

스위스 치즈 모델 기반 화학사고 분석에 관한 연구 -인도 Bhopal 사고 사례를 중심으로-

김명철¹, 김상길², 조규선^{1*}
¹호서대학교 안전행정공학과, ²한국산업안전보건공단

A Study on the Analysis of Chemical Accident Based on Swiss Cheese Model -Focusing on the case of India's Bhopal accident-

Myungchul kim¹, Sang Gil Kim², Guy Sun Cho^{1*}
¹Department of Safety Administration Engineering, Hoseo University
²Korea Occupational Safety and Health Agency

요약 1984년 12월 인도 마디아프라데시 Bhopal에서 발생한 인류 역사상 최악의 화학사고인 Bhopal 사고는 적어도 2천 명이 즉시 사망하였으며, 이십여만 명에서 삼십여만 명의 사람들이 호흡기 및 심각한 부상을 당하였으며, 사고 후 40년이 지난 지금도 법정 소송은 진행 중이다.

본 연구에서는 사고의 발생 원인을 시스템적으로 분석하기 위해, 제임스 리즌의 스위스 치즈 모델과 GEMS(Generic Error Modeling System, 이하 GEMS)을 사용하였다. Bhopal 사고의 직·간접적인 발생 원인은 스위스 치즈 모델 분석을 통하여 교육의 부재, 인원의 부족, 설비의 잘못된 운영 및 설계, 불안정한 행위 등의 결합들로 나타났다. 이들 결합 중에 불안정한 행위에는 설비 결함, 이를 초래한 관리 결함과 휴먼에러와 관련된 요인들이 있었다. 또한, 이들 결합의 내부에는 심리적 요인도 있었다. 이러한 불안정한 행위의 분석은 제임스 리즌의 GEMS를 사용하여 분석하였다. 이 모델의 분석을 통해, 실수·망각, 규칙 기반 착오, 지식 기반 착오, 위반으로 불안정한 행위 발생에 대한 발생 요인의 유형을 도출하여 사고에서 심리적인 요인이 어떻게 작용하였는지를 확인하였다.

Abstract The chemical accident that occurred in Bhopal, Madhya Pradesh, India in December 1984 immediately killed at least 2,000 people and caused respiratory or serious injury in 200,000 to 300,000. Court proceedings are still underway some 40 years after the accident. This study was performed by reviewing research studies on the topic and systematically analyzing data using James Reason's Swiss cheese model and the General Error Modeling System (GEMS) to determine the cause of the accident. Swiss cheese model analysis determined that the direct and indirect causes of the accident were lack of education, lack of personnel, incorrect operation, inappropriate facility design, and unsafe acts. Of these defects, unsafe acts included facility defects, management defects that caused them, and factors related to human error, and these acts were analyzed using James Reason's GEMS. In addition, psychological factors were found to contribute to these defects. Through this model analysis, types of occurrence factors of unstable behavior due to slip-lapse, rule-based error, knowledge-based error, and violation were derived to determine how psychological factors contributed to this accident.

Keywords : Safety Culture, Bhopal Accident, Unsafe Behavior, Swiss Cheese Model, Human Information Processing, Engineering Psychology

본 연구는 환경부의 '화학물질안전관리 전문인력 양성사업'의 지원으로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

*Corresponding Author : Guy-Sun Cho(Hoseo Univ.)

email: cho1395@hoseo.edu

Received August 14, 2023

Revised October 12, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

1. 서론

우리나라의 화학산업은 1960년대부터 발전하였고, 점차 화학공장의 규모가 커지고 복잡해짐에 따라 화학물질의 취급에 의한 위험성이 지속적으로 증가하고 있다. 화학물질에 의한 사고는 1984년 Bhopal, 1968년 체르노빌, 최근 2012년 구미산업단지의 불산 누출 사고, 2015년 텐진 항 화학물질 폭발사고 등 세계 곳곳에서 여러 형태의 사고가 발생하였다.

이러한 사고가 발생하는 원인은 다양하지만, 휴먼에러가 중대한 원인의 하나로 논의되고 있다.

