

# 국내 화학사고의 휴먼에러 기반 분석에 관한 연구

박정철<sup>†</sup> · 백종배 · 이준원<sup>\*</sup> · 이진우<sup>\*</sup> · 양승혁<sup>\*</sup>

한국교통대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>안전보건공단

(2017. 12. 5. 접수 / 2017. 12. 24. 수정 / 2018. 1. 5. 채택)

## A Study on the Analysis of Human-errors in Major Chemical Accidents in Korea

Jungchul Park<sup>†</sup> · Jong-Bae Baek · Jun-won Lee<sup>\*</sup> · Jin-woo Lee<sup>\*</sup> · Seung-hyuk Yang<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

<sup>\*</sup>Korea Occupational Safety & Health Agency

(Received December 5, 2017 / Revised December 24, 2017 / Accepted January 5, 2018)

**Abstract :** This study analyses the types, related operations, facilities, and causes of chemical accidents in Korea based on the RISCAD classification taxonomy. In addition, human error analysis was carried out employing different human error classification criteria. Explosion and fire were major accident types, and nearly half of the accidents occurred during maintenance operation. In terms of related facility, storage devices and separators were the two most frequently involved ones. Results of the human error-based analysis showed that latent human errors in management level are involved in many accidents as well as active errors in the field level. Action errors related to unsafe behavior leads to accidents more often compared with the checking behavior. In particular, actions missed and inappropriate actions were major problems among the unsafe behaviors, which implicates that the compliance with the work procedure should be emphasized through education/training for the workers and the establishment of safety culture. According to the analysis of the causes of the human error, the frequency of skill-based mistakes leading to accidents were significantly lower than that of rule-based and knowledge based mistakes. However, there was limitation in the analysis of the root causes due to limited information in the accident investigation report. To solve this, it is suggested to adopt advanced accident investigation system including the establishment of independent organization and improvement in regulation.

**Key Words :** human error, chemical accident, human error classification, accident investigation

### 1. 서론

최근 구미산업단지 불산 누출을 비롯해 화재, 폭발 등 화학설비의 중대산업재해가 끊이지 않고 있다. 한국의 산업재해로 인한 사고 사망자 수는 2000년대 이후로 꾸준히 감소하여 왔으나, 최근 정체를 보이고 있으며 2016년에는 전년보다 오히려 소폭 증가하였다<sup>1)</sup> (Fig. 1). 2014년 기준 한국의 사고사망 만인율은 0.58로, 독일(0.16), 일본(0.19) 등 주요국에 비해 2~3배 높은 수준이며, 통계를 발표한 OECD 회원국 14개국 중 멕시코(0.79) 다음으로 가장 높은 수준이다. 이 중, 중대화학사고로 볼 수 있는 화재, 폭발, 누출 사고 역시 최근 중대사고의 빈발로 인해 재해자 수와 사망자 수

의 감소 추세가 뚜렷하지 않은 실정이다<sup>2)</sup>.

산업재해의 발생 원인은 다양하지만 휴먼에러가 가장 중요한 원인의 하나로 지목되고 있다. 미국 산업재해의

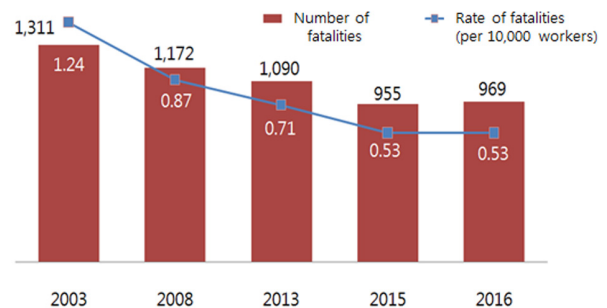


Fig. 1. Number and rate of fatalities by industrial accident.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Jungchul Park, Tel : +82-43-841-5460, E-mail : jcpark@ut.ac.kr

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju 27469, Korea

원인을 분석한 McSween의 연구에 따르면 불안정한 행동이 전체의 76%, 불안정한 행동과 상태의 조합이 20%로, 행동의 관여 비중이 전체의 96%를 차지했다<sup>3)</sup>. 김두환 외의 연구에서 수행한 사업장 대상의 사고원인에 대한 설문조사 결과에 따르면 사고원인 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 작업습관(44%)이고, 그 다음 지식과 경험(38%), 규칙 미준수(18%)의 순으로 나타났다<sup>4)</sup>.

취약한 경영시스템으로부터 발생하는 휴먼에러는 화학설비 사고의 주된 원인 중 하나이기도 하다<sup>5)</sup>. 작업자의 불안정한 행동 이외에도 넓은 의미에서 설계의 에러, 운용의 에러, 유지보수의 에러, 공정변경관리의 에러, 의사소통의 에러 등 다양한 측면의 휴먼에러가 재해의 원인으로 작용한다.

