

화학설비의 휴먼에러 사고방지를 위한 작업자 신뢰성 평가기법



2012년 7월 2일

박 정 철

한국교통대학교 안전공학과

사고사례 – BP Texas City 정유공장 폭발 사고



- 개요
 - 2005년 3월 23일, BP Products North America의 Texas City 정유공장에서 이성체화 유닛 재가동 준비 중 폭발과 화재가 발생
- 사고결과
 - 인명피해: 사망 15명, 부상 170여명
 - 재산피해: 15억 달러
- 사고원인
 - 공정안전 및 운영시스템상의 위험성 감소를 위한 관리시스템 부재
 - 근로자간 의사소통 부재 (교대근무자간 위험사항 인수인계 미이행)
 - 감독자들의 절차 준수 여부 미확인 및 사고당시 부재

연구배경

- 공정시스템의 복잡화, 자동화로 생산과 안전을 공정시스템에 의존
- 공정안전관리(PSM) 제도 시행 후 7년간 사망사고 62%, 상해사고 58% 감소

Year	Total	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
Total	82	12	24	7	9	11	6	6	7
Refinery	15	4	6	-	4	1	-	-	-
Petro-chemical	28	5	5	4	3	5	3	1	2
Fine chemical	4	-	2	-	-	1	1	-	-
Gas supply	3	-	-	1	-	2	-	-	-
Other chemical	17	1	4	1	-	1	2	3	5
Others	15	2	7	1	2	1	-	2	-

Cause of accident	Number	Percent
Total	82	100
Inadequate implementation of safe work permission	34	41.5
Inadequate maintenance, test and inspection	7	8.5
Inadequate operating procedure/operation error	15	18.3
Design error/mechanical failure	7	8.5
Inadequate management of change	11	13.4
Unidentified chemical reaction/run-away reaction	6	7.3
Others	2	2.5

※ Source: Hyuck-myun Kwon, The effectiveness of process safety management (PSM) regulation for chemical industry in Korea, Journal of Loss Prevention, 2006.

- 인적 오류(Human Error)로 인한 중대산업사고 발생비율 증가

※ Source: 백종배, PSM이행수준 제고를 위한 공정안전문화 측정방법 연구, 산업안전보건연구원, 2003.

연구배경

- 대다수의 산업재해가 인간의 실수에서 출발(Bridges and Tew, 2010)
- 취약한 경영 시스템으로부터 발생하는 휴먼에러(Human error)가 화학설비 사고의 원인(CCPS; Center for Chemical Process Safety, 2003)

- 휴먼에러
 - 설계의 에러, 운용의 에러, 유지보수의 에러, 공정변경관리의 에러, 의사소통의 에러 등 다양한 측면의 휴먼에러를 모두 포함

- 현행 공정안전관리(PSM) 제도
 - 기술적/관리적 요소들로 구성
 - 인적요인(Human Factors)에 대한 평가 취약

- 휴먼에러의 발생에 영향을 미치는 인적요인에 대한 평가를 PSM 제도 내에 구체적이고 체계적으로 반영 필요

연구목표

국내 화학설비의 휴먼에러 사고방지를 위한 작업자 신뢰성 평가기법 개발 및 관리개선

1. 국내·외 화학설비 휴먼에러 산업사고 분석

- 1.1 화학설비의 휴먼에러 분류체계 개발
- 1.2 국내·외 화학설비 휴먼에러 산업사고 수집 및 분석
- 1.3 화학설비의 휴먼에러 특성 파악

2. 화학설비의 작업자 신뢰성 평가기법 개발

- 2.1 기존 작업자 신뢰성 평가기법 분석
- 2.2 화학설비 휴먼에러 관련 인적요인 파악 및 수준 정의
- 2.3 국내 화학설비를 위한 작업자 신뢰성 평가기법 개발

3. 화학설비의 휴먼에러사고 방지를 위한 개선방안 및 평가방안 제시

- 3.1 화학설비의 휴먼에러사고 방지를 위한 개선방안 제시
- 3.2 국내 화학설비의 인적요인 관련 개선활동 평가방안 제시

휴먼에러 분류 체계

분류 기준	대분류	소분류
직접적/간접적 분류	직접적 휴먼에러 (Active human error)	현장 수준 (Operational level)
	간접적 휴먼에러 (Latent human error)	현장 수준 (Operational level)
		관리 수준 (Management level)
행태적 분류	행동 (Action)	불완전 (Incomplete)
		부적절 (Inappropriate)
		불이행 (Missed)
	확인 (Checking)	불완전 (Incomplete)
		부적절 (Inappropriate)
		불이행 (Missed)
원인적 분류	실수 (Slip and Lapse)	행동 실수 (Slip)
		기억 실수 (Lapse)
	착오 (Mistake)	규칙기반착오 (Rule-based mistake)
		지식기반착오 (Knowledge-based mistake)
	위반 (Violation)	일상적 위반 (Routine violation)
		상황적 위반 (Situational violation)
		예외적 위반 (Exceptional violation)

직접적/간접적 휴먼에러 분류 (CCPS, 2004; HSE, 2009)

대분류	소분류	설명
직접적 휴먼에러 (Active human error)	현장 수준 (Operational level)	시스템에 직접 심각한 부정적 영향을 미치거나, 그러한 영향을 초래할 수 있는 일련의 사건들을 단시간 내에 촉발하는 의도적 또는 비의도적 행동
간접적 휴먼에러 (Latent human error)	현장 수준 (Operational level)	직접적 휴먼에러와 유사하나 휴먼에러의 결과가 다른 에러 또는 특정 작업 조건과 결합해서 일정 시간 이후에 나타나는 에러 (유지/보수, 검사, 작업자간 의사소통 등)
	관리 수준 (Management level)	시스템이 실패할 수 있는 조건을 만드는 관리의 부재 또는 부적절한 관리 (설비 및 작업장 설계, 교육/훈련, 감독, 직무 분담 등)

휴먼에러의 형태적 분류

- Predictive Human Error Analysis (PHEA)의 휴먼에러 분류에 기반 (Embrey, 1992)

대분류	소분류	설명
행동 (Action)	불완전 (Incomplete)	올바른 행동을 수행하였으나 부정확하거나 불완전하게 수행함
	부적절 (Inappropriate)	불필요하거나 잘못된 행동을 수행함
	불이행 (Missed)	행동을 수행하지 않음
확인 (Checking)	불완전 (Incomplete)	올바른 대상을 확인하였으나 부정확하거나 불완전하게 확인함
	부적절 (Inappropriate)	잘못된 대상을 확인함
	불이행 (Missed)	확인을 수행하지 않음

휴먼에러의 원인적 분류 - 대분류

- SRK model을 바탕으로 한 Reason의 분류에 기반

대분류	설명
실수 (Slip and Lapse)	주의를 집중하지 않은 상태에서 작업을 수행함으로써 의도와 다르게 작업이 수행되는 에러
착오 (Mistake)	의도한 대로 작업을 수행하였으나, 실제로는 지식이나 정보, 경험 등의 부족으로 인해 작업이 잘못 수행되어 원치 않는 결과가 얻어지는 에러
위반 (Violation)	작업 수행 방법과 절차를 알고 있으면서도 의식적으로 이를 따르지 않는 에러

