



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

사업장 안전보건관리체계 향상을 위한
위험성평가 실행력 강화방안 연구
- 사고분석기법과 설계안전기법 활용 -

A Study on the Implementation of Risk
Assessment to Improve Occupational Safety and
Health Management System in the Workplace
- Application of Accident Analysis & Design Solution -

울산대학교 대학원
산업경영공학과
김 경 환

사업장 안전보건관리체계 향상을 위한
위험성평가 실행력 강화방안 연구
- 사고분석기법과 설계안전기법 활용 -

지도교수 정 기 효

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2023년 6월

울산대학교 대학원
산업경영공학과
김 경 환

김경환의 공학박사 학위논문을 인준함

심사위원	박창권	
심사위원	정기효	
심사위원	이수동	
심사위원	황규선	
심사위원	박주동	

울산대학교 대학원
2023년 6월

국 문 요 약

우리나라는 경제적으로 단기간 고도성장을 이룩하였으나 산업안전보건 측면에서는 OECD 국가 중 최하위 수준이다. 과거 20년간의 지속적인 산재감소 노력에도 불구하고 영국 등 유럽 주요 선진국과 비교할 때 4~10배 높은 산업재해발생률을 나타내고 있다. 또한 2018년 화력발전소에서 발생한 끼임 사고, 2020년 물류냉동창고 건설현장에서 발생한 화재사고, 2022년 주상복합 건설현장에서 콘크리트 타설 중 발생한 붕괴·매몰사고 등 대형사고의 연이은 발생은 사회적인 불안감을 조성해 왔다. 이러한 산재사고의 근본원인은 사업장 스스로 위험요인을 발굴하여 제거하는 안전보건관리시스템의 부재와 안전문화의 결여에서 기인된 것으로 알려지고 있다.

그로 인해 2021년에는 사업장 안전보건관리체계의 구축 및 이행에 관한 의무를 경영책임자 등에게 부여하는 중대재해처벌법이 제정되었고, 2022년 말에는 정부 관계부처 합동으로 중대재해 감축 로드맵을 발표하며 기업 스스로 위험요인을 확인하고 개선하는 자기규율 예방체계를 확립할 것을 강조하였다. 건설업의 경우 공사금액, 공사기간, 공정 등 안전과 관련된 중요한 의사결정이 건설공사 착공 이전에 이뤄지므로, 2016년 건설기술진흥법 개정을 통해 설계안전성검토제도(Design for Safety)를 도입하였다. 여기에서 주목할 것은 안전보건관리체계, 자기규율 예방체계, 설계안전성검토제도 모두 위험성평가를 핵심수단으로 두고 있다는 점이다.

위험성평가란 사업장 내에 잠재되어 있는 유해·위험요인(Hazard)을 찾아내어 작업자들이 사망, 부상 또는 질병으로 이어질 수 있는 위험성(Risk)의 크기가 허용범위를 벗어나는 경우 위험성 감소대책을 수립·시행하는 것을 지속적으로 실행하는 사전 재해예방활동이다. 2013년 산업안전보건법 개정을 통해 위험성평가가 법제화되어 시행되지 약 10년이 되었으나, 사업장에서 제대로 정착되지 못하고 있다. 그 이유를 선행연구에서는 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 파악과 적절한 개선대책 선정의 어려움, 전문 인력 부족 때문인 것으로 밝히고 있다. 따라서 본 연구는 사업장의 자율안전보건관리체계를 향상시키기 위해서는 위험성평가 실행력 강화가 우선되어야 한다고 판단하여, 위험성평가의 현장 작동성에 도움을 줄 수 있는 방법으로써 사고분석기법(Accident Analysis)과 설계안전기법(Design Solution) 적용방안을 제시하였다.

본 연구는 위험성평가에 보완적으로 활용될 수 있는 사고분석기법으로 역학모형을 기반으로 한 미국 에너지부(Department Of Energy) 사고분석기법을 선정하였다. DOE 기법은 사고분석을 통해 사고원인을 직접원인, 사고를 직접적으로 일으키진 않았으나 사고발생 가능성을 증가시킨 기여원인, 그리고 사고발생 사업장의 관리시스템 결함과 관련이 깊은 근본원인으로 분류한다. 그리고 동종재해 재발방지를 위해 각 원인별로 실질적인 개선대책을 수립할 수 있게 한다. 따라서 본 연구는 위험

성평가의 유해·위험요인 파악과 그에 대한 개선대책 선정업무에 DOE 기법을 보완적으로 활용하는 모델을 제시하였다. 그리고 DOE 기법의 효과성을 검증하기 위해 건설업과 제조업에서 발생한 중대재해 각 1건을 대상으로 DOE 기법을 실제로 적용하여, 도출된 사고원인 및 개선대책이 위험성평가에 환류 될 수 있음을 증명하였다. 하인리히의 재해발생 피라미드(1:29:300)에 따르면 총 330건의 사고가 발생하는 경우 중대사고 1건, 경미한 사고 29건, 아차사고 300건의 비율로 발생하며, 29건의 경미한 사고와 300건의 아차사고를 줄이게 되면 중대사고 발생비율 또한 줄어들게 된다. 따라서 아차사고와 경미한 사고를 대상으로 DOE 기법을 적용하고 그 결과를 위험성평가에 환류 시킨다면, 중대재해를 보다 효과적으로 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

설계안전(Design for Safety)이란 설계자가 건설공사 착공 이전인 설계단계에서 위험성평가를 실시하여 유해·위험요인을 발굴하고, 허용기준을 초과한 위험성에 대해서는 개선대책을 수립하여 설계도서에 반영하는 재해예방활동이다. 하지만 설계자의 위험성평가와 시공에 대한 지식·경험부족으로 설계안전이 제대로 정착되지 못하고 있다. 선행연구에서 설계자가 설계도서 검토를 통해 위험성평가 시 유해·위험요인 도출과 적절한 설계안전대책을 수립하는 업무의 난이도를 매우 높게 여기는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구는 설계자의 위험성평가 업무에 도움을 줄 수 있는 방법으로서, 영국 등 안전선진국에서 적용되고 있는 설계안전기법(Design solution)을 활용할 것을 제시하였다.

본 연구는 영국 등 안전선진국에서 활용되고 있는 설계안전기법의 구체적인 활용 가이드를 제시하기 위하여, 과거 3년간 국내 건설현장에서 발생한 추락사망재해(680건)을 대상으로 설계안전기법 적용 시 예방가능 여부를 분석하였다. 그리고 재해 특성(공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점)과 설계안전 연관성에 대한 카이 제곱 교차분석을 실시하였다. 분석결과 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점 모두 설계안전기법과 연관된 재해빈도에서 유의한 차이를 나타냈다. 설계안전기법이 적용될 수 있는 공사종류(유지·보수, 공장·창고, 소규모 근린생활시설), 작업공종(철골작업, 지붕·판넬작업, 철거·해체작업, 도장·방수작업), 공사금액(20억원 미만) 등은 설계안전기법 적용 영역 파악 및 정책 입안 시에 유용하게 활용될 수 있다. 특히, 재해자가 추락 직전에 있었던 추락발생지점은 설계안전과 연관성이 높은 것으로 파악되었다. 이와 같은 결과는 설계자가 위험성평가 시 추락 관련 유해·위험요인 파악과 적정 설계안전기법을 선정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 본 연구는 사업장 안전보건관리체계 정착을 위한 위험성평가 실행력 강화방안으로 사고분석기법과 설계안전기법 적용을 제시하였다. 그리고 위험성평가의 유해·위험요인 예측과 적정 개선대책 선정 문제에 사고분석기법과 설계안전기법이 보완적으로 사용될 수 있음을 적용사례와 통계분석을 통해 검증하였다. 하지만, 국내 산업현장의 사고분석기법 활용도는 미미한 수준이며, 관련 전문인력도 부

족하므로 사고분석기법 활용 가이드, 교육프로그램의 개발 등 후속연구가 필요하다. 그리고 본 연구에서는 추락재해예방을 위한 설계안전기법 적용 가능성에 대해서만 분석하였고, 기존 설계안전기법 외 추가적으로 개발 가능한 기법들에 대한 연구는 이뤄지지 않았다. 따라서 다른 재해유형과 새로운 설계안전기법 적용 가능성에 대한 추가 연구·개발이 필요할 것으로 사료된다.

※ Keywords : 안전보건관리체계, 위험성평가, 사고분석기법, DOE 기법, 설계안전기법, 추락재해예방, 추락발생지점

- 목 차 -

국문요약..... i
그림 목차 vii
표 목차 ix

제1장 서 론

1.1 연구배경 1
1.2 연구목적 및 범위 6
1.3 논문의 구성 8

제2장 연구에 대한 이론적 배경

2.1 안전보건관리체계와 위험성평가 9
2.2 사고분석기법 (Accident Analysis) 13
2.2.1 1세대 사건순서모형 14
2.2.2 2세대 역학모형 14
2.2.3 3세대 시스템모형 16
2.2.4 안전보건관리체계와 사고모형 18
2.3 설계안전 (Design for Safety) 19
2.3.1 영국 CDM(Construction Design & Management) 제도 21
2.3.2 싱가포르 DfS 제도 22
2.3.3 미국 PtD(Prevention through Design) 22
2.3.4 국내 DfS 관련제도 및 문제점 22

제3장 위험성평가와 사고분석기법

3.1 연구 전략 및 방법	24
3.2 사고분석기법 선정	25
3.2.1 DOE 기법의 절차 및 방법	25
3.2.2 사고원인 분석 및 검증	28
3.3 건설업 적용사례	30
3.3.1 사실분석	30
3.3.2 방호벽 분석	31
3.3.3 변화 분석	33
3.3.4 E&CF 차트 작성	34
3.3.5 사고원인 분석	36
3.4 제조업 적용사례	37
3.4.1 사실분석	37
3.4.2 방호벽 분석	38
3.4.3 변화 분석	40
3.4.4 E&CF 차트 작성	41
3.4.5 사고원인 분석	41

제4장 위험성평가와 설계안전

4.1 연구 전략 및 방법	43
4.1.1 연구대상 데이터 선정	44
4.1.2 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성 분석 방법	44
4.1.3 통계분석 방법	46

4.2 분석결과	48
4.2.1 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성	48
4.2.2 재해특성별 설계안전기법 연관성	48
4.2.3 통계분석결과로 본 설계안전기법 적용 가능성	52
제5장 결 론	54
참고문헌	58
Abstract	62
부 록	
부록 1 본 연구에 적용된 설계안전기법(14종)	65
부록 2 추락사망재해와 설계안전기법 연관성 분석 매트릭스도	79

그림 목차

그림 1-1 한국과 주요 선진국의 사고사망만인을 비교	1
그림 1-2 최근 10년간 업종별 사고성 사망재해 발생현황(2013-2022)	2
그림 1-3 최근 10년간 건설업 추락사망재해 발생현황(2013-2022)	2
그림 1-4 중대재해 감축 로드맵에서 제시하는 위험성평가 단계별 개선안	4
그림 2-1 안전보건관리체계 구축을 위한 7가지 핵심요소	10
그림 2-2 위험성평가 Flow Chart	11
그림 2-3 하인리히의 도미노 모형	14
그림 2-4 제임스 리즌의 스위스 치즈 모형	14
그림 2-5 제임스 리즌의 조직유발사고 전개 모형	15
그림 2-6 Acci-Map 분석 예시	16
그림 2-7 FRAM 분석사례	17
그림 2-8 STAMP의 시스템 안전통제 구조	17
그림 2-9 Time / Safety Influence Curve	19
그림 2-10 프로젝트 기간에 따른 변수별 영향곡선	20
그림 2-11 CDM 설계안전 개념도	21
그림 3-1 DOE 사고분석 절차	26
그림 3-2 E&CF 차트 작성순서 예시	27
그림 3-3 변화 분석 개념	28
그림 3-4 필요성 평가(Judgment of Need) 개념도	29
그림 3-5 사고발생 위치	30
그림 3-6 붕괴재해 상황도	30

그림 3-7 사고발생 사업장 방호벽 체계도	31
그림 3-8 건설업 붕괴사고 E&CF 차트	35
그림 3-9 산소배관 폭발사고 발생지점	37
그림 3-10 사고발생 사업장 방호벽 체계도	38
그림 3-11 제조업 폭발사고 E&CF 차트	41
그림 4-1 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성 분석 매트릭스도 예시	46
그림 4-2 추락사망재해의 설계안전기법 연관성 빈도 분석	48

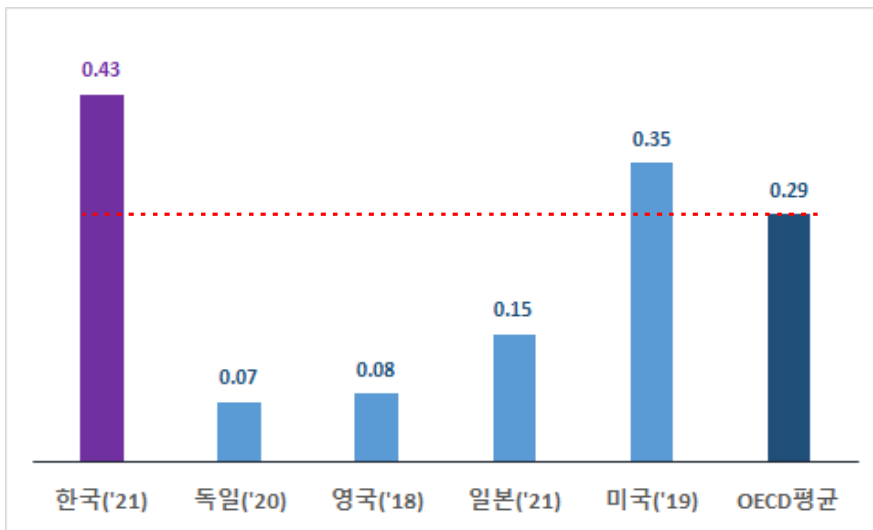
표 목차

표 3-1 건설업 붕괴사고 방호벽 분석표	32
표 3-2 건설업 붕괴사고 변화 분석표	34
표 3-3 제조업 폭발사고 방호벽 분석표	39
표 3-4 제조업 폭발사고 변화 분석표	40
표 4-1 본 연구에 적용된 설계안전기법(14종)	45
표 4-2 재해특성별 설계안전기법에 의해 예방 가능한 추락사망재해 빈도	49

제1장 서론

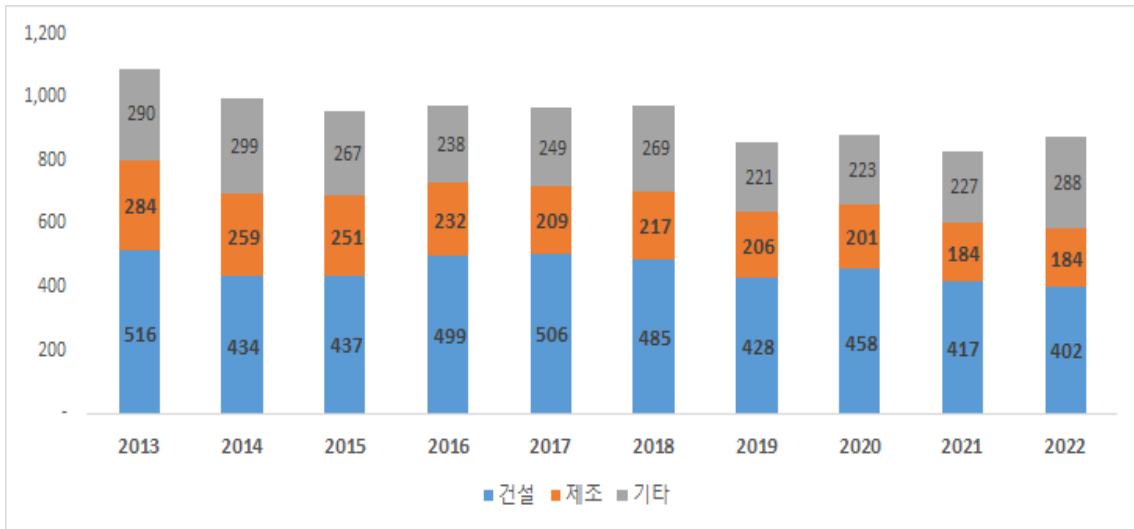
1.1 연구배경

우리나라는 경제적으로 단기간 고도성장을 이룩하였으나, 산업안전보건측면에서는 아직 후진성을 벗어나지 못하고 있다. 과거 20년간의 산재감소 노력에도 불구하고 유럽의 주요 선진국과 비교할 때 4~10배 높은 산업재해율을 나타내고 있다. 2021년 국내 산업현장에서 발생한 사고사망자수가 828명이고 사고사망만인율이 0.43‰로서 OECD 회원국(38개국) 중 34위에 해당하며, 이는 영국의 1970년대와 독일·일본의 1990년대의 수준과 비슷하다. 더구나 사고사망만인율은 8년째 0.4~0.5‰ 수준에서 정체되어 있으며, 특히 근로자수 50인 이상(건설업 공사금액 50억원 이상) 사업장의 중대재해는 최근 증가추세이다(고용노동부a, 2022).

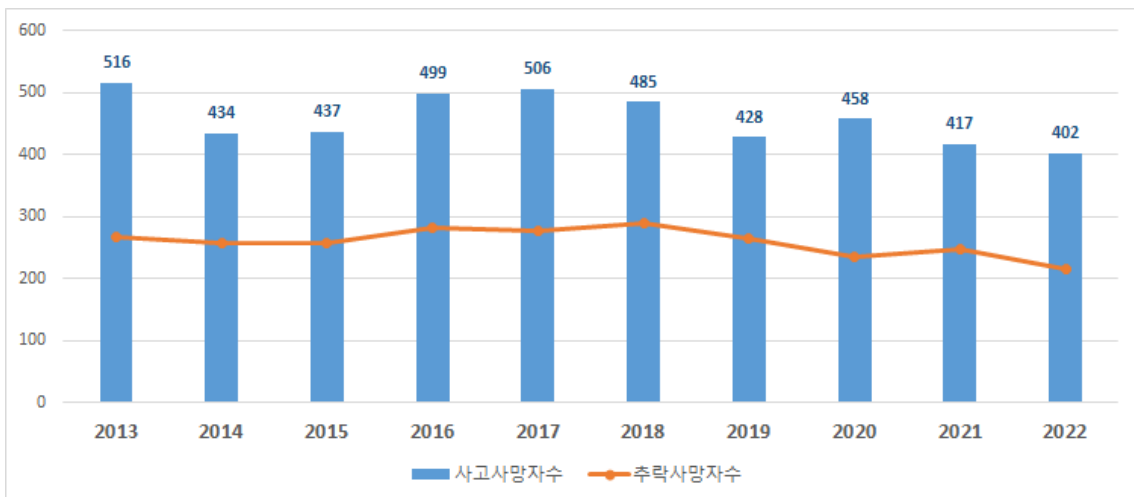


[그림 1-1] 한국과 주요 선진국의 사고사망만인율 비교(고용노동부b, 2022)

업종별로는 국내 산업현장에서 발생한 사고성사망재해 중 건설업 사망자가 절반 이상을 차지(2022. 12월 기준)하고 있으며, 제조업이 그 뒤를 이어 20% 정도의 비중을 차지하고 있다. 특히 건설업은 근로자 비중이 감소하고 있음에도 중대재해의 비중은 증가하고 있는 추세이며, 추락에 의한 사망자가 절반 이상을 차지하고 있다. 또한 2018년 화력발전소에서 발생한 끼임 사고, 2020년 물류냉동창고 건설현장에서 발생한 화재사고, 2022년 주상복합 건설현장에서 콘크리트 타설 중 발생한 붕괴·매몰사고 등 대형사고의 연이은 발생은 사회적인 불안감을 조성해 왔다. 이와 같이 대형사고 발생과 산재발생율이 높은 수준으로 정체되어 있는 근본원인은 사업장 스스로 위험요인을 발굴하고 제거하는 안전관리 시스템의 부재에 따른 것으로 알려지고 있다(고용노동부b, 2022).



[그림 1-2] 최근 10년간 업종별 사고성 사망재해 발생현황(2013-2022)



[그림 1-3] 최근 10년간 건설업 추락사망재해 발생현황(2013-2022)

위에서 언급한 바와 같이 사업장 안전보건관리체계 미비 및 안전문화의 결여로 인해 산재사망만인율이 높은 수준으로 정체되어 있다고 판단하여, 최근에는 사업장 안전보건 관리체계 구축 등 안전보건 확보 의무를 사업주와 경영책임자 등에게 부여하는 중대재해 처벌 등에 관한 법률(이하, 중대재해처벌법)이 제정되었다. 중대재해처벌법은 중대재해가 발생하면 산업안전보건법을 위반한 직접 행위자와는 별개로 조직, 예산 등 안전보건 상의 의사결정권을 가진 경영자를 처벌함으로써 중대재해를 사전에 방지하고자 제정되었다. 여기에서 사업주는 개인사업주만을 의미하며, 경영책임자 등은 중대재해처벌법 제2조에서 “사업을 대표하고 사업을 총괄하는 권한과 책임이 있는 사람 또는 이에 준하여 안전보건에 관한 업무를 담당하는 사람”으로 정의하고 있다. 따라서 사업주와 경영책임자란 사업 전반의 안전·보건에 관한 조직, 인력 및 예산 등에 관하여 총괄하는 권한과 책임을 가진 사람으로 해석된다(고용노동부, 2021).

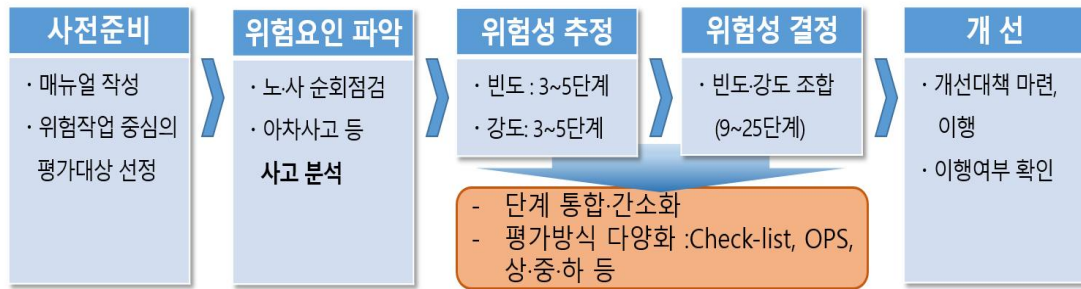
중대재해처벌법에 의거 사업주와 경영책임자에게 주어지는 안전보건확보의무(법 제4조)는 총 4가지이며, 이 중에서 가장 대표적인 의무가 동법 제4조 제1항에서 규정하고 있는 “재해예방에 필요한 인력 및 예산 등 안전보건관리체계의 구축 및 그 이행에 관한 조치”이다. “안전보건관리체계의 구축 및 이행”이란 사업주에게 고용되어 일하는 종사자의 생명과 건강보호를 위하여 사업장 스스로 유해·위험요인을 찾아내어 제거·대체 등 통제방안을 마련하고 이를 지속적으로 이행·개선하는 체계적인 재해예방활동으로 정의될 수 있다.

