

Development of a CCTV Based Smart Safety Management System in Thermal Power Plants

Ho Jun Song* · Jianxi Gao* · Wan Seon Shin**†

*College of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

**College of Systems Management Engineering, Sungkyunkwan University

석탄발전산업을 위한 지능형 CCTV 기반 스마트안전관리시스템 개발 연구

송호준* · 고건실* · 신완선**†

*성균관대학교 산업공학과

**성균관대학교 시스템경영공학과

There has been a steady rate of accident in Coal Thermal Power Plants which have relatively higher chance of mortality. However, neither the systematic view of safety management nor the methodology such as safety factors or system requirements are yet to be studied in detail. Therefore, this study aims to propose a methodology to preemptively deal with safety issues and to secure fact focused responsibility in safety. It consists of two main parts. First, the Safety Measurement Index(SMI) with total 50 factors is proposed by analyzing the key factors that contribute to safety accidents based on failure mode and effect analysis (FMEA) and quality function deployment (QFD). To analyze the safety requirements, index presented by major countries and organizations are discussed. Second, main features of intelligent CCTV are studied to determine their relative importance for the framework of Smart Safety Management System (SSMS). Main features are discussed with four technological steps. Also, QFD was held to analyze to analyze how key technologies deal with Quality Measurement Index(QMI). The research results of this study reveal that scientific approaches could be utilized in integrating CCTV technologies into a smart safety management system in the era of Industry 4.0. Moreover, this reasearch provides an specific approach or methodology for dealing with safety management in Coal Thermal Power Plant.

Keywords : Smart Safety Management, Safety Measurement, Power Plant, Quality Function Deployment, Failure Mode and Effect Analysis

1. 서 론

산업현장의 안전관리는 현장에서 많은 시간을 할애하는 근로자들에게는 매우 중요한 연구 주제다[25]. 4차 산

업혁명 시대가 도래했음에도 치명적인 안전사고가 국내외에서 연이어 발생하고 있다. 국가중앙행정기관이 관리하는 통계정보시스템 e-나라지표에서 제시한 산업재해 현황(연, 1998~2020)[24]에 따르면, 발전산업(전기가스/상수도업) 사망만인율의 경우, 2016년(0.41%)을 기준으로 크게 상승하였다. 그럼에도 불구하고, 여전히 발전산업은 산업재해에 대응 체계의 부재로 인하여 적절한 개선방안

Received 4 August 2021; Finally Revised 3 September 2021;

Accepted 8 September 2021

† Corresponding Author : wsshin@skku.edu

수립에 어려움을 겪고 있다[46]. 따라서 최신 기술을 이용한 안전관리 방법론에 대해서 보다 체계적인 연구가 필요한 상황이라고 판단된다.

산업 4.0 시대의 신기술을 활용한 발전산업 안전관리의 시스템 고도화 관련 가장 대표적인 연구는 지능형 CCTV와 스마트 센서를 활용하여 실시간 현장 모니터링을 강화하는 것이다. CCTV는 원거리에서도 영상 데이터를 통해 물리적인 요인들을 관리할 수 있다는 강점이 있는데, 최근에는 사물인터넷(Internet of Things)과 인공지능과 같은 지능형 기술과 연계되며 안전관리의 정확도와 대응성을 높이는 수단으로 인정받고 있다. 구체적으로 살펴보면, CNN(Convolutional Neural Network)을 통한 영상 데이터 전처리 기술이 발달하며 작업자의 행동을 분석하고 안전에 대한 의사결정을 지원하는 시스템이 등장하고 있다[11]. 그러나, 안전관리 시스템 개발 관점에서 CCTV의 기능을 활용하는 종합적인 방법론은 문헌에 제시되지 않았다.

본 연구에서는 발전산업 내 석탄취급 현장사례를 대상으로 안전측정지표(Safety Measurement Index)를 도출하고 이들 지표를 지능형 CCTV로 관리하는 스마트안전관리시스템(Smart Safety Management System)의 프레임워크를 제시하고자 한다. 발전산업의 안전관리 과정에서 미연방지에 요구되는 안전 이슈를 사전에 점검하고 지능형 기술과의 연계를 통해서 안전사고의 책임성을 높이는 수단을 확보하고자 한다.

본 연구의 목적은 크게 세 가지로 요약된다. 첫째, 한국 및 주요 국가에서 활용하고 있는 산업현장 안전요인 및 발전산업 위해요인을 분석하여 석탄취급 현장에서 활용할 수 있는 안전측정지표(Safety Measurement Index)를 개발하고자 한다. 둘째, 산업현장에서 발생할 수 있는 사고 유형을 검토하고 개발한 지표와의 연관도를 품질기능전개(Quality Function Deployment)로 분석하여 지표의 상대적 중요도를 도출한다. 이러한 연구의 초점은 안전요소의 우선순위를 점검하고 안전관리의 효율성을 추구하기 위함이다. 셋째, 지능형 CCTV의 기능을 기술적 동향을 검토하여 안전측정지표의 대응 가능성을 분석한다. 또한, 기술의 실현 가능성을 검토하여 시스템 프레임워크를 설계하였다.

2. 문헌 연구

산업현장의 안전관리는 주로 작업장과 작업자에 대한 관리로 구분되어왔다[11]. 작업장 관리는 환경에 대한 물리적, 화학적 요인뿐만 아니라 도구나 장비와 같은 설비적 요인에 대한 관리를 의미하는데, 주로 수치적이거나

정량적인 데이터 형태로 관리된다. 따라서 스마트 센서와 같은 지능형, 초연결 기술의 등장과 함께 더 객관적이고 체계적인 안전관리에 관한 연구가 활발하게 이루어져왔다[5]. 반면에 작업자 관리는 작업자의 육체적 요인 및 행동적 요인에 대한 관리를 의미하는데 정성적인 데이터 형태에 의존한다는 점에서 주로 감독관 및 모니터링 연구가 주를 이루었다. 현장에 대한 CCTV 영상 자료를 녹화 및 송신하여 원격 모니터링을 수행하는 관리 방법론이 이에 해당한다. 그러나 기존 연구를 통해 제시되고 있는 CCTV 안전관리 시스템은 기초적인 수준에 머물고 있으며[8], 주로 발생한 사고에 대한 감지[14, 39, 47]와 작업자 행동에 대한 분석[9, 21, 44]의 사후관리 차원에서 활용되고 있다는 한계가 있다.

최근 대량의 영상 데이터에 대한 고도화 분석이 가능한 지능형 CCTV의 안전관리 시스템 적용 및 고도화 연구가 등장하고 있다. 대표적으로 Kim et al.[22]는 CCTV를 통해 하천 영상을 분석하고 영상분석기법인 표면영상 유속계 방법론을 활용하여 홍수유출량을 산정할 수 있는 시스템을 제시하였다. Han et al.[15]는 제조 환경에서 작업자의 사고를 인지하기까지 걸리는 시간을 단축하기 위한 방법론으로 이미지 프로세싱(Image Processing)을 활용하였으며 5단계의 CCTV 안전시스템을 제시하였다. Jeon[19]는 CCTV 영상 데이터에 대한 딥러닝 분석을 통해 작업자의 복장을 분석하고 안전장비의 착용 여부를 분석할 수 있는 방법론을 제시하였다.

지능형 CCTV의 기술적 활용 가능성이 넓어짐은 안전관리 고도화의 시스템적 접근으로 이어지는데 이는 초연결, 초지능 기술의 연계를 통한 안전시스템의 확장으로 요약된다. Shin et al.[41]는 재난관리에 관한 해외 사례를 통해 빅데이터 활용 방법론을 도출하고 실제 산업의 적용 가능성을 분석하였다. Ko and Yang[23]은 공간 분석 및 데이터마이닝 방법론을 통해 안전 취약 환경을 식별하고 체계적으로 관리할 수 있는 모델을 제시하였다. Wahlstrom[48]은 발전산업의 안전관리를 위한 방법론으로 시스템적 사고를 도입하였으며 인적자원, 기술, 조직 그리고 정보 차원에서 시스템 설계를 시도하였다. Kang[20]는 4차 산업혁명 시대의 재난안전관리 현황을 시스템 관점에서 분석하였으며, 인공지능을 적용한 디지털 융합기술을 재난안전관리의 전 과정에 적용하여 선제적으로 안전에 대응할 수 있어야 함을 강조하였다. 더 나아가, Eom[11]은 스마트 안전관리 시스템의 확장을 위해 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터 그리고 지능형 CCTV를 도입하였으며, 안전감지와 작업자 위험감지로 구성된 시스템 프레임워크를 제시하였다. 마지막으로 Wu et al.[49]는 CCTV는 안전의 모든 이슈에 대한 원격 모니터링을 지원함을 강조하며 원자력 발전소의 안전관리 시스템을

기술적 관점에서 분석하였다.