휴먼에러의 원인적 분류 - 소분류

대분류	소분류	설명
실수 (Slip and Lapse)	행동 실수 (Slip)	작업을 행동으로 옮기는 단계에서 의도한대로 행동이 이루어지지 않은 에러
	기억 실수 (Lapse)	수행할 작업을 깜빡하거나, 어느 단계까지 작업을 수행했는지 잊거나, 무엇을 하려고 했는지를 잊는 등, 단기 기억의 한계로 인해 발생하는 에러
착오 (Mistake)	규칙기반착오 (Rule-based mistake)	작업자가 알고 있는 규칙이나 익숙한 절차에 의해 수행되는 작업에서, 처음부터 잘못된 규칙을 알고 있거나, 정확한 규칙이라 해도 상황에 맞지 않게 잘못 적용하는 에러
	지식기반착오 (Knowledge-based mistake)	익숙하지 않은 상황에서 목표와 계획, 절차를 수립해서 문제의 해결을 시도할 때 잘못된 진단이나 추론 때문에 생기는 에러
위반 (Violation)	일상적 위반 (Routine violation)	규칙이나 절차를 위반하는 것이 일상화되어 습관적으로 위반하는 에러
	상황적 위반 (Situational violation)	시간 압박, 인력 부족, 적합한 설비의 부재, 악천후 등 상황적 조건 때문에 불가피하게 규칙이나 절차를 위반하는 에러
	예외적 위반 (Exceptional violation)	거의 발생하지 않는 비정상적인 상황에서, 문제의 해결을 위해 위험을 감수하더라도 규칙이나 절차를 무시할 필요가 있다고 판단해 규칙이나 절차를 위반하는 에러

사고사례 분석

■ 국내 사고사례

- 안전보건공단 PSM 대상 사업장 중대산업사고 사고조사보고서
 - 총 51건 (2002~2011년도)
- 안전보건공단 발행 중대산업사고 사례집
 - 총 34건 (1997~2001년도)

■ 해외 사고사례

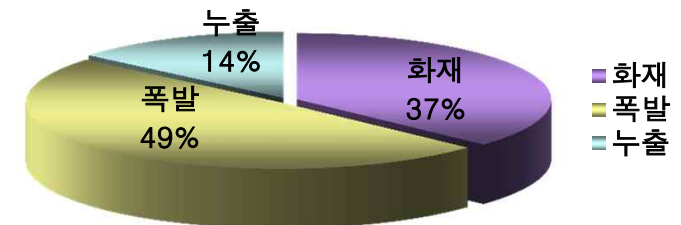
- CSB (USA) 사고조사보고서
 - 총58건 (1998~2012년도) 중 35건

분석 대상 산업사고의 범위

1. 화학설비에서 발생한 사고
(국내의 경우 PSM 대상 사업장)
 - 제조업 및 비제조업 포함(운수·창고업 및 통신업, 전기·가스 및 상수도업 등 포함)
2. 중대산업사고
 - 화재, 폭발, 누출 사고
3. 휴먼에러에 기인한 사고
 - 사고의 직접적인 원인이 다음의 에러 유형에 해당되는 사고
 - 직접적 휴먼에러(Active human error)
 - 현장 수준(Operational level)의 간접적 휴먼에러(Latent human error)

< 업종별 PSM 대상 사업장 수 (2012년도 현재)>

업종	사업장 수
건설업	5
기타의사업	57
운수·창고 및 통신업	69
임업	1
전기·가스 및 상수도업	65
제조업	723
미분류	111
총합계	1031

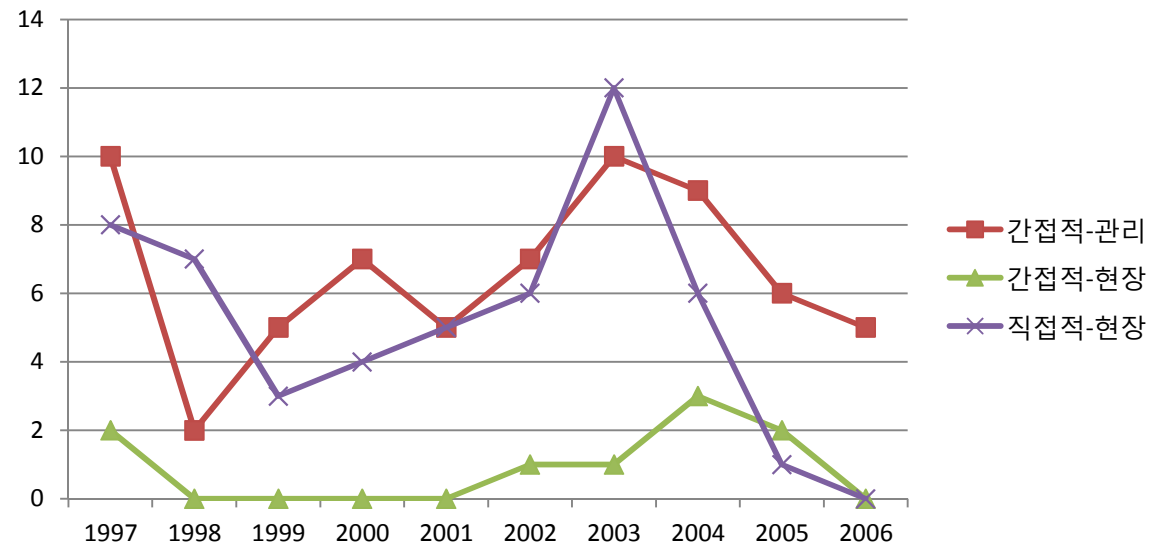
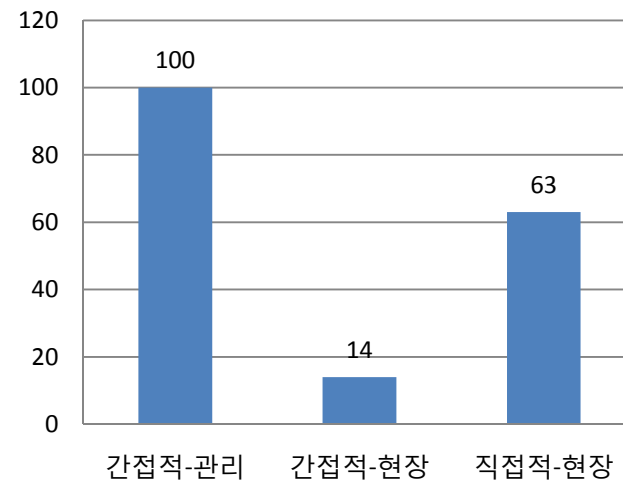