중대재해처벌법 시행령 제4조(안전보건관리체계의 구축 및 이행조치)에서는 사업장의 안전보건관리체계 구축을 위한 9가지 구성항목을 기술하고 있으며, 이중 핵심항목이 “사업장 특성에 따른 유해·위험요인을 확인하여 개선하는 업무절차”인 위험성평가이다. 위험성평가란 사고를 사전에 예방하기 위해 고안된 기법으로서, 사업장 내에 잠재된 유해·위험요인(Hazard)을 찾아내어, 이로 인해 작업자들이 사망, 부상 또는 질병으로 이어질 수 있는 위험성(Risk)의 크기가 허용기준을 벗어나는 경우 위험성 감소대책을 수립하여 실행함으로써 위험성을 허용기준 이하로 관리하는 활동을 말한다(고용노동부, 2023). 위험성평가는 2012년에 고시로 제정되었고, 2013년에 산업안전보건법 개정을 통해 법제화되어 시행된 지 약 10년이 지났다. 하지만 여전히 사업장에 제대로 정착되지 못하고, 서류작성에 치중하는 등 형식적으로 진행되고 있다. 위험성평가의 작동성이 미흡한 이유에 대한 선행연구 설문조사결과에 따르면 전문인력 부족, 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 파악과 개선대책 수립 업무의 어려움 때문인 것으로 조사되었다(서용하, 2015).

건설업은 일반적으로 도급계약을 통해 정해진 공사기간과 공사금액 내에서 건설 프로젝트를 완성해야 하는 노동집약적인 특성을 지니고 있다. 그리고 건설공사 착공 이전 초기단계에서 발주자와 설계자에 의해 공사금액, 공정, 품질 등 작업자 안전보건에 영향을 미치는 중요한 의사결정들이 이루어진다. 따라서 건설업 산업재해를 예방하기 위해서는 착공 후 시공단계에서 위험관리활동을 수행하는 것보다 프로젝트 초기인 설계단계에서 위험관리를 하는 것이 더욱 효과적이라는 의견이 지배적이다. 구체적으로 설계자가 설계단계에서 위험성평가를 실시하여 유해·위험요인(Hazard)을 발굴하고, 설계안전(Design for Safety, 이하 DfS)을 통해 그 위험성을 제거·감소시킨 후 그 결과를 설계도서에 반영할 수 있다. 영국 등 안전선진국에서는 약 30년 전부터 설계안전을 법 제도화하여 수행해 오고 있으며, 국내에서도 국토교통부가 2016년 건설기술진흥법 개정을 통해 설계안전성검토제도를 도입하여 시행 중에 있다. 하지만 설계안전에 대한 설계자 등의 인식 및 전문역량 부족 등으로 인해 제대로 정착되지 못하고 있다(신원상a, 2019).

최근 정부에서는 처벌 등 규제만으로는 재해감소에 한계가 있다는 인식하에 사업장 자율적으로 위험요인을 진단 및 개선하자는 내용이 담긴 “중대재해 감축 로드맵”을 발표하였다. 발표내용에 따르면 기업 스스로 “자기규율 예방체계”를 확립하도록 강조하고 있으며, 그 핵심수단을 위험성평가로 두고 있다. 그리고 위험성평

가 시 그간 포괄적으로 접근해옴으로써 개인·기업 간의 수행결과의 편차발생 등을 야기했던 유해·위험요인 파악단계의 경우, 아차사고 및 중대재해를 활용하여 유해·위험요인을 찾는 내용이 포함되어 있다[그림 1-4]. 또한 중소기업 등이 쉽고 간편하게 활용할 수 있는 위험성평가 기법을 개발하여 보급하겠다는 내용도 담겨있다(고용노동부b, 2022).



[그림 1-4] 중대재해 감축 로드맵에서 제시하는 위험성평가 단계별 개선안

지금까지 논의한 내용을 정리하면, 최근 정부에서는 국내 산업현장의 사고성 사망재해 발생율이 높은 원인을 사업장 안전관리시스템의 부재 또는 미비에 기인한 것으로 판단하여 사업장 안전보건관리체계를 구축하는데 중점을 두고 있다. 2021년 중대재해처벌법 제정을 통해 기업에게 안전보건관리체계의 구축 및 이행 의무를 부여하고 있으며, 2023년부터는 기업 스스로 자기규율 예방체계를 확립하여 위험요인을 관리하도록 독려하고 있다. 건설업의 경우 2016년 건설기술진흥법 개정을 통해 설계안전성검토제도가 도입되어 공공발주공사를 대상으로 시행되고 있고, 2019년에는 산업안전보건법 개정을 통해 DfS를 민간영역으로 확대하였다. 여기에서 주목할 점은 중대재해처벌법의 안전보건관리체계, 중대재해 감축 로드맵의 자기규율 예방체계, 건설기술진흥법의 설계안전성검토제도 모두 위험성평가를 핵심수단으로 두고 있다는 사실이다.

하지만 산업안전보건법 및 관련고시에서 정하고 있는 위험성평가 절차 중 유해·위험요인의 파악과 개선대책의 수립업무에 대해 사업장에서 어려움을 겪고 있는 것으로 조사되었으며, 건설업의 경우 DfS와 관련하여 설계단계에서 위험성평가를 실시할 수 있는 설계자가 거의 없는 것으로 파악되었다(유성곤, 2018).

따라서, 사업장에서 위험성평가를 중심으로 한 안전보건관리체계를 효과적으로 정착시키기 위해서는 사업장 위험성평가의 실행력이 우선되어야 한다. 그리고 위험성평가의 작동성 확보를 위해서는 유해·위험요인 예측과 개선대책 선정의 어려움을 해소할 수 있어야 하며, 이 문제에 대해 사고분석기법이 효과적인 방안이 될 수 있다. 하인리히의 1:29:300 이론(재해발생 피라미드)에 따르면, 총 330건의 사고가 발생하는 경우 중대사고 1건, 경미한 사고 29건, 아차사고 300건의 비율로 발생하게

되며, 경미한 사고와 아차사고 발생 건수를 줄임으로써 중대사고 발생비율을 줄일 수 있게 된다. 따라서 경미한 사고 또는 아차사고를 대상으로 사고분석을 실시하여 사고를 일으킨 유해·위험요인을 파악하고 이를 시스템적으로 개선한다면, 중대재해를 보다 효과적으로 예방할 수 있을 것이다.

그리고 건설업의 경우 설계자에게 설계단계에서 위험성평가를 효과적으로 수행할 수 있는 가이드가 제공된다면 유해·위험요인 파악 및 설계안전 적용을 통해 기존 설계도서에 내포된 위험성을 제거·감소시킬 수 있게 되고, 시공단계에서 다뤄야 할 유해·위험요인이 크게 줄어들게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 사업장 안전보건관리체계 향상방법으로서, 제조·건설업을 대상으로 한 사고분석기법(Accident Analysis)과 건설업을 대상으로 한 설계안전기법(Design Solution)을 위험성평가에 보완적으로 활용하는 방안을 제시하고자 한다.

1.2 연구목적 및 범위

국내 산업현장의 높은 산업재해율과 사회적 불안감을 조성하는 대형사고의 연이은 발생에 대한 근본원인을 사업장 안전관리시스템의 부재와 안전문화의 결여 때문이라는 인식하에 2021년에는 중대재해처벌법이 제정되어 2022년 1월부터 시행되고 있고, 2022년 11월에는 정부 관계부처 합동으로 중대재해 감축 로드맵을 발표하면서 기업 스스로 위험요인을 진단하고 개선하는 자기규율 예방체계 확립을 핵심과제로 제시하였다. 건설업의 경우 2016년 건설기술진흥법 개정을 통하여 설계안전성검토제도를 도입하여 공공발주공사 착공 전 설계단계에서 안전성검토를 수행토록 하였고, 2019년에는 산업안전보건법 제2차 전부개정을 통하여 설계안전의무가 민간으로 확대되었다. 한 가지 주목할 것은 안전보건관리체계, 자기규율 예방체계, 그리고 설계안전성검토제도 모두 위험성평가를 핵심 수단으로 활용하고 있다는 점이다.

위험성평가란 사업장 내 잠재된 유해·위험요인(Hazard)을 사전에 발굴하여, 작업자들이 사망, 부상 또는 질병으로 이어질 수 있는 위험성(Risk)의 크기가 허용기준을 벗어나는 경우 위험성 감소대책을 수립·실행하는 재해예방활동으로서, 2013년 산업안전보건법조항으로 제정되어 시행된 지 약 10년이 지났음에도 사업장에 제대로 정착되지 못하고 있다. 그 이유를 분석한 선행연구 설문조사결과에 따르면, 전문인력 부족, 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 파악과 개선대책 수립업무의 어려움 때문인 것으로 조사되었다(서용하, 2015).

따라서 본 연구에서는 그간 위험성평가에 대해 포괄적으로 접근해 오으로써 발생하는 업무수행상의 어려움, 즉 유해·위험요인에 대한 예측가능성과 적절한 개선대책의 선정문제를 해소하여 사업장에 위험성평가 실행력이 확보될 수 있도록 다음 두 가지 방안을 제시하고자 한다.

첫째는 아차사고(Near miss) 등을 대상으로 사고분석기법을 적용하여 사고를 일으킨 유해·위험요인과 이를 제어하지 못한 해당 사업장의 관리시스템 결함을 도출하는 방법이다. 1건의 중대재해가 발생하기 전에 29건의 경미한 사고와 300건의 아차사고를 대상으로 사고분석기법을 적용하여 사고요인(Causal factor)을 도출한 후 이를 위험성평가에 환류(Feed-back)시킨다면 유해·위험요인에 대한 예측성 문제를 상당부분 해소할 수 있을 것이다. 실례로 미국 에너지부에서 발전소 등의 운영상의 안전을 확보하기 위해 발간한 핸드북에 따르면, 사업장 내 발생한 크고 작은 사고들을 분석하여 해당 사업장 관리시스템의 적정성을 검토하고 개선하는 방안을 제시하고 있다(미국에너지부b, 2012).

둘째는 건설업의 경우 설계자가 설계단계에서 유해·위험요인의 파악하고 그 결과를 설계도서에 반영하는 업무에 영국 등 선진국에서 적용되고 있는 설계안전기법(Design solution)을 활용하도록 가이드를 제공하는 것이다. 설계단계에서 위험성평가를 효과적으로 실시하여 그 결과를 설계도서에 반영할 수 있다면, 시공단계에서 시

공자가 관리해야 할 위험의 양이 줄어들게 되므로 재해감소효과를 얻을 수 있을 것이다.

그리고 위험성평가 실행력 강화를 위해 위에서 제시한 두 가지 방안의 핵심내용을 파악하고, 사업장 적용 가능성을 검증하기 위해 다음 사항에 대하여 연구를 진행하였다.

- i) 위험성평가와 중대재해처벌법의 안전보건관리체계의 법적 구성항목, 절차 및 방법, 운영상의 문제점에 관한 연구
- ii) 산업발전에 따라 발생하는 사고형태의 변화와 그에 따라 고안된 사고분석기법들의 종류 및 특성에 관한 연구
- iii) 설계안전(Design for Safety) 이론과 영국 등 주요선진국의 DfS 제도 및 국내 관련 법제도의 주요내용에 관한 연구
- iv) 위험성평가와 안전보건관리체계에 적용될 수 있는 사고분석기법 선정 및 그 이유와 제조업·건설업 적용사례 연구
- v) 건설업 설계단계에서 위험성평가 시 설계자가 참조할 수 있는 국외 설계안전기법(Design solution)의 효과성에 관한 연구

1.3 논문의 구성

위험성평가를 중심으로 한 사업장 안전보건관리체계의 향상을 위한 두 가지 방안인 사고분석기법(제조업·건설업)과 설계안전기법(건설업)의 적용 및 효과성을 검증하고자 본 논문은 총 5장으로 구성되어 다음과 같은 순서와 내용으로 전개하였다..

제1장 서론에서는 본 연구 주제를 선정하게 된 배경과 연구목적을 밝히고 이를 달성하기 위한 연구 범위와 방법에 대해 서술하고 있다.

제2장 연구에 대한 이론적 배경에서는 산업재해 발생의 근본원인인 안전보건관리시스템 부재에 대한 대책으로써 최근 제정된 중대재해처벌법의 안전보건관리체계와 그 핵심수단인 위험성평가, 그리고 위험성평가에 보완적으로 활용할 수 있는 사고분석기법의 종류 및 특성, 마지막으로 건설업 설계안전성검토(Design for Safety) 제도의 배경이론, 절차 및 방법 등에 대한 선행연구 결과를 정리하였다.

제3장 위험성평가와 사고분석기법에서는 사업장 안전보건관리체계와 그 핵심수단인 위험성평가에 보완적으로 활용될 수 있는 사고분석기법을 선정(미국 에너지부 사고분석기법)하여 절차 및 방법에 대해 연구하였고, 제조업과 건설업에서 발생한 중대재해 각 1건에 대해 실제 적용해 봄으로써 도출된 분석결과가 위험성평가 및 안전보건관리체계에 환류 될 수 있음을 기술하였다.

제4장 위험성평가와 설계안전에서는 설계자가 설계단계에서 위험성평가 시 참조할 수 있는 국외 설계안전기법(Design solution) 중 추락재해예방 기법 14가지를 선정한 후, 과거 3년간 국내 건설현장에서 발생한 추락사망재해 680건과의 연관성 및 통계적 유의성 등을 분석하였다. 그 결과 추락사망재해 예방을 위해 설계안전기법이 적용될 수 있는 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점을 정의하였고, 각 건별로 재해를 예방할 수 있는 설계안전기법 선정방법을 제시하였다.

마지막으로 제5장 결론에서는 위험성평가를 기반으로 한 사업장 안전보건관리체계의 특성 및 문제점에 대해 정리하고, 앞에서 논의한 사고분석기법과 설계안전기법이 안전보건관리체계와 위험성평가에 보완적으로 활용될 수 있음을 논의한 후, 향후 추가연구가 필요한 사항들에 대해 언급하였다.

제 2 장 연구에 대한 이론적 배경

2.1 안전보건관리체계와 위험성평가

서론에서 언급한 바와 같이 중대재해가 지속적으로 발생하는 근본원인을 사업장 안전보건관리체계의 부재로 인한 것으로 인식되고 있다. 산업안전보건법을 위반한 직접 행위자만을 처벌하는 것만으로는 재해예방에 한계가 있다고 판단한 것이다. 그러므로 조식, 예산 등 근로자 안전보건에 관한 의사결정권을 가지고 있는 사업주와 경영책임자 등의 역할이 중요하므로, 이들에게 안전보건에 관한 의무를 부여함으로써 중대재해를 사전에 예방하고자 중대재해처벌법이 제정되었다. 여기에서 사업주는 개인사업주만을 의미하며, 경영책임자 등은 “사업을 대표하고 사업을 총괄하는 권한과 책임이 있는 사람 또는 이에 준하여 안전보건에 관한 업무를 담당하는 사람”을 의미한다. 중대재해처벌법은 경영책임자등이 동법 제4조 또는 제5조에서 정하고 있는 안전보건 확보의무를 위반하여 종사자에게 중대재해가 발생한 경우에 처벌한다(김광수, 2022).

중대재해처벌법이 경영책임자등에게 부과하는 안전보건 확보의무는 총 4가지이며, 이중 대표적인 의무는 제4조 제1항 “인력 및 예산 등 안전보건관리체계의 구축 및 그 이행에 관한 조치”이다. 안전보건관리체계의 구축 및 이행은 종사자의 안전보건을 확보하기 위해 사업장 스스로 유해·위험요인을 찾아내어 제거·대체 등 통제방안을 마련하고 지속적으로 개선하는 체계적인 재해예방활동을 말한다(황동혁, 2022).

중대재해처벌법 시행령 제4조에서는 안전보건관리체계 구축 및 이행을 위해서 ① 안전보건 목표 및 방침 설정, ② 안전보건관리 조직, ③ 위험요인 확인 및 개선절차(위험성평가), ④ 인력 및 예산편성·집행, ⑤ 관계자에게 권한 및 예산 부여, ⑥ 안전관리자·보건관리자 등의 배치, ⑦ 근로자 참여, ⑧ 비상 시 대응절차, ⑨ 도급·용역·위탁 시 안전보건조치를 하도록 규정하고 있다. 이와 같은 안전보건관리체계의 9가지 구성항목은 경영진의 리더십, 책임과 권한의 부여, 근로자 참여를 강조하면서 2018년 국제표준화기구에서 제정한 안전보건경영시스템인 ISO 45001과 맥락을 같이하며(송경일, 2019), 한국산업안전보건공단의 안전보건경영시스템(KOSHA-MS)의 인증기준 내용과도 대부분 일치한다. 그리고 중대재해처벌법의 안전보건관리체계와 안전보건경영시스템은 위험성평가를 핵심수단으로 두고 있다. 안전보건관리체계(시스템)는 사업장 내 잠재된 위험을 효과적으로 관리·통제하기 위한 것으로서, 경영진의 리더십·목표·방침이 우선되어야 위험성평가를 실행할 수 있는 조직 및 예산이 편성되고, 관계자에게 필요한 권한과 책임이 부여되며 근로자가 적극적으로 참여해야 위험성평가가 원활히 작동될 수 있는 것이다(안전보건공단, 2021).



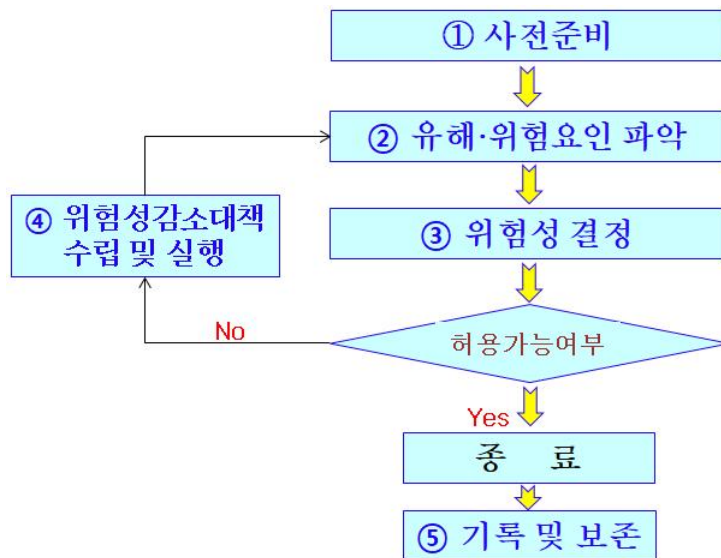
[그림 2-1] 안전보건관리체계 구축을 위한 7가지 핵심요소(고용노동부)

위험성평가를 태동시킨 역사적인 사건은 1979년 미국에서 발생한 TMI(Three Mile Island) 핵발전소 방사능 유출 사고이다. 이 사고를 계기로 인간-기계체계(Human-machine system)에서 인적 실수(Human error)가 안전관리측면에서 중요한 요소로 고려되기 시작하였으며, 점검·규제 위주의 수동적인 안전관리에서 벗어나 능동적으로 사전 재해예방활동을 수행하기 위해 위험성평가가 고안되었다(E. Hollnagel, 2014).

산업안전보건법 제36조에 따르면 사업주는 “건설물, 기계·기구·설비, 원재료, 가스, 증기, 분진, 근로자의 작업행동 또는 그 밖의 업무로 인한 유해·위험요인을 찾아내어 부상 및 질병으로 이어질 수 있는 위험성의 크기가 허용 가능한 범위인지 평가하고 그 결과에 따라 이 법과 이 법에 따른 명령에 따른 조치”를 하는 위험성평가를 실시하여야 한다. 그리고 위험성평가의 구체적인 절차와 방법은 사업장 위험성평가에 관한 지침(고용노동부 고시)에서 정하고 있다. 동 지침에 따르면 위험성평가 절차는 [그림 2-2]와 같이 ① 사전준비, ② 유해위험요인 파악, ③ 위험성 결정, ④ 위험성 감소대책 수립 및 실행, ⑤ 기록 및 보존 순으로 진행된다.

사전준비단계에서는 위험성평가 매뉴얼(위험성평가 실시규정)을 작성하고, 빈도·강도법 등 위험의 크기(위험성)를 판단하는 기준과 허용기준을 확정하며, 위험성평가에 활용될 수 있는 작업절차, 기계·기구 사양서, 물질안전보건자료 등 해당 사업장의 안전보건정보를 파악한다. 위험성평가의 핵심절차 중 하나인 유해·위험요인 파악단계에서는 사업장 순회점검, 근로자 제안제도, 청취조사, 안전보건자료 활용 등 사업장 실정에 맞는 유해·위험요인 파악방법을 선정하여 해당 사업장 내 잠재된 유해·위험요인을 도출해 낸다. 위험성결정단계에서는 파악된 유해·위험요인들이 근로자에게 노출되었을 때 얼마나 위험한지 허용가부를 결정하게 된다. 위험성결정 결과 허용기준을 초과한 유해·위험요인에 대해서는 위험성 감소대책을 수립

및 실행해야 한다. 위험성 감소대책 수립 시에는 고려해야 할 우선순위가 있다. 첫째, 법령에 규정된 사항이 있는 경우 법 기준 이상으로 대책을 수립해야 한다. 둘째, 작업 계획단계에서 작업방법 변경 등을 통해 위험성을 제거 또는 감소시킬 수 있는지 고려해야 한다. 셋째, 작업계획변경을 통해 위험성 통제가 어렵다면 안전시설·방호장치 설치 등 공학적인 대책을 강구해야 한다. 넷째, 작업절차서 정비, 작업허가제(Permit to Work), 안전보건교육 등 관리적 대책을 검토해야 한다. 마지막으로 작업자에게 개인보호구 지급·사용을 검토해야 한다.