미국 산업재해의 원인을 분석한 McSwen의 연구에 따르면 불안정한 행동의 76%, 불안정한 행동과 상태의 조합이 20%로 행동의 관여 비중이 전체의 96%를 차지하고 있다[1].

휴먼에러의 사고 이론 모델은 원인적 측면에서 개인적 접근 방식과 시스템 접근 방식으로 분류할 수 있다.

개인적 접근 방식은 고전적이며 널리 알려진 방식으로 사람들의 불안정한 행동에 초점을 맞추고 있다. 그러나, 개별 원인에 집중함으로써, 사고가 반복적으로 발생하는 패턴이 나타나기 쉽다[2].

시스템적 접근법은 인간은 실수할 수 있으며, 어떠한 조직에서도 에러가 발생할 수 있다는 기본 전제가 있다. 이러한 기본 전제를 기초로 하여 사고를 차단하는 시스템적 방어가 핵심이다. 이는 모든 사건이 발생했을 때의 중요한 문제는 누가 실수를 했는지가 아니라, 어떻게 그리고 왜 방어가 실패했는가에 있다. 이러한 방어의 실패를 예방하기 위해서는 인간의 심리적 에러의 특성을 파악하고, 외적 환경과 관리 시스템을 적절히 개선할 필요가 있으며, 조직과 규정 등 다양하고 체계적인 관리가 이루어져야 한다[3].

본 연구는 휴먼에러의 시스템적 접근법인 영국의 심리학자 제임스 리즌이 제시한 스위스 치즈 모델로 분석을 기초로 하였다. 중대재해 중의 하나인 1984년 인도에서 발생한 Bhopal 폭발 사고 사례를 사고의 원인 분석을 하여 설비 결함과 관리 결함 및 작업자의 불안정한 행동으로 분류, 분석을 진행하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제1장에서는 연구의 필요성과 목적에 대해 설명하였고, 제2장에서는 선행연구와 이론적 배경을 기술하였고, 제3장에서는 연구방법을 제시하였으며 제4장에서는 발생 형태별 사고 원인 해석으로 진행하였으며, 제5장에서는 연구의 결론 및 한계에 대해 서술하였다.

2. 선행연구와 이론적 배경

2.1 선행연구

유기성과 김재문(2018)은 스위스 치즈 모델을 적용한 철도 감전 사고 발생형태에 관한 연구에서 철도 감전 사고를 스위스치즈 모델을 적용하여 발생 요인별로 구분하고, 이 요인 중 불안정한 행위는 실수, 망각, 착오, 위반의 형태로 분석하였다[4].

심재익(2022)은 스위스 치즈 모형 기반의 보행사고 예방 대책 연구에서 보행사고 발생 과정을 스위스 치즈 모델을 기반으로 불안정한 행위를 분석하고 보행 사고 발생 예방대책을 제시하였다[5].

곽호완과 박창호(2005)는 대구 지하철 사고에 대한 분석 1 : 인간 에러와 시스템에서 대구 지하철 화재사고의 인지심리학적 측면에서 대구 지하철 사고에 대한 시간대별 휴먼에러의 유형을 실수, 망각, 규칙 기반 및 지식 기반 착오, 시스템 결함으로 분석하고 이를 바탕으로 에러 방지 보조 시스템을 제안하였다[6].

김성지, 이철기, 염병수, 갈원모(2021)은 Swain과 Reason의 휴먼에러 모델을 이용한 전동차 기관사의 인적오류 사고분석에 관한 연구에서 광역철도에서 발생한 휴먼에러를 제임스 리즌의 기술 기반 오류, 규칙 기반 착오와 지식 기반 착오의 연구모델로 분석하고, 대책을 수립하였다[7].

위 논문들은 스위스 치즈 모델을 기반으로 여러 산업 분야의 휴먼에러를 시스템적으로 원인 분석한 연구이다. 본 연구에서는 Bhopal 사고의 휴먼에러를 스위스 치즈 모델과 불안정한 행위의 체계를 적용하여 시스템적으로 원인을 분석하였다.