<PSM 대상 사업장 중대산업사고 형태('96~'11)>

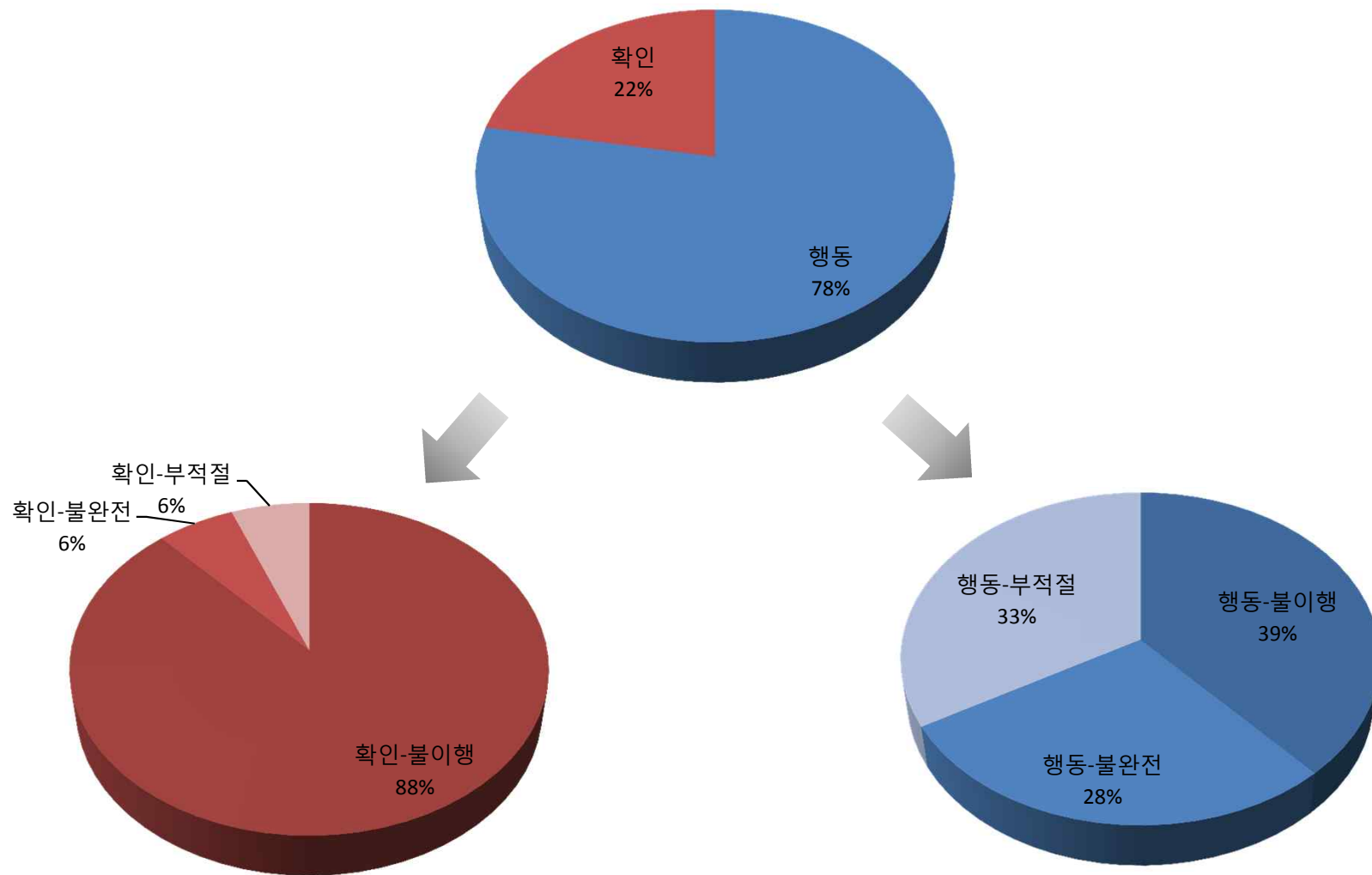
국내 사고사례 분석 (일부)

사고년도	사고원인	직접적/간접적	현장/관리	형태적	형태적-세부	원인적	원인적-세부
2002	중화조 내부에서 화재	간접적	관리				
2002	중화조 하부에서 폐 유기용제 누출화재	간접적	현장	행동	불완전	?	?
2002	배관, 호스에서 폐 유기용제 누출에 의한 폭발. 화재	직접적	현장	행동	부적절	?	?
2002	작업자가 원심분리기 상부의 N2(질소) 공급용 밸브를 개방하지 않은채 작업을 하여 정전기에 의한 스파크 발생	직접적	현장	행동	불이행	?	?
2002	원심분리기 내부는 재료에 대한 내식성을 높이기 위하여 Teflon 코팅 처리처리하여 정전기가 발생할 경우 축적된 정전기의 제거가 불가능	간접적	관리				
2002	제품의 열분해에 의한 폭발. 화재	직접적	현장	행동	부적절	착오	규칙
2002	저장탱크의 위험물(초산)을 제거하지 않은 상태에서 화기작업 실시.	직접적	현장	행동	부적절	?	?
2002	탱크와 연결된 배관에 BLIND(맹판) 미삽입	간접적	관리				
2002	불순물의 존재	간접적	관리				
2002	보일러가동시간이 정해진 시간 초과하여 보일러 과열	직접적	현장	행동	불완전	실수	기억
2002	반응기 내부 온도조절밸브를 장기간 운휴 후에 처음으로 조정함으로 인해 잘못 조정	직접적	현장	행동	불완전	?	?
2002	이상온도상승시 경보 설비 부재	간접적	관리				
2002	파열판의 작동불량 및 용량부족	간접적	관리				
2002	MEK가 활성탄 상에서 산화, 중합반응	간접적	관리				
2003	밸브 오조작	직접적	현장	확인	불이행	실수	기억
2003	긴급차단 장치 등 액체염소 방출시 대비책 미흡	간접적	관리				
2003	액체염소 누출 감지장치 미설치	간접적	관리				
2003	운전절차서 미흡	간접적	관리				
2003	이상조치 해소시 무리한 작업 수행	직접적	현장	행동	불완전	실수	행동
2003	내부에 체류하던 공정물질의 세척 및 퍼지 미흡	간접적	현장	행동	불완전	착오	규칙
2003	전선의 Spark	간접적	관리				
2003	튜브가 고온 Sulfur 부식에 의한 두께 감소로 내압에 의해 파열	간접적	관리				
2003	위험성평가 없이 임의의 Filter를 설치, 사용	간접적	관리				
2003	약제를 긁어모으는 과정에서열적 발화원(나화, 불꽃 등)이 점화원으로 작용	직접적	현장	행동	부적절	?	?
2003	정전기 대전방지 조치 미흡	간접적	관리				