이러한 연구 동향은 지능형 CCTV를 통한 안전관리와 고도화 가능성을 제시하고 있으나, 아직까지 CCTV를 통해 관리할 수 있는 안전요인 및 명확한 안전관리 시스템을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 발전산업의 안전 이슈를 점검하고 측정요인을 도출하여 체계적인 스마트안전관리시스템을 개발하고자 한다.

3. 안전측정지표 개발

3.1 연구 방법론

본 연구는 발전산업 내의 석탄취급현장을 대상으로 안전요인을 분석하였다. 석탄취급현장은 공정 대부분이 비교적 위험도가 높은 컨베이어를 사용한다는 점에서 위험요인에 노출되기 쉽기에 위험요인에 대한 발굴과 위험도를 낮추기 위해 신속한 분석방법이 요구된다. 본 연구의 프로세스는 크게 발전산업의 안전측정지표 도출과 지능형 CCTV 기반의 스마트안전관리시스템 개발로 나뉜다(<Figure 1> 참조). 우선, 발전산업 안전측정지표를 도출하기 위해 발전산업의 사고 유형과 안전요인을 검토하였다. 사고 유형의 경우 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) 방법론을 토대로 심각도(Severity), 발생도(Occurrence), 그리고 검출도(Detectability)를 평가하여 위험우선순위(Risk Priority Number, RPN)를 도출하였다. 분석을 위한 데이터로는 고용노동부에서 산업재해 현황분석 책자를 통해 제시하고 있는 통계자료를 활용하여 타당성을 확보하였다. 안전요인의 경우 국내 및 해외에서 활용하고 있는 산업안전지표를 분석하였으며, 체계적인 관리를 위해 항목을 작업자, 작업방식, 작업 공간 그리고 작업 환경에 따라 분류하였다. 마지막으로 사고 유형과 안전요인에 대해 품질기능전개(Quality Function Deployment, QFD) 분석을 시행하여 각 요인에 대한 상대적 중요도를 도출하여 지표체계를 완성하였다.

개발한 지표에 대한 실질적인 활용을 위해서는 각 요

인에 대한 기술적 대응 가능성을 분석할 필요가 있는데, 이를 위해 본 연구에서는 지능형 CCTV의 주요 기능을 분석하였다. 또한, 도출한 발전산업 안전측정지표에 대해 지능형 CCTV의 주요 기능의 연관성을 QFD 방법론을 통해 분석하여 시스템적 요구사항을 도출하였다. 마지막으로, 분석 결과를 토대로 발전현장에서 활용할 수 있는 스마트안전관리시스템 프레임워크를 제시하였다.

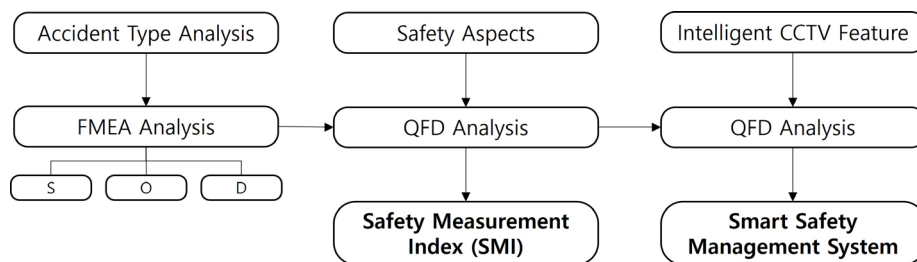
3.2 안전사고 유형 분석

석탄취급장의 공정은 위험도가 높은 일련의 설비로 구성되어 있다는 점에서 안전사고는 전체 공정의 중단뿐만 아니라 치명적인 인적 피해로 연결된다. 또한, 발생 가능한 안전사고 유형이 매우 다양하다는 점에서 체계적이고 차별적인 관리가 요구된다. 특히, 석탄취급장은 안전사고에 직접적으로 작용하는 위해요소가 매우 많다는 점에서 안전사고에 대한 정량적인 분석은 직접적인 현장 관리로 이어진다. 그러나, 아직까지 석탄발전소의 안전사고 관리는 발생 빈도와 같은 기본적인 통계자료에 근거하고 있으며, 위험성에 대한 객관적인 분석으로 이어지지 못하고 있다[8]. 따라서, 다양한 사고 유형에 대한 중요도 및 위험성을 정량적으로 측정하기 위해 본 연구에서는 FMEA 방법론을 활용하였다.

FMEA는 시스템의 발생 가능한 실패 유형을 검토하고 제거하여 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 활용되는 방법론이다[4, 35]. 각 사고 유형은 심각도, 발생 가능성 그리고 탐지 어려움의 세 가지 변수를 통해 평가되는데 일반적으로 10점 척도가 사용된다[6]. FMEA에서는 세 변수인 심각도(S), 발생도(O), 그리고 검출도(D)의 곱을 통해 위험우선순위(RPN)를 계산하는데, RPN이 높은 사고 유형일수록 관리의 필요성이 높음을 의미한다.

$$RPN = S \times O \times D \tag{1}$$

각 사고 유형에 대한 RPN 평가의 객관성 확보를 위해 고용노동부에서 매년 발간하는 산업재해현황분석의 최



<Figure 1> Research Process

〈Table 1〉 Status of Safety Accidents of Power Plant Industry in Recent 5 Years

	2015		2016		2017		2018		2019		Aver.
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
Fall	6	6.82	16	17.2	5(1)	6.58	10	10.2	13	12.75	10.71
Trip over	11	12.5	21	22.58	18	23.68	18	18.37	23	22.55	19.94
Buried, eversion	1	1.14	3	3.23	1	1.32	5	5.1	5	4.9	3.14
Bumped	6	6.82	5	5.38	5	6.58	12 (1)	12.24	7	6.86	7.58
Hit by an object	7 (1)	7.95	2	2.15	3	3.95	5	5.1	6	5.88	5.01
Collapse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Get stuck	7	7.95	8	8.6	10	13.16	7	7.14	12	11.76	9.72
Cut, amputate or stab	1	1.14	1	1.08	1	1.32	2	2.04	3	2.94	1.70
Fire, explosion, burst	9 (2)	10.23	1	1.08	0	0	9	9.18	3	2.94	4.69
Traffic accident	18	20.15	10	10.75	6	7.89	4	4.08	4	3.92	9.42
Musculoskeletal disease	6	6.82	6	6.45	7	9.21	5	5.1	3	2.94	6.10
Illness or disorder	10 (4)	11.36	9 (4)	9.68	13 (2)	17.11	12 (3)	12.24	14 (3)	13.73	12.82
Electric shock	4	4.55	1	1.08	1	1.32	2	2.04	5	4.9	2.78
Burn or freeze	1	1.14	10	10.75	5 (1)	6.58	6	6.12	3	2.94	5.51
Chemical contact	1	1.14	0	0	1	1.32	1	1.02	1	0.98	0.89
Sum	88	100	93	100	76	100	98	100	102	100	100

주) 괄호() 안은 사망자 수를 의미함.