[그림 2-2] 위험성평가 Flow Chart

2013년 산업안전보건법 개정을 통해 위험성평가를 법제화한지 약 10년이 지났음에도 사업장에 위험성평가가 제대로 정착되지 못하고 있다. 중소기업뿐만 아니라 대기업에서도 위험성평가의 취지를 이해하지 못하고 서류작성 위주 등 형식적으로 수행하는 경우가 많다. 그 이유에 대해 우리나라는 국제기준에 비해 위험성평가를 폭넓은 개념으로 접근하고 있고, 위험성 평가 결과에 따른 조치 또한 포괄적으로 다루기 때문이라는 의견이 있다(정진우, 2021). 한편, 기업은 경영성과를 달성하기 위해 조직 내 각 부분이 목표를 세우고 모든 역량과 자원을 활용하여 통합적으로 진행하게 된다. 그리고 그 가운데 발생하는 산업재해 역시 단일차원이 아닌 조직 내부와 조직을 둘러싸고 있는 외적 영향요소에 의한 다차원적 결과물이라 볼 수 있다(김연성, 2017). 하지만 조직 관리시스템 차원에서 유해·위험요인을 파악하는 것은 결코 쉬운 일이 아님을 짐작할 수 있다.

위험성평가 실효성에 관한 설문조사 결과 위험성평가 절차 중 가장 어려운 단계는 유해·위험요인 파악과 개선대책의 수립이며, 이것은 전문 인력과 관련 정보의 부족, 위험성평가 기법에 대한 교육 및 경험 부족 등이 연관된 것으로 나타났다(서

용하, 2015). 한편, 위험성평가의 유해·위험요인 파악 단계에서는 미래에 발생 가능한 재해에 대해 예측할 수 있어야 하고, 그 위험성(Risk) 크기를 정확히 산정하기 위해서는 가능성(빈도)과 중대성(강도)에 대한 기준이 명확해야 하나 위험을 예측하는 것과 위험성을 객관적으로 지표화하는 것은 현실적으로 쉽지 않다(김태우, 2017).

2022년 11월에 정부에서 발표한 중대재해 감축 로드맵에 따르면, 사업장 스스로 유해·위험요인을 진단하고 개선하는 자기규율 예방체계를 확립토록 하는 것을 핵심과제 중 하나로 선정하였고, 이를 달성하기 위한 수단으로 위험성평가를 제시하였다. 그리고 위에서 언급한 위험성평가의 작동성 문제를 개선하기 위해 최근 개정된 사업장 위험성평가에 관한 지침(고시)에서는 아차사고·중대재해 등 실제 사고를 통한 유해·위험요인의 파악, 체크리스트, OPS(One Point Sheet) 등 평가방식의 단순화, 근로자 참여 확대 등의 내용을 포함하고 있다(고용노동부, 2023).

2.2 사고분석기법 (Accident Analysis)

고용노동부에서는 산업재해조사의 이유에 대해 재해발생 원인을 명확히 규명하여 적절한 예방책을 수립·실천함으로써 동종 또는 유사재해의 재발을 방지하기 위함이라고 밝히고 있다. 이를 달성하기 위해서는 합리적 설명이 가능하도록 사고원인을 파악하고 이를 제어하지 못한 사업장 관리시스템의 문제점들을 개선할 수 있어야 한다. 하지만 현실에서는 산업안전보건법 위반 행위자에 대한 처벌에만 중점을 두고 있으며, 유사재해 재발방지를 위한 근본원인(Root cause) 파악 관련 기법 또는 가이드조차 제공되지 못하고 있는 실정이다(권재범b, 2021).

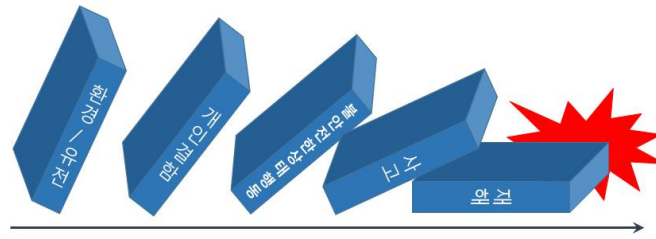
사고조사과정에서 기술적 사항 등 표면적 요인만 다루고 잠재적 사항들을 무시한다면, 관리시스템의 개선은 어려워지며 동일한 사고가 반복될 수 있다. 따라서 유사사고 재발방지를 위해서는 기술적인 사항뿐만 아니라, 이와 관련된 인적실수와 이를 제어하지 못한 조직 측면에서의 문제점을 파악할 수 있어야 한다(최윤길, 2020). 한편, 조직의 관리시스템 결함 등 사고의 근본원인을 파악할 수 있다면 유사사고의 재발 가능성과 그 손실의 중대성에 대해 가늠할 수 있어 적절한 예방대책을 수립할 수 있게 된다. 이와 같은 이유에서 사고발생 근본원인을 파악하기 위해 RCA(Root Cause Analysis), DOE(Department Of Energy) 기법, FRAM(Functional Resonance Analysis Method) 등 사고분석기법들이 개발되고 활용되어 왔다(권재범a, 2021).

사고에 대한 인식은 사회발전에 따라 사고의 양상이 변화되면서 진보되어 왔다. 18세기 영국 중심의 산업혁명기에는 증기엔진 등 불안정한 기계장비가 작업자들의 생명을 위협하면서 기술(Technology) 중심의 안전관리가 이뤄졌다. 1979년 미국 TMI(Three Mile Island) 핵발전소에 발생한 방사능 누출사고는 인적요소(Human factors)를 안전관리에서 중요한 사항으로 다루는 계기를 만들었다. 인간-기계체계(Human-machine system)에서 안전을 위협하는 요소로 인간을 주목하기 시작한 것이다. 그리고 1986년 미국에서 발생한 우주선 챌린저호 폭발사고를 계기로 안전관련 의사결정 등에 영향을 미치는 조직(Organization) 측면이 중요하게 고려되기 시작했다. 정리하면, 산업이 발전하고 사고형태가 변화되면서 안전의 무게중심이 기술에서 인적요소, 그리고 조직 측면으로 옮겨져 온 것이다.(배계완·김경환, 2021).

사고분석모형도 산업의 변천 및 사고형태의 변화에 따라 발전되어 왔다. 사고모형은 조사자가 사고와 관련된 요소들을 논리적으로 이해할 수 있게 하는 일종의 틀(Frame)으로써, 사고의 전체를 이해하는데 도움을 줄 수 있다. 하지만 틀 밖의 사고관련 요소들이 배제될 수 있으므로 주의가 요구된다. 특히, 사고발생 당시의 전체적인 상황을 파악해야 정확한 사고원인과 대책을 수립할 수 있으므로 조사자는 하인드사이트(Hindsight)와 같은 편견(Bias)에 빠지지 않도록 유의해야 한다. 일반적으로 사고모형은 1세대 사건순서모형, 2세대 역학모형, 3세대 시스템 모형으로 분류되며, 각 세대의 모형별 특징은 다음과 같다(배계완·김경환, 2021).

2.2.1 1세대 사건순서모형

사건순서모형은 1931년 하인리히가 발간한 산업사고예방(Industrial accident prevention) 책을 통해 소개된 사고발생 도미노 이론이 대표적이다. 도미노 모형에 따르면 사고에 선행된 사건들(Events)이 순차적으로 파급되면서 사고(Accident)가 발생하며, 사건간의 인과관계는 선형적이고 분명하다. 그리고 사건 간의 연결고리인 불안정한 상태 및 행동을 제거함으로써 사고를 예방할 수 있다고 설명한다.

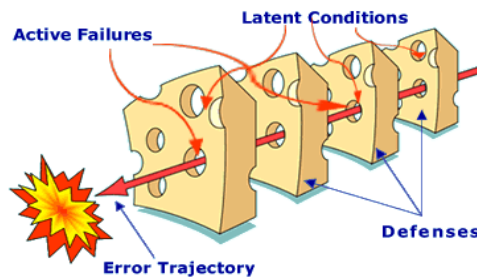


[그림 2-3] 하인리히의 도미노 모형

도미노 모형 외에도 FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis), FMEA(Failure Mode & Effect Analysis) 등이 1세대 모형에 속한다. 사건순서모형은 사건의 과정이 명확하므로 이해하기 쉬운 반면, 사건의 인과관계가 확실해야 성립된다는 단점이 있다. 하지만 실제 사고에서 기계적 측면이 아니고서는 확실한 인과관계가 성립되는 경우는 드물다.

2.2.2 2세대 역학모형

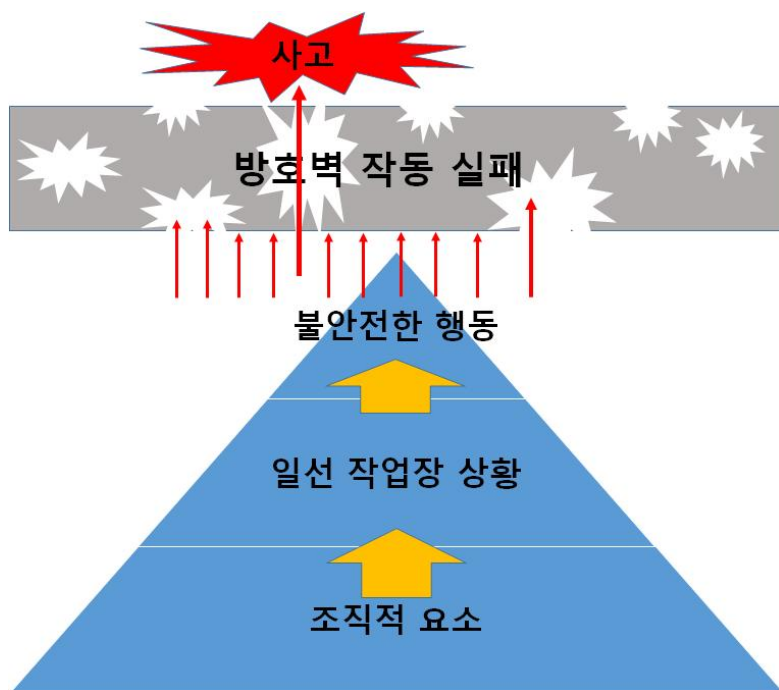
1970년대 이후 산업의 발전과 함께 대형사고가 연이어 발생하면서, 사고의 원인을 일선 작업장에서의 인적실수 등 활동적 요인(Active factors)과 조직 내부에 오랜 기간 존재해 온 잠재적 요인(Latent factors)의 상호작용에 따른 것으로 보는 역학모형(Epidemiological model)이 개발되었다. 1997년 James Reason이 고안한 “스위스 치즈 모형(Swiss cheese model)” 이 대표적인 예이다.



[그림 2-4] 제임스 리즌의 스위스 치즈 모형(미국 에너지부a, 2012)

James Reason에 따르면, 사고는 [그림 2-5]과 같이 일선작업자의 불안정한 행동이 그가 일했던 작업장의 불안정한 상태로부터 영향을 받게 되고, 조직 내부에 오랜 기간 존재해 온 시스템 결함으로 인해 사고예방을 위해 설치해 두었던 방호벽(Barrier)이 무력화 되면서 발생하게 된다. 역학모형은 사고를 직·간접적으로 일으킨 작업자의 불안정한 행동 보다 이를 제어하지 못한 해당 사업장의 관리시스템에 중점을 두고 있다. 그리고 인적실수(Human error)를 사고의 원인이 아닌 방호벽 작동실패에 따른 결과로 본다. 재해예방 측면에서는 사람의 상태를 바꾸긴 어렵지만 사람의 일하는 상태는 바꿀 수 있으므로, 조직 내 방호벽을 강화함으로써 사고를 예방할 수 있다고 설명한다(James Reason, 2014). 역학모형을 기반으로 사업장에서 적용되고 있는 2세대 사고분석기법으로는 HFACS(Human Factors Analysis and Classification System), HPES(Human Performance Enhancement System), HPIP(Human Performance Investigation Process), 미국 에너지부(Department of Energy) 사고분석기법 등이 있다.

이러한 역학모형의 단점은 방호벽 작동실패와 관련하여 특정 비난대상을 찾으려는 경향이 있다는 점이다. 비난(Blaming)은 사업장 안전관리시스템에서 작업자들로 하여금 책임이 따르는 업무를 회피하게 만들므로 비생산적이며, 안전관리시스템의 장애물로 여겨지고 있다(미국에너지부a, 2012).

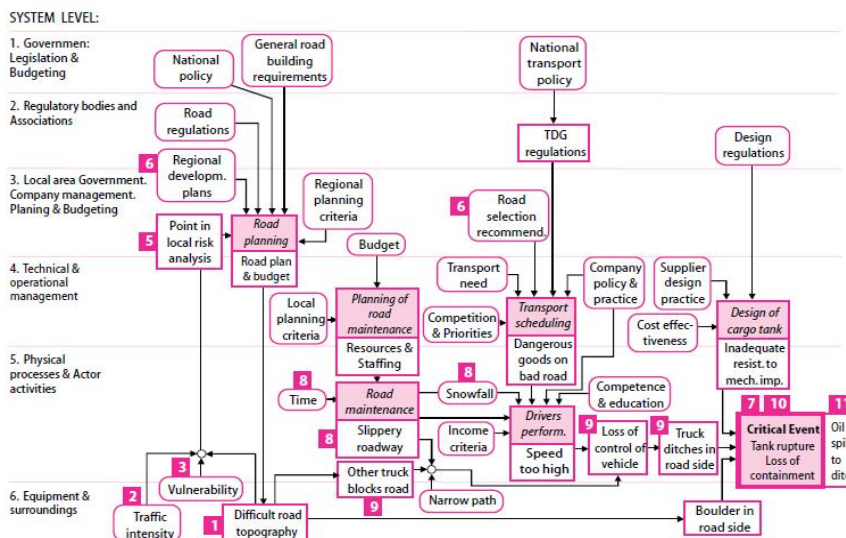


[그림 2-5] 제임스 리즌의 조직유발사고 전개 모형

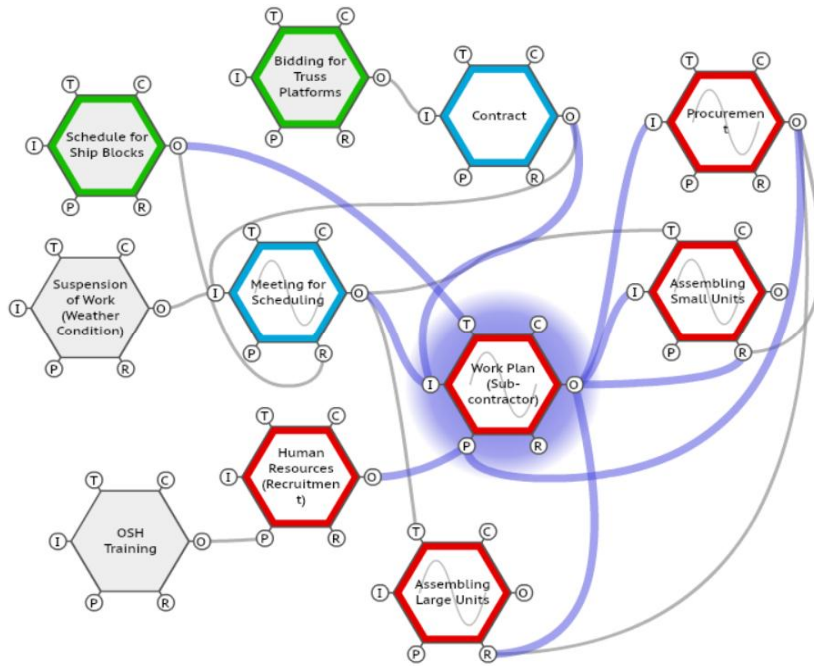
2.2.3 3세대 시스템모형

현대의 복잡한 사회기술체계(Socio-technical system)에서 안전관리자는 조직 내에서 일어나고 있는 모든 상황을 파악할 수도 없고 파악된 사항들을 관리하기도 힘들다. 그리고 1·2세대 사고모형으로는 설명할 수 없는 사고들이 종종 발생하기도 한다. 예를 들어, 시스템에서 부분적으로는 괜찮은 행동들이 다른 부분의 기능들과 상호작용하여 시스템의 불안전성을 야기할 수 있다. 시스템 모형은 시스템 내에 존재하는 정상범위로 간주되는 변동요소(Variability)들이 예상치 못한 조합을 이루면서 발생하게 되는 사고의 과정을 설명할 수 있다.

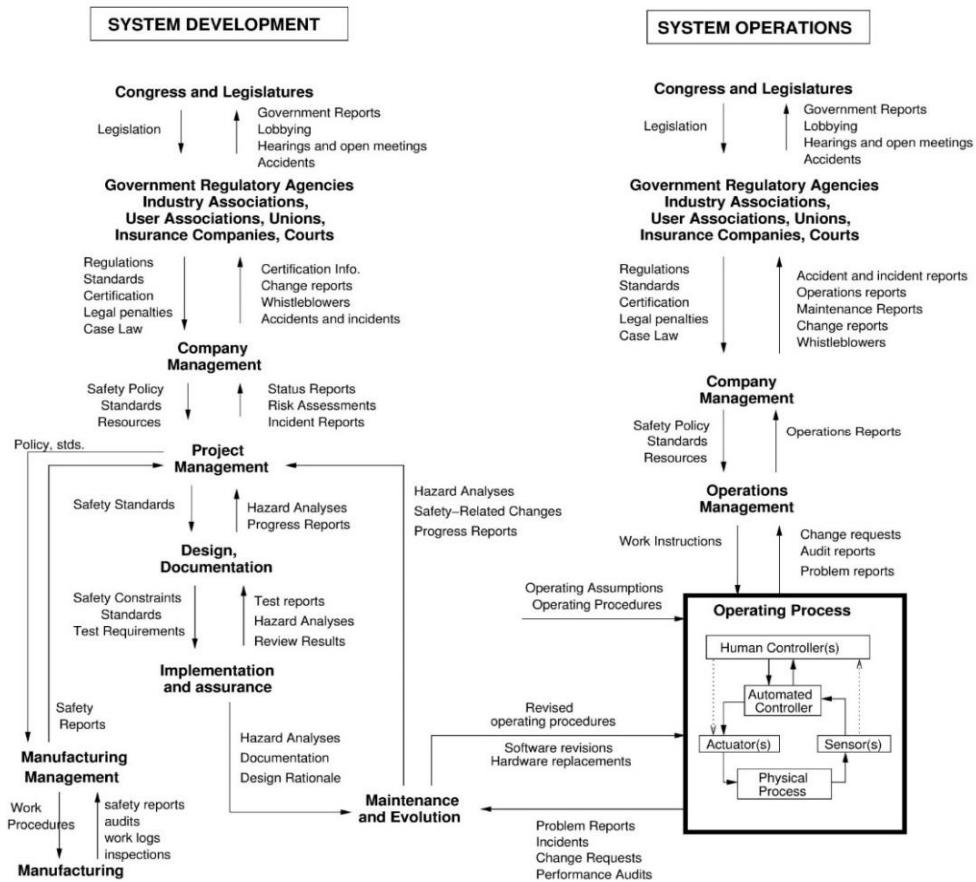
현재 사용되고 있는 시스템 모형에는 Rasmussen의 Acci-Map, Leveson의 STAMP(System-Theoretic Accident Model & Processes), Hollnagel의 FRAM(Functional Resonance Analysis Method)이 있다. Acci-Map은 근로자-중간관리자-경영진-정부 등의 목적과 수단 관계에서 각 계층이 사고에 미친 영향을 시간적 순서에 따라 나타낼 수 있다. 그리고 계층별 의사결정이 실행되는 과정과 이에 필요한 정보가 제대로 제공되었는지 그 흐름을 분석할 수 있다(Rasmussen, 2000). FRAM의 관점에서 시스템은 조직 내 각 파트(부서)들의 집합이 아닌 각 기능들의 결합으로 간주된다. 시스템을 구성하는 각 기능은 6가지 측면(인입, 인출, 시간, 조건, 통제, 자원)을 가지고 있으며, 기계·장비 또는 사람에 의해 수행되느냐 따라 다양한 변동성(Variability)을 지니게 된다. 그리고 각 기능이 지니고 있는 변동성이 다른 기능들의 변동성과 어떻게 상호작용하여 시스템이 불안정해 지고 사고로 이어질 수 있는지를 설명해 줄 수 있다(Hollnagel, 2012). STAMP는 작업장-중간관리-경영진 등 계층화된 모형으로서 인적실수와 같이 사람의 행동에 따른 변동성 등 각 단계별 변동성은 통제에 의해 제어되며, 통제방식의 종류, 작동유무 등으로 사고를 분석한다(Nancy G. Leveson, 2019).



[그림 2-6] Acci-Map 분석 예시 (Jens Rasmussen, 2000)



[그림 2-7] FRAM 분석 사례 (배계완 · 김경환, 2021)



[그림 2-8] STAMP의 시스템 안전통제 구조 (Nancy G. Leveson, 2019)

2.2.4 안전보건관리체계와 사고모형

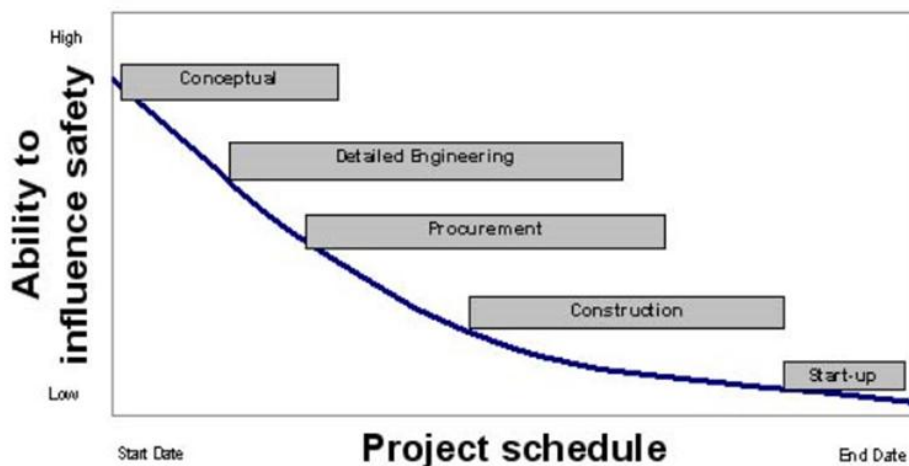
앞서 언급한 바와 같이 사업장 안전보건관리체계는 위험성평가를 중심으로 구성되어 있다. 그리고 위험성평가의 작동성을 강화시키기 위해 경영진 주도로 목표를 정하고 조직과 예산을 편성하며, 관계자에게 책임과 권한 부여 및 근로자 참여를 강조한다. 위험성평가는 사업장 내에 잠재되어 있어 노출 될 경우 사고로 이어질 수 있는 유해·위험요인(Hazard)을 찾아내어 그 위험의 크기(Risk)를 평가한 후 허용범위를 초과한 경우 위험성 감소대책을 수립하여 실행하는 활동이다. 산업안전보건법 제36조(위험성평가의 실시)에서는 유해·위험요인을 일으킬 수 있는 항목으로서 “건설물, 기계·기구·설비, 원재료, 가스, 증기, 분진, 근로자의 작업행동 또는 그 밖의 업무”로 기술하고 있다. 그리고 사업장 위험성평가에 관한 지침(고용노동부 고시)에서는 위험성 감소대책 수립 시 계획단계에서 작업변경 등에 의한 위험성 제거 또는 감소 - 공학적 대책 - 관리적 대책 - 개인보호구 사용 순으로 대책을 수립하도록 기술하고 있다.