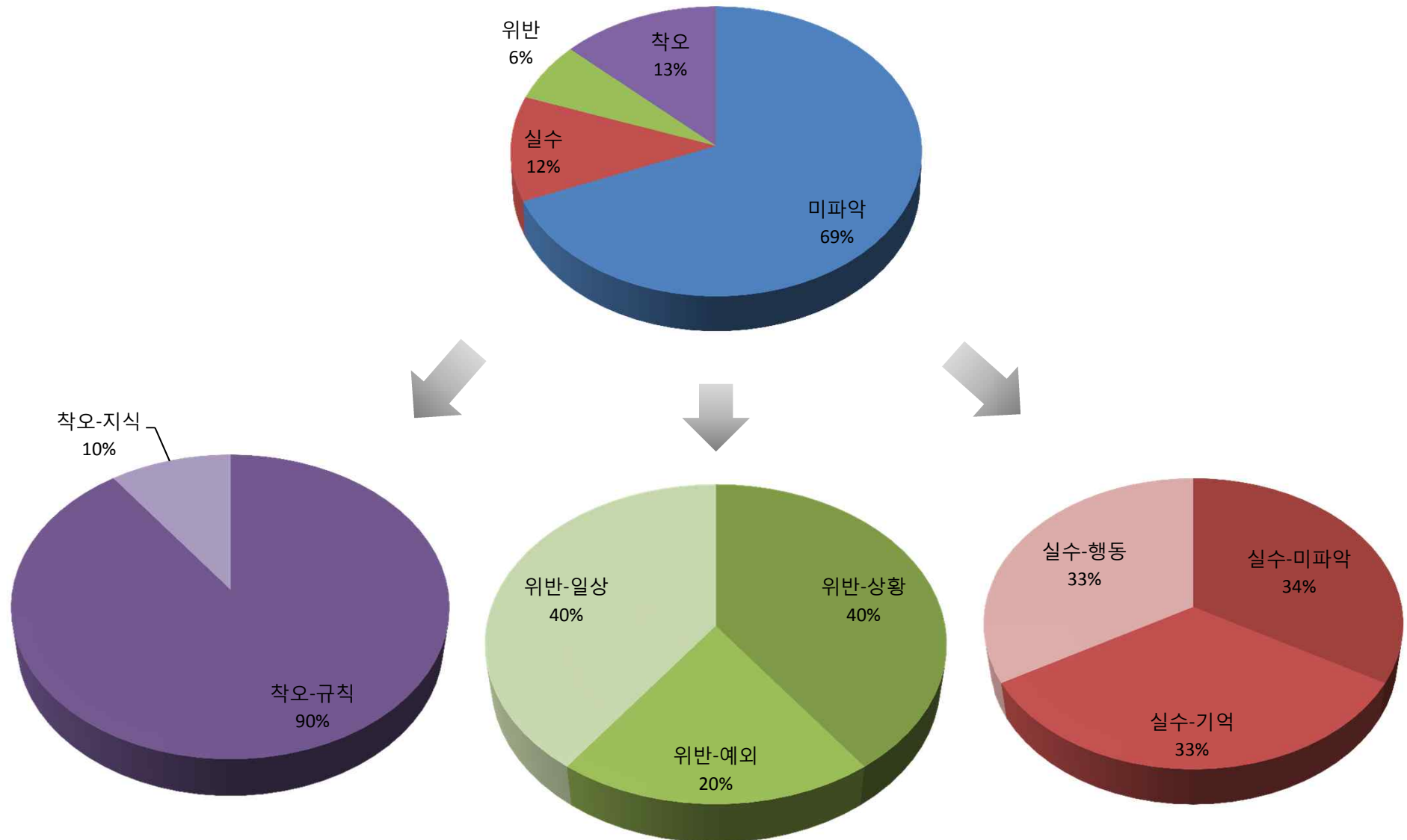
국내 사고사례 분석 결과 - 직접적/간접적 분류



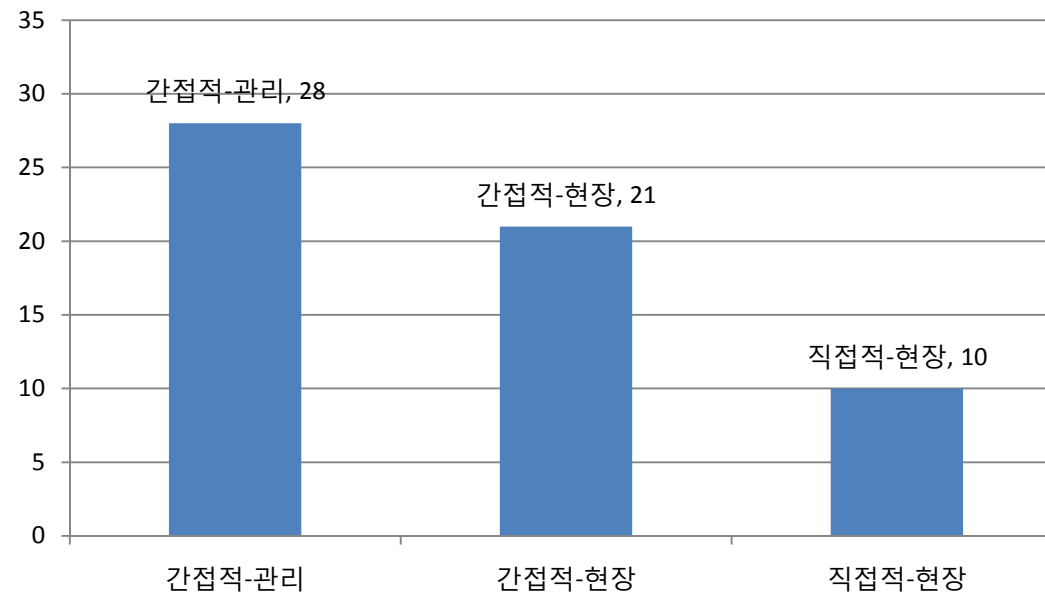
국내 사고사례 분석 결과 - 형태적 분류



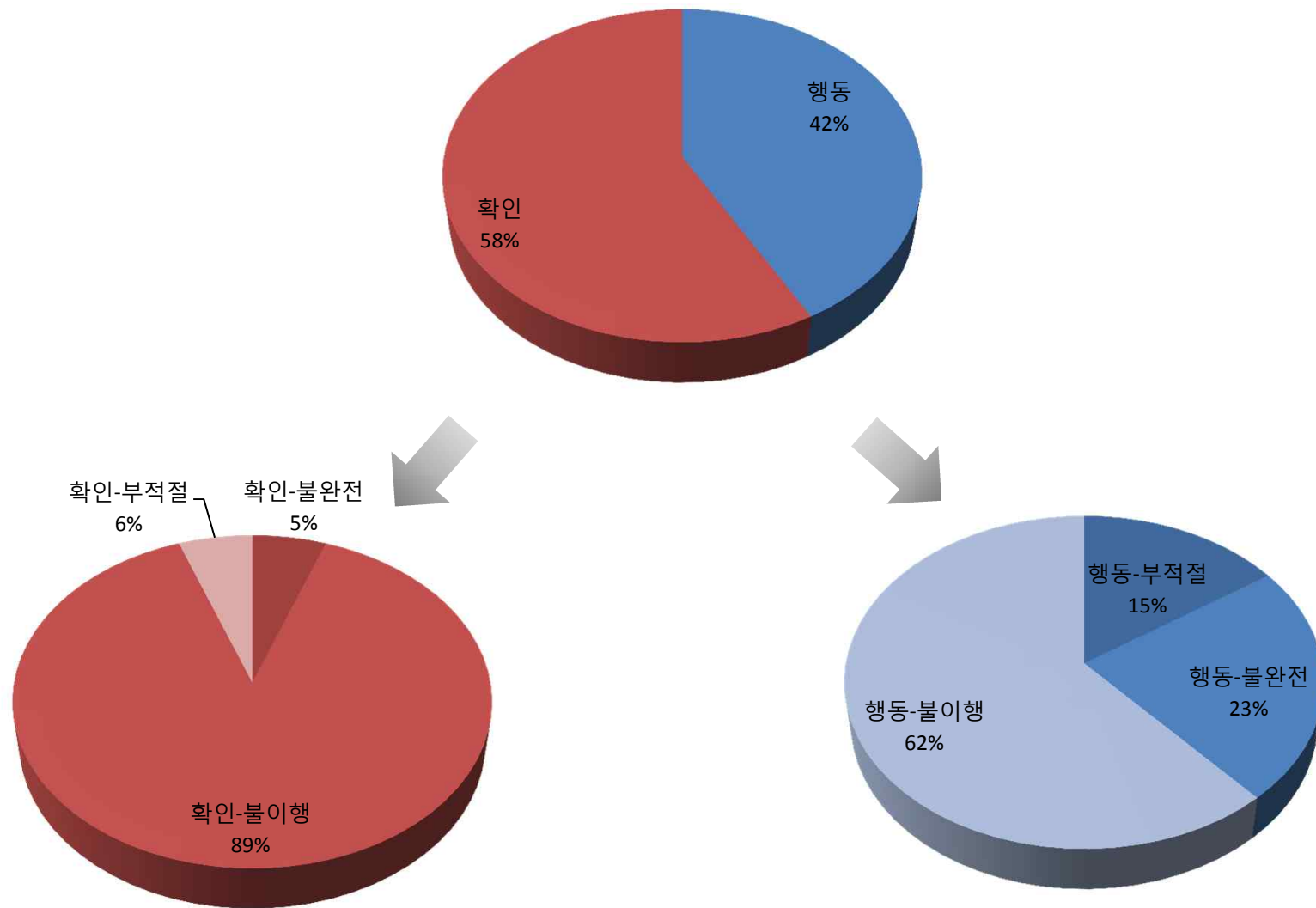
국내 사고사례 분석 결과 - 원인적 분류



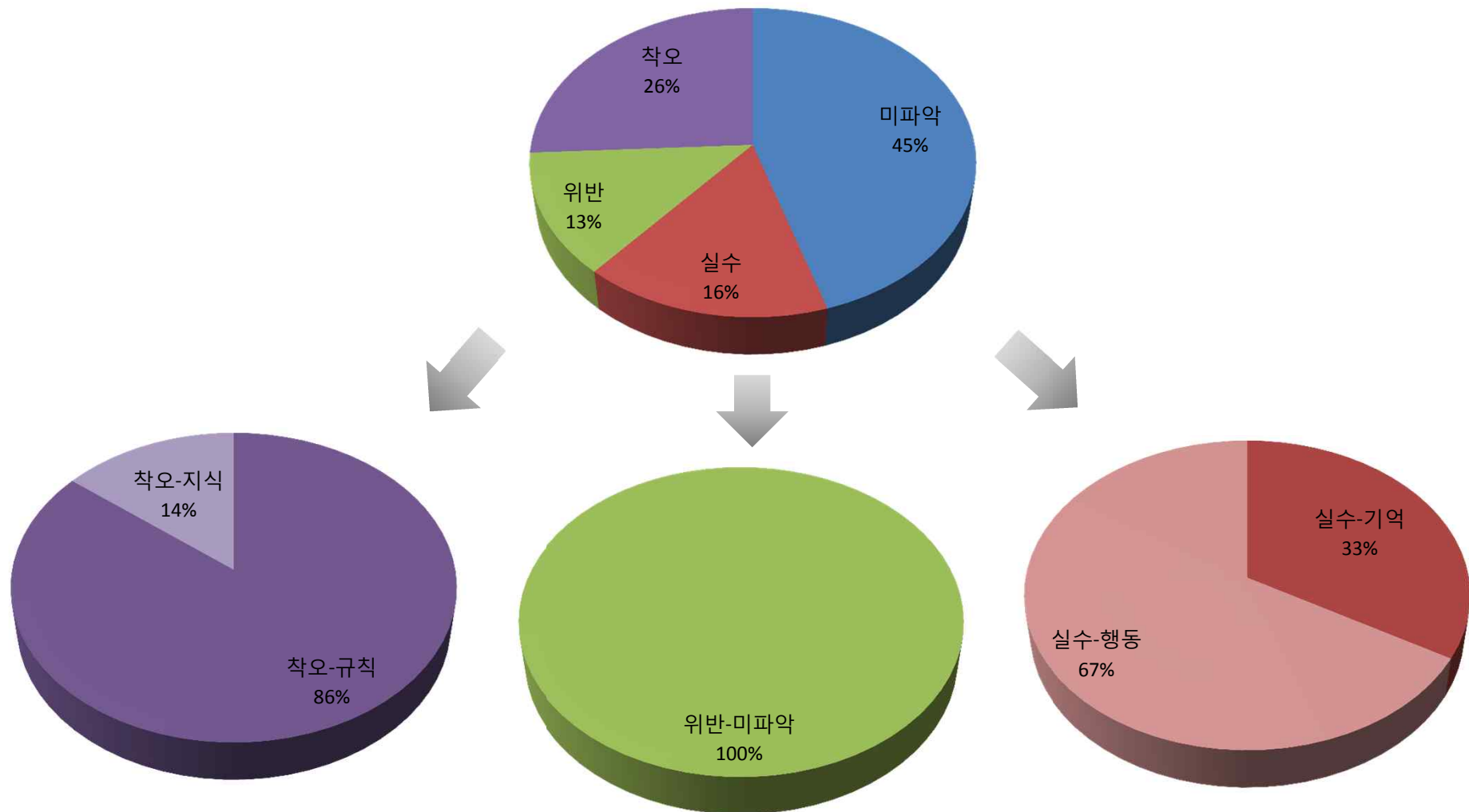
CSB 사고사례 분석 결과 - 직접적/간접적 분류



CSB 사고사례 분석 결과 - 형태적 분류



CSB 사고사례 분석 결과 - 원인적 분류



작업자 신뢰성 평가기법

- 인간 신뢰성 평가(HRA; Human Reliability Assessment)
 - 위험의 존재하에서 인간의 작업 수행에 따른 에러의 영향 예측
 - 원자력 발전소, 화학플랜트, 철도, 우주항공, 국방 등 다양한 분야에서 활용
- 인간 신뢰성 평가의 주요 기능
 - 휴먼에러의 확인(Identification)
 - 휴먼에러의 예측(Prediction)
 - 휴먼에러의 방지(Prevention)
- 작업자 신뢰성 평가기법 분류
 - 정량적(Quantitative) 기법
 - 정성적(Qualitative) 기법
 - 회고적(Retrospective) 기법
 - 예측적(Predictive) 기법