근 5개년(2016년~2019년) 통계 데이터를 활용하였다[28, 29, 30, 31, 32]. 산업현장의 사고 유형은 기타를 제외하고 15가지로 구분되는데, 각각에 대한 재해 현황 및 사망사고 현황은 <Table 4>와 같다. 최근 5년에 대해 넘어짐(Trip over)과 업무상 질병(Illness or disorder)가 가장 높은 빈도를 보였으며 떨어짐(Fall), 끼임(Get stuck) 그리고 교통사고(Traffic accident)가 그 뒤를 이었다. 업무상 질병으로 인한 사고가 매년 꾸준히 발생하였음을 알 수 있었으며 간헐적으로 떨어짐, 부딪힘(Bumped), 물체에 맞음(Hit by an object) 등으로 인한 사망사고도 발생하였다. 무너짐(Collapse)은 5년에 걸쳐 단 한 번도 발생하지 않았으나, 사고의 심각성과 위험성을 고려하여 사고 유형에서 제외하지 않았다.

다양한 연구에서 석탄발전소 작업 환경 내 안전사고를 분석하기 위해 FMEA 방법론을 활용하였는데[4, 36], RPN 평가 방식은 기본적인 틀을 공유하되 연구 및 적용 환경에 따라 약간의 변형이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 Bhattacharjee et al.[4]의 RPN 분석 방법론을 근거로 심각도, 발생도 그리고 검출도에 대한 5점 평가 척도를 구성하였다. 그러나, 발생도(O)의 경우 사고 유형에 대한 발생빈도 자료를 참고하여 산출 근거를 재구성하였다(<Table 2>~<Table 4> 참조).

RPN의 계산은 석탄취급환경을 고려하여 주관적으로 평가하되, 앞서 제시한 평가 기준에 근거하여 진행하였다. 심각도(S)의 경우 구체적인 재해사고의 심각도가 제시되지 않아 각 재해에 대한 사망자 발생 수를 참고하여

〈Table 2〉 FMEA Severity Evaluation Criteria

Code	Score	Criteria
Very Low (VL)	1	Minor damage
Low (L)	2	Slight damage
Medium (M)	3	Significant damage
High (H)	4	Significant damage with loss
Very High (VH)	5	Mostly result in loss

〈Table 3〉 FMEA Occurrence Evaluation Criteria

Occurrence	Score	Criteria
Very Low (VL)	1	Take over 16% ~ 20%
Low (L)	2	Take over 12% ~ < 16%
Medium (M)	3	Take over 8% ~ < 12%
High (H)	4	Take over 4% ~ < 8%
Very High (VH)	5	Take over 0% ~ < 4%

〈Table 4〉 FMEA Detection Evaluation Criteria

Detection	Score	Criteria
Very Low (VL)	1	Most likely to be detected
Low (L)	2	Likely to be detected
Medium (M)	3	Normally detected
High (H)	4	Less likely to be detected
Very High (VH)	5	Mostly not detected

유추하였으며 발생도(O)는 발생빈도 및 비율에 근거하여 평가하였다.

RPN 분석 결과 끼임(Get stuck)과 업무상 질병(Illness or disorder)이 가장 높은 위험도를 보였으며 넘어짐(Trip over)과 화재, 폭발, 파열(Fire, explosion, burst)가 그 뒤를 이었다(<Table 5> 참조). 반대로 절단, 베임, 찢림(Cut, amputate or stab), 무너짐(Collapse) 그리고 깔림, 뒤집힘(Buried, eversion)이 가장 낮은 RPN을 보였다. 각 석탄취급현장의 사고 유형에 대한 RPN 값은 각각의 위험 정도를 나타내는데 본 연구에서는 이를 사고에 대한 상대적 가중치로 확장하여 활용하고자 한다.

<Table 5> RPN Evaluation Result

Type	S	O	D	RPN
Get Stuck	5	3	4	60
Illness or disorder	5	4	3	60
Trip over	4	5	2	40
Fire, explosion, burst	5	2	3	30
Bumped	4	2	3	24
Hit by an object	4	2	3	24
Fall	4	3	2	24
Musuloskeletal disease	3	2	4	24
Burn or freeze	5	2	3	30
Chemical contact	4	1	3	12
Traffic accident	2	3	2	12
Electric shock	4	1	3	12
Cut, amputate or stab	2	1	4	8
Collapse	3	1	2	6
Buried, eversion	2	1	2	4

3.3 안전요인 검토 및 분석

산업재해 및 안전의 경우 대체로 각 국가의 정부에서 제도적 차원으로 관리 방침이 제시되고 있기에 본 연구에서는 한국을 포함한 주요 국가에서 제시하고 있는 안전 위해 요인을 수집 및 분석하였다. 우선, 산업현장의 전반적인 위해요인을 점검하기 위해 한국의 산업안전보건기준, 미국의 OSHA(Occupational Safety and Health Administration), IFC(International Finance Corporation) 그리고 핀란드의 FIOH(Finnish Institute of Occupational Health)에서 제시하고 있는 평가지표 4건을 수집하였다. 더 나아가, IFC와 NIOH는 산업별로 관리가 요구되는 추가적인 안전 요인들을 제시하고 있어, 본 연구에서는 석탄발전소 및 석탄취급 환경의 안전지표 2건을 추가로 수집하였다. 수집한 각 지표에 대한 구성요인은 <Table 6>과 같다.

주요 국가의 안전지표는 주로 작업자와 작업 환경에

대한 안전 지표로 구성이 되어 있으나, 분류 및 평가 방식에 차이가 있다. 또한, 석탄취급현장에 요구되는 안전지표를 명확하게 제시하고 있지 않아 유연한 적용에 어려움이 있다. 따라서, 석탄취급현장에 대응하는 안전요인을 분류 및 도출하기 위해 피쉬본 다이어그램(Fishbone diagram) 방법론을 활용하였다. 피쉬본 다이어그램은 문제의 원인 또는 영향을 명확하게 도출할 수 있고 문제해결을 위해 관리해야하는 요인들을 시각적으로 제시한다는 점에서 매우 유용하다. 본 연구에서는 Eom[11]에서 제시하고 있는 분류 방법론을 활용하여 안전요인을 작업자, 작업방식, 작업공간, 그리고 작업장환경으로 구분하였다. 각 분류에서 요구하는 항목 및 정의를 기준으로 분류를 진행하였으며 석탄취급현장의 특성을 고려하여 20개의 중간지표를 도출하였으며 50개의 세부지표를 도출하였다(<Table 7> 참조).

작업자 요인은 석탄취급현장 내의 독립적인 작업자에 관련한 안전요인을 의미하여 구체적으로는 보호장비, 행동표준, 무리한 행동 그리고 기타 행동으로 나뉜다. 행동은 주로 인간공학적인 요인들을 포함하고 있으며 불필요한 행동 및 위험한 행동(흡연 등)에 대한 관리도 포함한다. 최종적으로 작업자 요인은 12가지 세부 지표로 구성된다.

작업 방식은 공정 내에 요구되는 작업에 대한 안전요인을 다루는데, 작업방식, 작업위치, 작업동선 그리고 사고 후 대처로 나뉜다. 사고 후 대처의 경우 발생한 사고를 얼마나 빠르게 인지하고 공유하며 대처하는지를 의미한다. 석탄취급현장의 경우 석탄재 및 연기로 인해 일산화탄소 중독과 같은 인지하기 어렵거나 따른 대응이 필요한 사고가 빈번하게 발생한다는 점에서 사고 인지가 매우 중요하다. 최종적으로 작업 방식에 대한 12가지 세부 지표를 도출하였다.

작업 환경은 석탄취급현장을 둘러싼 환경적인 요인들을 다루는데, 중간 지표로는 소음, 진동, 온도 및 밝기, 에너지, 대기 환경, 반응성 물질 그리고 생물학적 물질로 나뉜다. 환경 요인은 스마트 센서와 같은 측정기술이 발달함에 따라 다양한 고도화 연구가 진행되고 있다. 또한 석탄은 휘발성이 매우 강하여 심각한 사고로 직결될 수 있다는 점에서 환경변수 연구가 활발하게 진행되었다[37]. 작업 환경은 더 나아가 14가지 지표로 세분화된다.