2.2 이론적 배경

2.2.1 스위스 치즈 모델

영국의 심리학자인 제임스 리즌이 제안한 스위스 치즈 모델은 사회심리학적 모델에 기반으로 하고 있다.

이 모델은 Fig. 1과 같이 발생 요인에 대하여 불안정한 행위, 불안정한 행위의 유발 조건, 감독의 문제, 조직의 문제 등 크게 4가지로 시스템적인 접근 방법을 제안하였다.

이 모델의 핵심은 방어, 장벽, 안전장치이다[8]. 사고는 구멍이 순간적으로 정렬할 때만 발생할 수 있으며, 이 발생은 직접 요인을 제외하고, 스위스 치즈의 구멍과 같이 늘 사고가 날 수 있는 잠재적 결함들이 존재하다가 이 결함들이 동시에 나타날 때 사고가 발생하게 된다[9].

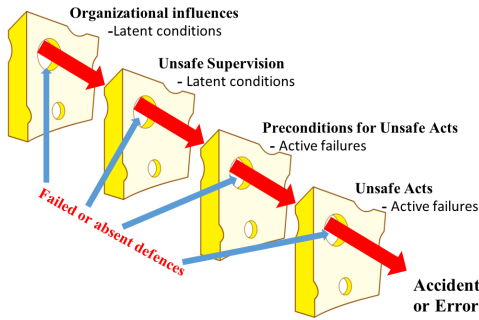


Fig. 1. James reason's Swiss cheese model

2.2.2 불안한 행위 체계

제임스 리즌은 Fig. 2와 같이 인간의 과실 조사 기법으로 GEMS를 제시하였다.

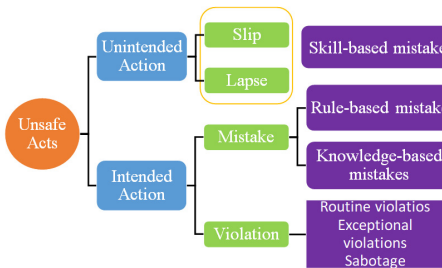


Fig. 2. James Reason's GEMS

이 분류는 인간 의식의 단계 중에서 문제를 일으킨 단계 및 필요한 조치를 파악하기 위한 분석의 도구로 유용하다. 이러한 이유로 국제해사기구(IMO : International Maritime Organization)에서 인간 과실 조사 기법의 하나로 채택하고 있다[10].

Fig. 2와 같이 불안전 행위는 발생 의도(intention)에 따라, 의도하지 않은 행위는 기술 기반 오류(skill-based error)로, 의도한 행위는 규정 기반 착오(rule-based mistake), 지식 기반 착오 (knowledge-based mistake)로 분류하였다.

기술 기반 오류는 일상 행동 중 도식에 의한 자동처리 과정에서 실수 및 망각으로 발생하였다. 규칙기반의 착오는 문제 해결 행동 중에 규칙에 의한 자동처리 과정에서 발생되었고, 지식 기반 착오는 문제 해결을 위한 의식 처리 과정에서 발생하였다[11].

3. 연구 방법

3.1 형태 분석 모델링 및 조건 분석

Fig. 3과 같이 Bhopal 사고를 입력 조건으로 발생 요인을 출력 조건으로 하여 스위스 치즈 모델의 4가지 발생 요인으로 나누고, 이 중 불안정한 행위는 기술 기반 오류(실수·망각), 규칙 기반 착오와 지식기반 착오를 기반으로 도식화하였다. 이 요인들의 조작성 정의는 Table 1과 같다.