 - 확인(Identification)
 - 예측(Prediction)
 - 방지(Prevention)

작업자 신뢰성 평가기법의 분류

■ 분류체계 기반 방법(Taxonomy based methods)

- 에러 모드 분류체계 사용
- SHERPA, HET, TRACEr, CREAM, etc.
- 장단점
 - 적용이 쉽고 빠름, 저비용
 - 분석자의 판단에 전적으로 의존
 - 낮은 예측 신뢰도 (inter-analyst and intra-analyst reliability)

■ 질문 기반 방법(Error identifier methods)

- 에러 확인 질문 활용 (e.g., '작업자가 시간 내에 행동을 수행하지 못할 수 있는가?')
- HEIST, THEA, etc.
- 장단점
 - 분류체계 기반 방법에 비해 신뢰도 높음
 - 모든 에러 확인 질문을 검토하기 위해 시간 소요

작업자 신뢰성 평가기법의 분류

- 정량화 방법(Error quantification methods)
 - 휴먼에러 발생 확률 예측
 - 에러 발견을 위해 수행도 형성 인자(Performance shaping factors) 활용
 - 원자력 발전 분야에서 주로 사용됨
 - JHEDI, HEART, etc.
 - 장단점
 - 에러 발생 확률을 수치로 제시
 - 적용이 어려우며 확률적 위험성 평가에 대한 지식 필요
 - 신뢰도에 대한 의문