마지막으로 작업 공간은 현장을 구성하는 공간적인 요인들을 다루며, 설비 상태, 작업 보조 장치, 안전대, 전기 배선 그리고 기타 요인으로 나뉜다. 석탄은 휘발성이 아주 높다는 점에서 설비의 상태 혹은 전기 배선에 대한 요인이 매우 중요하게 작용하며 안전 및 신뢰성 공학 관점의 연구가 활발하게 진행되어 왔다[27]. 작업 공간의 세부 지표로는 총 12가지 요인을 도출하였다.

<Table 6> Major Guidelines of Safety Index

IFC, EHS Guidelines [17]	OSHA Field Safety and Health Manual [10]	FIOH, EHS Guidelines [7]		OSHA Korea [34]	IFC EHS for Thermal Power Plants [18]	NIOH, EHS in Coal Fired Thermal Power Plant [33]
Facility Risk Management	Safety Equipments	Behavior	Personal Safety Equipment	Workshop Manage	Radiation	Hazardous Gas
Facility Operation Manage	Vehicle Management	Cleanliness	Abnormal Behavior	Hallway Managing	Thermal	Respiratory Dust
Facility Location	Worksite Violence		Worktable	Safety Equipment	Noise	Coal Dust
Noise Level	Working Environment		Shelf	Fall Prevention	Confined Space	Hazardous Substances
Noise Exposure Time	Hazardous Energy		Facility Surface	Collapse Prevention	Electricity	Working Temperature
Noise Blocking Device	Limited Space		Trace Bin	Falsework	Fire and Explosion	Noise Level
Noise Offset Device	First Aid		Floor and Workbench	Ventilation	Coal Ash	Noise Exposure Time
Vibration Level	Noise	Machine Safety	Design, Structure Condition	Rest Facilities	Arsenic	Radiation
Electricity	Falling Prevention		Emergency Stop	Remnant Action		Chimney Height
Eye Protection	Respiratory Protection		Machine Safety Device	Facility Hazards		Discharge
Thermal	Infection via Blood		Continuous Access	Explosion Prevention		Vibration Level
Traffic	Ergonomics	Occupational Hygiene	Ventilation	Electrical Hazards		Vibration Exposure
Occupation Temperature	Radiation		Lighting	Hazardous Substance		
Ergonomics	Electricity Safety		Luminous	Asbestos Prevention		
Working Height	Hazardous Substance		Chemical Substances	Prohibited Substances		
Luminous	Decontamination	Ergonomics	Workbench Design	Noise and Vibration		
Noxious Gas	Contaminated Device		Manpower Work	Abnormal Temperature		
Ventilation			Repeated Work	Temperature and Humidity		
Dust		Hallway	Physical Diversity	Radiation		
Flammable Substances			Design and Marks	Pathogen		
Corrosion and Oxidation			Tidiness and Condition	Dust		
Chemical Reaction			Sight and Light	Confined Work Space		
Asbestos		Fire Safety	Fire Extinguisher/Equipment	Ergonomics		
Biological Substances			Emergency Exit			
Radiation			No Smoking			
Safety Equipments			Electricity Wiring			
Small Space			First Aid Equipment			
Isolated Worker						
Accident Recognition						

<Table 7> Safety Measurement Index for Coal Fired Thermal Power Plant

Large	Medium	Small	RW(%)
Worker	1. Protective Equipment	1.a. Eye Protective Equipment	2.59
		1.b. Respiratory Protective Equipment	3.46
		1.c. Head Protective Equipment	5.01
		1.d. Other Protective Equipments	5.90
		1.e. Cleanness of Protective Equipments	1.71
	2. Abnormal Behavior	2.a. Excessive Work	0.14
		2.b. Excessive Use of Body	5.34
		2.c. Unstable Working Posture	0.88
	3. Other Behaviors	3.a. Violence at Work	2.91
		3.b. Dangerous Behaviors (i.e. Smoking)	2.25
	4. Working Standard	4.a. Work Performance Duration	4.20
		4.b. Use of Right Tools	4.43
	Method	5. Working Method	5.a. Work Flow
5.b. Working Height			1.75
5.c. Working Method			2.29
5.d. Cleanliness and Arrangement			1.56
6. Worker Location		6.a. Worker Location	0.51
		6.b. Isolated Worker	0.47
		6.c. Worker Density	0.76
7. Worker Flow		7.a. Worker Flow	0.04
		7.b. Entrance Prohibited Space	0.04
8. Post-Accident Response		8.a. Accident Recongition	4.07
		8.b. Accident Alarming	3.58
		8.c. Accident Managing	4.15
Space		9. Facility Status	9.a. Facility Risk
	9.b. Facility Location		0.30
	9.c. Facility Malfunctioning		3.46
	10. Working Aid Device	10.a. Facility Safety Device	1.49
		10.b. Noise Prevention Device	0.21
		10.c. Vibration Offsetting Device	0.56
	11. Safety Guard	11.a. Falling Protection	1.99
		11.b. Floor and Worktable	0.73
	12. Electric Wiring	12.a. Electric Wiring Management	0.83
	13. Others	13.a. Vehicle Managment	0.38
13.b. Abnormal Object		3.87	
13.c. Outsider Management		0.13	
Environment	14. Noise	14.a. Noise Level	1.90
		14.b. Noise Exposure Time	0.63
	15. Vibration	15.a. Vibration Level	3.01
		15.b. Vibration Exposure Time	1.13
	16. Temperature & Luminosity	16.a. Temperature & Thermal	2.25
		16.b. Luminosity	3.04
	17. Energy	17.a. Radiation	1.96
	18. Atmospheric Environment	18.a. Dust	2.57
		18.b. Asbestos	2.84
		18.c. Ventilation	1.38
	19. Responsive Substances	19.a. Noxious Gas	0.42
		19.b. Flammable Substances	2.82
		19.c. Corrosion and Oxidation	0.69
20. Infective Substances	10.a. Infection	0.78	

3.4 QFD 분석

본 연구에서는 앞서 도출한 각 안전요인의 상대적 중요성을 분석하기 위해 각 사고 유형에 기여하는 정도를 QFD 방법론을 활용하였다. QFD는 소비자의 요구사항은 조직의 기능 혹은 제품의 사양 관점에서 해석하여 분석하는 방법론이다[3]. QFD는 주로 품질관리 및 신뢰성 공학 측면에서 활용되어왔으나[40], 최근 안전관리서의 적용 연구도 활발하게 등장하고 있다[2].

QFD는 품질의 집(House of Quality)으로 알려진 속성행렬을 활용하여 변수 간의 관계를 분석하는데, 본 연구에서는 사고유형(A_i)과 안전요인(S_j)의 두 가지 변수를 설정하였다. 또한, 사고유형에 대한 상대적 가중치(w_i)를 위해 FMEA를 통해 도출한 RPN 계수를 활용하였다. 두 변수에 대해 각 항목에 대한 연관성을 검토하였으며 정도에 따라 1점(약한 관계), 3점(보통 관계), 그리고 9점(강한 관계)을 평가하여 안전요인의 상대적 중요도(P_j)를 도출하였다. 도출식은 다음과 같다.

$$P_j = \sum_i^{15} w_i r_{ij} \quad (2)$$

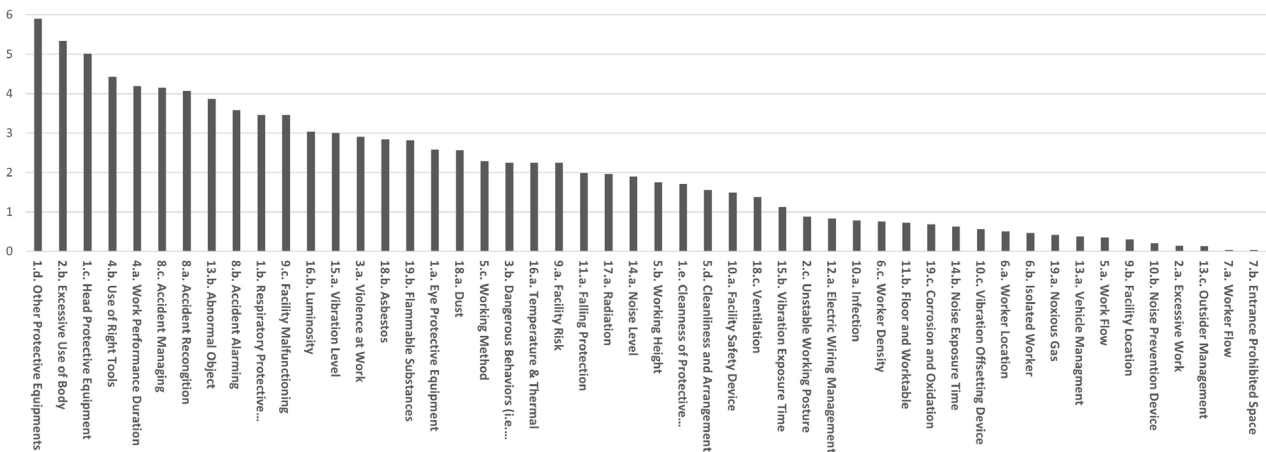
- 단, (P_j 는 S_j 의 상대적 중요도
- w_i 는 A_i 의 상대적 가중치
- r_{ij} 는 P_j 와 A_i 의 연관도
- r_{ij} 는 0 또는 1 또는 3 또는 9)