위험성평가의 4단계인 위험성 감소대책 수립 및 실행은 사업장 관리시스템의 방호벽(Barrier)를 강화시키는 것이므로, 역학모형의 방호벽과 유사한 것으로 판단된다. 그리고 역학모형은 작업자의 불안정한 행동, 그가 일했던 작업장의 불안정한 상태 및 사업장내 갖춰진 방호벽의 작동실패로 사고발생과정을 설명하므로 위험성평가의 유해·위험요인 파악과 상당한 연관성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 사업장에 잠재된 유해·위험요인을 파악하고 통제하는 방안으로써 사전조치인 위험성평가와 사후조치인 사고분석(역학모형)은 상호보완적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2.3 설계안전 (Design for Safety)

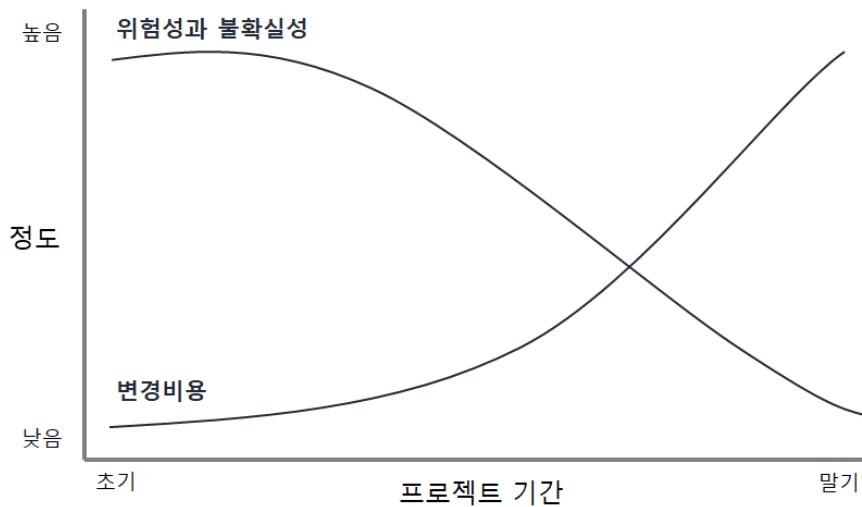
건설업의 산업재해발생률 및 그 강도는 타 산업에 비해 매우 높은 수준이다. 2022년 12월 기준으로 고용노동부에서 발표한 전 산업 사고사망자 중 건설업 사망자가 341명으로 약 53%를 차지하고 있다. 그리고 그 중 절반이상이 추락으로 사망하였다. 건설업은 도급공사계약에 따른 정해진 공사기간과 금액 내에 건축물을 완성해야 하므로 해당 기간 내에 많은 인력을 투입해야 하는 노동집약적 특성이 있다. 그리고 근로자의 건강과 생명보호에 대한 책임은 고용관계에 있는 사업주에게 있으므로, 근로자 안전보건업무가 시공사에게 집중되어 왔다. 하지만, 건설프로젝트의 특성상 공사비용, 품질, 공정 등 근로자 안전에 영향을 미치는 중요한 의사결정들이 건설공사 착공이전에 발주자와 설계자에 의해 이뤄진다. 따라서 시공사 주도의 건설재해예방에는 한계가 있으므로, 효과적으로 건설재해를 예방하기 위해서는 기획-설계-시공-유지관리-해체에 이르는 생애주기(Life cycle)에 걸쳐 발주자, 설계자 및 원·하청 시공자가 안전관리업무에 함께 참여하고, 상호협력 및 분담해야 한다(안홍섭, 2011).

건설현장에서 발생하고 있는 사고의 약 25.7%가 건설공사 착공 이전인 기획과 설계상의 문제에 기인하여 발생하고 있다(염성준, 2020). 1997년 Szymberski가 발표한 공정/안전 영향곡선(Time/Safety influence curve)에 따르면 건설공사 착공 이후에 안전관리를 시작하는 것 보다 착공 이전인 계획·설계단계에서 안전을 고려하는 것이 훨씬 효과적임을 알 수 있다[그림 2-9]. 이는 설계도서에 잠재된 유해·위험요인을 시공단계에서 도출하고 개선하는데 한계가 있고, 착공 전에 잘못 결정된 공사금액과 공사기간은 시공단계에서 공기의 촉박과 혼재작업 등 근로자 안전에 부정적인 영향을 초래하기 때문이다.



[그림 2-9] Time / Safety Influence Curve (Szymberski, 1997)

미국 PMI(Project Management Institute)에서 발간한 프로젝트 관리 가이드에 수록된 건설 프로젝트의 생애주기(Life cycle)별 인력과 비용의 투입정도를 보면, 프로젝트 초기 기획단계에서는 인력·비용 투입수준이 낮으나, 프로젝트가 본격적으로 수행되면서 그 수준이 점점 높아지게 된다. 반면에 건설프로젝트의 위험성과 불확실성은 [그림 2-10]과 같이 초기단계에서는 높지만 프로젝트를 변경하는데 소요되는 비용은 적게 들며, 건설프로젝트가 구체화 될수록 위험성과 불확실성은 줄어들지만 변경비용은 늘어나게 된다. 따라서 건설공사에 있어서 안전관리의 최적 시기는 프로젝트 초기단계라 할 수 있다.



[그림 2-10] 프로젝트 기간에 따른 변수별 영향곡선 (미국 PMI, 2013)

이와 같이 시공단계에서 재해예방활동을 하는 것보다 착공 전 설계단계에서 근로자 안전을 고려하는 것이 더욱 효과적이라 여겨 영국 등 주요 선진국에서는 1990년대부터 설계안전(Design for Safety, 이하 DfS) 제도를 도입하였다. DfS란 건설재해 감소를 위해 설계단계에서 위험성평가를 실시하여 유해·위험요인을 사전에 발굴하고 적절한 위험성 통제대책을 수립한 후 설계도서에 반영하는 활동을 말한다(이소림, 2019). DfS의 필요성과 관련하여 건설프로젝트 관계자들은 설계(안)가 작업자들의 안전에 미치는 영향이 크다는 것을 인지하고 있는 것으로 조사되었으며, 설계도서와 건설현장 발생 재해와의 연관성에 대한 연구도 진행되었다(Gambatese, 2008).

국내에서도 그간 DfS 관련 연구가 진행되었으며, 주요 주제는 크게 발주자의 역할, 국내 DfS의 문제점 및 제도개선, DfS 관계자를 대상으로 한 지원시스템 개발로 분류 된다(김시은, 2019). 발주자는 건설공사 안전보건관리의 총괄주체로서 계획단계에서는 중점 관리해야 할 유해·위험요인과 감소방안을 정하고, 설계단계에서는 안전보건 역량을 갖춘 설계자를 선정하여 안전한 설계를 하도록 지원하며, 시공단계에서는 안전보건 역량을 갖춘 시공자를 선정한 후 설계단계에서 도출된 위험성

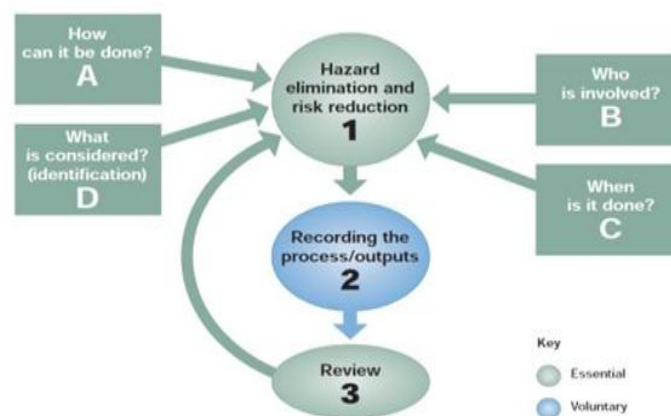
감소대책의 이행여부를 확인해야 한다(임세중, 2020). 이와 같이 DfS 관련 실무는 설계자에 의해 수행된다, 하지만 설계자의 DfS 관련 역량부족 등으로 국내에서는 제대로 정착되지 못하고 있다. 국내 DfS제도의 개선 방향을 파악하기 위해, 국내 DfS제도 도입의 모델이 된 영국의 CDM(Construction Design & Management) 제도 등과 국내 DfS제도 도입실태 등에 대한 선행 연구내용을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

2.3.1 영국 CDM(Construction Design & Management) 제도

영국 산업안전보건청(Health & Safety Executive)은 1994년에 CDM제도를 제정한 이후 그 이전보다 1.5배 이상의 건설공사가 발주 되었으나 최근 6년간 사망만인율을 60%이상 감소시킨 성과를 거둔 것으로 조사되었다. CDM제도는 건설공사 초기인 기획단계 부터 발주자, 설계자, 감독자 및 원·하청 시공자가 참여 및 상호 협조하여 설계와 시공을 안전하게 수행하도록 규정하고 있다.

CDM 1994가 시행된 지 약 10년경과 후 실시된 동 제도의 실효성에 대한 연구결과에 따르면, 10년간의 노력에도 산재감소효과가 미미한 수준으로 조사되었다. 그리고 그 원인을 계획 감독자의 늦은 선임시점, CDM 관계자들의 인식부족, 비효율적인 행정관리체계 때문인 것으로 기술하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 2007년 CDM 개정을 진행하였으며, 주요 내용은 안전보건 전문역량을 갖춘 CDM 조정자(CDM Coordinator)를 선임하여 발주자를 보좌하며 설계자와 시공자 간의 안전보건업무를 조정토록 하였다. 그리고 불필요한 행정절차를 대폭 간소화 시켰다(U.K. HSE, 2007).

CDM 2007 시행 이후 설계자가 설계단계에서의 위험성평가 경험이 축적되고, 안전설계 업무역량이 향상되는 등 CDM제도가 자리를 잡게 되자 2015년 CDM제도 2차 개정을 통해 발주자가 안전보건 역량을 갖춘 주설계자와 주시공자를 선임하여 상호 협업을 통해 안전설계를 진행토록 하고 있다(지경환, 2017).



[그림 2-11] CDM 설계안전 개념도 (영국 HSE)

2.3.2 싱가포르 DfS 제도

싱가포르는 2015년 Workplace Safety and Health 개정을 통해 DfS제도를 도입하였다. DfS는 발주자가 지정한 전문가(DfS Professional)를 중심으로 한 설계검토과정(DfS Guide)을 통해 진행된다. DfS 가이드에 따라 총 3단계로 진행되며, 가이드 1에서는 기획단계에서 자재, 구조적 적정성 등을 검토하고, 가이드 2에서는 실시설계도서를 바탕으로 위험성평가를 실시하여 유해·위험요인 도출 및 위험성 제어를 위한 설계안전기법(Design solution)을 검토하며, 가이드 3에서는 설계도서에 반영되지 못한 잔존 유해·위험요인 관련 정보를 기록함으로써 시공단계에서 관리될 수 있도록 한다. 최근 국내에서 논의되고 있는 DfS 관계자의 역량 수준관리를 위해 싱가포르에서는 DfS 전문가 역량향상을 위한 교육과정을 운영하고 있다(김시은, 2019).

2.3.3 미국 PtD(Prevention through Design)

미국은 2007년 국립직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health)에서 산업재해로부터 근로자를 보호하기 위한 PtD 결의안(Initiative)을 발표하여 설계자의 안전보건역할을 강조하였다. 그리고 그 이후로 PtD 워크숍을 정기적으로 실시하고 있다. 미국의 경우 법 환경 특성에 따른 책임소재문제 등으로 PtD가 법제도화 되진 않았으나, 기업의 경쟁력 제고를 위해 프로젝트 형식으로 발족되었다. 또한 국립직업연구기관(National Occupational Research Agenda)에서는 PtD 촉진을 위해 건설업에 중점을 둔 CHPtD(Construction Hazard Prevention through Design)을 주요 10대 과제 중 하나로 선정하였고, 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, 이하 OSHA)은 여러 제휴 프로그램 중 하나인 건설 원탁회의(Round table)에서 DfS 작업그룹을 만들어 설계안전을 추진토록 하였다(김경환, 2015).

2.3.4 국내 DfS 관련제도 및 문제점

국내에서도 시공사에게 집중된 산업재해예방활동의 한계를 인식하고 건설공사 착공 전 주요 의사결정권자인 발주자와 설계자에게 작업자 안전보건에 대한 역할을 요구하는 제도가 도입되었다. 2016년 5월 국토교통부에서는 건설기술진흥법 개정을 통해 설계안전성검토제도(DfS)를 도입하여, 설계자가 설계단계에서 위험성평가를 실시하여 유해·위험요인(Hazard)을 파악하고 그에 대한 개선대책을 설계도서에 반영토록 하였다. 이와 같이 국내에서도 DfS를 법제화함으로써 건설업 안전보건의 무게 중심이 기존 시공사에서 발주자와 설계자로 넘어오는 계기가 마련되었다고 할 수 있다.

하지만, 건설기술진흥법에 의한 DfS는 공공발주공사만을 대상으로 하고, 실시설계 80% 진행단계에서 적용토록 하고 있으므로, 도면, 시방서, 내역서 등이 거의 완성된 상태에서 설계변경 등 개선안을 설계도서에 반영하는 것은 현실적으로 어렵다. 그리고 설계변경에 소요되는 기간과 비용에 대한 보상방안도 마련되어있지 않은 실정이다. 고용노동부는 2019년 산업안전보건법을 전부개정하면서 DfS제도 적용대상을 민간영역으로 확대하였다. 총 공사금액이 50억원이상의 건설공사의 발주자는 계획 단계에서 중점 관리대상 유해·위험요인 등의 내용이 담긴 기본안전보건대장을 작성하여 설계자에게 제공해야 한다. 설계자는 이를 바탕으로 기본설계단계에서 위험성평가를 실시하여 주요 유해·위험요인 및 감소대책이 포함된 설계안전보건대장을 작성해야 한다. 시공단계에서는 발주자가 설계안전보건대장을 시공사에게 제공하고 시공자는 설계안전보건대장의 위험성 감소대책에 대한 이행계획 등이 포함된 공사 안전보건대장을 작성해야 한다(고용노동부, 2020).

DfS의 핵심은 설계단계에서의 위험성평가로서, 설계자가 설계도서를 바탕으로 시공법을 가정하여 유해·위험요인을 파악하고, 그 위험성이 허용범위를 벗어난 경우 위험성을 제거 또는 감소시킬 수 있는 설계안을 마련하는 것이다. 따라서 DfS제도가 효과적으로 작동하려면, 설계자가 DfS 수행 역량을 보유해야 한다. 하지만 그간 시공단계에서 원·하청 시공사 중심으로 수행해 온 위험성평가를 설계자들이 수행하는데 어려움이 큰 것으로 조사되었다. 설계사무소 직원들을 대상으로 DfS 관련 인식을 조사한 결과에 따르면, DfS 필요성에 대한 인식수준이 낮으며, DfS 업무수행이 가능한 설계사부소가 거의 없는 것으로 파악되었다(유성곤, 2018).

또한, 설계자가 설계단계에서 위험성평가 시 현장여건을 고려하지 않은 개선대책을 수립하고 이를 설계도서에 반영하게 되면, 시공자가 시공단계에서 대응하는데 어려움이 야기된다(김시은, 2019). DfS 업무수행능력에 대한 선행조사결과에 따르면, 설계자의 DfS관련 업무를 12가지로 분류하였고 그 중 위험요소에 관한 자료수집, 위험성평가, 위험성 감소대책 수립이 중요한 업무로 조사되었다. 하지만 설계자들이 세 가지 중요업무의 난이도가 높다고 느끼는 반면 설계자들의 업무수행 수준이 낮아 DfS를 제대로 수행하기 어렵다고 응답하였다. 그리고 관련 전문 인력 또한 부족한 것으로 파악되었다(신원상b, 2019). 따라서 국내 DfS제도가 제대로 정착되기 위해서는 DfS관련 지식과 경험 등 전문성을 보유한 인력을 확보하는 것이 우선되어야 한다.

제 3 장 위험성평가와 사고분석기법

3.1 연구 전략 및 방법

선행연구조사 결과 정부에서 안전관리의 핵심수단으로 간주하는 위험성평가가 제대로 정착되지 못하고 있으며, 그 이유는 사업장내 잠재되어 있는 모든 위험에 대해 포괄적으로 접근함으로써 야기되는 위험예측의 모호성(Uncertainty) 때문인 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구는 이 문제의 해결 방안으로써 위험성평가에 사고분석기법을 보완적으로 활용할 것을 제안하고자 한다.

최근 개정된 사업장 위험성평가에 관한 지침(고용노동부 고시)에 따르면, 위험성평가의 대상에 아차사고와 중대재해를 일으킨 유해·위험요인을 포함시키고 있다. 이처럼 사고는 사업장내 잠재된 유해·위험요인과 이를 제어하는 사업장 관리시스템의 적정여부를 확인할 수 있는 중요 힌트가 될 수 있다. 한편 하인리히의 재해발생 피라미드(1:29:300)에 의해 아차사고를 대상으로 사고분석을 한다면 더 큰 재해예방효과를 기대할 수 있다. 실제로 미국 에너지부에서는 발전소 등 운영상의 안전을 확보하기 위해 핸드북을 발간하여 사업장 내 발생한 크고 작은 사고들을 기반으로 관리시스템 적정성을 검토해서 개선토록 유도하고 있다(미국에너지부b, 2012).

사전예방수단으로써 널리 활용되고 있는 위험성평가 수행의 모호성(Uncertainty) 문제에 대한 방안으로써 본 연구가 제시한 사후조치수단인 사고분석기법의 효과성을 다음 순서에 따라 검증하였다. 첫째, 위험성평가가 제대로 정착되지 못하는 절차상의 문제점들을 정의하였다. 둘째, 위험성평가 문제를 보완할 수 있는 사고분석기법을 선정하였다. 마지막으로 건설업과 제조업에서 발생한 중대재해 각 1건을 대상으로 선정된 사고분석기법을 실제 적용함으로써 도출된 사고원인과 개선대책을 위험성평가에 실제 적용가능한지 여부를 검증하였다.

첫 번째 단계인 현행 위험성평가의 문제점은 본 연구의 선행연구조사에서 드러난 바와 같이 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 예측성 문제와 적절한 개선대책 선정 문제로 정의하였다. 실제로 현장 위험성평가 관계자들은 지식·경험의 부족 등으로 인해 사업장 내 잠재되어 보이지 않는 유해·위험요인을 발굴해 내는데 어려움을 호소하였고, 파악된 유해·위험요인에 대해 해당 사업장에서 효과적으로 제어할 수 있는 대책을 선정하는 업무 또한 위험성평가의 주요 장애요인으로 여겨졌다.

3.2 사고분석기법 선정

사고모형에는 사건의 순차적 인과관계에 의해 발생하는 사건순서모형(1세대)과 사업장 내 오랜 기간 잠재된 결함들이 작업자의 불안정한 행동과 결합되어 발생하는 역학모형(2세대), 그리고 복잡한 시스템을 구성하는 요소들이 갖는 정상범위 내의 변동성들이 결합·중첩되어 예기치 못한 사고를 일으키는 시스템모형(3세대)이 있다. 이 중에서 2세대 역학모형에 따르면 사고는 미숙련공 등 적정인력 배치문제, 교육·훈련 문제 등 사업장의 오래된 관리상의 결함이 존재하는 상태에서 작업자의 불안정한 행동(Human error)과 작업자가 일하던 장소의 불안정한 상태가 맞물리게 되면서, 그리고 재해예방을 위해 조치해둔 방호벽(Barrier)이 제대로 작동하지 못하고 뚫리면서 발생하게 된다.

역학모형을 활용한 사고분석을 통해서 사고를 직접적으로 일으킨 요인, 사고발생 가능성을 증가시킨 요인 그리고 이를 제어하지 못한 사업장의 관리시스템 결함들을 도출해 낼 수 있다. 그리고 도출된 사고원인(Causal factors)과 개선대책(Recommendation)은 위험성평가와 이를 기반으로 한 사업장 안전보건관리체계 개선에 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 사고분석결과는 위험성평가 실행에 있어서 애로사항으로 거론되는 유해·위험요인의 예측성과 관련하여 어떤 위험을 관리해야 하는지 가르쳐 줄 수 있고, 이를 제어하지 못한 관리시스템 결함과 관련하여 적절한 개선대책을 제시할 수 있다.