작업자 신뢰성 평가기법의 특징 및 장단점

기법	분류	분야	학습 시간	소요 시간	장점	단점
SHERPA	에러 확인	원자력, 화학공정 및 일반	하	중	배우기 쉽고 사용하기 쉬움 검증된 신뢰도 많은 분야에 사용됨 범용적 에러 분류체계	대규모 또는 복잡한 작업의 경우 많은 시간과 노력 소요
SPEAR	에러 확인	화학공정 및 일반	하	중	배우기 쉽고 사용하기 쉬움 분석자가 특정 분류체계를 선택 가능	SHERPA와 거의 유사함 많이 사용되지 않음 검증 필요
HET	에러 확인	항공 및 일반	하	중	배우기 쉽고 사용하기 쉬움 범용적 에러 분류체계	대규모 또는 복잡한 작업의 경우 작업 분석에 부가적 노력 필요
TRACEr	에러 확인 리스크 평가	항공 관제 및 일반	중	상	IEM, PEM, EEM, PSF를 포함하는 종합 적 분석 충실한 이론적 배경 예측적 및 회고적 분석 가능	분류체계 기반의 기법 중 복잡한 편임 검증 필요
TAFEI	에러 확인	제품 설계 및 공공기 술	중	중	체계적이고 철저함 충실한 이론적 배경	대규모 또는 복잡한 작업의 경우 작업 분석에 부가적 노력 필요 상태공간다이아그램(SSD) 필요
Human Error HAZOP	에러 확인	원자력, 화학공정 및 일반	하	중	배우기 쉽고 사용하기 쉬움 범용적 에러 분류체계	대규모 또는 복잡한 작업의 경우 작업 분석에 부가적 노력 필요 팀 구성 필요
THEA	에러 확인	설계 및 일반	하	중	에러 결과 및 설계 개선책과 연관된 에러 확인 질문 사용	많은 시간 소요 에러 모드가 없어 어떠한 에러가 일어날지 해석이 어려움 많이 사용되지 않음

작업자 신뢰성 평가기법의 특징 및 장단점

기법	분류	분야	학습 시간	소요 시간	장점	단점
HEIST	에러 확인	원자력, 화학공정 및 일반	하	중	에러 결과 및 설계 개선책과 연관된 에러 확인 질문 사용	많은 시간 소요 많이 사용되지 않음
HERA	에러 확인 리스크 평가	원자력 및 화학공정	상	상	철저한 분석 툴킷 방식으로 인한 종합적 평가 가 능	검증 필요 배우기 어렵고 많은 시간 소요
HEART	에러 확인 리스크 평가	원자력 및 화학공정	하	중	정량적 분석 가능 PSFs 고려 쉽고 빠르게 적용 가능	일관성 부족 방법에 대한 가이드 부실 검증 필요
CREAM	에러 확인 리스크 평가	원자력 및 대형 시스 템	상	상	종합적 평가 가능 예측적 및 회고적 분석 가능	배우기 어렵고 많은 시간 소요 너무 복잡함 많이 사용되지 않음

SHERPA

Systematic Human Error Reduction and Predication Approach

- 행동 분류체계 활용
 - 행동(action), 인출(retrieval), 확인(check), 선택(selection), 정보교환에러 (information communication)
- HTA (Hierarchical Task Analysis)의 최하위 수준 작업에 대해 행동 분류체계 적용 및 가능한 에러 모드 도출
 - 활동(Action): e.g., 버튼 누르기, 스위치 당기기, 문 열기 등
 - 인출(Retrieval): e.g., 화면이나 매뉴얼로부터 정보를 얻음
 - 확인(Checking): e.g., 절차적 확인 실시
 - 선택(Selection): e.g., 대안 중에서 선택
 - 정보전달(Information communication): e.g., 다른 팀과의 대화
- 각 에러 모드에 대해 에러의 결과, 에러 복구, 확률 및 치명도, 설계 개선책 기술

SHERPA

Systematic Human Error Reduction and Predication Approach

■ SHERPA의 에러 모드 분류체계

행동 에러

A1-동작이 너무 길거나 짧음
A2-잘못된 동작 시점
A3-잘못된 방향으로의 동작
A4-동작이 너무 적거나 큼
A5-잘못된 정렬
A6-잘못된 대상에 올바른 동작
A7-올바른 대상에 잘못된 동작
A8-동작 생략
A9-불완전한 동작
A10-잘못된 대상에 잘못된 동작

확인 에러

C1-확인 생략
C2-불완전한 확인
C3-잘못된 대상에 올바른 확인
C4-올바른 대상에 잘못된 확인
C5-잘못된 확인 시점
C6-잘못된 대상에 잘못된 확인

선택 에러

S1-선택 생략
S2-잘못된 선택

인출 에러

R1-정보를 얻지 못함
R2-잘못된 정보를 얻음
R3- 불완전한 정보 인출

정보전달 에러

I1-정보가 전달되지 않음
I2-잘못된 정보가 전달됨
I3-불완전한 정보 전달

SHERPA

Systematic Human Error Reduction and Predication Approach

■ 절차

- Step 1. 계층적 작업 분석(HTA; Hierarchical task analysis)
- Step 2. 작업 분류(Task classification)
- Step 3. 휴먼에러 확인(HEI; Human error identification)
 - 에러 모드 분류체계 활용
- Step 4. 결과 분석(Consequence analysis)
- Step 5. 복구 분석(Recovery analysis)
 - 에러를 이후의 작업 단계에서 복구할 수 있는지 기술
- Step 6. 서수적 확률 분석(Ordinal probability analysis)
 - Low (L): 발생한 적이 없음; Medium (M): 이전에 발생한 적이 있음; High (H): 자주 발생함
- Step 7. 위험도 분석(Criticality analysis)
 - Low (L), Medium (M), High (H)
- Step 8. 개선책 분석(Remedy analysis)
 - Equipment, Training, Procedures, Organizational

정성적 작업자 신뢰성 평가의 예: 염소 탱크 충전 작업

작업 단계	에러 형태	에러	에러 복구	결과	에러 저감 방법		
					절차	훈련	설비
2.3 탱크 목표 중량 설정	R2-잘못된 정보를 얻음	잘못된 중량 입력	확인 시	• 탱크 과충전 이전에 경보가 울리지 않음	• 목표 중량에 대한 별도의 검증	• 작업자가 이중으로 확인 • 수치를 체크리스트에 기록	• 중량 경보의 자동 세팅 • 자동 기록 시스템 • 디스플레이 개선
3.2.2 충전중 탱크 확인	C1-확인 생략	충전 중 탱크를 주시하지 않음	초기 중량 경보 시	• 제대로 설정된 경우 알람 울림 • 설비 결함이 조기에 발견되지 않음	• 관리감독자가 주기적으로 확인	• 안전을 위한 주기적 확인의 중요성 강조	• 자동 기록 절차 제공
3.2.3 마지막 2-3톤 충전시 탱크 앞 대기	A8-동작 생략	작업자가 대기하지 않음	작업 3.2.5 수행 시	• 10분 이내에 경보 감지하지 못할 경우 탱크 과충전	• 작업자가 부담을 느끼지 않도록 작업 스케줄 개선	• 미대기 시 발생 가능한 위험에 대해 설명	• 2차 영역에 경보 반박 • 경보 미인지시 충전 중지하도록 자동 인터록 설치
3.2.5 최후 중량 경보 취소	A8-동작 생략	최종 중량 경보를 초기 중량 경보로 인지	복구 방법 없음	• 탱크 과충전	• 두 경보 소리의 차이를 체크리스트에 제공	• 작업자들에게 두 경보 소리의 차이에 대해 주의하게 함	• 초기와 최종 중량 경보에 완전히 다른 소리 사용
4.1.3 탱크 밸브 닫음	A8-동작 생략	탱크 밸브를 닫지 않음	작업 4.2.1 수행 시	• 4.2.1에서 압력 확인 시 압력 미탐지	• 행동에 대한 별도의 확인 • 체크리스트 사용	• 작업자가 에러 결과를 알 수 있게 설명	• 에러 확률을 줄이기 위한 밸브 포지션 인디케이터
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