백종배 외의 연구에서는 중대산업사고의 원인을 분석하고 휴먼에러 요인을 파악하였으며 공정안전문화를 측정하기 위한 방법을 제시하였다<sup>6)</sup>. 이 연구에서 중대사고 사례 44건의 원인을 분석한 결과에 따르면 안전작업허가절차를 미준수한 경우가 22건(50%)으로 가장 많았으며, 설비결함 및 설계에러가 5건(11%)으로 나타났다.

2000년에서 2008년 사이에 발생한 국내 화학사고 470여건을 분석한 박정규 외의 연구에 따르면, 대다수의 사고들이 인적요인을 포함하는 것으로 나타났다<sup>7)</sup>. 가장 큰 비중을 차지하는 원인은 안전관리의 미흡으로 나타났으며(47%), 정전기 및 스파크가 20%, 운전자 부주의가 18%로 나타났다. 국내 화학사고에 관한 이형섭과 임지표의 연구에서도 전체 사고 중 60%에 인적요인이 관여된 것으로 나타났다<sup>8)</sup>.

휴먼에러의 분류를 사고 데이터에 적용하는 연구들도 다양한 산업 분야에서 수행되어 왔다. Graziano 외의 연구는 항공관제를 위해 개발된 TRACER (Technique for the Retrospective and predictive Analysis of Cognitive Errors) 분류체계에 기반해 52건의 선박 사고 보고서를 분석하여 289건의 휴먼에러를 파악하였다<sup>9)</sup>. 파악된 휴먼 에러를 발생 장소, 하위 작업, 설비에 따라 분류하고, 외재적(External), 내재적(Internal), 심리적 에러 형태 (Error modes) 범주에 기반한 분석을 수행하였다.

Theophilus 외의 연구는 항공 산업을 위해 개발된 HFACS에 기반하여 오일/가스 산업에 적합한 HFACS-OGI 분류체계를 개발하고 11건의 사고 분석에 적용하여 범주 간의 연관관계를 파악하였다<sup>10)</sup>. 이외에도, 운영식 외의 연구에서는 인적 오류의 원인을 분석하기 위한 Activity theory 기반의 방법론을 제안하고, 원자력 발전소에서 발생한 2건의 인적 사고에 대한 Case study를 통해 효용성을 입증하였다<sup>11)</sup>.

이러한 선행연구들에도 불구하고 국내 화학설비에서 발생한 사고에 대해 휴먼에러의 분류를 적용한 사례는 찾아보기 힘들다. 산업 분야마다 휴먼에러 범주의 빈도가 다를 수 있기 때문에, 기존 연구결과의 대다수는 국내 화학산업에 직접적인 시사점을 제공하기 어렵다. 화학사고가 감소하지 않는 기본적 원인 중 하나가 사고 정보의 분석을 통한 학습이 취약하기 때문이라는 점을 고려하면, 화학사고의 가장 큰 원인 중 하나인 휴먼에러의 특성을 파악하는 연구가 필수적이다. 본 연구는 국내에서 발생한 화학사고에 대해 사고의 주요 원인으로 작용한 휴먼에러를 도출하고 이를 직접적/간접적 분류, 행위에 따른 분류, 원인에 따른 분류의 3가지 기준으로 분류하여 어떠한 종류의 휴먼에러가 화학사고에 중요한 영향을 미쳤는지 분석한다. 뿐만 아니라, 사고 형태, 관련 작업, 설비, 원인 등에 대해서도 분석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 시사점을 도출한다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 2009년부터 2013년도까지 5년 동안 국내 사업장에서 발생한 중대산업사고(산업안전보건법 제49조 2항) 중 화학설비에 의해 발생한 81건의 사고를 대상으로 안전보건공단의 재해조사의견서를 활용하여 분석을 실시하였다.

분석을 위한 분류체계로는 일본 산업기술총합연구소(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)와 과학기술진흥사업단(Japan Science and Technology Corporation, JST)이 공동으로 개발한 웹 기반 화학사고 데이터베이스인 RISCAD(Relational Information System for Chemical Accidents Database)의 분류체계를 활용하였다. RISCAD 분류체계<sup>12)</sup>는 화학사고에 특화되어 있으며, 상세한 분류를 제공하는 장점이 있다. RISCAD의 분류 기준 중 가장 분석 가치가 높다고 판단된 작업, 설비, 원인의 세 가지 기준을 선택하여 사고를 분류하였다. RISCAD에서는 작업을 8개 대분류, 31개 중분류로 구분하고 있으며, 설비는 13개 대분류, 40개 중분류, 원인은 8개 대분류, 25개 중분류로 구분하고 있다. 소분류도 제공되는 경우가 있으나, 중분류 항목에 따라 소분류가 없는 항목이 많으며, 소분류까지 적용하기 위해서는 충분히 많은 데이터 개수가 필요하다. 따라서, 소분류를 활용한 분석은 항목에 따라 필요한 경우에 대해서만 실시하였다. 한 사고에 여러 가지 설비나 작업, 원인이 동시에 관련된 경우에는 사고조사 보고서에 기술된 요소 중 가장 비중이 높고 사고에 대해 영향력이 크다고 판단되는 요소를 선택하였다.