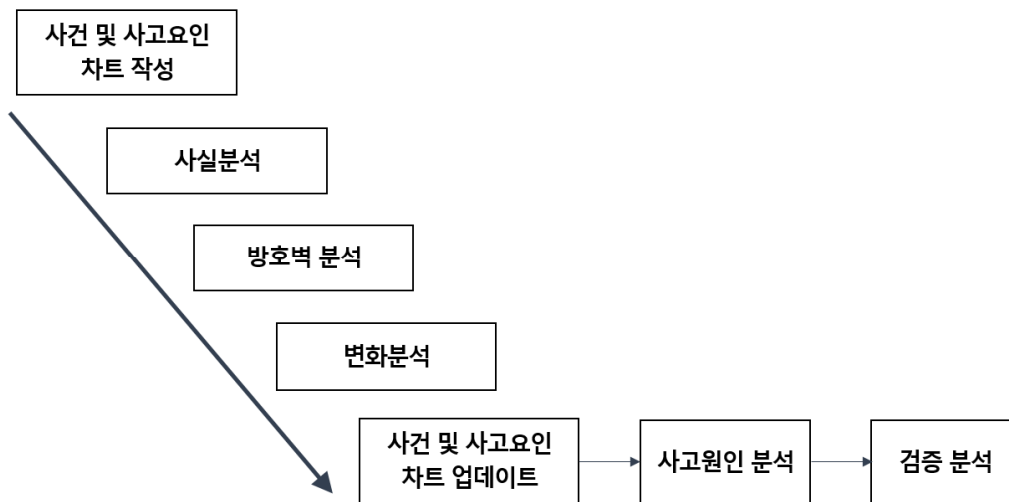
따라서 본 연구는 지금까지 언급한 위험성평가의 모호성문제와 관련하여 2세대 역학모형이 위험성평가에 보완적으로 사용될 수 있을 것으로 판단하였다. 1979년 미국 TMI 핵발전소 방사능 누출사고로 인적실수(Human error)가 사업장 안전관리에서 중요한 요소로 부각되면서 HFACS(Human Factors Analysis and Classification System), HPES(Human Performance Enhancement System), 미국 에너지부(Department of Energy) 사고분석기법 등 2세대 사고모형들이 개발·활용되어왔다. HFACS는 항공기 관련 사고분석을 위해 고안되었으며, HPES와 DOE 기법은 원자력사고 분석을 위해 개발되었다. 이 중에서 DOE 기법은 사고(Accident)로 이어지는 사건들(Events)을 시간적인 순서에 따라 전개하는 사건 및 사고요인 차트(Events & Causal Factors Chart)를 기본분석도구로 씌움으로써 원자력산업뿐만 아니라 타 업종에도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 미국 에너지부에서는 실무에 적용 가능토록 사고분석 핸드북을 발간하였으며, 이를 토대로 한 사고분석 보고서들이 미국 에너지부 홈페이지에 등재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 미국 정부에서 고안하여 실무에 활용 중인 DOE 기법을 본 연구의 사고분석기법으로 선정하였다.

3.2.1 DOE 기법의 절차 및 방법

DOE 기법은 크게 무슨 일이 일어났는지(What happened?) 관련증거를 수집하는 사고조사와 왜 일어났는지(Why it happened?)를 파악하는 사고분석으로 구분된다. 그리

고 사고분석은 [그림 3-1]와 같이 ① 사건 및 사고요인 차트(Events & Causal Factors Chart, 이하 E&CF 차트) 작성, ② 사고원인 분석(Root Cause Analysis), ③ 검증 분석(Verification Analysis) 순으로 진행된다.

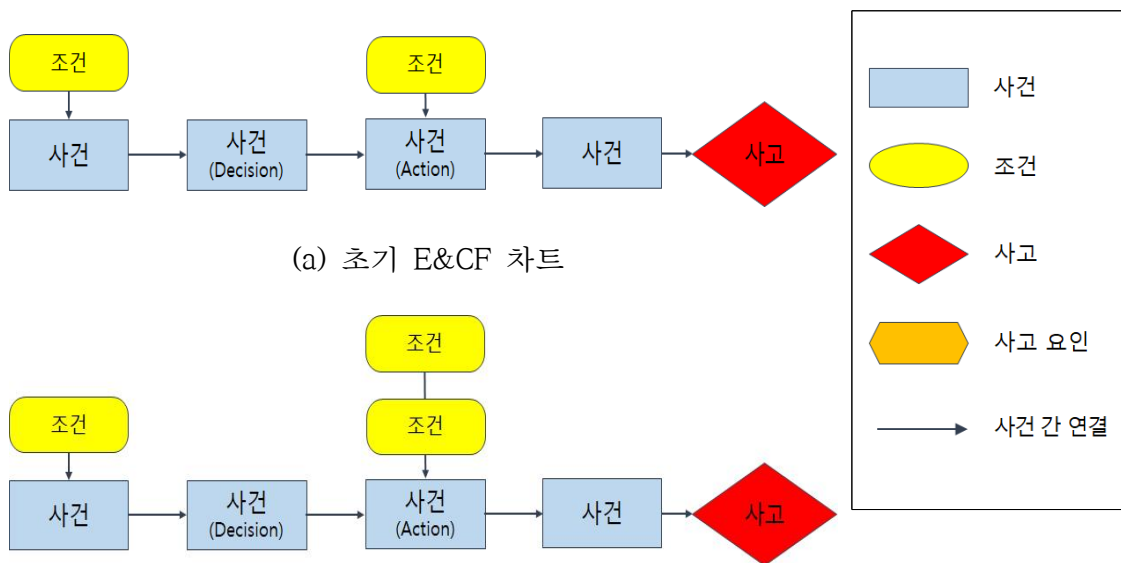
E&CF 차트 작성은 4단계를 거쳐 진행된다. 첫째, 사고조사를 통해 수집된 인적·물적 증거들을 토대로 사건별로 내용을 정리하는 사실분석(Factual Analysis)을 실시하고, 파악된 사건 및 조건들을 [그림 3-2]의 (a)와 같이 논리적 순서에 따라 초기 E&CF 차트를 작성한다. E&CF 차트에서 사건들(Events)은 발생시간 또는 인과관계 순서에 따라 수평적으로(왼쪽에서 오른쪽 방향) 나열하고, 각 사건별 작업환경, 물리적 상황, 심리적 상태 등 조건들(Conditions)은 수직으로(해당 사건의 위나 아래에 배치) 연결한다. E&CF 차트를 활용하여 사고분석을 할 경우 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다. 우선 사고(Accident)로 이어지는 사건들(Events)과 이에 영향을 준 조건들(Conditions)을 도식화 하고 그 유효성을 검증할 수 있다. 그리고 사고와 직접적인 관련이 있는 사건 및 조건들을 통해 사고와 관련된 개인과 조직의 관계를 파악할 수 있고 조직 차원의 관리시스템과 연관시킬 수 있다. 마지막으로 추가적으로 조사 및 분석해야 할 사항들을 찾을 수 있다.



[그림 3-1] DOE 사고분석 절차 (미국 DOE, 2012)

둘째, 재해예방을 위해 해당 사업장에서 적용된 방호벽 분석(Barrier Analysis)을 실시한다. 방호벽 이론에 따르면 사고는 사업장에 잠재된 유해·위험요인(Hazard)과 재해대상 작업자(Target)와의 접촉에 의해 발생한다. 따라서 이 양자 간의 접촉을 차단하기 위해 사업장에서 조치했던 또는 조치해야 했던 방호벽의 종류가 무엇이며, 사고를 막지 못한 각 방호벽의 작동 실패 이유를 분석하는 단계이다. 방호벽은 일반적으로 물리적 방호벽과 관리적 방호벽으로 구분한다. 물리적 방호벽으로는 둥근톱 덮개 등과 같이 유

해·위험 기계 등에 직접 설치되는 방호벽과 슬래브 단부 안전난간 등 유해·위험요인과 재해대상 사이에 설치되는 방호벽, 그리고 안전모·안전대 등 재해대상인 작업자가 착용하는 개인보호구 등이 있다. 관리적 방호벽에는 작업절차서(Standard Operating Procedure), 안전작업 수행여부에 대한 관리감독, 작업허가서(Permit to Work) 등이 있다. 방호벽 분석 시에는 기본적으로 해당 사업장에 설치된 방호벽의 효과성, 방호벽을 무시 또는 무능화 할 수 있는지 여부, 방호벽 신뢰도에 영향을 줄 수 있는 사업장의 오래된 시스템 결함 유무 등에 대해 확인해야 한다. 그리고 해당 사업장에서 제대로 작동하지 못한 방호벽뿐만 아니라 사용되지 않은 방호벽, 설치되지 않은 방호벽에 대해서도 모두 확인하고 사고에 미친 영향을 분석해야 한다.

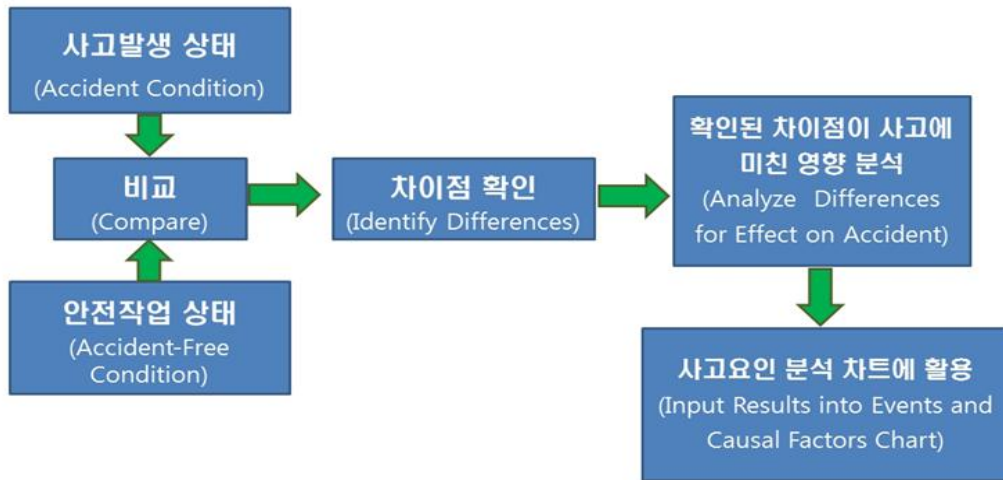


(a) 초기 E&CF 차트

(b) E&CF 차트 업데이트

(c) 최종 E&CF 차트

[그림 3-2] E&CF 차트 작성순서 예시 (미국 DOE, 2012)



[그림 3-3] 변화 분석 개념 (미국 DOE, 2012)

셋째, 사고당시 변화요인이 사고에 미친 영향을 분석하는 변화 분석(Change Analysis)을 실시한다. 변화란 작업표준의 개정, 작업자 변경 등 사업장 시스템이 계획대로 운영될 때 형성되는 균형(Balance)을 깨뜨리는 것으로서, 사업장의 기존 시스템 운영범위에서 벗어난 상태를 의미하기도 한다. 변화 분석의 개념은 [그림 3-3]과 같이 사고당시의 작업상황과 그 이전의 평상 시 작업 상황 또는 표준 작업절차와 비교하여 파악된 차이점이 사고발생에 어떻게 영향을 미쳤는지를 분석하는 것이다. 따라서 변화 분석을 실시하기 전에 기본적으로 사고발생 이전의 상황과 계획수립 시 가정했던 상황에 대해서 파악해 두어야 하며, 설계도면, 장비명세서, 운영 및 유지관리 절차, 업무분장(구성원의 책임과 역할) 등이 유용하게 활용될 수 있다. 또한 변화 분석 결과를 E&CF차트에 포함시키면 잠재적인 사고요인을 파악하는데 도움이 된다.

마지막으로 방호벽분석과 변화분석을 통해 파악된 사건 및 조건들을 E&CF 차트에 반영하여 [그림 3-2]의 (c)와 같이 최종적으로 완성한다. E&CF 차트작성의 궁극적인 목적은 사고의 전체를 파악하는 것으로서 사고발생 당시의 상황과 최대한 근접하게 업데이트해야 한다.

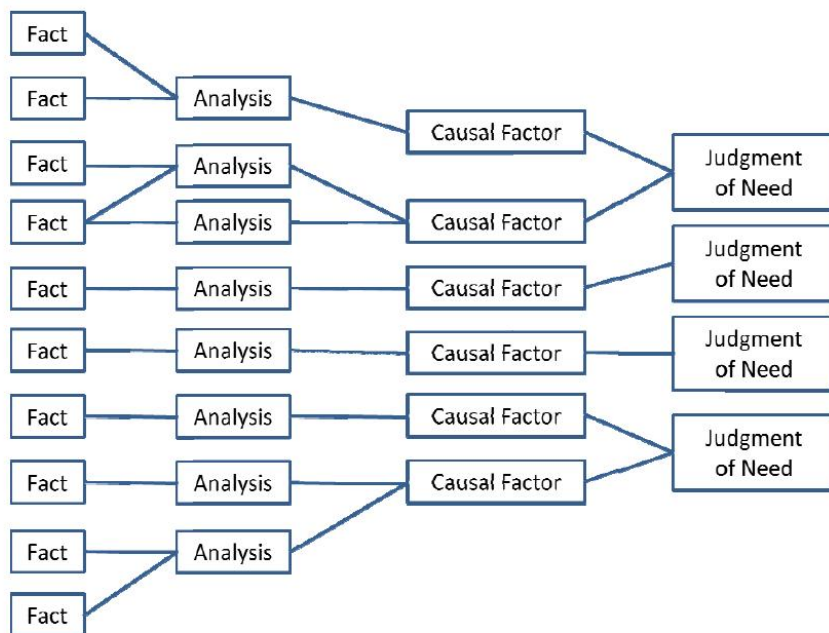
3.2.2 사고원인 분석 및 검증

최종적으로 수정된 E&CF 차트를 통해 사고발생 과정을 전체적인 관점에서 파악하고 사고발생 메커니즘 분석을 통해 사고원인(Causal Factors)을 도출한다. 사고원인이란 사고를 일으켰거나 사고 발생에 영향을 준 사건(Events)과 조건(Conditions)을 의미한다. 동종·유사재해의 재발방지를 위해서는 의미 있는 개선대책(Recommendations)이 도출되어야 하며, 이를 위해서는 사고의 직접적인 원인뿐만 아니라 사고발생 사업

장 시스템 작동 실패 등 근본원인을 찾아낼 수 있어야 한다.

DOE 사고조사 핸드북에서는 사고원인을 3개의 유형으로 분류한다. 첫째, 사고를 직접적(Immediate)으로 일으킨 직접원인(Direct Cause)을 파악한다. 직접원인은 E&CF 차트에서 사고 직전단계의 사건이나 조건이 해당될 수 있다. 둘째, 사고를 직접적으로 일으키지는 않았으나, 사고발생 가능성을 증가시킨 기여원인(Contributing Cause)을 파악한다. 마지막으로 사업장 관리시스템 결함과 관련된 근본원인(Root Cause)을 파악한다. DOE 핸드북에서는 근본원인을 ‘개선되기만 하면 동종재해의 재발을 막을 수 있는 사고원인’으로 정의하고 있다. 예를 들어 안전관리상 책임과 역할의 명확성 문제, 구성원들의 업무수행에 필요한 역량 보유 여부, 안전 목표 달성을 위해 자원이 균형 있게 제공·활용되는지 여부 등이 근본원인에 해당 될 수 있다.

사고분석을 통해 사고원인이 도출되면, 각 사고원인별로 필요성 평가(Judgment of Need)를 실시한다. 필요성 평가는 동종·유사재해의 재발방지 또는 재발 시 그 피해를 최소화하기 위해서 해당 사업장 관리차원에서 꼭 필요하다고 판단되는 통제방안 및 안전조치를 확인하는 단계이다. 필요성 평가 시에는 개인이 아닌 절차와 관리시스템 개선에 초점을 두어 작성하고, 그 조치를 시행해야 하는 조직(부서)을 명시해야 한다.



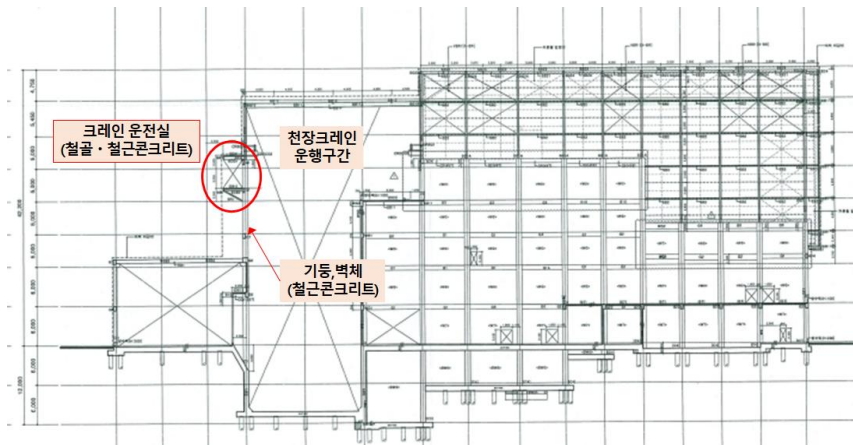
[그림 3-4] 필요성 평가(Judgment of Need) 개념도 (미국 DOE, 2012)

필요성 평가를 통해 개선대책(Recommendation)이 정해지면 보고서 초안을 작성한 후 검증분석(Verification Analysis)을 실시한다. 이 단계에서는 조사과정에 수집된 인적·물적 증거들과 보고서 구성내용의 일치성 및 논리적 부합여부 등을 검증하게 된다.

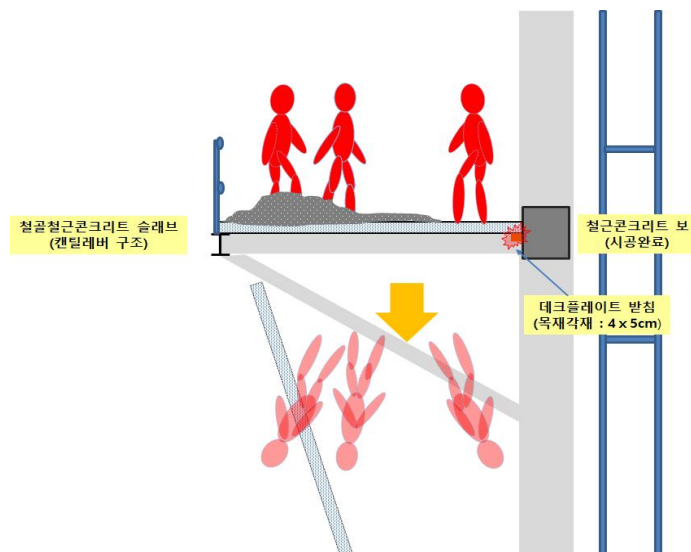
3.3 건설업 적용사례

3.3.1 사실분석

생활 폐기물 등 처리시설 신축현장에서 일어난 구조물 붕괴 및 추락사고로서, 사고 당일 콘크리트공 3명이 캔틸레버(외팔보 구조) 바닥 콘크리트를 타설하던 중 데크플레이트 지지부가 작업하중을 견디지 못하고 붕괴되면서 24m 아래 바닥으로 떨어져 사망하였다. 붕괴사고는 [그림 3-5]와 같이 폐기물 집하장의 상부 천장크레인 운행구간의 측면에 위치한 운전실에서 발생하였다. 운전실은 철근콘크리트 벽체에 철골철근콘크리트 캔틸레버가 지지되는 구조형식으로, 벽체는 철근콘크리트업체, 캔틸레버는 철골업체에서 시공하였으며, 사고는 두 협력업체 간의 경계지점에서 발생하였다.



[그림 3-5] 사고발생 위치

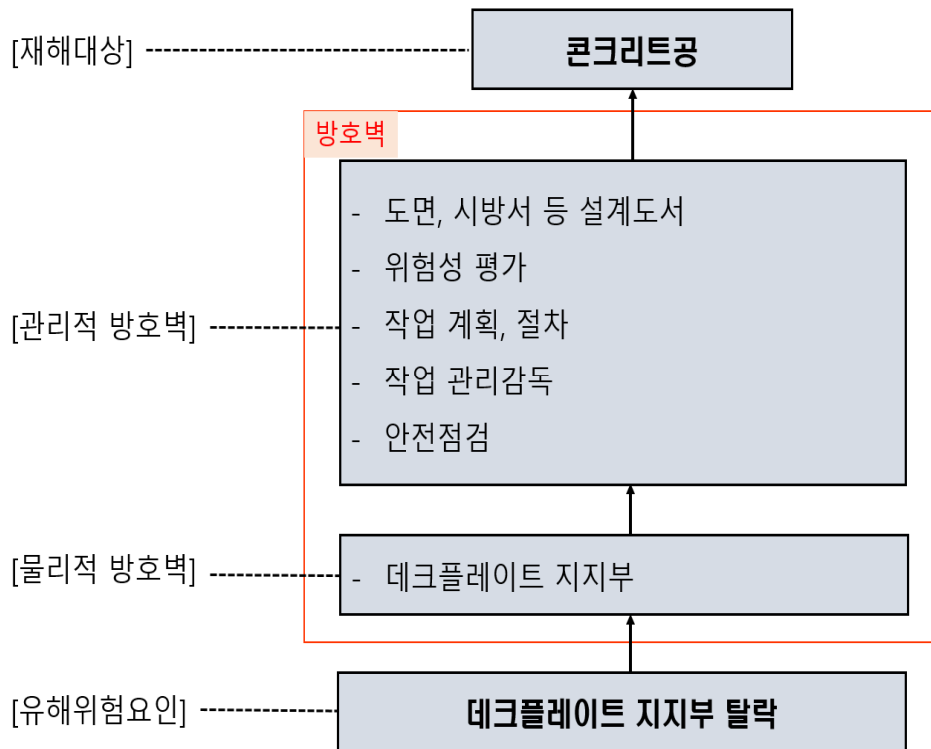


[그림 3-6] 붕괴재해 상황도

데크플레이트의 한 변은 철골보 위에 다른 한 변은 철근콘크리트 벽체에 못으로 고정된 목재각재 위에 거치되었다[그림 3-6]. 그리고 목재각재 받침은 두 업체의 작업경계지점에 위치하여 공사계약상 어느 한쪽업체의 업무로 보기 어려운 상태였다. 사고는 콘크리트 타설 작업하중에 의해 목재각재를 고정했던 못이 벽체로부터 빠지면서 발생하였다. 목재각재 받침을 설치할 때에는 캔틸레버 하부에 외부비계가 설치되어 있었으나, 사고당시에는 후속공정인 캔틸레버 하부 출입구공사를 진행하기 위해 비계가 해체된 상태였다.

3.3.2 방호벽 분석

데크플레이트 지지부 붕괴사고와 관련 있는 사고발생 사업장의 방호체계는 [그림 3-7]과 같다. 물리적 방호벽은 데크플레이트 받침(목재각재)이며, 관리적 방호벽은 데크플레이트 받침과 관련된 설계도서, 위험성평가, 작업계획 및 절차, 작업 관리감독, 안전점검이 있었다. 그리고 각 방호벽의 사고당시 작동상태와 방호실패이유, 그리고 사고에 미친 영향을 <표 3-1>과 같이 분석하였다.