HEART

Human Error Assessment and Reduction Technique

- 복잡한 시스템에서 휴먼에러 가능성 예측 및 정량화
- 작업에 대한 에러발생조건(EPCS; Error Producing Conditions) 확인
- 절차
 - Step 1. 분석 대상 작업/시나리오 결정
 - Step 2. 계층적 작업 분석
 - Step 3. 스크리닝 절차
 - Step 4. 작업 불신뢰도 분류
 - Step 5. 에러발생조건 확인
 - Step 6. 에러발생조건의 효과 비중 평가 (0=Low ~ 1=High)
 - Step 7. 개선 대책 도출
 - Step 8. 문서화

HEART

Human Error Assessment and Reduction Technique

에러발생조건 (EPC) (일부)	에러율 최대 변화량
잠재적으로 중요하지만 드물게 또는 새롭게 발생하는 낯선 상태	×17
에러 탐지와 수정을 위한 시간의 부족	×11
낮은 신호 대 잡음 비	×10
요구되는 수행기준의 모호함	×5
인식된 위험과 실제 위험 사이의 불일치	×4
모호하거나 잘못된 시스템 피드백	×4
조작자의 경험 미숙	×3
거의 또는 전혀 독립적이지 않은 산출물의 테스트	×3
단기적인 목표와 장기적인 목표 사이의 상충	×2.5
사실 확인을 위한 정보 입력 채널의 다양성 부족	×2
작업의 요구와 개인의 교육 수준 사이의 불일치	×2
신뢰할 수 없는 계측	×1.6
조작자의 능력과 경험을 뛰어넘는 절대적 판단의 필요	×1.6
기능과 책임의 불분명한 할당	×1.6

유형	작업 (일부)	작업자 에러율 기준치 (5~95%ile)
A	완전히 낯선, 결과를 예측하기 어려운 속도로 수행된 작업	0.55 (0.35~0.97)
B	감독 또는 절차 없이 한번에 새로운 상태로 변경하거나 이전 상태로 복원하는 작업	0.26 (0.14~0.42)
C	비교적 단순한, 주의가 부족한 상태로 또는 빠르게 수행되는 작업	0.16 (0.12~0.28)
D	일상적이고 많이 연습된, 비교적 낮은 수준의 기술을 요하는 빠른 작업	0.09 (0.06~0.13)
E	절차에 따라 확인하면서 새로운 상태로 변경하거나 이전 상태로 복원하는 작업	0.02 (0.007~0.045)
F	완전히 익숙한, 잘 설계되고 충분히 연습된, 시간당 몇 번씩 발생하는 일상적 작업이 적절한 지식과 경험을 갖춘 사람에 의해 에러를 복구할만한 충분한 시간 동안에 수행되는 경우	0.003 (0.0008~0.009)

정성적 작업자 신뢰성 평가의 예: 일상적 작업

작업 유형 - F		에러율 기준치 - 0.003	
에러 산출 상태	에러율 최대 변화량	효과 비중	평가 결과
경험 부족	×3	0.4	$(3-1) \times 0.4 + 1 = 1.8$
학습된 것과 반대된 작업	×6	1.0	$(6-1) \times 1.0 + 1 = 6.0$
위험에 대한 인식 불일치	×4	0.8	$(4-1) \times 0.8 + 1 = 3.4$
목표간 상충 관계	×2.5	0.8	$(2.5-1) \times 0.8 + 1 = 2.2$
낮은 의욕	×1.2	0.6	$(1.2-1) \times 0.6 + 1 = 1.12$

에러 발생 확률 = 0.27 ($0.003 \times 1.8 \times 6.0 \times 3.4 \times 2.2 \times 1.12$)

화학설비 휴먼에러 관련 인적요인 분석

- 휴먼에러의 근본 원인이 되는 인적요인 파악
 - 수행도 형성 인자(PSFs; Performance Shaping Factors) 관련 문헌 조사
 - 인간공학 참고 문헌
 - 기존 작업자 신뢰성 평가기법
 - RBPS 및 COMAH 인적요인 관련 항목
- 인적요인 상대적 중요도 결정
 - 대상 화학설비 사업장 선정
 - 지역, 업종, 규모 등 고려
 - 주요 사업장 안전관리자 및 작업자 대상 심층 인터뷰
 - AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법 활용

화학설비 휴먼에러 관련 인적요인 분석

<인적요인 분류별 수준 및 에러 계수 (Hallbert et al., 2007) >

인적요인 분류	인적요인 수준	에러 계수	인적요인 분류	인적요인 수준	에러 계수
주어진 작업 시간 (인원 문제 포함)	•불충분한 시간 •거의 충분한 시간 (평균 시간의 약 66.6%) •평균 시간 •충분한 시간 (평균 시간의 1~2배, 20분 초과) •여유로운 시간 (평균 시간의 2배 이상, 20분 초과)	$P(\text{failure}) = 100\%$ 10 1 0.1 0.01	절차	•이용이 불가능한 수준 •불완전한 수준 •이용 가능하지만 빈약한 수준 •보통 •진산/증상에 기반함	50 20 5 0.5 1
스트레스 및 스트레스 요인 (인원 문제 포함)	•매우 높음 •높음 •보통	5 2 1	인간-기계 인터페이스 (도구 포함)	•누락/오해의 소지가 있음 •열악함 •보통 •좋음	50 10 1 0.5
작업 난이도	•매우 복잡한 작업 •약간 복잡한 작업 •보통의 작업 •명확한 진단 작업	5 2 1 0.1	업무에 대 한 적성	•부적합 (과다한 피로, 약물 복용, 병, 컨디션 난조) •신체능력저하 •평균	$P(\text{failure}) = 100\%$ 5 1
경험 및 훈련 정도	•낮음 •보통 •높음	10 1 0.5	작업 공정 및 감독	•빈약함 •보통 •좋음	2 1 0.8
작업 환경	•열악함 •좋음	5 1	의사소통	•의사소통 단절 혹은 의사소통 시스템이 간섭받거나 손상됨 •구두 의사소통 규칙에 대한 표준이 없음 •의사소통 표준이 잘 구현되고 실행됨	10 5 1

공정안전관리체계에서의 휴먼에러 방지활동 평가

<국가별 PSM 인적요인 반영 동향>

국가	주관 기관	기존 현황	제도개선 연구동향
미국	화학기술자협회(AICHE) 산하 화학공정안전센터(CCPs, Center for Chemical Process Safety)	OSHA의 PSM규정 중 공정위험분석(1919.119(e))에서만 인적요인을 포함하여 리스크 분석을 실시하도록 규정 (29 CFR 1910.119)	기존 공정안전관리(PSM) 상의 인적요인(Human Factor)을 포함한 공정안전문화와 관리체계 향상을 위하여 2007년에 리스크기반 공정안전(RBPS) 관리체계를 제시
영국	보건안전청(HSE)	COMAH 규정 중 리스크 평가에서 인적요인을 포함하여 실시하도록 규정	- 공정안전관리 활동에 인적요인의 적용 확대를 위하여 연구 - 현재 HSE의 Safety Report Assessment Manual 개발·활용
한국	고용노동부	공정안전보고서의 제출·심사 등에 관한 규정 제29조(위험성평가기법)에서 작업자실수분석기법을 선정할 수 있도록 규정	이번 연구를 통해 방향 정립

※ Source: Center for Chemical Process Safety, Risk Based Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, 2007.
 Health and Safety Executive, The promotion of human factors in the onshore and offshore hazardous industries, Health and Safety Executive, 2003.
 Health and Safety Executive (HSE), The Safety Report Assessment Manual.