석탄취급현장의 안전위해요인에 대한 상대적 중요도 분석 결과는 <Figure 2>와 같다. 안전요인의 4가지 대분류의 관점에서는 작업자 요인(상대적 중요도 평균 3.24%)이 가장 높은 중요도를 보였으며 작업 환경(1.81%), 작업 방

식(1.63%), 그리고 작업 공간(1.35%)가 그 뒤를 따랐다. 작업자 요인이 작업환경 요인보다 높게 평가되었다는 점은 주목할만한데, 많은 연구가 환경변수에 대한 정확관리에 초점을 맞추고 있다는 점에서 연구 확장 방향성을 제시한다. 또한, 환경변수와 달리 작업자에 관련한 안전요인들은 정성적 데이터 혹은 이미지 데이터를 통한 관리가 주를 이룬다는 점에서 지능형 CCTV 도입의 필요성을 지지한다.

분석 결과 작업자 요인 중에서는 기타 신체 보호장비(상대적 중요도 5.9%)와 머리 보호장비(5.01%)가 가장 높은 중요도를 보였는데 이는 보호장비 착용이 안전현장의 우선수칙으로 여겨진다는 점에서 받아들여질 만하다. 작업환경에서는 밝기(3.04%)가 중요하게 평가되었는데, 석탄취급현장의 경우 석탄재와 분진으로 인해 조도가 대체로 낮다는 점에서 개선 요구사항으로 제시할 수 있다. 작업방식에서는 사고 대처(4.15%)와 사고 인지(4.07%)가 가장 높은 중요도를 보여 사고에 대한 사후대처의 중요성 또한 매우 높음을 알 수 있다. 마지막으로 작업공간에서는 이상물체(3.87%)와 설비 오작동(3.46%)이 주요 안전요인으로 도출되었다.

본 연구에서 제시한 안전측정지표는 각 요인에 대한 상대적 중요도를 제시하여 안전관리의 효율성을 지원하며 안전시스템 구성의 방향성을 제시해준다. 기존의 안전관리시스템 연구는 센서를 통한 환경변수의 관리에 초점을 맞추고 있으나, 작업자와 설비의 관리 또한 중요하다. 최근, 인간공학이나 설비 건전성 평가를 위한 센서 고도화 연구가 안전분야에서 등장하고 있으나, 높은 비용과 방대한 데이터를 요구한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이미지 데이터를 통해 통합적인 안전관리를 추구할 수 있는 스마트안전관리시스템을 제시하고자 한다.

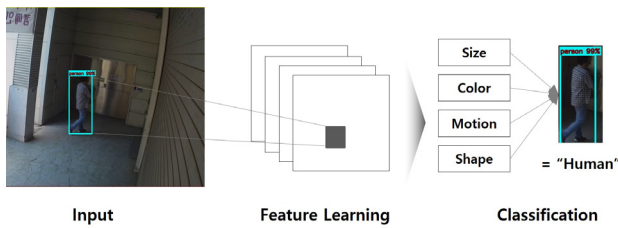


<Figure 2> Graphical Visualization for the Relative Weight of Safety Indicators

4. 스마트안전관리시스템 프레임워크

4.1 지능형 CCTV 기능 검토

최근 이미지 센싱 기술이 발달함에 따라 CCTV를 통한 단순 모니터링을 넘어 데이터 분석의 지능화 및 의사결정의 자동화 연구가 활발하게 등장하고 있다. 지능형 CCTV의 핵심 기능은 사물 감지, 사물 추적, 사물 분류와 인지, 그리고 행동 분석의 4단계로 구분된다[15]. 사물 감지는 지능형 CCTV의 기반 기술로, 주어진 공간 내의 사람 또는 물체의 유무를 판단함을 의미한다(<Figure 3> 참조). 초기 설정된 배경 데이터를 기준으로 새롭게 등장하는 객체에 대한 추출을 통해 이루어지는데[12], 최근에는 기억장치 방법론 기반의 CNN 적용 연구로 확장되고 있다[26]. 안전 환경에서는 사물 감지 대상으로는 이상 물체, 차량, 설비나 작업자 등이 있으며 최근에는 물체 및 사람 수 측정 연구로 확장되고 있다[43].



<Figure 3> Description of Object Detection

사물 추적은 공간 내의 위치와 상태를 기준으로 움직임을 감지하여 특정 행동을 분석한다. 주로 흐름 분석(flow analysis), 시간차 학습(temporal differencing), 배경 제거(background subtraction) 그리고 동적 임계값 분석(dynamic threshold) 등의 방법론이 있는데[1], 최근에는 서포트 벡터 머신(support vector machine) 알고리즘을 통해 그 정확도를 높이려는 시도가 이루어지고 있다[45]. 안전 현장에서 사물 추적 대상으로는 설비 상태, 이상 행동, 사건 인식 등이 있다.

사물 분류와 인지는 지능형 CCTV의 고도화 단계로, 사물의 특징에 대한 변수(크기, 색, 모양 등)를 추출하여 객체를 분류한다. 최근에는 단순한 사물의 종류에 대한 분류를 넘어, 안전 인식을 통한 신원 확인과 같은 종류 내에서의 구분 또한 가능해졌다. 사물 분류는 분석의 정확도는 빛이나 연기과 같은 노이즈(noise)에 매우 민감하며, 영상의 높은 해상도를 요구한다는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 CNN, GMM(Gaussian Mixture Model) 그리고 HMM(Hidden Markov Model)과 같은 머신러닝 방법론을 활용하여 정확도를 높이려는 시도들이 등장하고 있다[42].

마지막으로 행동 분석은 지능형 CCTV의 가장 고도화 단계로, 사물의 행동 및 움직임을 분석하여 해석함을 의미한다. 보통 이미지 프로세싱을 통해 행동을 감지하고 인공지능을 통해 의사결정을 지원하는데, 정상 사건 혹은 비정상 사건의 판단이 대표적인 예다[16]. 위해 요소의 단순 인지 수준의 전통적인 산업현장의 안전관리에서, 지능형 CCTV의 행동 분석은 현장의 주요 사건을 유형화하고 조치 방안을 함께 제공하여 빠른 조치를 촉진할 수 있다. 계층형 SVM (Support Vector Machine)을 통해 미세 변수의 측정이 가능해지면서 안전모나 안전장비의 착용 여부[50] 또는 작업자 상태 분석이 가능하다(<Figure 4>, <Figure 5> 참조).

지능형 CCTV의 고도화된 인지 기술을 궁극적으로 안전 모니터링의 자동화를 추구하며 데이터 통신망의 구축이 필수적이다. 특히 영상 데이터는 큰 용량으로 인해 저장 및 전송 기술 체계성이 요구되어 클라우드 컴퓨팅이나 엣지(edge) 컴퓨팅 등이 활용되고 있다[13]. 또한, 5G와 같은 통신 기술의 발달에 따라 빅데이터의 구축 및 실시간 공유가 가능해졌다. 통신 속도 향상을 위해 데이터 전처리를 통해 용량의 최적화를 확보하려는 연구 또한 활발하게 진행되고 있다[15].