Table 1. Human error classification taxonomy employed in this research

Classification Criteria	Category	Subcategory	Definition
Active/Latent	Active error	Operation level	Errors that have an immediate consequence and are usually made by frontline workers such as drivers or operators
		Latent error	Errors that their consequence appear after a certain period of time when combined with other errors or specific operating conditions (e.g., Errors in maintenance, inspection, communication between workers, etc.)
		Management level	The absence or inadequacy of management which create conditions that cause the system to fail (e.g., Errors in workplace design, training, supervision, job allocation, etc.)
Behavior	Action	Incomplete	An action that is required, but performed incorrectly or incompletely
		Inappropriate	A wrong or unnecessary action performed
		Missed	An action that is required, but not performed
	Checking	Incomplete	Checking that is required, but done inaccurately or incompletely
		Inappropriate	Checking that is done with the wrong target
		Missed	Checking that is required, but not done
Cause	Slip and Lapse	Slip	Actions that has not been done as intended by the worker
		Lapse	Errors due to the limit of short term memory (e.g., forgetting tasks or task steps to be performed)
	Mistake	Rule-based mistake	Erroneous rules applied, or correct rules applied in a wrong situation
		Knowledge-based mistake	Errors in diagnosis or reasoning while solving problems by making goals, developing plans and procedures, usually in an unfamiliar circumstances
	Violation	Routine violation	Violations of rules or procedures that have become a normal way of working
		Situational violation	Violations of rules or procedures that are due to circumstantial conditions such as time constraints, insufficient staff for the workload, or extreme weather conditions
		Exceptional violation	Violations of rules or procedures in abnormal situation where the worker believes, falsely, that the benefits of breaking the rule outweigh the risks

본 연구에서는 휴먼에러가 원인으로 작용한 사고에 대해 보다 심층적인 분석을 실시하였다. 휴먼에러 분석에는 박정철 외의 연구에서 기존 연구에 대한 분석을 통해 도출한 Table 1의 휴먼에러 분류체계를 활용하였다<sup>13)</sup>. 직접적/간접적 분류는 미국 화학공정안전센터(Center for Chemical Process Safety, CCPS)와 영국 보건안전청(Health and Safety Executive, HSE)의 보고서에서 공히 제시하고 있는 분류체계이다<sup>14,15)</sup>. 이 분류에 따라 국내 화학사고의 휴먼에러를 관리수준의 간접적 에러, 관리수준의 직접적 에러, 현장수준의 직접적 에러로 분류하였다. 행위에 따른 분류는 휴먼에러가 어떠한 유형의 행위로 나타났는지에 따라 분류한다. 본 연구에서는 Embrey의 분류체계를 행동(Action)과 확인(Checking)에 대해 각각 불완전, 부적절, 불이행의 세 가지의 소분류를 사용하는 방식으로 단순화하여 활용하였다<sup>16)</sup>. 원인적 분류는 인간의 정보처리과정 중 어떠한 단계가 원인으로 작용하였는지에 따라 분류하는 것으로, 인지처리과정의 모델인 SRK (Skill-Rule- Knowledge) 모델<sup>17)</sup>에 기반하고 있다. 이 분류에 따라 휴먼에러의 원인을 실수, 착오, 위반으로 나누고, 실수는 행동실수와 기억실수, 착오는 규칙기반착오와 지식기반착오, 위반은 일상적, 상황적, 예외적 위반으로 분류하였다. 서로 다른 휴먼에러 분류 기준 간에 연관관계가 있는지 확인하기 위

해  $\chi^2$  검정(Chi-squared test)을 수행하였다.