공정안전관리체계에서의 휴먼에러 방지활동 평가

<RBPS 상의 인적요인 요구항목 예시>

RBPS 항목	인적요인 요구항목
사고 조사	• 사고조사 절차서에는 사고발생에 영향을 미친 인적요인을 파악할 수 있도록 해야 함
유해위험요인 파악 및 리스 크 분석/공정 안전문화	• 설비결함 및 휴먼에러 유발요인을 최소화할 수 있도록 설비와 공정을 설계하여야 함 • 보고서에 공정의 설계 및 운전에서 발생가능한 휴먼에러 유형, 발생 시나리오가 작성되어야 함 • 인적요인 분석 시 다양한 인적요인 기법을 적용하여 인간의 행동에 영향을 미치는 요인을 파악해야 함 • 절차서와 현장의 라벨 간 불일치 여부를 파악해야 함 • 필요 시 투입량, 작업빈도에서 실수를 유발할 수 있는 작업이 있는지를 확인해야 함 • 비정상 운전의 경우, 제어실 운전원이 계산할 필요가 있는 상황이 있는지를 확인해야 함 • 필요 시 비상대피로 등의 표시가 명확한지 확인해야 함
공정지식 관리	• 물질혼합 시 발생가능한 휴먼에러 유발요인(라벨링 또는 용기 칼라표시 등)과 함께 발생가능한 결과를 파악해야 함

※ Source: Center for Chemical Process Safety, Risk Based Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, 2007.

공정안전관리체계에서의 휴먼에러 방지활동 평가

<영국 HSE의 Safety Report Assessment Manual 상의 인적요인 평가항목 예시>

Section	인적요인 요구항목
10. 사전 리스크 평가	•유해위험요인을 파악하고 분석하는 전문가의 역량이 확보되어야 함 •평가 시 인간의 행동이 어떻게 중대사고의 발생 및 결과에 영향을 미치는지 명시되어야 함 •리스크 평가 시 인적요인을 고려하여야 함 •휴먼에러의 발생 가능성 및 관련된 휴먼에러 유형이 명확해야 함 •사고발생 시나리오에서 단계별로 발생가능한 휴먼에러를 작성해야 함
11. 방침 및 안 전관리체계	•새로운 설비의 설계 및 구매 시 Man-Machine Interface를 고려하여야 함 •리스크 평가 시 인적요인을 반영하기 위하여 운전원을 참여시켜야 함 •사고조사 시 인적 원인과 관리적 원인을 파악해야 함
12. 기술 측면	•중대사고를 유발할 수 있는 모든 가능한 직접원인에 휴먼에러가 포함되어야 함 •운전원 등이 비상사태에 충분히 대응할 수 있도록 공정이 배치되어야 함 등

※ Source: Health and Safety Executive (HSE), The Safety Report Assessment Manual.

국내 화학설비의 인적요인 관련 개선활동 평가방안 제시

- 휴먼에러 방지활동의 평가 기준 및 평가 방법 제시
 - PSM 인적요인 반영 실태 및 계획 벤치마킹 (미국, 영국, 독일 등)
 - 중대산업사고 예방센터 감독관 자문

ILLUSTRATIVE

구 분	휴먼에러 방지활동 평가항목 예시
인적요인에 대한 인지	전 직원이 인적요인이 무엇이고 작업에 어떻게 영향을 미치는지 이해하고 있는가?
리스크 평가 시 휴먼에러 반영	휴먼에러를 파악 및 정량화하는 전문가와 공동으로 리스크 평가를 수행하고 있는가? 리스크에 인간이 어떻게 영향을 미치고 이를 어떻게 최소화시킬 수 있는지 명확히 이해하고 있는가?
사건 및 사고조사	전 직원에 대한 교육훈련을 통해 휴먼에러를 포함한 근본원인분석을 이해하고 있는가? 모든 사건/사고 조사보고서의 개선방안을 추적 관리하는 시스템을 보유하고 있는가? 아차사고를 조사하여 사고발생으로 이어질 수 있는 원인을 파악하는 시스템을 보유하고 있는가?
안전관리시스템	성과측정을 위하여 공정안전 데이터를 사용하고 있는가?
절차서	안전운전절차서에 휴먼에러를 방지하기 위한 방법이 작성되어 있는가?
의사소통	모든 의사소통 체계에 문제가 없는지를 평가하고 있는가? 의사소통 체계가 단절되었을 경우, 표준화된 대체 방법을 구비하고 있는가?
역량	업무별 역량평가시스템을 구비하고 있는가?
유지보수	유지보수 기술자가 장치수명을 결정하는 활동에 참여하고 있는가?
인간-기계 상호작용	설계단계부터 작업자(사용자)가 참여하고 있는가?
제품 및 서비스	제품/서비스에서 휴먼에러를 최소화할 수 있는 사용 편의성 및 안전성을 고려함으로써 인적요인을 사업성장 기회로 활용하고 있는가?

화학설비의 휴먼에러 방지를 위한 개선방안 제시

- 휴먼에러 방지를 위한 인적요인 개선방안 제시
 - 인적요인 별 개선방안 도출
 - 공학적 개선방안: 작업장 설비, 작업 환경, 인간-기계 인터페이스 등
 - 관리적 개선방안: 인원 배치, 작업 절차, 조직 문화 등
 - 개선방안 관련 기존문헌 참고
 - RBPS, COMAH 등 국외 공정안전관리 제도 평가 항목 참고
 - 인간공학 및 안전 분야 전문가 자문

기대효과 및 활용방안

■ 기대효과

- 화학설비 사업장의 휴먼에러사고에 대한 경각심 및 인식 증대
- 휴먼에러사고 발생 위험 파악 및 사고방지 활동 증가
- 공정안전수준 향상으로 인한 중대산업사고 방지

■ 활용방안

- 휴먼에러사고 분석 결과
→ 휴먼에러사고 관련 교육자료
- 작업자 신뢰성 평가기법
→ 휴먼에러 가능 요소 파악, 발생 가능성 예측, 사고 방지
- 작업자 신뢰성 평가기법 개발 방법론
→ 타 고위험 산업분야의 작업자 신뢰성 평가기법 개발
- 화학설비의 인적요인 관련 개선활동 평가방안
→ 공정안전보고서 이행상태 평가제도 반영