[그림 3-7] 사고발생 사업장 방호벽 체계도

<표 3-1> 건설업 붕괴사고 방호벽 분석표

(유해·위험요인) 데크플레이트 지지부 붕괴		(재해대상) 콘크리트공		Context
방호벽 종류	방호벽의 실제 작동상태	방호 실패 이유	사고에 미친 영향	
· 데크플레이트 받침 (물리)	· 받침이 콘크리트 벽면에서 탈락되면서 지지부 붕괴	· 받침(목재각재)가 못으로 고정되어 작업하중을 견디지 못하고 벽면에서 이탈 · 사전 안전성검토 미실시	· 받침붕괴로 데크플레이트가 탈락되면서 그 위에 있던 작업자 3명 추락	절차 부재 지식부족
· 설계도서 (관리)	· 해당 공사 시공 상세도 없음	· 설계와 시공에 차이가 있어 도면을 적용할 수 없으나 유사도면을 참조하여 받침설치방법 결정 → 도면 해석 오류 · 구조검토 후 시공상세도를 작성하고 이에 따라 시공해야 하나 미실시	· 안전성이 확보되지 않은 받침 시공방법 결정 → 목재각재를 콘크리트 못으로 벽에 고정	지식부족
· 위험성평가 (관리)	· 콘크리트 타설 시 데크플레이트 받침 붕괴 위험에 대한 위험성평가 미실시	· 위험성평가에서 데크플레이트 받침 붕괴 위험요인 예측 실패 · 콘크리트 타설 전 해당 위험요인 인지 후 위험성평가를 실시하지 않았음.	· 데크플레이트 받침 탈락 및 붕괴위험에 대한 적절한 대책수립 없이 작업 진행	지식부족 위험성평가 형식적실시
· 작업계획, 절차 (관리)	· (철골업체) 데크플레이트 받침 시공을 원청에 요청 · (골조업체) 자기 업무가 아니라고 생각하여, 원청 요구에 소극적으로 작업수행	· 데크플레이트 받침 시공에 대한 책임과 역할이 명확하지 않음.	· 부실한 데크플레이트 받침 설치 · 데크플레이트 붕괴 위험 인지 후에도 적절한 보강조치 없이 콘크리트 타설 진행	책임과 역할 불명확 이해관계 충돌
· 공사 관리감독 (관리)	· 데크플레이트 검측 시 철근 용접 보강여부 확인하지 않음.	· 검측기사가 데크플레이트 철근 용접보강내용에 대해 전달받지 못함.	· 데크플레이트 철근 용접보강조치 없이 콘크리트 타설 진행	의사소통 부재
· 안전점검 (관리)	· 안전팀에서 데크플레이트 철근 용접 보강 요청 후 개선여부 미확인	· 안전팀에서 시공팀에게 개선요청 후 개선될 것으로 생각함.	· 데크플레이트 붕괴 위험에 대한 적절한 보강조치 없이 콘크리트 타설 진행	의사소통 부재

물리적 방호벽 1개와 관리적 방호벽 5개에 대한 작동 실패원인 분석결과 물리적 방호벽인 데크플레이트 받침의 경우 목재각재를 시공 완료된 철근콘크리트 보 측면에 콘크리트 못으로 고정·설치하여, 콘크리트 타설 작업하중에 대한 지지력 부족으로 벽면에서 이탈되었다.

관리적 방호벽 중 설계도면의 경우 현장여건에 맞는 도면이 없음에도 시공 상세도를 작성하지 않고 유사도면을 잘못 인용·해석하여 받침설치방법을 결정하였다. 위험성평가의 경우 데크플레이트 받침 붕괴위험을 예측하지 못하였고, 사고전일 안전팀에 의해 해당 작업의 위험성이 파악되었지만 위험성평가를 실시하지 않고 개선대책을 제시했다. 안전팀이 시공팀에 요구한 개선대책(철근용접보강)은 품질문제가 야기되므로 시공팀은 받아들일 수 없었으며, 대신 구조안전 효과가 없는 철근 철선보강작업을 콘크리트 타설 전까지 실시하였다. 그리고 안전팀은 요구했던 철근용접보강 여부를 확인하지 않았다. 데크플레이트 받침 설치작업 계획 및 절차의 경우 계약서상에 어느 협력업체의 업무인지 명확하지 않아서, 원청의 요청에 철근콘크리트업체는 소극적으로 작업하여 받침을 부실하게 설치했다.

3.3.3 변화 분석

변화 분석은 사고발생 당시의 작업상황과 안전한 작업상황을 비교하여 확인된 차이점이 사고에 미친 영향을 분석하는 것으로 <표 3-2>와 같이 실시하였다.

그 결과 사고에 영향을 미친 차이점 3가지를 다음과 같이 파악하였다. 첫째, 사고가 발생한 데크플레이트 받침과 부합하는 설계도면이 없음에도 구조검토 및 시공 상세도 작성 없이 유사도면을 잘못 해석하고 적용하였다. 둘째, 휴가 후 복귀한 안전관리자가 데크플레이트 받침의 위험성을 인지했으나, 후속공정(출입구 설치) 때문에 캔틸레버 하부 비계가 해체된 상태였으므로, 데크플레이트 받침 보강작업이 여의치 않았다. 안전관리자는 이에 대한 대안으로써 품질문제를 야기 시키는 철근 용접보강을 공사팀에 요청하였다. 셋째, 데크플레이트 받침 공사가 어느 협력업체의 업무인지 계약서 상에 명확하지 않았다. 철골업체는 원청에게 데크플레이트 받침 설치를 요청하였고, 원청은 철근콘크리트업체에게 데크플레이트 받침용 목재각재 설치를 요청하였다. 철근콘크리트업체는 계약상 자기업무범위가 아니라고 생각하였으나, 원청의 거듭된 요청으로 인해 수동적으로 수행하였고 해당 작업에 대한 비용보상은 이뤄지지 않았다.

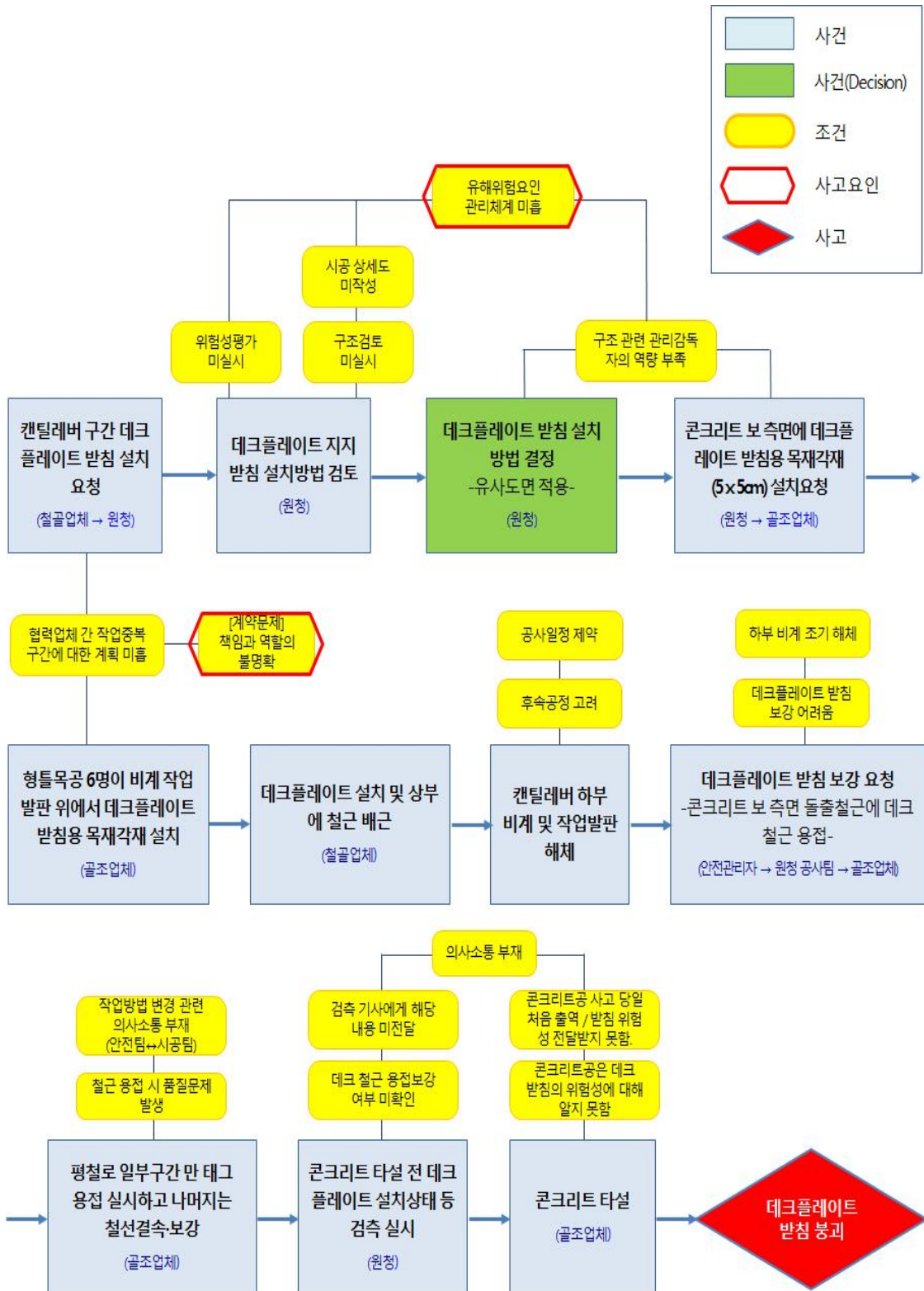
<표 3-2> 건설업 붕괴사고 변화 분석표

요소	사고현장 상태 (Present Condition)	안전작업 상태 (Ideal Condition)	차이 (Difference)
(What) 데크플레이트 받침	· 설계도면(시공상세도) 없이 공사 진행 · 목재각재 설치방법(못간격 등)에 대한 구체적인 기준 없이 임의로 설치	· 구조검토에 의해 시공상세도를 작성하고 이에 따라 받침 설치	· 구조검토에 의한 시공 상세도 미작성 · 시공상세도 없이 작업
(Where) 지상 높이 24m의 캔틸레버구조물	· 크레인운전실 하부 비계 해체로 데크플레이트 받침 보강작업이 어려워짐. → 후속공정인 출입문 공사를 위해 비계 조기 해체 · 대안으로 원청 안전팀이 콘크리트 보 돌출 철근과 데크플레이트 수평철근 용접 보강 지시	· 캔틸레버 구간 작업 완료까지 비계 존치 → 비계 작업발판 위에서 데크플레이트 받침 보강	· 공사기간 등을 고려하여 후속공정 진행을 위해 캔틸레버 하부 비계 조기 해체 → 데크플레이트 받침 보강의 어려움으로 인해 콘크리트 보 철근과 데크플레이트 수평철근 용접 보강 지시
(Who) 철근콘크리트업체 및 철골업체	· 데크플레이트 받침을 누가 시공하느냐에 대한 다툼 →(철골) 원청에 시공 요구 →(골조) 골조업체 작업범위에 포함되지 않는다고 판단했으나 원청의 거듭된 요청에 소극적으로 수행	· 계약단계에서 데크플레이트 받침 시공에 대한 책임과 역할 명확화 · 계약에서 누락된 업무에 대한 비용 등 보상방안 마련	· 데크플레이트 받침 시공에 대한 책임과 역할이 명확하지 않음. · 비용 등 보상이 없는 업무를 소극적으로 수행

3.3.4 E&CF 차트 작성

본 연구는 사고조사과정에서 수집된 인적·물적 증거들을 토대로 사실분석을 실시하여 데크플레이트 붕괴 사고(Accident) 이전에 선행된 사건(Events)들과 각 사건별 상황, 맥락 등 조건들(Conditions)을 파악하였다. 사건들의 경우 시간적 발생순서에 따라 수평(왼쪽에서 오른쪽)으로 전개하였으며, 각 사건별 조건들은 해당 사건 위에 수직으로 나열하여 초기 E&CF 차트를 작성하였다. 그리고 방호벽 분석과 변화분석을 통해 도출된 추가적인 사건과 조건들을 E&CF 차트에 업데이트 하였다. 최종적으로 업데이트한 결과 [그림 3-8]과 같이 데크플레이트 붕괴사고 전에 선행된 11개의 사건들을 나열하였다. 그 중 2번째 사건은 작업방법 검토 사건이고, 3번째 사건은 데크플

레이트 받침설치방법에 대한 의사결정이며, 검토 및 의사결정 시 관련자의 지식·배경, 필요행위 수행여부 등 조건을 수직으로 표시하였다.



[그림 3-8] 건설업 붕괴사고 E&CF 차트

3.3.5 사고원인 분석

본 연구는 사실분석을 통한 초기 E&CF 차트 작성 후 방호벽 분석 및 변화 분석을 통해 사고발생 직전의 상황에 가깝게 E&CF 차트를 업데이트하여[그림 3-8], 사건 및 조건들의 영향에 의한 사고의 발생과정을 전체적인 관점에서 분석하였다. 그리고 동종·유사재해 재발을 방지하기 위하여 사고원인을 직접원인, 기여원인, 관리시스템 결함과 관련이 깊은 근본원인으로 구분하였다. 사고를 직접적으로 일으킨 원인(Direct Cause)은 구조적 안전성 검토 없이 설치된 데크플레이트 받침이 콘크리트 타설 시 작업하중을 견디지 못하고 철근콘크리트 보에서 이탈·붕괴된 것으로 조사되었다. 그리고 사고를 직접 일으키진 않았으나 사고 발생 가능성을 증가시킨 기여원인(Contributing Cause)은 사고발생 지점과 맞는 설계도면이 없음에도 유사도면을 잘못 인용·해석하여 데크플레이트 받침 방법을 결정하는 실수를 범한 공사팀의 역량부족 문제, 콘크리트 타설 전날 안전팀이 사고발생지점의 위험성을 인지했으나, 적절하지 못한 보강법을 공사팀에게 제시하고 이를 확인하지 않는 등 의사소통 문제, 그리고 후속공정으로 인해 캔틸레버 하부 비계를 조기해체하여 데크플레이트 받침 보강작업이 어려웠던 점 등이 파악되었다.

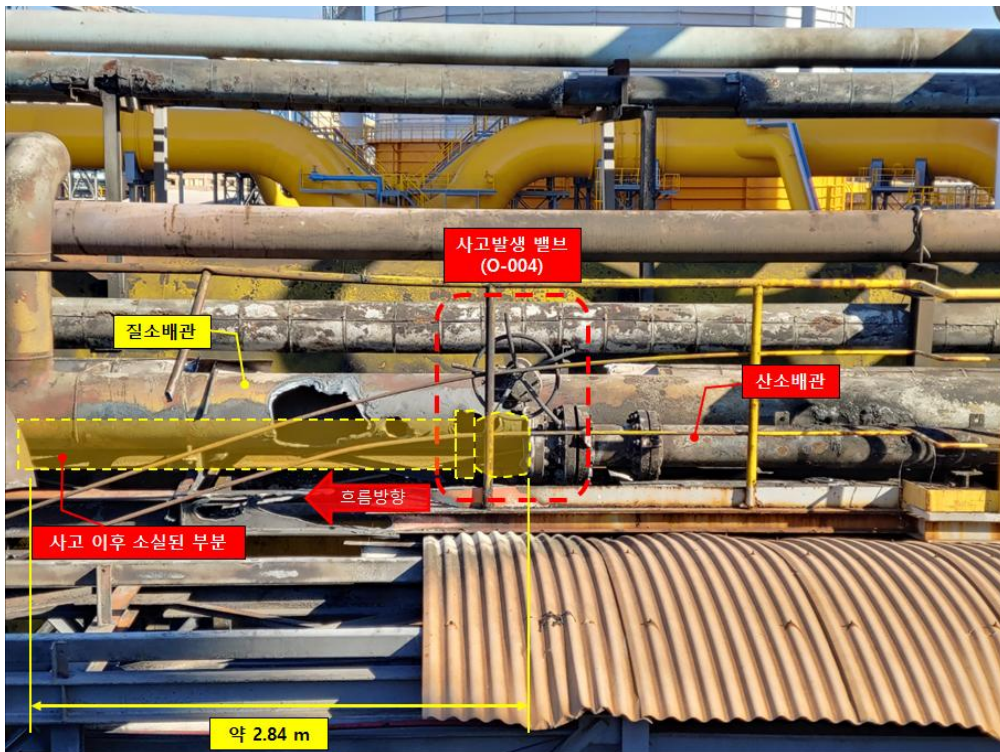
동종재해 재발을 막을 수 있는 근본원인(Root Cause)의 경우 크게 2가지의 관리시스템 결함이 있는 것으로 파악되었다. 첫째, 서류작성 위주의 형식적인 위험성평가 실시 등으로 인해 데크플레이트 받침 붕괴 위험성 예측에 실패하였고, 사고 전일 안전팀이 해당 위험성을 인지하였을 때에도 위험성평가를 미 실시 하여 구조검토에 의한 받침보강 대책 수립, 실행 및 확인 등이 이뤄지지 않는 등 사업장의 유해·위험요인 관리체계가 미흡하여 작동되지 않았다. 둘째, 협력업체 선정 및 계약단계에서 철근콘크리트업체와 철골업체의 겹치는 작업구간에 대한 책임과 역할이 명확히 구분되지 않았다. 그로 인해 데크플레이트 받침작업 책임에 대한 다툼이 있었고, 원청의 거듭된 요청에 협력업체는 마지못해 수용하고, 해당업무를 소극적으로 처리하였다.

동종재해 재발을 방지하기 위해서는 첫째, 안전점검 등에 의한 유해·위험요인의 파악 및 적절한 개선대책을 수립-실행-실행여부 확인 등 위험성평가의 작동성을 강화시키는 것이 필요하다. 둘째, 협력업체 선정단계에서 공사범위를 검토하여 업무영역을 명확히 하고, 겹치는 작업구간에 대해서는 업체 간 책임과 역할을 분명히 해야 한다. 마지막으로 공사방법 변경 등 변경사항 발생 시 작업방법 결정, 검토 및 확인하는 체계 수립이 필요하다.

3.4 제조업 적용사례

3.4.1 사실분석

제철소 내에서 철 가공에 필요한 산소를 생산·공급하는 산소공장 배관라인에서 폭발사고가 발생하였다. 사고발생 시 진행된 작업은 산소공장의 노후 플랜트 일부를 철거하기 위한 사전조치로서 산소배관을 차단하는 작업이었다. 작업계획에 따르면, 산소밸브(Ball valve)를 수동으로 잠궈 산소배관을 차단하고, 배관 내 잔류 산소를 배출(질소 퍼지)한 후 차단판을 설치하는 순으로 진행될 예정이었다. 그러나 배관 내 알 수 없는 지점에서 산소가 누설되어 산소농도가 폭발치를 상회하였고, 산소누설 위치 파악의 어려움과 얼마 남지 않은 작업종료시간 때문에 사고 당일에 해당 작업의 마무리가 어렵다고 판단하여, 산소밸브를 다시 원상태로 여는 작업 중에 화재·폭발이 발생하였다. 그리고 그 결과로 작업자 3명이 사망하였다.



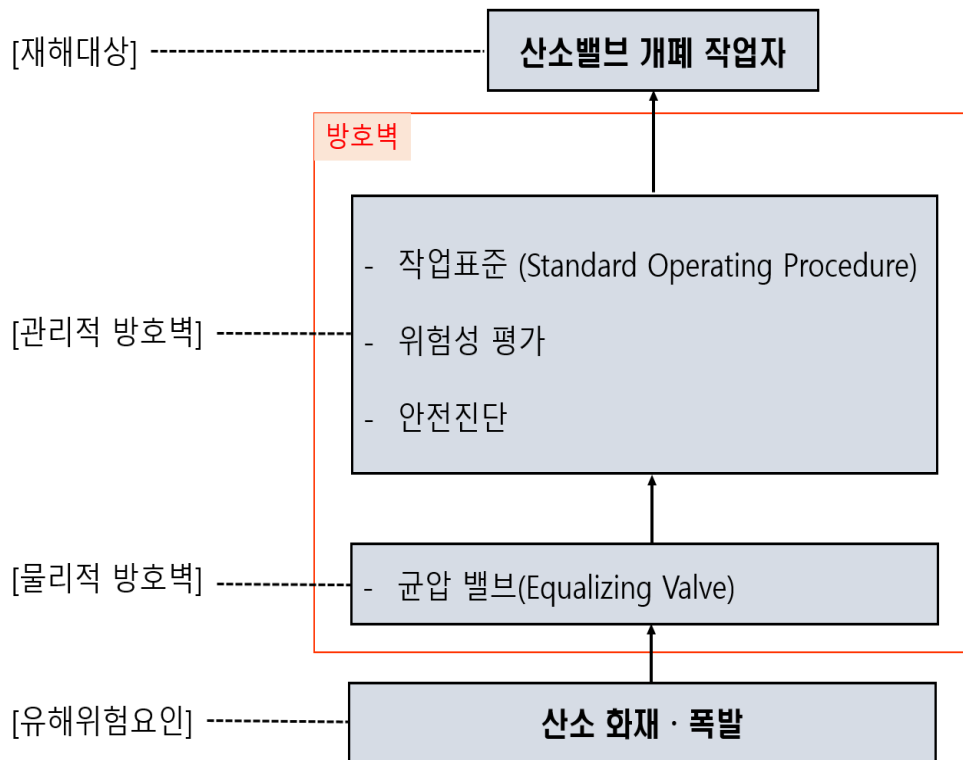
[그림 3-9] 산소배관 폭발사고 발생지점(안전보건공단)

산소배관 폭발사고의 원인은 탄소강 재질의 산소배관 내 존재하는 금속입자 등의 이물질이 산소밸브 개방 시 발생하는 난류(Turbulence)에 의해 입자 간 또는 입자-배관 사이 충돌로 점화되었고 고농도 산소가 있는 배관에 착화되면서 화재·폭발이 발생한 것으로 추정된다. 산소밸브 약 20개소의 개폐작업에 협력업체와 원청 직원

약 40명이 팀을 구성하여 투입되었으며, 사고는 그 중 1개소에서 발생하였다. 산소배관작업은 작업허가(Permit To Work) 대상에 포함되지 않으나 고소작업에 따른 작업허가가 이뤄졌으며, 해당 작업 진행을 위해 작성된 작업계획에 대해 안전팀의 검토과정은 없었다. 산소배관 개폐작업과 관련된 작업표준(Standard Operating Procedure)에는 단순히 밸브를 서서히 개폐하도록 기술하고 있다.

3.4.2 방호벽 분석

사고발생 사업장의 산소배관 밸브개폐작업 관련 방호체계는 [그림 3-10]과 같다. 물리적 방호벽으로는 균압밸브(Equalizing Valve)가 있었으며 관리적 방호벽은 작업표준(Standard Operating Procedure), 위험성평가, 안전진단이 있었다. 사고 당시 각 방호벽의 실제 작동상태와 방호실패 이유 및 사고에 미친 영향을 <표 3-3>과 같이 분석하였다. 물리적 방호벽인 균압밸브는 산소밸브 개방 시 밸브의 좌·우 압력차에 따른 난류발생을 방지하기 위한 장치로써 사고발생 산소밸브에는 설치되어 있지 않았다. 그리고 산소공장 운영직원은 원활한 산소밸브개폐를 위해 균압밸브를 설치한다고 이해하는 등 균압밸브의 용도에 대해 제대로 인식하지 못하고 있었다.