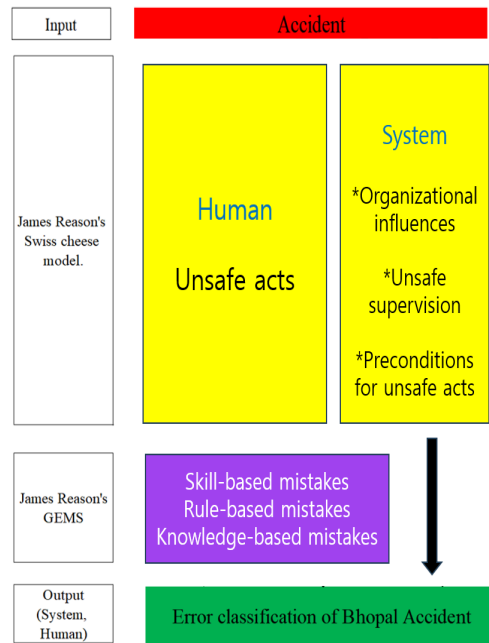


Fig. 3. An Analysis Model for the Cause of Bhopal Accident Using Swiss Cheese Model

4. 발생형태별 사고원인 해석

4.1 Bhopal 사고에 대한 발생 개요

Union Carbide Corporation(이하 UCC)의 자회사인 Union Carbide India Limited(이하 UCIL)는 1969년부터 Bhopal 공장에서 carbaryl 계 살충제, 제품명 SEVIN[24]을 Methyl isocyanate(이하 MIC)와 Alpha naphthol을 반응하여 생산 하였다[25].

Table 1. Human error classification taxonomy employed in this research

Category	Subcategory		Definition	Prior researcher
Unsafe Acts	skill-based error	Slip	Actions that has not been done as intended by the worker	Park Jung-chul and 4 others[12]
		Lapse	Errors due to the limit of short term memory	Park Jung-chul and 4 others[13]
			Missing procedures during the linkage process due to non-compliance of action	Ho Wan Kwak Chang & Ho Park[14]
	Rule-based mistake	Erroneous rules applied, or correct rules applied in a wrong situation	Park Jung-chul and 4 others[15]	
		Apply daily rules as inappropriate in special situations	Ho Wan Kwak Chang & Ho Park[16]	
		Misinterpret and apply invalid rules	Ki-Seong Yu & Jae-Moon Kim[17]	
	Knowledge-based mistake	Errors in diagnosis or reasoning while solving problems by making goals, developing plans and procedures, usually in an unfamiliar circumstances	Park Jung-chul and 4 others[18]	
		Not considering all alternatives	Ho Wan Kwak Chang & Ho Park[19]	
	Violation	Violations of rules or procedures that have become a normal way of working	Park Jung-chul and 4 others[20]	
	Preconditions for Unsafe Acts	a physical and technical mental condition		Ki-Seong Yu & Jae-Moon Kim[21]
Unsafe Supervision	Inadequate supervision, intended inappropriate behavior, failure to correct problems, violation of supervisor's regulations		Ki-Seong Yu & Jae-Moon Kim[22]	
Organizational influences	Resource management, organizational society atmosphere, operation		Ki-Seong Yu & Jae-Moon Kim[23]	

생산 초기에는 SEVIN의 주원료인 MIC와 Alpha naphthol을 수입하였으나, 1979년 이후에는 두 가지 물질을 Bhopal 공장에서 자체 생산하였다[26].

사고는 라인 세척 작업 중 MIC가 저장된 E610 탱크에 물이 유입되어, 유입된 물과 MIC의 발열반응에 의해 중합이 일어났다. 이때의 반응으로 안전밸브가 파열되고, E610 탱크 내의 MIC는 PVH → Jump line → PVVH → VGS → 플레어 스택을 통해 누출되었다[27].

시간에 따른 작업의 내용은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Description of event

event time	Description of event
1984.12.2. 20~21:00	①Two-shift MIC plant supervisor instructs cleaning of pipeline from phosgene line to scrubber connected to MIC tank.
1984.12.2. 21:15	②The MIC operator starts cleaning the four lines in the MIC storage facility with high pressure water without confirming the slip blind installation. ③The line was reported to the supervisor for blockage, but the supervisor ordered the cleaning again.
1984.12.2. 22:30	④Worker shift
1984.12.2. 23:00	⑤The pressure gage connected to the E610 tank in the control room is 10 psi.