각각의 사고에 영향을 미치는 휴먼에러는 하나 이상일 수 있다. 휴먼에러의 빈도에 초점을 맞춘 기존의 연구에서는 발생한 모든 휴먼에러를 대상으로 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 특정한 종류의 휴먼에러가 화학사고에서 차지하는 비중을 살펴보는 것이 목적이기 때문에, 설비, 원인, 작업에 대한 분석에서와 마찬가지로 사고 별로 가장 중요한 원인으로 작용한 것으로 판단되는 휴먼에러를 대상으로 하여 빈도를 분석하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 재해 형태와 관련 작업, 설비 및 원인 분석 결과

재해의 형태를 기준으로 분류한 결과는 Fig. 2와 같았다. 폭발이 44%로 가장 많았고, 화재(22%), 독성(15%), 질식(10%), 누출(6%)의 순이었다.

재해가 발생한 작업에 따라 분류한 결과에 따르면 절반에 가까운 사고가 유지보수 작업시(44%)에 발생하였으며, 다음은 생산 및 제조(38%)였다(Fig. 3). 유지보수 중에서는 수리작업이 67%로 대부분을 차지하였다. 생산 및 제조 작업 중에서는 운전작업(29%), 이동(26%), 반응(23%) 등 다양한 작업들이 고르게 높은 비중을 보였다.

발생 설비를 기준으로 사고를 분류한 결과는 Fig. 4

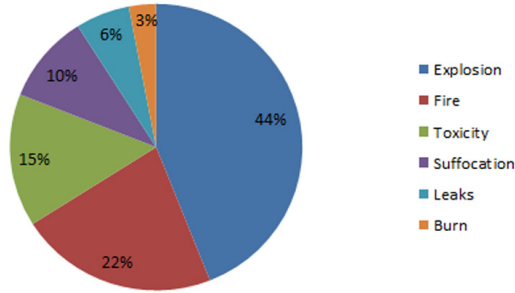


Fig. 2. Types of the accidents.

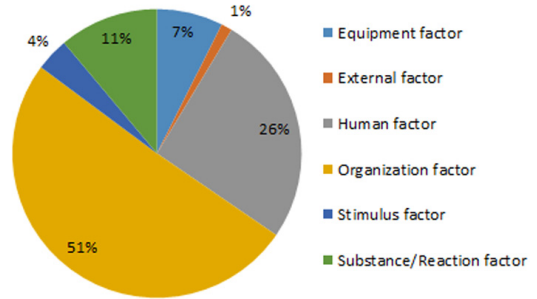


Fig. 5. Causes of the accident.

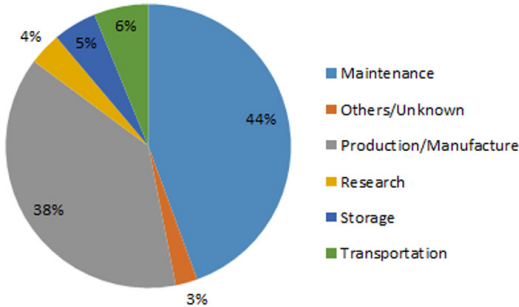


Fig. 3. Operation involved in the accident.

### 3.2 휴먼에러 분석 결과

직접적/간접적 휴먼에러 분류에서는 현장수준의 직접적 에러가 57%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 관리수준의 간접적 에러가 37%, 현장수준의 간접적 에러가 6%로 나타났다(Fig. 6).

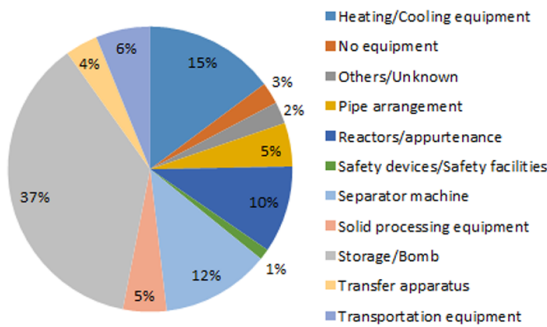


Fig. 4. Facilities involved in the accident.

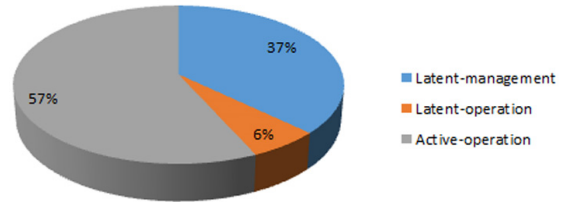


Fig. 6. Classification by active/latent errors.

와 같았다. 저장장치(37%)가 가장 비중이 높았으며, 다음은 가열 및 냉각 장치(15%), 분리기(12%), 반응기(10%)순이었다. 저장장치 중에는 액체 저장장치의 비중이 90%로 대부분을 차지했으며, 가열 및 냉각 장치 중에는 로(Furnace)의 비중이 58%로 가장 높았다. 반응기는 Batch reactor가 75%로 대부분이었고, 분리기에서는 증류탑이 60%를 차지 한 것으로 나타났다.