<Figure 4> Example of Worker Motion Sensing



<Figure 5> Example of Safety Helmet Sensing

주요 문헌에서 제시하고 있는 지능형 CCTV의 기능은 <Table 8>과 같이 23가지로 요약된다. 본 연구에서는 석탄취급현장의 안전측정지표에 대응하기 위한 스마트안전관리시스템의 방향성을 제시하기 위해 QFD 방법론을 확장하였다. 기존에 분석하였던 안전측정지표의 상대적 중요도를 환산하여 가중치로(p_j) 활용하였으며, 지능형 CCTV의 각 기능(F_k)에 대한 상호 연관성을 분석하여 기능의 상대적 중요도(R_k)를 계산하였다.

$$R_k = \sum_j^{50} p_j r'_{kj} \quad (3)$$

단, (R_k 는 F_k 의 상대적 중요도
 p_j 는 S_j 의 상대적 가중치 환산값
 r'_{kj} 는 S_j 와 F_k 의 연관도
 r'_{kj} 는 0 또는 1 또는 3 또는 9)

지능형 CCTV의 주요 기능에 대한 상대적 중요도 분석 결과는 <Table 8>과 같다. 우선, 4가지 기능 중에서는 행동 분석(총 29.47%)이 가장 높게 평가되었고 구체적으로는 작업자 상태 분석(9.35%)과 사건 정상 판별(9.33%)이 높은 상대적 중요도를 보였다. 이는 나머지 기능과 비교하면 2배 이상의 중요도로 안전관리시스템의 고도화 및 자동화의 필요성을 지지한다. 또한, 행동 분석은 단순한 감지나 인식을 넘어 시스템 차원에서 의사결정을 단행한다는 점에서 구체적이고 체계적인 안전관리를 지원할 수 있다. 사물 감지(15.50%) 또한 상대적으로 높은 중요도를 보였는데 이는 지능형 CCTV의 기반 기술로서 작용하기 때문으로 해석할 수 있다.

둘째로, 작업자의 상태 분석과 사건 정상 판별은 높은 정확도를 요구한다는 점에서 향후 연구의 방향성을 제시한다. 이는 특히 의사결정의 자동화(6.52%)를 위해 필수적으로 작용한다. 최근에는 인공지능 및 데이터 마이닝 방법론인 SVM 또는 CNN의 활용 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 라즈베리파이를 사용하여 분석의 정확도와 시스템의 효율성을 향상하려는 연구 시도도 등장하고 있다[38]. 분석의 정확도 향상을 위한 노이즈 관리 또한 필요한데 이는 석탄분진 혹은 매연과 같은 방해요인이 많은 석탄취급현장에서 매우 중요하다.

더 나아가, 안전관리의 고도화를 구축하기 위해 영상 데이터의 변수 설정 연구가 필요하다. 산업현장에는 다양한 설비 및 요소들이 등장하는데, 안전관리의 자동화를 추구하기 위해서는 각 변수에 대한 학습이 요구된다. 그러나 변수의 개수가 필연적으로 높은 분석 정확도로 이어지진 않는다는 점에서 객체 혹은 사건에 대한 주요 특징을 추출하고 효율적으로 변수를 정의할 수 있어야

한다. 변수 정의를 위해서는 산업현장의 특성 검토와 함께 전문가 지식 체계를 활용할 수 있다.

마지막으로 실시간 모니터링(9.06%)이 매우 높게 평가되었으며 이는 안전관리를 위한 지능형 CCTV 시스템의 궁극적인 목표와 부합한다. 석탄취급현장의 사고는 빠른 대처를 요구한다는 점에서 실시간 모니터링과 함께 이벤트 팝업 및 알람(7.59%) 또한 중요하게 평가된다. 분석 정확도(4.18%)가 분석 속도(2.35%)보다 상대적으로 더 높은 중요성을 보였는데, 이 두 기능은 대체로 반비례 관리를 보인다는 점에서 우선순위의 검토가 필요해 보인다.

<Table 8> Major Features of Intelligent CCTV and Their Relative Weights

Major Feature	Sub-Features	RW(%)
Detection	Object Detection	7.14
	Space Detection	2.92
	People Counting	0.01
	Environment Detection	5.43
Tracing	Object Location	1.81
	Event Tracing	3.09
	Facility Status Tracing	3.46
	Motion Tracking	1.23
Object Recognition	Object Classification	2.08
	Personal Identification	3.38
	Personal Tracking	3.71
	Object Identification	2.57
Motion Analysis	Worker Status Analysis	9.35
	Event Status Analysis	9.33
	Motion Analysis	4.27
	Automated Decision	6.52
Data Analysis	Analyzation Speed	2.35
	Performance/Accuracy	4.18
	Data Transfer Speed	3.74
	Data Back-up	2.06
Monitoring	Real Time Monitoring	9.06
	Event Pop-up & Alarm	7.59
	Resolution	4.72

4.2 스마트안전관리시스템 프레임워크

지능형 CCTV의 기능적 요구사항에 대한 분석을 통해 스마트안전관리시스템은 크게 산업현장 감지, 데이터 분석, 안전관리, 그리고 의사결정 수행으로 나뉜다(<Figure 6> 참조). 산업현장 단위에서 이루어지는 감지는 구체적으로 개별 감지, 현장 감지, 그리고 환경 감지로 나뉘는데, 지능형 CCTV 및 스마트 센서를 통해 안전 데이터

측정이 이루어진다. 취득한 데이터는 클라우드를 통해 저장 및 데이터 전처리가 이루어지며, 최종 데이터에 대한 분석이 실시된다.

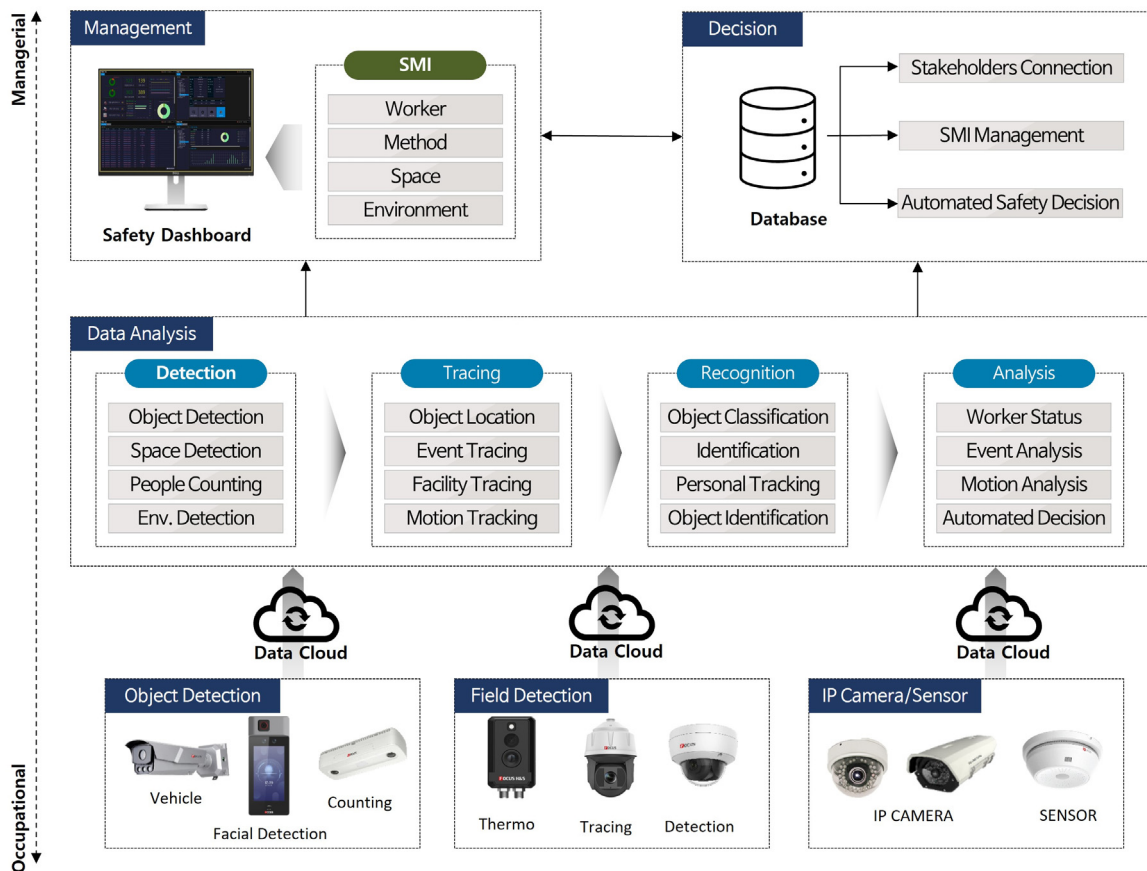
영상 데이터의 분석은 지능형 CCTV의 4단계 분석을 따르며, 스마트안전관리시스템에서는 단순한 감지의 수준을 넘어 작업자와 설비의 개별 단계로 안전 요소들의 추적 및 분석을 추구한다. 분석을 위한 방법론으로는 CNN과 SVM 등을 제시할 수 있으며, 서버에 저장된 영상 데이터를 기반으로 모델 훈련을 실시하여 분석의 정확도를 향상시킬 수 있다. 데이터 분석은 현장에서 감지한 데이터를 통해 위해 요소를 검출하고 실질적인 안전 수준을 진단하여 관리자에게 보고한다는 점에서 매우 중요하다.