1984.12.2. 23:30	⑥Operator detects MIC odor and checks PVVH pipeline near scrubber for MIC leakage ⑦Water spray on ⑧Ask the control room operator for situations and response actions.
1984.12.3. 00:15	⑨Recognize that the pressure gage in the control room of the E610 tank in the control room instructs 25 to 30 psi and report to the supervisor.
1984.12.3. 00:30	⑩The needle on the pressure gage of the E610 tank in the control room points to a maximum of 55 psi ⑪Connecting and running VGS.
1984.12.3. 00:40	⑫The MIC operator records leakage of the MIC on a 33-meter PVVH line. ⑬Operate sirens inside and outside the factory for about 5 minutes ⑭Attempt to transfer from micro's E610 tank to E619 tank
1984.12.3. 02:30	⑮Factory's External Siren Re-Operation. ⑯Valve reinstalled and leakage stopped.

4.2 스위스 치즈 이론에 따른 분석

4.2.1 분석 개요

Bhopal 사고의 발생 요인을 Table 1의 정의를 이용하여 스위스 치즈 모델을 기반으로 분석하고, 이 중 불안정한 행위는 기술 기반 오류(실수·망각), 규칙 기반 착오와 지식 기반 착오, 위반으로 세분화하였다.

분석 결과는 Table 3에 제임스 리즌의 스위스 치즈 이론을 기본으로 발생 요인 및 불안정한 행위를 구분하여 나타내었다.

4.2.2 불안전 행위의 분석

4.2.2.1 기술 기반 오류(실수·망각)

12월 2일 21시의 세척작업 시에 Slip blind의 설치를 미확인한 것으로, 이것은 22시 30분의 교대 근무 전에 작업 완료하겠다는 의도에서의 조급함과 Slip blind의 설치가 자신의 업무 아니라는 무관심으로 인해 Slip blind의 설치 확인을 하지 않은 것이다. 이것은 박정철 외(2018)의 “작업 단계 중에 잊어버린 것”이므로 망각에 해당된다[28].

12월 2일 22시 30분의 작업 교대 시의 정보의 미 전달로, 이는 이전 작업자의 근무 종료로 인한 긴장의 이완에서 오는 방심과, 과중한 업무에서의 해방감, 퇴근예의 서두름으로 정보 전달을 누락한 것이다. 이것은 곽호완과 박창호(2005)의 “행동의 불이행으로 인한 연계과정 중의 절차의 누락”이므로 망각에 해당된다[29].

4.2.2.2 규칙 기반 착오

UCIL의 초기에는 운영자는 학위 소지자로 6개월간의 교육을 하였으나, 경영 사정의 악화로 교육은 폐지, 일부 운영자들은 고등학교 졸업자나, 다른 공장에서 이동 배치되었다. 또한, 직원은 교대 조당 12명의 작업자, 3명의 감독자, 2명의 유지관리 감독자 및 1명의 감독자에서 6명의 작업자, 1명의 감독자와 1명 비정규 감독자로 축소되었다[30]. 이는 기존의 자격 기준과 인원을 잘못 해석하여 자격 기준의 변경 및 축소를 적용한 것이다.

이것은 박정철 외(2018)의 “상황의 잘못된 해석으로 잘못된 규칙의 적용”이므로 규칙 기반 착오에 해당된다[31].

12월 2일 23시에 제어실 작업자가 E610 탱크의 압력은 2 psi에서 10 psi로 상승하였다. 그러나, 탱크 내의 압력 기준은 2~25 psi로 설정되어 있기 때문에, 제어실 작업자는 비정상 상황임을 인식하지 못하였고, 이에 따른 대응도 하지 않았다. 이것은 정상 조건하에서의 압력 기준으로는 적절하였으나, MIC와 물과의 발열반응에 의한 압력 상승 시에는 적절하지 못한 규칙의 적용이었다.

이것은 곽호완과 박창호(2005)의 “일상 규칙의 특정 상황에서 적절하지 않은 적용”이므로 규칙 위반 착오에 해당된다[32].