원인별 분석 결과는 조직요인이 51%로 가장 높았으며 다음이 인적요인(26%)과 물질/반응 요인(11%)으로 나타났다(Fig. 5). 조직요인의 대부분은 안전관리의 결함(90%)이 원인이었으며, 그 중 잘못된 관리방법(92%)이 대부분이었다. 인적요인의 대다수는 부적절한 행동/작업(95%)이었으며, 그 중에서도 작업 및 운전의 실수가 65%로 절반 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 설비요인에 의한 화학사고는 전체의 7%정도였다.

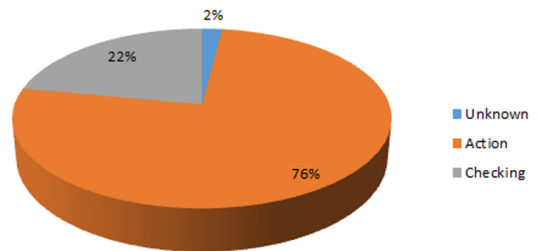


Fig. 7. Classification by behavior.

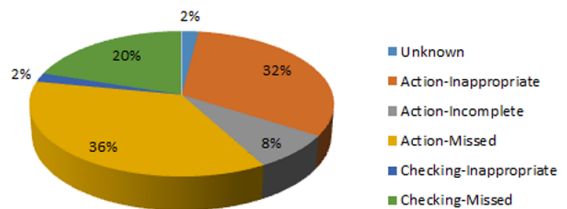


Fig. 8. Detailed classification by behavior.

행위에 따른 휴먼에러 분류에서는 확인이 22%정도를 차지한 데 비해 78%에 달하는 대부분의 사고가 행동의 실수에 의한 것으로 나타났다(Fig. 7). 보다 세부적으로 살펴보면 행동 중에서도 행동의 불이행과 부적절한 행동이 각각 36%와 32%를 차지해 가장 큰 문제로 나타났다(Fig. 8).

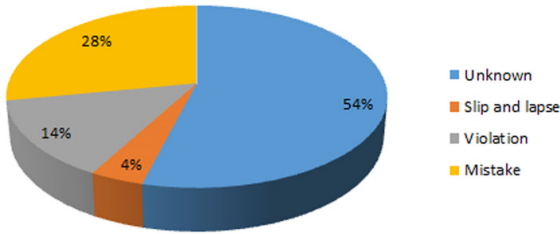


Fig. 9. Classification by cause.

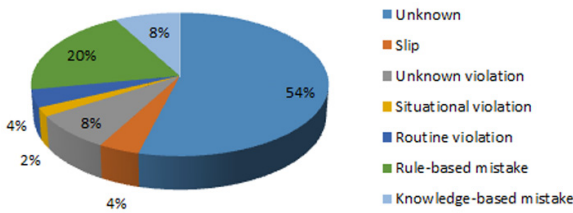


Fig. 10. Detailed classification by cause.

원인에 따른 휴먼에러 분석 결과, 휴먼에러의 원인을 파악할 수 없는 경우가 절반 이상(54%)이었다(Fig. 9, 10). 그 다음으로 착오의 비중이 가장 높았으며(28%), 다음이 위반(14%)과 실수(4%)의 순서였다. 세부적인 원인적 분류를 살펴보면 착오 중 규칙기반 착오의 비중이 전체의 20%로 가장 높았으며, 위반 중에서는 원인을 파악할 수 없는 위반의 비중이 전체의 8%로 가장 높았다.

휴먼에러 분류기준 간의 연관관계를 확인하기 위해 범주형 변수 간의 독립성 검정에 사용되는  $\chi^2$  검정 (Chi-squared test)을 수행하였다. 분석 결과, 유의확률 0.05에서 직접적/간접적 에러 분류와 행위에 따른 분류 사이에는 유의한 연관관계가 있는 것으로 나타났다 ( $p$ -value=0.004). 전체 휴먼에러 중 현장수준의 간접적 에러의 비율이 행동에서는 5%인데 반해 확인에서는 10%에 달했다. 직접적/간접적 분류와 원인적 분류 사이에는 연관관계가 없었으며( $p$ -value=0.937), 원인적 분류와 행위에 따른 분류도 서로 독립적인 것으로 나타났다( $p$ -value=0.869).