현장 단위에서 취득 및 분석한 데이터는 대쉬보드를 통해 관리자에게 보고되며, 안전측정지표에 근거하여 수준이 정량적인 형태로 제시된다. 안전수준은 각 안전 요소의 상대적 중요도에 근거하여 현장의 종합적인 안전 현황을 제시한다. 따라서 관리자는 안전수준을 효율적으로 높일 수 있는 요소 및 자원을 제시할 수 있다. 대쉬보

드는 안전 현황뿐만 아니라, 안전관리를 위해 활용되고 있는 시스템의 현황을 함께 제시한다.

마지막으로 관리자는 종합적인 안전 데이터를 토대로 의사결정을 단행할 수 있으며, 이를 위해 지식 데이터베이스(Knowledge Database)를 활용한다. 스마트안전관리 시스템에서는 궁극적으로 의사결정의 자동화를 추구하는데, 이를 위해서는 각 안전 이슈에 대응하기 위한 자원 및 방법론의 정의가 요구된다. 이해관계자와의 안전수준 공유 또한 의사결정 단계에서 이루어지며, 이를 통해 관리자는 안전의 책임성과 공감성을 확보할 수 있다.

스마트안전관리시스템은 영상 데이터에 대한 고도화 분석을 통해 안전 이슈에 대한 포괄적인 관리를 시행한다는 점에서 의의가 있다. 영상 데이터는 모션트래킹이나 사물 인지와 같은 객체 분석을 통해 정성적인 안전 요인들을 관리할 수 있으며, 열화상, 적외선 또는 환경 센서를 통해 정량적인 요인들 또한 관리한다. 본 시스템은 궁극적으로 안전관리의 자동화를 추구하는데, CNN이나 RNN과 같은 인공지능망 방법론을 통해 안전수준을 예측할 수 있다.



<Figure 6> Framework of Smart Safety Management System

사물 감지, 추적, 인지 그리고 행동 분석은 안전관리지표를 통한 수준 진단으로 연결되며 궁극적으로 안전 대쉬보드를 통한 관리자의 실시간 관리로 이어진다. 스마트안전관리시스템은 더 나아가 안전에 관련한 이해관계자와의 안전수준 공유로 연결된다는 점에서 책임성과 대응성을 강화한다. 이해관계자와의 공유는 또한 안전 대응을 위한 방법론 및 관련 자원과의 빠른 연결을 가능하게 하여 효율적인 개선 활동을 추구한다.

5. 결론 및 시사점

최근 국내 발전산업 부문의 석탄취급 현장에서 안전사고가 빈번하게 발생하여 사회적으로 큰 우려감을 고조시킨 바 있다. 또한, 작업 현장에 대한 근로자의 요구사항이 다각화되면서 안전의 책임성과 명확성이 더욱 강조되고 있다. 발전산업의 안전관리를 위해서 기술적 측면에서 다양한 연구개발이 진행되어온 것에 비해서 안전관리 요인들을 체계적으로 관리하고 개선하는 시스템적 프레임워크에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 본 연구는 안전사고 유형에 기반하여 요인들을 도출하고 관리할 수 있는 시스템을 제시한다.

안전요인을 도출하기 위해, 사고 현황을 고용노동부에서 제시하고 있는 통계자료를 통해 분석하였으며, FMEA 방법론을 활용하여 사고의 위험우선순위를 분석하였다. 또한, 각 국가 및 기관에서 제시하고 있는 5가지 주요 안전지표를 검토하였으며, QFD를 통해 최종적인 안전측정지표를 제시하였다. 본 연구에서 개발한 안전측정지표는 20가지 중간지표와 50가지 세부지표로 구성되어있다. 또한, 분석 결과를 토대로 안전관리 시스템에 요구되는 지능형 CCTV의 기능적 요인들을 분석하였다. 안전지표와의 연관성을 QFD로 분석하여 상대적 중요도를 도출하였다. 마지막으로, 인식 및 센서링, 데이터 분석, 그리고 모니터링 지원으로 구성되는 스마트안전관리시스템 프레임워크를 제시하였다.

본 연구는 경영적 관점에서 현장의 안전수준을 명확하게 측정할 수 있는 지표를 제시하였다는 점에서 안전의 객관성과 책임성 확보에 기여하고 있다고 판단된다. 또한, 안전 부문의 선제적 대응에 요구되는 관리지표를 제시하여 예방 차원의 모니터링을 지원하고 있다. 본 연구에서 제시된 스마트안전관리시스템은 현장의 안전관리 요인과 지능형 모니터링 도구를 체계적으로 연결할 수 있다는 사실을 확인하였다. 다만, 현장 데이터의 부족으로 인해서 사고 유형에 대한 분석을 석탄취급 현장만의 자료가 아닌 전기수도업의 전반적인 산업에 대한 통계자료를 사용했으므로 추후 관련 데이터에 근거한 정교한 후속 연구가 필요한 상황이다. 또한, 실제 발전산업의

특정 현장을 설정하고 안전관리의 효율성 및 기존의 시스템과의 차별성을 검증해야 할 것이다. 각 지표의 구체적인 측정 방법론을 제시하고, 의사결정 지원을 위한 이해관계자 분석도 향후 고려되어야 할 연구 주제다.

References

- [1] Al-Nawashi, M., Al-Hazaimeh, O.M., and Saraee, M., A novel framework for intelligent surveillance system based on abnormal human activity detection in academic environments, *Neural Computing and Applications*, 2017, Vol. 28, No. 1, pp. 565-572.
- [2] Bas, E., An integrated quality function deployment and capital budgeting methodology for occupational safety and health as a systems thinking approach: the case of the construction industry, *Accident Analysis & Prevention*, 2014, No. 68, pp. 42-56.
- [3] Bergquist, K. and Abeysekera, J., Quality Function Deployment(QFD) - A means for developing usable products, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1996, No. 16, Vol. 4, pp. 269-275.
- [4] Bhattacharjee, P., Dey, V., and Mandal, U.K., Risk assessment by failure mode and effects analysis (FMEA) using an interval number based logistic regression model, *Safety Science*, 2020, Vol. 132, 104967.
- [5] Chae, M. and Cho, J.H., Platform of ICT-based environmental monitoring sensor data for verifying the reliability, *Journal of Platform Technology*, 2021, Vol. 9, No. 1, pp. 23-31.
- [6] Chang, K.H., Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology, *Microelectronics Reliability*, 2009, Vol. 49, No. 12, pp. 1586-1596.
- [7] Cho, J.N., A study of development for national occupational health and safety indicators, Korea Occupational Safety & Health Administration, 2015.
- [8] Cocca, P., Marciano, F., & Alberti, M., Video surveillance systems to enhance occupational safety: A case study, *Safety Science*, 2016, Vol. 26, pp. 140-148.
- [9] Cocca, P., Marciano, F., and Rossi, D., Assessment of biomechanical risk at work: practical approaches and tools, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 2008, Vol. 10, No. 3, pp. 21-27.
- [10] Department of Labor, OSHA field safety and health manual, Occupational Safety and Health Administration, 2020.