[그림 3-10] 사고발생 사업장 방호벽 체계도

<표 3-3> 제조업 폭발사고 방호벽 분석표

(유해·위험요인) 산소배관 화재·폭발		(재해대상) 산소밸브 개폐 작업자		Context
방호벽 종류	방호벽의 실제 작동상태	방호 실패 이유	사고에 미친 영향	
· 균압밸브 (물리)	· 사고발생 산소밸브에는 미설치	· 균압밸브의 용도를 산소밸브 안전성 확보가 아닌 작업의 용이성 때문인 것으로 잘못 이해	· 산소밸브 개방 시 밸브 좌·우의 압력차에 의해서 난류가 발생하여 입자충돌에 의해 점화됨	지식부족
· 작업표준 (관리)	· 균압밸브 설치기준 미포함 · 산소밸브 개폐를 단순히 서서히 작동하도록 기술	· 이전 산소배관 사고에서 균압밸브 등 대책검토가 제대로 이뤄지지 않았음. · 작업표준의 검토 및 개선에 대한 전문성 부족	· 작업표준에 따라 산소밸브를 서서히 닫는 작업 중 사고발생함.	지식부족 조직학습 부재
· 위험성평가 (관리)	· 정기평가에서 산소밸브 개폐에 따른 폭발 위험 예측 실패	· 위험성평가를 서류 위주의 형식적으로 진행 · 관계자의 전문성 부족 · 이전 사고에 대한 위험성평가 미실시	· 산소밸브 개폐 위험 예측실패로 작업표준 등 개선이 이뤄지지 않았음.	지식부족
· 안전진단 (관리)	· 산소공장 안전진단 시 산소배관 개폐 위험성 및 관련 작업표준에 대한 검토 미실시	· 위험성평가와 안전보건 경영시스템 실시여부, 현장 시설 중심으로 진단 수행	· 사고발생 위험에 대한 진단 및 개선이 이뤄지지 않았음	지식, 경험 부족

관리적 방호벽인 작업표준에는 균압밸브 설치기준을 포함하고 있지 않았으며, 단순히 산소밸브 개폐를 서서히 진행하라고만 기술하고 있어, 재해자들이 작업표준대로 작업하던 중에 사고가 발생한 것으로 추정된다. 정기적으로 실시하는 위험성평가에서는 산소밸브 개폐작업 관련 화재·폭발위험을 예측하는데 실패하였다. 이는 위험성평가 관계자들의 전문성 결여에 따른 것으로 판단된다. 마지막으로 안전진단에서는 이

들에 걸쳐 위험성평가 및 안전보건경영시스템 요구사항의 이행여부와 현장 상태 파악에만 집중하였고, 작업표준의 적정성 및 준수여부 등에 대한 검토는 이뤄지지 않았다.

3.4.3 변화 분석

사고당시의 작업상황과 안전한 작업상태를 비교하여 파악된 차이점이 사고에 미친 영향을 분석하는 변화 분석을 <표 3-4>와 같이 실시하였다. 차이점은 두 가지로서, 첫째, 산소밸브 개폐작업은 하도급 계약에 의해 협력업체 담당직원들이 해야 하는 업무이지만 COVID-19 노출 등으로 담당직원들이 격리되면서, 이전 작업경험이 있는 직원을 포함한 협력업체 및 원청 직원으로 대체인력을 구성하였고, 이들이 해당 작업을 처음 수행하던 중 사고가 발생하였다.

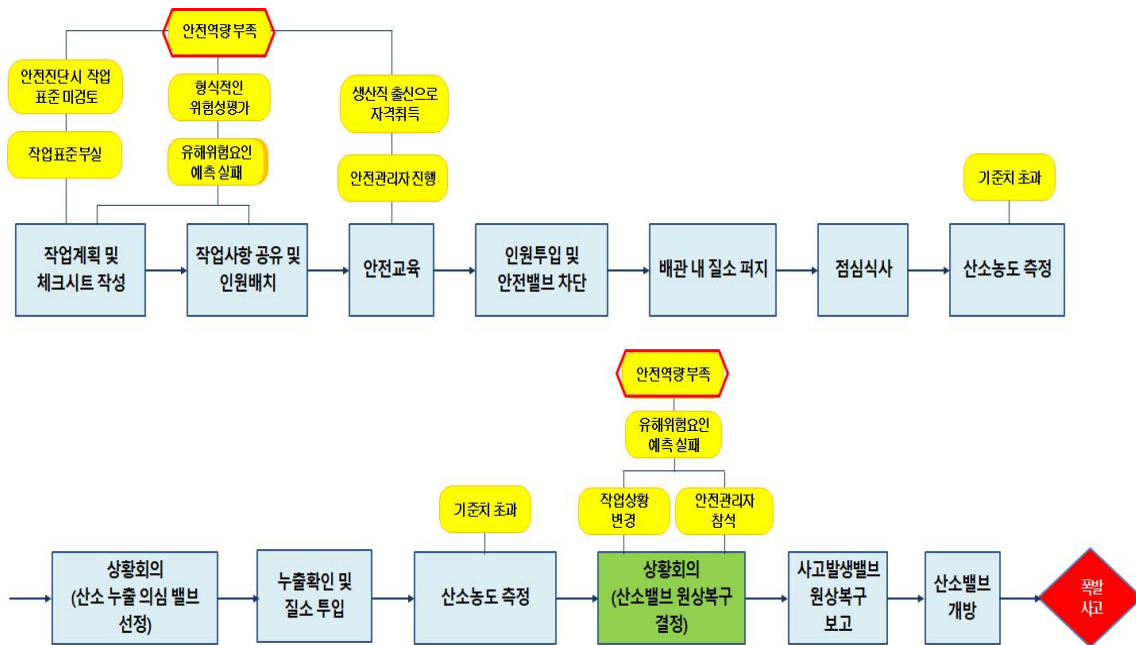
둘째, 작업허가 절차가 매우 형식적으로 진행되었다. 작업허가서는 작업관계자가 작성 후 해당 작업 책임자가 검토하고 안전팀에서 최종 승인하는 절차가 일반적이거나, 사고현장에서는 작업팀 외의 직원이 작성하고, 별도의 검토과정 없이 해당 작업 책임자가 직접 승인하였다. 산소밸브 개폐작업은 해당 사업장의 작업허가 대상이 아니지만, 높이 2m이상 고소작업에 해당되어 작업허가서를 작성하였다.

<표 3-4> 제조업 폭발사고 변화 분석표

요소	사고현장 상태 (Present Condition)	안전작업 상태 (Ideal Condition)	차이 (Difference)
(Who) 산소밸브 조작작업자	· 원청과 협력업체 직원으로 팀을 구성하여 산소밸브 개폐업무 등을 진행	· 협력업체 담당 직원들이 산소밸브 개폐업무 진행 →협력업체와 하도급 계약	· COVID-19 노출 등으로 협력업체 담당직원이 격리되어, 원청 및 협력업체 직원들로 작업조 구성
(When) 작업허가	· 작업팀 외의 직원이 작업허가서 작성 후 별도의 검토과정 없이 해당 작업 책임자가 승인	· 작업관계자가 작업허가서를 작성하고, 작업 책임자가 이를 검토한 후 안전팀에서 최종승인	· 형식적인 작업허가 →작업팀 외의 직원이 작업허가서 작성하고, 검토과정은 없었으며, 작업 책임자가 최종 승인하여, 안전팀에서는 검토 또는 승인하지 않았음.

3.4.4 E&CF 차트 작성

본 연구는 건설업 사례와 마찬가지로 사실분석을 통해 산소배관 폭발사고(Accident) 발생 이전에 선행된 사건들(Events)과 각 사건별 상황, 맥락 등 조건들(Conditions)을 파악하였다. 그리고 사건들을 시간적 발생순서에 따라 수평으로 전개하였으며, 각 사건별 조건들은 해당 사건 위에 수직으로 나열하여 초기 E&CF 차트를 작성하였다. 그리고 방호벽 분석과 변화 분석을 통해 도출된 추가적인 사건과 조건들을 E&CF 차트에 업데이트 하여 최종적으로 13개 사건들과 그에 따른 조건들을 [그림 3-11]와 같이 나타내었다.



[그림 3-11] 제조업 폭발사고 E&CF 차트

3.4.5 사고원인 분석

본 연구는 건설업 사례와 마찬가지로 E&CF 차트를 활용하여 사고발생 전체과정을 파악한 후 사고원인을 직접원인, 기여원인, 근본원인으로 구분·도출하였다. 사고의 직접원인(Direct Cause)은 산소밸브를 개방하면서 발생한 난류(Turbulence)로 인해 탄소강 재질의 노후 배관 내 존재하는 금속입자 등 이물질들이 입자충돌하면서 점화된 것으로 추정되었다. 기여원인(Contributing Cause)은 산소밸브개폐 작업계획 수립 시 참조한 작업표준에 균압밸브 등의 안전조치사항이 포함되어 있지 않았고 단순히 밸브 작동을 서서히 하라고만 기술하고 있는 점, 그리고 주기적으로 진행되는 위험성평가에서 산소개폐 위험성 예측에 실패한 점, 사고발생 2개월 전 실시된 안전진단에서 작

업표준 적정성 검토가 이뤄지지 않은 점으로 파악되었다.

불안전한 상태 및 행동을 제어하지 못한 해당 사업장의 관리시스템 결함과 관련이 있는 근본원인(Root Cause)은 위험성평가를 기반으로 한 안전보건관리시스템의 작동성 및 효과성 문제로 드러났다. 산소배관 관련 국제표준인 ASTM(American Society for Testing and Materials)과 AIGA(Asia Industrial Gases Association)에 따르면 산소밸브 개폐 시 균압밸브를 활용하여 산소밸브 전·후의 동압상태를 확인한 후 밸브를 서서히 개방토록 기술하고 있다. 하지만 사고발생 사업장의 작업표준에서는 단순히 산소밸브를 서서히 조작해야 한다고만 기술하고 있었다. 더구나 작업표준 개선으로 이어지는 위험성평가와 안전진단 시에도 해당내용에 대한 검토가 이뤄지지 않았다. 이는 오랜 기간 생산직으로 근무한 후 안전관리 자격을 취득하여 선임된 안전관리자의 안전역량문제와 관련이 깊은 것으로 추정된다. 따라서 동종재해 재발을 방지하기 위해서는 단기적으로 위험성평가 수행 시 해당 분야 전문가의 도움을 받아 진행하고 도출된 내용을 관련 작업표준에 포함시켜야 하며, 장기적으로 안전관리자의 전문역량을 확보하는데 노력을 기울여야 한다.

제 4 장 위험성평가와 설계안전

4.1 연구 전략 및 방법

선행연구조사에서 논의한 바와 같이 건설업 안전관리는 시공자가 중심이 되어 정해진 공사기간과 공사금액의 제약을 받으며 수행되어 왔다. 하지만 작업자의 안전과 직결되는 공사기간과 공사금액, 구조물 형태, 공정 및 공법 등 주요사항들은 착공 전에 결정되어져, 시공자가 시공단계에서 대응하는데 한계가 있다는 지적이 많았다. 이러한 시공자 중심의 안전관리 한계에 대한 대안으로서 영국 등 주요선진국에서는 건설공사 착공 이전단계에서 안전보건을 확보하는 설계안전(Design for Safety)제도를 약 30년 전부터 도입·시행해 오고 있다.

DfS는 설계자가 설계단계에서 위험성평가를 실시하여, 잠재된 유해·위험요인을 파악한 후 그 대책으로써 설계도면을 변경하거나, 시방서 등 설계도서에 대책내용을 반영하는 것이다. 국내에서는 2016년 건설기술진흥법 개정을 통해 DfS를 공공부분에 도입하였고, 2019년 산업안전보건법 개정을 통해 민간영역으로 확대하였다. 하지만 현재까지 DfS는 제대로 정착되지 못하고 있으며, 선행연구에서는 그 이유를 DfS 수행자의 전문성 부족 때문인 것으로 파악하였다. 구체적으로 설계자의 위험성평가 경험 부족 등으로 설계도서 검토를 통한 유해·위험요인 발굴 및 개선대책 선정에 어려움을 겪고 있는 것으로 조사되었다(신원상b, 2019).

국토교통부에서는 설계자가 시공법을 가정하여 시공과정 중 발생할 수 있는 유해·위험요인을 도출하고 대책 수립 시에도 위험을 회피·제거 또는 감소시키는 대책을 선정토록 하고 있지만, 시공 및 위험성평가 경험이 없는 설계자가 해당업무를 수행하는 것은 어려울 것으로 예상된다. 그리고 국토교통부와 고용노동부에서 작성한 DfS 업무 매뉴얼에서는 DfS 적용사례를 제시하고 있으나 실무적용에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 설계자가 설계단계에서의 위험성평가 시 겪는 애로사항에 대한 대안으로써 영국 등 안전선진국에서 적용되고 있는 설계안전기법(Design solution)을 활용할 것을 제안하고자 한다. 구체적으로 설계자가 설계도서 검토를 통해 유해·위험요인을 파악하고 개선대책으로서 설계안전기법을 선정하는 업무에 대한 가이드를 제공하고자 한다. 이를 위해 건설현장에서 발생한 추락사망재해와 설계안전기법의 통계적 유의성을 분석하였다. 추락재해는 건설업 사고사망자의 절반 이상을 차지하고 있으며, 설계자가 설계도서 검토 시 추락관련 유해·위험요인을 비교적 수월하게 특정 지을 수 있다. 왜냐하면 추락발생 직전 작업자가 위치했던 장소(추락발생지점)가 추락 관련 유해·위험요인 파악에 중요한 힌트가 될 수 있기 때문이다(김경환, 2015).

4.1.1 연구대상 데이터 선정

본 연구는 2020년부터 2022년 사이 국내 건설현장에서 발생한 추락사망재해 총 680건을 분석대상으로 하였다. 중대재해 발생 시 한국산업안전보건공단에서 재해조사를 하여 정리된 재해 요약자료로서, 재해 주요정보를 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점으로 분류하였다. 그리고 자료 내용 중 명확하지 않은 정보는 중대재해조사 보고서를 확인하는 등 재해정보 정제과정을 거쳤다.

4.1.2 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성 분석 방법

본 연구에서는 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성을 분석하기 위해 다음 4단계의 과정을 거쳐 진행하였다. 첫째, 추락사망재해가 발생한 건설공사의 특성(재해 특성)을 파악하기 위해 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점을 정의하였다. 공사종류와 작업공종의 경우 미국 산업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration)에서 제공하고 있는 코딩 표준을 참조하였다. 그리고 공사금액과 추락발생지점은 산업안전보건법령 기준과 기존 연구내용을 고려하여 분류하였다.

둘째, 추락사망재해(680건) 각 건별 설계안전기법(Design solution)과의 연관성 여부에 대한 판단기준을 결정하였다. Michael Behm은 재해와 설계안전기법의 연관성을 분석하는 기준으로 ① 건설공사의 물리적 특성 중 사고 및 설계와 연계된 부분의 존재 여부, ② 기존 문헌·자료 등에서 제시되고 있는 설계안전기법 유무, ③ 재해예방을 위해 새로 개발될 수 있거나 적용 가능한 설계안전기법 유무를 제시하였다(Michael Behm, 2005). 본 연구에서는 설계안전기법의 연관성을 여부를 명확하게 판단하기 위한 기준으로 Michael Behm의 3가지 기준 중 두 번째인 기존 문헌 등에서 제시되고 있는 설계안전기법 유무를 설계안전과의 연관성 여부 판단기준으로 정의하였다.

셋째, 본 연구는 영국과 미국 등의 DfS관계기관 문헌 등에서 추락재해예방을 위해 제시·적용되고 있는 설계안전기법들(Design solutions)을 파악하였다. 우선, 영국과 미국 등에서 제시된 지붕·옥상, 철골구조물, 계단 또는 슬래브 단부 등에서의 추락방지 설계방안들을 조사하였다. 조사결과 미국 11개, 영국 22개, 호주 및 싱가포르 각 1개 등 총 35개의 설계안전기법들을 파악하였다. 그리고 2022년 국내 건설현장에서 발생한 추락사망재해 199건의 추락발생지점(재해자가 추락 직전에 있었던 위치)을 30개로 분류하였다. 그 후 추락발생지점(30개)과 설계안전기법(35종)의 비교·검토를 통해 국내 건설 구조물 특성에 적합하여 설계 시 적용 가능한 설계안전기법 14개를 <표 4-1>와 같이 선정하였다.

<표 4-1> 본 연구에 적용된 설계안전기법(14종)

추락발생지점	추락형태	설계안전기법	출처
지붕	지붕에서 추락 / 얇은 지붕재료를 뚫고 추락	① 지붕 앵커 설계	미국 OSHA 제휴 프로그램
		② 채광창 단부 안전난간 설치, 채광창에 와이어 메쉬 설치, 강도가 확보된 지붕, 채광창 자재 사용	
		③ 옥상 단부 파라펫 설계	
		④ 전기·통신설비 등을 지붕 단부에서 4.5m 이격하여 설치토록 설계	
철골구조물	철골구조물에서 추락	⑤ 철골 기둥 웹(Web)의 0.5m, 1.0m 높이에 와이어로프(안전난간) 설치용 구멍 설계	미국 OSHA 제휴 프로그램
		⑥ 철골 기둥 측면에 철골보 거치용 T형강 설계	
		⑦ 프리패브 : 안전난간, 파이프 랙 등이 포함된 철골계단 틀 설계	영국 DBP(Design Best Practice)
		⑧ 지상에서 철골계단 유닛을 선조립	
슬래브 단부	단부에서 추락	⑨ 계단 등 단부에 안전난간 시스템 설계 (e.g. Cast-in socket)	미국 OSHA 제휴 프로그램.
천장 구조물	천장 재료 탈락 또는 뚫고 추락	⑩ MEWP 접근이 가능한 천장재(구조) 설계	영국 DBP(Design Best Practice)
기타	사다리에서 추락	⑪ 지붕, 옥탑으로 이동이 가능한 고정식 사다리 설계	미국 OSHA Design for Construction Safety
	트럭 적재함 등에서 추락	⑫ 트럭 적재함에서 안전하게 하물 적재 또는 하역이 가능하도록 발판 및 승강로 제작	
	고소작업 시 추락	⑬ 모듈러 공법 : 지상에서 구조물의 각 유닛을 선조립	
	고소에서 에어컨 실외기 설치 중 추락	⑭ 에어컨 실외기를 지상높이에 설치가능토록 받침대 설계	호주 안전설계 지침

마지막으로 추락사망재해 680건에 대한 설계안전기법의 연관성 여부를 [그림 4-1]과 같이 추락발생형태(추락발생지점)와 설계안전기법 간의 매트릭스도를 활용하여 분석하였다.

		설계안전기법							
		지붕 앵커 설계	지붕 채광창 단부 난간/메쉬 망/강도 확보된 재료 사용	옥상 단부 파라펫 설계	지붕 위로 접근 위한 고정식 사다리 설계	철골 기둥 웹 0.5m, 1.0m 높이에 와이어 로프 설치용 구멍 설계	지붕 옥탑으로 이동 가능한 고정식 사다리 설계	MEWP 접근 가능 토탈 천장 구조 설계	계단 등 단부 안전 난간 시스템 설계
추락 발생 형태 (추락 발생 지점)	콘크리트 지붕·옥탑에서 추락	●		●	●				
	채광창을 뚫고 추락		●						
	슬레이트 지붕을 뚫고 추락		●						
	철골구조물에서 수평이동 중 추락					●			
	천장을 뚫고 추락							●	
	이동식사다리를 통해 지붕·옥탑으로 이동 중 추락						●		
	계단 또는 슬래브 단부에서 추락								●

[그림 4-1] 추락사망재해와 설계안전기법 연관성 분석 매트릭스도 예시

4.1.3 통계분석 방법

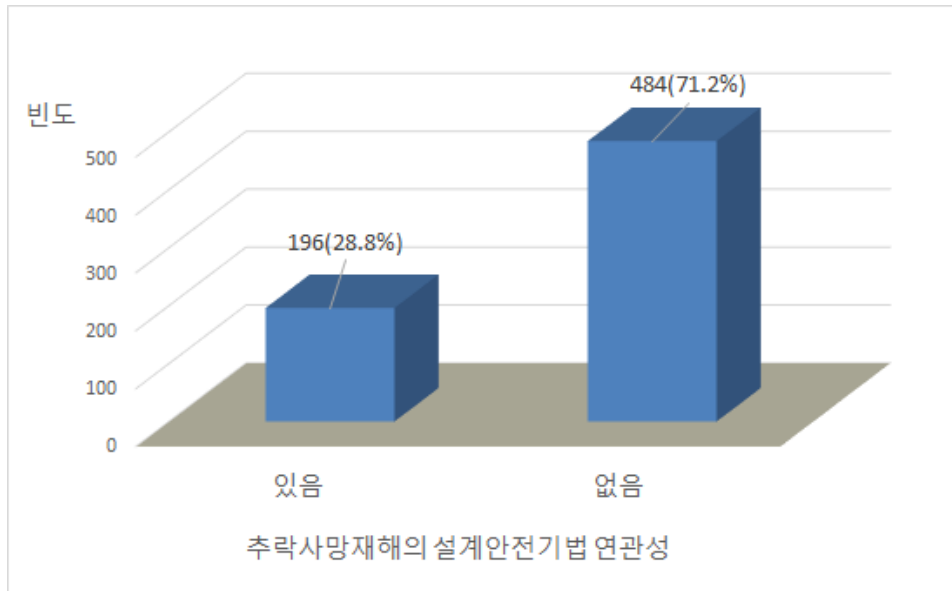
본 연구에서는 5% 유의수준으로 SPSS 프로그램을 활용하여 통계분석을 진행하였다. 독립변수로는 재해 특성 4가지(공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점)로 결정하였으며, 종속변수는 설계안전기법 적용으로 예방 가능했던 추락사망재해 빈도로 선정하였다. 그리고 종속변수(빈도) 특성을 고려하여 카이제곱(Chi Square) 분

석을 적용하였다. 또한 본 연구에서는 독립변수와 종속변수 간의 연관정도를 파악하기 위해 파이 및 크래머 값(Phi or Cramer's Value)을 분석하였으며, 카이제곱 분석의 가정을 고려하여 빈도수 5미만인 경우 분석대상에서 제외시켰다.