## 4. 토의

### 4.1 재해 형태와 관련 작업, 설비 및 원인

재해의 형태, 발생 설비, 작업, 원인 등에 대한 분석 결과는 화학 공정을 운영하는 사업장에서 어떠한 부분에 보다 초점을 맞추어 사고 방지 대책을 수립해야 하는지에 대해 시사점을 제공한다. 즉, 사고 형태로 보았을 때는 폭발과 화재의 방지가 중요하며, 작업 기준으로는 많은 사고가 유지보수 작업 중에 발생했다. 미국과 영국

에서 발생한 중대화학사고 45건에 대한 기존연구에서도 38%정도의 사고가 유지보수 절차의 개선을 통해 예방할 수 있었던 것으로 나타났다<sup>18)</sup>. 본 연구 결과에 따르면 대부분의 사고가 그 중에서도 수리 작업 시에 발생하므로, 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다.

설비의 경우에는 해당 설비의 수가 전체 설비의 숫자 대비 차지하는 비중이 클수록 사고 발생의 빈도가 높을 것으로 유추할 수 있다. 안전보건공단의 노후 화학설비 보유 사업장 실태조사 결과에 따르면<sup>19)</sup>, 조사대상 사업장 205개소에서 보유한 화학설비의 비율은 부속설비를 제외하였을 때 ‘화학물질 저장설비 또는 계량설비’가 22.9%, ‘열교환기류’와 ‘점화기를 직접 사용하는 열교환기류’가 포함 19.5%, ‘화학물질 분리장치’와 ‘분체화학물질 분리장치’가 포함 4.5%, ‘화학물질 반응 또는 혼합장치’가 11.6%였다. 설비의 분류 체계가 상이하어 직접적인 비교는 어렵지만, 이러한 설비의 비율은 해당 설비로 인한 사고의 비율과 어느 정도 유사한 경향을 보인다고 할 수 있다. 단, 저장장치와 분리기의 경우 설비의 비율에 비해 사고의 빈도가 상대적으로 높은 것으로 나타났음에 주목할 필요가 있다.

원인별 분석 결과는 설비나 외부적 요인보다는 안전 관리에 관련된 조직 요인(51%)과 작업 및 운전의 실수에 관련된 인적 요인(26%)이 중요한 것으로 나타났다. 이는 2000년에서 2008년 사이에 발생한 국내 화학사고에 대해 분석한 박정규 외의 연구 결과와 유사한 결과이다<sup>7)</sup>. 또한, 인적 요인의 높은 비중은 서론에서 언급한 McSween의 연구결과와 일맥상통한다<sup>3)</sup>.

### 4.2 휴먼에러 분석

직접적/간접적 휴먼에러에 대한 분석 결과 현장수준의 직접적 휴먼에러가 57%로 나타났지만, 관리수준의 간접적 에러도 37%로 상당 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이를 통해 일반적으로 휴먼에러의 범위에 포함되는 현장에서의 에러 뿐만 아니라 관리 측면에서의 에러도 상당한 비중을 차지한다는 것을 알 수 있다. 기존 문헌에 따르면 20-30%의 중대화학사고에서 간접적 휴먼에러가 원인으로 작용한다<sup>18)</sup>.

행위에 따른 휴먼에러 분석에서는 행동이 78%, 확인이 22%를 차지하여, 대부분의 직접적 휴먼에러에 의한 사고가 확인보다는 행동의 실수에 의한 것으로 나타났다. 이는 인간-기계 시스템에서 디스플레이 장치에 비해 제어 장치의 개선이 사고 방지에 보다 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것으로 해석될 수 있다. 특히 행동 중에서도 불완전한 행동보다 행동의 불이행과 부적절한 행동이 문제가 되는 것으로 나타났다. 이는

작업을 수행함에 있어 경험이나 기술의 부족으로 인해 제대로 수행하지 못하는 문제보다 정해진 작업 절차를 제대로 따르지 않는 문제가 사고로 이어진 경우가 많았다는 것을 의미한다.

원인 기반의 분류에 따르면, 밝혀진 휴먼에러의 원인 중에서는 착오의 비중이 가장 높았고(28%), 그 다음이 위반(14%)이었다. 세부적으로 살펴보면 착오 중 규칙기반 착오(Rule-based mistake)가 전체의 20%로 가장 높았으며, 지식기반 착오(Knowledge-based mistake)는 8%, 숙련기반 실수(Skill-based error)는 4%였다. Reason은 여러 연구결과를 종합하여 대략적으로 숙련기반의 에러가 61%, 규칙기반 착오가 28%, 지식기반 착오가 11%의 비중을 차지한다고 하였다<sup>20)</sup>. 본 연구 결과와 비교하면 규칙기반 착오와 지식기반 착오의 비중은 유사하다고 할 수 있으나 숙련기반 실수의 비중이 크게 차이나는 차이가 난다. 숙련기반 실수는 수행하는 작업에 주의를 기울이지 않거나, 외부요인에 의해 주의력이 흐트러져 작업 절차를 준수하려는 의도와는 다르게 행동이 수행되는 경우에 발생한다. 본 연구에서 숙련기반 실수의 비중이 현저하게 낮은 것은 중대사고의 위험성이 높은 화학공정의 특성상 이러한 단순한 유형의 에러가 직접적으로 중대사고로 이어지지 않도록 설비나 관리측면에서 기본적인 대비가 되어있기 때문인 것으로 보인다.