- [11] Eom, J.H., An architecture of a smart safety management system to prevent accidents in workplace, *Journal of Digital Contents Society*, 2020, Vol. 21, No. 4, pp. 817-823.
- [12] Filoneko, A. and Jo, K. H., Unattended object identification for intelligent surveillance systems using sequence of dual background difference, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, Vol. 12, No. 6, pp. 2247-2255.
- [13] Gao, Z., Zhang, H., Dong, S., Sun, S., Wang, X., Yang, G., Wu, W., Li, S., and de Albuquerque, V.H., Salient object detection in the distributed cloud edge intelligent network, *IEEE Network*, 2020, Vol. 34, No. 2, pp. 216-224.
- [14] Gubbi, J., Marusic, S., and Palaniswami, M., Smoke detection in video using waveletes and support vector machines, *Fire Safety Journal*, 2009, Vol. 44, No. 8, pp. 1110-1115.
- [15] Han, J.H., Ok, S.H., Song, K., and Jang, D.Y., CCTV monitoring system development for safety management and privacy in manufacturing site, *Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 2017, Vol. 26, No. 3, pp. 272-277.
- [16] Hamida, A.B., Koubaa, M., Nicolas, H., and Amar, C. B., Video surveillance system based on a scalable application-oriented architecture, *Multimedia Tools and Applications*, 2016, Vol. 75, No. 24, pp. 17187-17213.
- [17] International finance corporate, Environmental, Health, and Safety General Guidelines, 2007.
- [18] International Finance Corporate, Environmental, Health, and Safety Guidelines for Thermal Power Plants, 2017.
- [19] Jeon, S.Y., Park, J.H., Youn, S.B., Kim, Y.S., Lee, Y.S., and Jeon, J.H., Real-time worker safety management system using deep learning-based video analysis algorithm, *The Korean Institute of Smart Media*, 2020, Vol. 9, No. 3, pp. 25-30.
- [20] Kang, H.J., Established smart disaster safety management response system based on the 4th industrial revolution, *Journal of Digital Contents Society*, 2018, pp. 561-567.
- [21] Kim, Y.C., Jung, H.W., and Bae, C.H., Prevention of human error in ship building industry, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 2011, Vol. 30, No. 1, pp. 127-135.
- [22] Kim, Y.S., Yang, S.K., Yu, K., and Kim, D.S., Flood runoff calculation using disaster monitoring CCTV system, *Journal of Environmental Science International*, 2014, Vol. 23, No. 4, pp. 571-584.
- [23] Ko, K.S. and Yang, J.K., Industrial safety risk analysis using spatial analytics and data mining, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 4, pp. 147-153.
- [24] Korea statistical information service, Industrial Accidents Status, https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01&outLink=Y&parentId=C.1;C_14.2;#C_14.2.
- [25] Lee, M.S., Park, K.O., and Lee, G.H., Management factors associated with health and safety education in Korean manufacturing companies, *Korean Journal of Health Education and Promotion*, 2006, Vol. 23, No. 2, pp. 121-140.
- [26] Li, X., Ye, M., Liu, Y., Zhang, F., Liu, D., and Tang, S., Accurate object detection using memory-based models in surveillance scenes, *Pattern Recognition*, 2017, Vol. 67, pp. 73-84.
- [27] Melani, A.H.A., Murad, C.A., Netto, A.C., de Souza, G.F.M., and Nabeta, S.I., Critically-based maintenance of a coal-fired power plant, *Energy*, 2018, Vol. 147, pp. 767-781.
- [28] Ministry of Employment and Labor, Analysis of Industrial Accidents, 2015.
- [29] Ministry of Employment and Labor, Analysis of Industrial Accidents, 2016.
- [30] Ministry of Employment and Labor, Analysis of Industrial Accidents, 2017.
- [31] Ministry of Employment and Labor, Analysis of Industrial Accidents, 2018.
- [32] Ministry of Employment and Labor, Analysis of Industrial Accidents, 2019.
- [33] National Institute of Occupational Health, Environment, Health and Safety Issues in Coal Fired Thermal Power Plants, 2019.
- [34] National Law Information Center, Rules on OSH Standards, 2021, <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%82%B0%EC%97%85%EC%95%88%EC%A0%84%EB%B3%B4%EA%B1%B4%EA%B8%B0%EC%A4%80%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%B9%99>
- [35] Oh, H.S., Developing a quality risk assessment model for product liability law, *Journal of Society of Korea*

- Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 3, pp. 27-37.
- [36] Panchal, D. and Kumar, D., Risk analysis of compressor house unit in thermal power plant using integrated fuzzy FMEA and GRA approach, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 25, No. 2, pp. 228-250.
- [37] Pan, H., Su, T., Huang, X., and Wang, Z., LSTM-based soft sensor design for oxygen content of flue gas in coal-fired power plant, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, Vol. 43, No. 1, pp. 78-87.
- [38] Panda, S.K. and Sahu, S.K., Design of IoT-based real Time video surveillance system using raspberry pi and sensor network, *In Intelligent Systems*, Springer Singapore, 2021, pp. 115-124.
- [39] Park, J.H., Park, T.J., Lim, H.K., and Seo, E.H., Analysis of crane accidents by using a man-machine system model, *Journal of the Korean Society of Safety*, 2007, Vol. 22, No. 2, pp. 59-66.
- [40] Ryu, J.H., Jung, T.W., Oh, H.S., Lee, S.J., and Cho. J.H., Innovation strategy for new product development process by indicative planning & QM tools, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 4, pp. 78-86.
- [41] Shin, D.H. and Kim, Y.M., The utilization of big data's disaster management in Korea, *The Journal of the Korea Contents Association*, 2015, Vol. 15, No. 2, pp. 377-392.
- [42] Sreenu, G. and Durai, M. S., Intelligent video surveillance: a review through deep learning techniques for crowd analysis, *Journal of Big Data*, 2019, Vol. 6, No. 1, pp. 1-27.
- [43] Sun, S., Akhtar, N., Song, H., Zhang, C., Li, J., and Mian, A., Benchmark data and method for real-time people counting in cluttered scenes using depth sensors, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, Vol. 20, No. 10, pp. 3599-3612.
- [44] Templer, J., Archea, J., and Chen, H. H., Study of factors associated with risk of work-related stairway falls, *Journal of Safety Research*, 1985, Vol. 16, No. 4, pp. 183-196.
- [45] Verma, K.K., Singh, B.M., and Dixit, A., A review of supervised and unsupervised machine learning techniques for suspicious behavior recognition in intelligent surveillance system, *International Journal of Information Technology*, 2019, pp. 1-14.
- [46] Yoon, Y.S. and Park, J.Y., A Study on improvement of safety management through statistical analysis of industrial accidents at coal-fired power plants, *Journal of The Korean Institute of Plant Engineering*, 2020, Vol. 25, No. 1, pp. 55-63.
- [47] Yuan, F., An integrated fire detection and suppression system based on widely available video surveillance, *Machine Vision and Application*, 2010, Vol. 21, No. 6, pp. 941-948.
- [48] Wahlstrom, B., Systemic thinking in support of safety management in nuclear power plants, *Safety Science*, 2018, Vol. 109, pp. 201-218.
- [49] Wu, C.R. and Lu, B.W., Development of closed-circuit television inspection system for steam generators in nuclear power plants, *Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems*, 2020, pp. 550-555.
- [50] Wu, H. and Zhao, J., An intelligent vision-based approach for helmet identification for work safety, *Computers in Industry*, 2018, Vol. 100, pp. 267-277.
- ORCID**
- Ho Jun Song | <https://orcid.org/0000-0002-0603-4119>
- Jianxi Gao | <https://orcid.org/0000-0001-6257-9159>
- Wan Seon Shin | <https://orcid.org/0000-0002-0547-0621>