1979년 SEVIN의 원료인 MIC를 수입에서 합성으로 공정을 변경하였으나, 해당 설비의 능력, 화학물질에 대한 위험성보다 경제적 이익을 우선시 한 잘못된 판단으로 위험성 평가를 진행하지 않았다.

MIC 저장 탱크 중 예비 탱크인 E619에 기준 미달의

MIC가 보관되어 있었다. 이는 예비 탱크인 E619에 기준 미달의 MIC를 보관에 의해 얻어지는 경제적 이익을 비상사태 발생의 리스크보다 우선시 한 잘못된 판단으로, 예비 탱크인 E619에 MIC를 보관하였다.

12월 3일 00시 40분의 약 5분간의 사이렌 가동은 공장 주변의 주민에게 불필요한 경보와 불필요한 공포를 심어주지 않으려는 감독관의 잘못된 판단에 의해, 사이렌이 가동을 중단하였다. 이는 주변 주민의 비상 사태 대응을 실행하지 못하게 한 것이다.

위의 세 가지 사례는 유기성과 김재문(2018)의 “잘못된 상황의 판단으로 잘못된 규칙을 적용”이므로 규칙 위반 착오에 해당된다[33].

4.2.2.3 지식 기반 착오

E610 탱크 내의 MIC와 물과 발열반응 시에 탱크 내부의 모니터링을 압력 지시계만으로 파악하여 MIC와 물과의 발열반응을 진단하지 못하였다.

이는 박정철 외(2018)의 “익숙하지 않은 상황에서 문제 해결을 위한 진단의 오류”이므로 지식 기반 착오에 해당된다[34].

방지시설인 플레어 스택과 VG는 1984년 11월 25일부터, MIC를 탱크에 저장 중임에도 유지 보수를 위해 가동 중지된 상태였다[35]. 이는 탱크 내 MIC의 누출 위험성을 고려하지 않은 것이다.

MIC 탱크 내의 온도를 5°C 이하로 관리하는 냉각설비로 1984년 6월 가동 중지되었으며, 냉각제(Freon)은 공장의 다른 곳으로 이동하였다[36]. 이는 보관 탱크 내의 MIC와 물의 발열반응으로 발생하는 온도 상승을 고려하지 않은 것이다.

방지시설인, 워터커튼은 10m 높이까지 독성물질을 중화시키도록 설계되었으나, MIC의 누출은 33 m 높이의 PVVH에서 발생하여 독성물질을 중화할 수 없었다.

방지 시설인 플레어 스택으로 설계 용량은 35 °C, 15 psi에서 86 kg/hr이었으나, 실제 사고 시에는 20,000 kg/hr로[37], 대규모 누출에 대비한 설계를 하지 않았다.

MIC 시설의 파이프와 밸브는 탄소강으로 교체하였다. 탄소강으로의 교체는 파이프라인의 부식을 발생하였고, 철 이온이 생성되었다. 이때 생성된 철 이온은 MIC와 물과의 반응을 촉진시켰다[38].

RVVH와 PVH를 연결하는 점프 라인은 관리적 이점을 위해 설치되었다. 점프 라인은 Bhopal 사고의 도화선이 된 세척 작업 시에 물이 E610 탱크로 유입되는 통로 및 MIC 누출 경로로 이용되었다.

이것은 세척작업 시에 점프 라인이 E610 탱크로 물이 유입되는 통로가 될 수 있다는 것을 고려하지 않았다.

위의 네 가지 사례는 곽호완과 박창호(2005)의 “발생할 수 있는 모든 대안의 고려하지 않음”이므로 지식 기반 착오에 해당된다[39].