반면에, 작업 절차를 잘 모르거나 잘못 알고 행동하는 착오와, 작업 절차를 알면서도 이를 어기는 위반이 사고를 불러일으킨 경우가 많았다. 이는 행위에 따른 분석에서 행동의 불이행과 부적절한 행동의 비중이 높았던 점을 설명해 준다. 착오는 지식이나 정보, 경험 등의 부족으로 인해 작업을 잘못 수행되어 원치 않는 결과가 얻어지는 에러다. 따라서, 화학사고에서 높은 비중을 차지하는 규칙기반 착오를 방지하기 위해서는 작업자에 대한 교육/훈련이 중요함을 알 수 있다. 또한, 안전수칙 위반으로 인한 사고의 방지를 위해 올바른 안전문화의 확립을 통한 작업 절차의 준수가 보다 강조될 필요가 있다<sup>21)</sup>.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 화학사고에 대해 RISCAD 분류 체계를 기반으로 그 형태와 관련 작업, 설비, 원인 에 대한 기본적인 분석을 실시하고, 직접적/간접적 분류, 행위에 따른 분류, 원인에 따른 분류에 의해 휴먼에러 기반의 심층적인 분석을 실시하였다. 사고 형태에 있어서는 폭발과 화재, 작업 중에서는 유지보수, 설비 측면에서는 저장장치와 분리기에 대한 비중이 높은 것으

로 나타났다.

휴먼에러 기반 분석에서는 현장수준의 직접적 휴먼에러와 함께 관리수준의 간접적 휴먼에러가 많은 사고에 관여됨을 확인하였다. 행위에 따른 분류에서는 작업자의 상황 인식을 위한 확인에 비해 불안정한 행동과 관련된 실수가 사고로 이어지는 비율이 높은 것으로 나타났다. 불안정한 행동 중에서도 특히 행동의 불이행과 부적절한 행동이 문제가 되는 것으로 나타나, 작업자에 대한 교육/훈련과 안전 문화의 확립을 통한 작업 절차의 준수가 강조되어야 함을 확인하였다. 원인적 분석에 따르면, 기존 연구와 비교하여 착오와 위반의 비중에 비해 숙련기반 실수가 사고로 이어지는 빈도가 현저하게 낮은 것으로 나타났다.

그러나, 사고조사보고서에 포함된 정보의 한계로 인해 휴먼에러의 원인을 파악할 수 없는 경우가 절반 이상(54%)에 달했다. 본 연구에서 활용한 재해조사 의견서는 재해에 대한 안전보건공단의 공식적인 보고서로서, 사업장 개요, 재해자 인적사항 및 상해정도, 재해발생 경위, 조사내용, 조사자 의견, 재해발생 원인, 재해 예방 대책 등의 항목으로 구성되어 있다. 그러나, 작성자에 따라 각 항목에 대한 기술의 상세 정도에 차이가 크고, 재해의 직접적 원인에 대한 추론에 초점이 맞추어져 있어 재해의 근본적인 원인은 드러나 있지 않은 경우가 많다. 사고조사의 목적은 일차적으로 해당 사고의 직접적인 원인을 정확하게 찾는 데 있지만, 유사 사고의 재발 방지를 위해서는 근본적 원인까지 찾아내는 것이 중요하다.

학계에서는 휴먼에러를 단순히 사고의 원인으로 보기 보다는 시스템에 내재된 심층적 문제에 의해 발생한 결과로 보아야 한다는 견해가 점차 지지를 얻고 있다<sup>22)</sup>. 이 견해에 따르면 휴먼에러가 사고의 원인으로 지목되더라도 그것이 사고조사의 종결을 의미해서는 안 되며, 설비, 조직, 관리, 환경 등 어떠한 작업조건의 문제에 의해 휴먼에러가 발생한 것인지에 대해 근본적인 원인을 찾아내야 한다. 휴먼에러를 원인이 아니라 결과로서 바라보는 이러한 관점이 정착되기 위해서는 사고에 대해 휴먼에러의 근본 원인을 밝혀내는 심층적인 조사가 이루어지고 그 결과가 공유되어야 한다. 이를 위해 미국의 CSB(Cheical Safety Board)와 같은 독립적인 중대화학사고 조사기관의 신설 및 관련 제도의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 국내에서 발생한 화학사고에 대해 사고의 주요 원인으로 작용한 휴먼에러를 다양한 분류 기준에 따라 분석하여 빈도를 제시함으로써, 어떠한 종류의 휴먼에러가 중요한 영향을 미쳤는지 밝혀냈다는 데에 그



