상보다 2배 이상의 누설전류가 발생

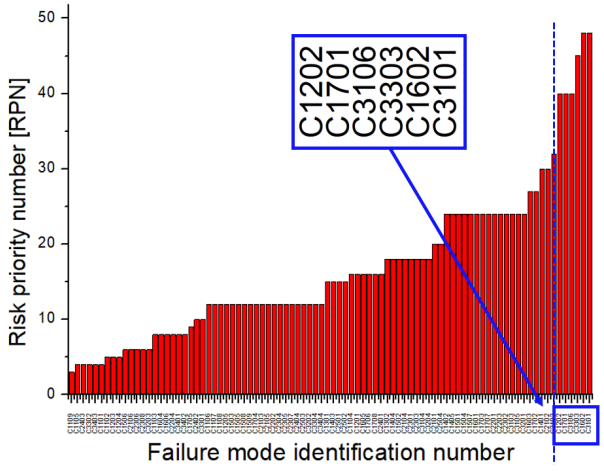

Fig. 4. Risk priority number for failure mode identification number.

되었다[17]. 식품제조업의 경우 전기시설 중 전기배선, 전기배선의 접속부, 단자대의 경우는 정상전류임에도 불구하고 접촉불량, 접속부의 부식 등의 이유로 국부적인 열이 발생된다. 국부적인 열의 경우 1,500 W에서도 300~400℃의 열을 발생시키며 이 열은 전기배선의 피복, 접속부의 PVC를 녹이고 화재를 일으키기에 충분한 에너지원으로 작용한다[16]. Table 9는 화재전문가(학계), 현장전문가, 논문 및 기술지를 바탕으로 고장우선순위를 결정하였다.

Fig. 4는 MC, 혼합기의 전동기, 히터, 전기배선, 단자대로 RPN이 40 이상의 값을 보인 것으로 우선관리대상으로 선정된 6개의 고장원인을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 기존의 KRAS와 유해위험방지계획서가 전기화재를 방지하는 평가 방법으로 다소 구체적이지 않아서 전기화재를 체계적으로 방지할 수 있는 위험성평가로 FMEA를 제안하였다. 본 연구에서 제안하고 평가한 결론은 다음과 같다.

1) 본 논문에 제시한 FMEA는 식료품제조업에 즉시 영향을 미칠 수 없지만 신속하게 처리하지 않으면 화재 또는 시스템 문제로 악화될 수 있는 일부 숨겨진 고장 모드를 조기에 감지하기 위한 방법론을 제시한 것이다.

2) 식료품 제조업의 튀김 공정에서 구축된 모델을 적용한 결과 MC, 혼합기의 전동기, 히터, 전기배선, 단자대의 RPN이 40 이상으로 나타났다. 이는 제조공정의 환경과 공정상의 전기적 문제였다.

3) 본 연구에서 제시한 전기화재에 대한 FMEA는 식료품제조업뿐만 아니라 전 사업장에 적용이 가능하도록 구성하였다. 또한 특정 고장에 대한 전기화재의 FMEA 분석을 제공하려는 첫 번째 시도이며 신뢰성의

확보가 가능하다. 하지만 향후 상당한 시간적 노력과 업데이트가 필요하다.

References

1) KRAS, https://kras.kosha.or.kr/, 2023.
2) Risk Assessment Regulation-Electric Shock Disaster Prevention Plan, Korea Industry Health Association, The Safety Technology, No. 63, pp. 26-31, 2003.
3) Y. S. Jeong, D. H. Kim and S. C. Kim, “Analysis of Insulation Resistance Change according to the Installation Environment of Food Manufacturing”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 38, No. 1, pp. 34-41, 2023.
4) S. B. Ko, D. H. Kim, and S. C. Kim, “Analysis of the Insulation Resistance Trend according to the Installation Environment of the Electric Wiring of the Melting Furnace”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 38, No. 2, pp. 15-22, 2023.
5) Hyeon-Kyo Lim, System Safety Engineering, Hansol Academy, p. 93, 2012.
6) BS EN IEC 60812:2018, Failure Modes and Effects Analysis(FMEA and FMECA), 2018.
7) SAE-ARP5580, Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Procedures, SAE, 2001.
8) MIL-1629a, Procedures for Performing a Failure Mode and, Effects and Criticality Analysis, DOD, 1980.
9) Korea Occupational Safety & Health Agency, “A Study on Development of Evaluation Model for Reliability and Safety of Temporary Electric Power Installations, pp. 25-40, 2003.
10) Reliability Information Analysis Center, Failure Mode / Mechanism Distribution, 2016.
11) Reliability Information Analysis Center, 2011, Non-electronic Parts Reliability Data & Electronic Parts Reliability Data, 2011.
12) IEEE Gold Book, “Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”, IEEE, pp. 259-300, 2007.
13) Pareto principle, https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_principle, 2023.
14) J. C. Lee, D. H. Kim and S. C. Kim, “Characteristic of Current and Temperature according to Normal and Abnormal Operations at Induction Motor of 2.2 ㎾ and 3.7 ㎾”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 38, No. 3, pp. 35-42, 2023.
15) G. B. Kim, D. H. Kim and S. C. Kim, “Analysis of Thermal Characteristic for Wiring at Heater Connector of Semiconductor Chiller Equipment”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 38, No. 3, pp. 27-34, 2023.
16) S. U. Kang, “Analysis of Characteristics and Application of Detecting Sensors for Signals by Poor Contact at Electrical Outlet”, Department of Safety Engineering Graduate School, Chungbuk national University, 2014.
17) Makoto TSUBAKI, Hiroki NAKAGAWA, Masanori IWANAMI, Hironobu NAKANO, “Experimental Considerations of Tracking Phenomena of Wiring Devices”, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering Vol. 55. No. 2, pp. 33-39, 2005.