Table 3. Error classification of Bhopal Accident by Human Error Factors

Category	Error classification
Unsafe Acts	[Slip ,Lapse] ①Unidentified Installation for slip blind ②Failure to communication at work shift
	[Rule-based error] ①Abolition of training, modification of facility qualification, and reduction of facility operation personnel ②Determined by manual only when pressure rise 2 psi to 10 psi ③Non-review of the hazards of existing facilities and MIC in case of process change ④Storage of MIC in E619 tank ⑤Siren on for five minutes
	[Knowledge-based mistake] ①E610 tank monitoring with pressure indicator only ②Execute shutdown of prevention facilities (flare stack, VGS) during MIC storage ③Cooling facility shutdown and coolant movement ④Using a design fault Water curtain ⑤Using a design fault flare stack ⑥Non-consideration of MIC and water reaction promotion due to carbon steel replacement ⑦Install Jumplines
Preconditions for Unsafe Acts	①Water curtain protection leak above design height ②Flare Stack Design Capacity Exceeded ③Replacement of carbon steel in pipes and valves
Unsafe Supervision	①Insufficient cleaning work training
Organizational influences	①No temperature setting standard in the MIC tank

5. 결론

본 연구는 인도 Bhopal 사고에 대한 원인 중 불완전한 행위에 관하여 제임스 리즌의 GEMS 모델을 기반으로 분석하였다. 본 연구는 아래와 같은 시사점을 가지고 있다.

첫째, Bhopal 사고 사례를 스위스 치즈 모델을 기반

으로 휴먼에러 연구에 참조할 수 있는 사례를 제시하였다. 이는 향후 관련 연구에 참조할 수 있는 좋은 사례가 될 것이다.

둘째, Bhopal 사고에서 발생한 불안전 행위는 사고의 직접적인 원인이 된 망각으로부터 기인된 Slip blind의 설치 미확인에서 발생했다기보다는 잘못된 시스템, Slip blind 설치의 확인 단계 미비, E610 탱크 내의 압력 지시계 무시, 냉각시설, 방지사설 (플래어 스택, VGS)의 가동 중지, 워터커튼의 설계 오류 등에 의한 것임을 확인하였다. 이는 화학 물질 취급 사업장에서 반드시 유의하여야 할 부분이다.

셋째, 휴먼에러는 독립적 사건이 아니어서 단순한 원인-결과와 일차원적인 분석 형태가 아닌 시스템적으로 접근과 다양한 경로를 통한 사건의 발생구조를 분석하는 것이 필요로 함을 밝혔다. 한 예로 E610 탱크의 압력은 2 psi에서 10 psi로 압력 상승 시의 비정상임을 인지하지 못한 것은, 탱크 내의 모니터링을 압력계로만 모니터링이 가능, 매뉴얼의 미비, MIC에 대한 학습의 부재 등으로 분석하였다. 사고 예방을 위해서 시스템으로 접근이 필요한 부분이다.

본 연구는 학술적, 실무적 가치가 있지만, 기존 발생했던 기업의 사고에 대한 단일 사례라는 한계가 있다. 앞으로 다양한 사례를 통해서 본 연구에서 진행한 휴먼에러의 스위스 치즈 모델을 바탕으로 불안정한 행위를 야기하는 요인과의 상관관계를 분석한다면, 보다 실질적인 사업장 안전의 시스템적인 개선 및 안전성 향상에 학술적, 실무적 가치가 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] T. E. McSween, The value-Based Safety Process: Improving Your Safety Culture with Behavior-Based Safety, p7, Wiley, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1002/0471721611.ch1>
- [2] J. Reason, "Human error: models and management", *BMJ*, 18: 320(7237), pp 768-770, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- [3] J. Reason, "Human error: models and management", *BMJ*, 18: 320(7237), pp 768-770, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- [4] K. S. Yu, & J. M. Kim "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>