의의가 있다. 이는 국내 화학산업 전반에 걸쳐 사고 방지를 위해 휴먼에러 리스크를 파악하고 개선방안을 제시하는 데 도움이 되는 정보를 제공할 수 있다. 또한, 국내 화학사고의 휴먼에러 분류에 대한 거시적인 통계 정보를 제공함으로써, 해외 화학산업, 또는 타업종에서의 휴먼에러 분석 결과와의 직·간접적 비교에 활용될 수 있다. 다만, 본 연구는 화학사고의 휴먼에러 분류에 대한 거시적인 통계 정보를 제공하는 데 초점을 맞추었으며, 개별 사고에 관한 심층적인 분석 결과를 제공하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 사고조사 및 보고 체계에 대한 보완이 선행되어야 하며, 휴먼에러를 불러일으킨 근본 원인에 대한 기술통계적 분석에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

**감사의 글:** This was supported by Korea National University of Transportation in 2016.

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2016R1D1A1B03933470).

## References

- 1) Ministry of Employment and Labor of Korea, "Prevention Strategies for Major Industrial Accidents", August 2017.
- 2) Ministry of Employment and Labor of Korea, "Prevention Strategies for Major Chemical Accidents", May, 2013.
- 3) T. E. McSween, "The Values-Based Safety Process: Improving Your Safety Culture with Behavior-Based Safety", Wiley, 2003.
- 4) D. H. Kim, "Study on Human Error Analysis of Chemical Plants", KOSHA Occupational Safety and Health Research Institute, 1999.
- 5) CCPS (Center for Chemical Process Safety), "Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents", 2003.
- 6) J. B. Baek, "A Study on the Measurement of Process Safety Culture for Improvement of Status to Process Safety Management", KOSHA Occupational Safety and Health Research Institute, 2003.
- 7) J. K. Park, "A Study on the Improvement of the Chemical Accident Response System", Korea Environment Institute, 2013.
- 8) H. S. Lee and J. P. Yim, "A Study on Prevention Measure Establishment through Cause Analysis of Chemical-Accidents", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 21-27, 2017.
- 9) A. Graziano, A. P. Teixeira and C. Guedes Soares. "Classification of Human Errors in Grounding and Collision Accidents using the TRACER Taxonomy", Safety Science, Vol. 86, pp. 245-257, 2016.
- 10) S. C. Theophilus, V. N. Esenowo, A. O. Arewa, A. O. Ifelebuegu, E. O. Nnadi and F. U. Mbanaso, "Human Factors Analysis and Classification System for the Oil and Gas Industry (HFACS-OGI)", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 167, pp. 168-176, 2017.
- 11) Y. S. Yoon, D.-H. Ham and W.-C. Yoon, "Application of Activity Theory to Analysis of Human-related Accidents: Method and Case Studies", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 150, pp. 22-34, 2016.
- 12) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Japan Science and Technology Corporation (JST), RISCAD (Relational Information System for Chemical Accidents Database), [http://riscad.db.aist.go.jp/PHP\\_EN/](http://riscad.db.aist.go.jp/PHP_EN/).
- 13) J. Park, J. B. Baek, I. G. Hong, J. H. Kim and S. K. Hong, "Techniques and Management Strategies for Preventing Human-error Related Chemical Accidents", KOSHA Chemical Material Center, 2012.
- 14) CCPS (Center for Chemical Process Safety), "Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety", American Institute of Chemical Engineers, 2004.
- 15) HSE, "Reducing error and influencing behaviour 2<sup>nd</sup> ed. HSG48", 1999.
- 16) D. E. Embrey, "Techniques for auditing and reducing risk from human error", In Ergonomics in the Process Industries, IChemE, North-Western Branch Papers No. 5, Rugby, 1993.
- 17) J. Rasmussen, "Skills, rules, knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 13, pp. 257-266, 1983.
- 18) R. J. Taylor, "Human Error in Process Plant Design and Operations - A Practitioner's Guide", CRC Press, 2016.
- 19) KOSHA, "Survey Results of Factories with Old Facilities", 2014.
- 20) J. Reason, "Human Error", Cambridge University Press, 1990.
- 21) I. G. Hong, J. B. Baek, "A Qualitative Study on Safety Rule Violation Motives at Manufacturing Plants", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 2, pp. 133-142, 2016
- 22) S. Dekker, "The Field Guide to Understanding Human Error", Ashgate, 2006.