- [5] J. I. Shim, *A Study on Pedestrian Safety Improvement based on Swiss Cheese Model*, Ph.D dissertation, Ajou University, pp. 96-99, 2022.
<https://dspace.aiou.ac.kr/handle/2018.oak/20625>
- [6] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [7] S. J. Kim, C. K. Lee, B. S. Yum, & W. M. Gal, "A Study on the Human Error Accident Analysis of Train Engineers Using Human Error Models of Swain and Reason", *Journal of The Korean Institute of Plant Engineering*, 26(3), pp5-16, 2021.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO02763491>
- [8] J. Reason, "Human error: models and management", *BMJ*, 18: 320(7237), pp 768-770, 2000.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- [9] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [10] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model." *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [11] T. J. Yu, Y. G. Kwon, & B. H. Song, "Classification and Analysis of Human Error Accidents of Helicopter Pilots in Korea", *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.* 28(4), pp 21-31, 2020.
 DOI: <https://doi.org/10.12985/ksaa.2020.28.4.021>
- [12] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [13] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [14] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [15] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [16] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [17] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [18] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [19] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [20] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [21] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [22] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [23] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model." *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [24] B. Bowonder, "An analysis of the Bhopal accident", *Project Appraisal*, 2:3, pp157-168, 1987.
 DOI: <https://doi.org/10.1080/02688867.1987.9726622>
- [25] R. Varma, & D. R. Varma, "The Bhopal Disaster of 1984", *Bulletin of Science, Technology & Society*, 25, pp 37-45, 2005.
 DOI: <https://doi.org/10.1177/0270467604273822>
- [26] B. Bowonder, "Industrial hazard management: an

- analysis of the Bhopal accident", *Project Appraisal*, Vol.2, No3, pp 157-168, 1987.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02688867.1987.9726622>
- [27] T. R. Chouhan, "The unfolding of Bhopal disaster", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 18, Issues 4-6, pp 205-208, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.07.025>
- [28] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [29] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [30] R. Varma, & D. R. Varma, "The Bhopal Disaster of 1984", *Bulletin of Science, Technology & Society*, 25, pp37-45, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0270467604273822>
- [31] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [32] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>
- [33] K. S. Yu, & J. M. Kim, "A Study on the Form of Electric Shock Accident Using Swiss Cheese Model" *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(12), pp1711-1716, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1711>
- [34] J. C. Park, J. B. Baek, J. W. Lee, J. W. Lee, & S. H. Yang, "A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea", *The Korean Society of Safety*, 33(1), 66-72, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.1.66>
- [35] G. Joseph, M. Mark & L. Long, "Lessons after Bhopal: CSB a catalyst for change". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 18, Issues 4-6, 2005, pp 537-548, ISSN 0950-4230, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.07.009>
- [36] R. Willey, "Consider the Role of Safety layers in the Bhopal Disaster", *Chemical Engineers Progress*, 110(12), pp 22-27, 2014.
https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20141222_1.pdf
- [37] B. Bowonder. "The Bhopal Accident". *Technological forecasting and social change*. 32: pp 169-182. ISSN 0040-1625, 1987.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(87\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0040-1625(87)90038-2)
- [38] O. Basha, J. Alajmy, & T. Newaz, "Bhopal gas Tragedy: A safety case study", *Texas A&M University at Qatar*, pp 1-35, 2009.
<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/187848>
- [39] H. W. Kwak, & C. H. Park, "Analysis on Daegu Subway Fire Accident 1: Human Errors and System", *Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, vol.17, no.3, pp. 311-326, 2005.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artid=ARTO00972603>

김 명 철(Myung-Chul Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 인천대학교 대학원 화학과 (이학석사)
- 2022년 6월 ~ 현재 : 한국무사시도료(주)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 대학원 안전행정공학과 (박사과정)

<관심분야>

공정안전, 안전보건경영시스템, 휴먼에러, 위험성평가

김 상 길(Sang-Gil Kim)

[정회원]



- 2022년 8월 : 한국교통대학교 안전공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국산업 안전보건공단 근무

<관심분야>

공정안전, 화학사고예방관리

조 규 선(Guy-Sun Cho)

[정회원]



- 2020년 8월 : 숭실대학교 대학원
안전보건융합공학과 (공학박사)
- 1992년 1월 ~ 2018년 2월 : 한국
산업안전보건공단 부장
- 2018년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
안전행정공학과 교수

〈관심분야〉

공정안전, 안전보건경영시스템, 로봇안전, 위험성평가