4.2 분석결과

4.2.1 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성

추락사망재해 680건에 대한 설계안전 연관성 분석결과 196건(28.8%)이 설계안전기법으로 재해를 예방할 수 있었던 것으로 나타났다[그림 4-2]. 본 연구에서는 설계안전 연관여부를 명확하게 판단하기 위해 국내 건설현장 실정에 적용 가능한 설계안전기법을 보수적으로 선별하였으며, 새롭게 개발·적용될 수 있는 기법들을 제외하고 적용하였음에도 설계안전기법을 통해 추락사망재해의 상당수를 예방할 수 있었던 것으로 파악되었다.



[그림 4-2] 추락사망재해와 설계안전기법의 연관성 빈도 분석

4.2.2 재해특성별 설계안전기법 연관성

독립변수인 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점에 따라 설계안전기법 적용 가능성에 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. 첫째, 공사종류에 따라 설계안전기법으로 예방 가능한 추락재해 빈도에 유의한 차이가 있는 것으로 파악되었다 ($\chi^2(16) = 87.0, p < 0.000$). 공사종류별 추락사망재해 빈도는 <표 4-2.a>와 같이 유지·보수(17.9%), 빌딩(12.5%), 공장·창고(9.4%), 주택(7.4%), 소규모 근린생활시설(7.2%), 인테리어·리모델링(6.2%), 아파트(5.1%) 순으로 나타났으며, 이 중에서 유지·보수(22.4%)와 공장·창고(14.3%)가 설계안전기법과 연관성이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

<표 4-2> 재해특성별 설계안전기법에 의해 예방 가능한 추락사망재해 빈도

(a) 공사종류별 빈도

공사종류	추락사망재해		설계안전기법으로 예방 가능했던 재해	
	빈도	점유율(%)	빈도	점유율(%)
계	680	100.0	196	100.0
유지·보수	122	17.9	44	22.4
빌딩	85	12.5	11	5.6
공장·창고	64	9.4	28	14.3
주택	50	7.4	14	7.2
소규모 근린생활시설	49	7.2	15	7.7
인테리어, 리모델링	42	6.2	10	5.1
아파트	35	5.1	4	2.1
철거·해체	30	4.4	11	5.6
전기·통신	17	2.5	3	1.5
축사	17	2.5	11	5.6
태양광 설비	13	1.9	10	5.1
물류센터	9	1.3	2	1.0
엘리베이터, 기계설비	8	1.2	1	0.5
종교시설	8	1.2	1	0.5
학교	8	1.2	-	-
도로, 교량	7	1.0	-	-
기타	116	17.1	31	15.8

(b) 공사금액별 빈도

공사금액	추락사망재해		설계안전기법으로 예방 가능했던 재해	
	빈도	점유율(%)	빈도	점유율(%)
계	680	100.0	196	100.0
3억원 미만	312	45.9	109	55.6
3억 ~ 20억원 미만	143	21.0	46	23.5
20억 ~ 50억원 미만	81	11.9	23	11.7
50억 ~ 120억원 미만	46	6.8	10	5.1
120억 ~ 800억원 미만	61	9.0	5	2.6
800억 ~ 1,500억원 미만	17	2.5	1	0.5
1,500억원 이상	20	2.9	2	1.0

(c) 작업공종별 빈도

작업공종	추락사망재해		설계안전기법으로 예방 가능했던 재해	
	빈도	점유율(%)	빈도	점유율(%)
계	680	100.0	196	100.0
도장·방수	89	13.1	25	12.8
지붕·판넬 마감작업	74	10.9	31	15.8
콘크리트 작업(형틀, 철근배근)	57	8.4	4	2.0
철거·해체작업	54	7.9	27	13.8
철골작업	45	6.6	39	19.9
가시설물 설치·해체	42	6.2	2	1.0
전기·통신설비 작업	24	3.5	7	3.6
유리·창호작업	23	3.4	2	1.0
미장·단열작업	22	3.2	4	2.0
기타 내부마감작업	21	3.1	4	2.0
공조설비작업	19	2.8	5	2.6
기계설비 설치작업	17	2.5	3	1.6
기타 외부마감작업	11	1.6	1	0.5
태양광설비 작업	11	1.6	10	5.1
석재·타일작업	10	1.5	2	1.0
청소·정리작업	10	1.5	4	2.0
조적작업	8	1.2	0	0.0
기타	143	21.0	26	13.3

(d) 추락발생지점별 빈도

추락발생지점	추락사망재해		설계안전기법으로 예방 가능했던 재해	
	빈도	점유율(%)	빈도	점유율(%)
계	680	100.0	196	100.0
이동식사다리	56	8.2	4	2.0
단부·수직개구부	46	6.8	12	6.1
철골구조물	42	6.2	42	21.4
판넬지붕	41	6.0	-	-
강관비계	39	5.7	-	-
지붕 채광창	39	5.7	39	19.9
차량탑재형 고소작업대	39	5.7	2	1.0
달비계	36	5.3	-	-
이동식비계	32	4.7	-	-
콘크리트 지붕·옥탑	31	4.6	31	15.8
개구부	21	3.1	-	-
옹벽·사면	19	2.8	-	-
시스템 비계	19	2.8	-	-
크레인·리프트	19	2.8	-	-
거푸집동바리	17	2.5	-	-
슬레이트 지붕	16	2.4	16	8.2
천장 구조물	16	2.4	15	7.7
계단 단부	12	1.8	12	6.1
Canopy	10	1.5	10	5.1
고소작업대 및 철골구조물	7	1.0	7	3.6
트럭 적재함	6	0.9	6	3.1
기타	117	17.1	-	-

둘째, 공사금액에 따라 설계안전기법으로 예방 가능한 재해빈도에 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($\chi^2(6) = 35.4, p < 0.000$). 3억원 미만(45.9%), 3억~20억원 미만(21.0%), 20억~50억원 미만(11.0%) 등 중·소규모 건설현장에서 추락사망재해 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다. 한편, 추락사망재해에 대한 설계안전기법 연관성은 공사금액이 적을수록 높은 것으로 파악되었다.

셋째, 작업공종에 따라 설계안전기법으로 예방 가능한 추락재해 빈도에 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($\chi^2(17) = 223.9, p < 0.000$). 작업공종별 추락사망자 빈도는 도장·방수작업(13.1%), 지붕·판넬 마감작업(10.9%), 형틀·철근·콘크리트 작업(8.4%), 철거·해체작업(7.9%), 철골작업(6.6%) 순으로 나타났다. 또한, 설계안전기법과 연관성이 높은 작업공종은 철골작업(19.9%), 지붕·판넬 마감작업(15.8%), 철거·해체작업(13.8%), 도장·방수작업(12.8%)인 것으로 분석되었다.

넷째, 추락발생지점에 따라 설계안전기법으로 예방 가능한 재해빈도에 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($\chi^2(26) = 631.2, p < 0.000$). 추락발생지점별 사망재해 빈도는 이동식사다리(8.2%), 단부·수직개구부(6.85), 철골구조물(6.2%), 판넬지붕(6.0%), 강관비계(5.7%), 지붕 채광창(5.7%), 차량탑재형 고소작업대(5.7%) 순으로 나타났다. 반면, 설계안전기법의 적용이 가능했던 추락발생지점 빈도는 철골구조물(21.4%), 지붕 채광창(19.9%), 콘크리트 지붕·옥탑(15.8%), 슬레이트 지붕(8.2%) 순으로 높게 파악되었다.

한편, 파이 및 크래머 값 분석결과, 설계안전기법과 연관성 정도는 추락발생지점, 작업공종, 공사금액, 공사종류 순으로 높게 나타났다. 추락발생지점의 설계안전기법 연관성(크래머 값)이 0.964로 가장 높았으며, 작업공종(0.547), 공사종류(0.358), 공사금액(0.228) 순으로 설계안전기법과 연관정도가 큰 것으로 파악되었다.

4.2.3 통계분석결과로 본 설계안전기법 적용 가능성

추락발생지점은 재해자가 추락하기 직전에 있었던 장소로서, 설계자가 설계도서 검토를 통해 위험성평가 시 추락 관련 유해·위험요인의 도출과 그에 대한 대책으로써 설계안전기법을 선정하는데 도움을 줄 수 있는 중요한 정보이다. 추락발생지점별 추락사망재해 빈도는 이동식사다리, 단부·수직개구부, 철골구조물, 판넬지붕, 강관비계, 지붕 채광창, 차량탑재형 고소작업대 순으로 높게 나타났으나, 설계안전기법의 적용이 가능했던 추락발생지점 빈도는 철골구조물, 지붕 채광창, 콘크리트 지붕·옥탑, 슬레이트 지붕 순으로 높게 파악되었다. 이 결과는 John Gambatese가 지붕과 철골구조물이 설계안전기법을 효과적으로 적용할 수 있는 영역이라고 밝힌 선행연구결과와 일치하는 내용으로서, 지붕과 철골구조물에 설계안전기법 적용 시 상당수의 추락사망재해를 예방할 수 있음을 의미한다.

한편, 재해 특성인 공사종류, 공사금액, 작업공종에 대한 정보 역시 추락사망재해 예방을 위한 설계안전기법 적용에 활용될 수 있다. 설계안전기법과 연관성이 있는 공사종류는 유지·보수, 공장·창고, 소규모 근린생활시설 순으로 높게 나타났으며, 공사금액은 20억원 미만 소규모 현장에서 설계안전 연관성이 높은 것으로 파악되었다. 그리고 설계안전 관련성이 있는 작업공종은 철골작업, 지붕·판넬작업, 철거·해체작업, 도장·방수작업 순으로 조사되었다. 이러한 재해특성은 설계자가 설계도서 검토 시 추락사망재해예방을 위해 설계안전기법을 적용해야 할 영역을 확인하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

제 5 장 결 론

그간의 지속적인 산업재해감소 노력에도 불구하고 국내 산업재해율은 영국 등 주요선진국에 비해 매우 높은 수치를 나타내고 있다. 또한, 사회적 물의를 일으키는 대규모 인명피해사고가 연이어 발생하면서 사회적 불안감이 조성되어왔다. 이러한 산재사고의 근본원인을 사업장 내 잠재되어 있는 위험을 발굴하고 제거하는 안전보건관리체계의 미비 때문인 것으로 판단하여 2021년 중대재해처벌법 제정을 통해 경영책임자 등에게 안전보건관리체계의 구축 및 이행조치의무를 부여하였으며, 2022년 중대재해 감축 로드맵을 발표하며 기업 스스로 자기규율 예방체계를 확립할 것을 요구하고 있다. 한편, 건설업의 경우 관련법 개정을 통해 건설공사 착공 전에 발주자와 설계자로 하여금 설계안전성검토(Design for Safety)를 시행토록 하고 있다. 여기에서 주목할 것은 안전보건관리체계, 자기규율 예방체계, 설계안전성검토 모두 위험성평가를 핵심 수단으로 활용하고 있다는 점이다.

위험성평가는 2013년 법제화된 후 약 10년이 경과하였으나 사업장에 제대로 정착되지 못하고 있다. 그 이유를 선행연구에서는 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 파악과 개선대책 선정의 어려움, 전문 인력 부족 때문인 것으로 밝히고 있다. 따라서 본 연구는 사업장의 자율 안전보건관리체계 향상을 위해서는 위험성평가의 현장 실행력 강화가 우선이라고 판단하였고, 그 해결방안으로써 사업장 위험성평가 작동성 문제에 보완적으로 활용할 수 있는 사고분석기법(Accident Analysis)과 설계안전기법(Design Solution) 적용방안을 제시하였다. 그리고 위험성평가의 문제점, 사고분석 및 설계안전 적용과 관련한 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 사업장에서 위험성평가 실행력을 저하시키는 주요 원인들을 분석하였다

사업장 위험성평가 수행 실태 및 관계자 의식문제는 선행연구자료 분석을 통해 이뤄졌다. 위험성평가는 사업장내 잠재되어 있는 유해·위험요인을 발굴하여 그 위험성 크기를 평가한 후 적절한 감소대책 수립·실행을 통해 위험성을 허용범위 이내로 끌어내리는 체계적인 재해예방활동이다. 하지만 선행연구에서 위험성평가 관계자를 대상으로 한 설문조사결과 잠재된 유해·위험요인을 예측하는 것과 도출된 유해·위험요인에 대한 적절한 대책을 선정하는데 어려움을 겪고 있는 것으로 조사되었다.

건설업의 경우 건설공사 착공 이전인 설계단계에서 설계자가 설계도서 참조 및 시공법을 가정하여 위험성평가를 실시하도록 되어 있다. 하지만 위험성평가와 시공 관련 경험·지식 부족으로 설계자들이 위험성평가를 제대로 수행하지 못하는 것으로 조사되었다. 특히, 도면·시방서 등 설계도서를 통해 유해·위험요인을 파악하는 것과 이에 대한 적절한 대책으로서 안전설계안을 수립하는 업무의 난이도를 높게

인식하는 것으로 파악되었다. 따라서 사업장에서 위험성평가가 제대로 작동하기 위해서는 위험성평가 절차 중 사업장 내 잠재된 유해·위험요인을 예측하는 것과 도출된 유해·위험요인에 대한 적절한 개선대책을 수립하는 것에 대한 구체적인 가이드가 필요한 것으로 판단된다.

둘째, 위험성평가의 유해·위험요인 파악 및 개선대책 선정에 도움을 줄 수 있는 사고분석기법을 선정하였고 적용사례 제시를 통해 그 효과성을 검증하였다.

사업장에서 발생하는 크고 작은 사고는 작업자의 불안정한 행동, 작업장의 불안정한 상태, 작업절차 결함, 관리감독 부재 등 사고요인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 따라서 사고는 해당 사업장의 안전관리실태를 판단할 수 있는 결정적인 힌트가 될 수 있다. 그러므로 사고발생 사후조치로서 동종·유사재해의 재발을 방지하기 위한 목적으로 사고조사·분석을 실시한다. 한편, 위험성평가는 재해예방을 위한 사전조치로서 실시된다. 본 연구는 재해의 사전예방을 위해 실시하는 위험성평가에 대해 사후조치인 사고분석을 보완적으로 사용할 수 있다고 착안하여 연구를 진행하였다. 앞서 언급한 위험성평가의 유해·위험요인 파악 및 개선대책 선정 문제에 대해 사고분석을 통해 도출한 사고요인과 이를 제어하지 못한 사업장 관리시스템 결함내용이 실질적인 도움을 줄 수 있기 때문이다.

본 연구는 위험성평가에 보완적으로 사용할 수 있는 사고분석기법으로 미국에너지부(DOE) 사고분석기법을 선정하였다. DOE 기법은 제임스 리즌의 스위스 치즈모델을 기반으로 한 역학모형의 한 종류로서, 사고의 원인을 직접원인(Direct Cause), 사고를 직접적으로 일으키진 않았으나 사고발생 가능성을 증가시킨 기여원인(Contributing Cause), 해당 사업장의 관리시스템 결함과 관련이 있는 근본원인(Root Cause)으로 분류한다. 그리고 도출된 원인에 따라 개인 안전역량, 관리감독, 작업절차 및 허가, 사업장 관리시스템 측면에서 개선대책을 제시한다. 이러한 사고분석결과는 위험성평가 절차 중 유해·위험요인 파악과 그 위험성을 제어하기 위한 개선대책을 선정하는데 실질적인 도움을 줄 수 있다.

사고분석기법을 위험성평가에 보완적으로 활용할 때 얻을 수 있는 효과성을 검증하기 위해, 본 연구는 건설업과 제조업에서 발생한 중대재해 각 1건에 대해 DOE 기법을 활용하여 사고분석을 실시하였다. 그리고 사고분석으로 도출된 사고원인 및 개선방안이 위험성평가에 환류(Feed-back)될 수 있음을 확인하였다.

셋째, 건설프로젝트 설계단계에서 설계자가 위험성평가 시 활용할 수 있는 설계안전 기법 적용 가이드를 제시하였다.

건설프로젝트의 경우 공사금액과 공사기간이 계약을 통해 정해져 있고, 안전관련

중요한 의사결정들이 건설공사 착공 이전에 시행된다는 점에서 건설공사의 안전관리를 착공 이전 기획·설계단계에서 시작해야 한다는 의견이 지배적이다. 영국의 CDM제도, 국내 설계안전성검토·안전보건대장 제도는 착공 전 설계단계에서 설계자가 실시하는 위험성평가를 기초로 하는 법제도이다. 설계자가 설계도서 검토를 통해 유해·위험요인을 도출하고 이를 제어하기 위한 방법으로 설계안전(Design for Safety)을 실시하는 것이 주 내용이지만, 설계자의 위험성평가 관련 지식·경험부족으로 제대로 정착되지 못하고 있다.

따라서 본 연구는 현재 영국 등 안전선진국에서 적용되고 있는 설계안전기법들(Design solutions) 중 추락재해예방 관련 기법들 일부를 선정하여, 과거 3년간 국내 건설현장에서 발생한 추락사망재해 680건을 대상으로 해당 기법 적용 시 예방가능 여부를 분석하였다. 재해 특성(독립변수)인 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점과 종속변수인 설계안전 연관성에 대한 카이 제곱 교차분석을 실시하였다. 분석결과 공사종류, 공사금액, 작업공종, 추락발생지점 모두 설계안전기법 적용으로 예방 가능했던 재해빈도에서 유의한 차이를 나타냈다. 설계안전기법이 적용될 수 있는 공사종류(유지·보수, 공장·창고, 소규모 근린생활시설), 작업공종(철골작업, 지붕·판넬작업, 철거·해체작업, 도장·방수작업), 공사금액(20억원 미만)은 설계안전기법 적용 영역 파악 및 정책 입안 시에 유용하게 활용될 수 있다.

한편, 추락발생지점은 설계안전과 연관성이 매우 높은 것으로 분석되었다. 추락발생지점이란 재해자가 추락하기 직전에 있었던 장소로서 추락 관련 유해·위험요인을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있는 정보이다. 그리고 추락발생지점별 적용 가능한 설계안전기법들은 해당 유해·위험요인에 대한 설계안전 대책으로서 활용될 수 있다. 따라서 설계자가 설계도서를 활용하여 위험성평가 시 설계안전기법이 적절하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 본 연구는 선행연구조사를 통해서 사업장 스스로 위험요인을 발굴·통제하는 안전보건관리체계가 제대로 정착되기 위해서 위험성평가 실행력 확보가 우선되어야 한다고 판단하였다. 그리고 위험성평가의 작동성 제고를 위해 사고분석기법과 설계안전기법을 활용할 것을 제시하였고, 그 효과성에 대해서는 적용사례와 통계분석을 통해 검증하였다. 하인리히의 재해발생 피라미드(1:29:300) 이론에 따르면, 총 330건의 사고가 발생하는 경우 중대사고 1건, 경미한 사고 29건, 아차사고 300건의 비율로 발생하게 되며, 경미한 사고와 아차사고를 줄이면 중대사고 발생비율 또한 줄어들게 된다. 따라서 아차사고를 체계적으로 관리하고 사고분석을 실시한다면, 유해·위험요인을 조기에 예측하고 적절한 개선대책을 수립·실행할 수 있어, 실질적인 재해예방 효과를 기대할 수 있게 된다. 건설공사의 경우 설계단계에서 설계안전기법을 활용한 위험성평가가 정착되면, 설계도서상에 잠재된 유해·위험요인을 상당수 제거 또는 그 위험성을 감소시킬 수 있게 되어 시공단계에서의 위험수준과 재해예방부담이 현저히 줄어들게 될 것으로 기대된다.

하지만, 국내 산업현장의 사고분석기법 활용도는 아직 미미한 수준이며, 관련 전

문인력도 부족하므로 사고분석기법 활용 가이드, 교육프로그램의 개발 등 후속연구가 필요하다. 그리고 본 연구에서는 추락재해예방을 위한 설계안전기법 적용 가능성에 대해서만 분석하였고, 기존 설계안전기법 외 추가적으로 개발 가능한 기법들에 대한 연구는 이뤄지지 않았다. 따라서 다른 재해유형과 새로운 설계안전기법 적용 가능성에 대한 후속 연구개발이 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

Erik Hollnagel(2012), “FRAM : the Functional Resonance Analysis Method” , pp.39-85.

Erik Hollnagel(2014), “Safety I vs. Safety II” , pp.21-31

Health and Safety Executive of U.K.(2007), “Construction Design and Management 2007 Approved Code of Practice” , pp.24-28.

James Reason(2014), “인재는 이제 그만(Managing the Risks of Organizational Accidents)” , pp.10-25

Jens Rasmussen(2000), “Proactive Risk Management in a Dynamic Society” , pp.17-26.

John A. Gambatese, Michael Behm(2008), “Designer’ s role in construction accident causality and prevention: Perspectives from an expert panel” , Journal of Safety Science, 46:675-691.

Michael Behm(2005), “Linking construction fatalities to the design for construction safety concept” , Journal of Safety Science, 43:589-611.

Nancy G. Leveson(2009), “CAST HANDBOOK: How to Learn More from Incidents and Accidents” , pp.26-33.

Occupational Safety & Health Administration in the U.S.(1987), “Standard Industrial Classification(SIC) manual” .

U.S. Department of Energy(a)(2012), “Accident and Operational Safety Analysis - Volume 1: Accident Analysis Techniques” , pp.1-1~1-5.

U.S. Department of Energy(b)(2012), “Accident and Operational Safety Analysis - Volume 2: Operational Safety Analysis Techniques” , pp.1-9~1-41.

U.S. Project Management Institute(2013), “A Guide to the Project Management Body of Knowledge” , pp.38-46.

T. Michael Toole, John Gambatese(2008), “The Trajectories of Prevention through Design in Construction” , Journal of Safety Science, 46:675-691.

고용노동부(2019), “근로자 안전보건 확보를 위한 발주자의 안전보건관리 매뉴얼” , pp.112-128.

고용노동부(2020), “건설공사 안전보건대장의 작성 등에 관한 고시” , pp.1-4.

고용노동부(2021), “중대재해처벌법 해설(중대산업재해 관련)” , p.5-6, 20-23

고용노동부a(2022), “2022. 12월말 산업재해 발생현황” , pp.6-14.

고용노동부b(2022), “산업안전 선진국으로 도약하기 위한 중대재해 감축 로드맵” , p.1-10

고용노동부(2023), “사업장 위험성평가에 관한 지침” , 고용노동부고시 제2023-19호, pp.1-12.

고용노동부, 한국산업안전보건공단(2023), “2023 새로운 위험성평가 안내서” , pp.77-103.

국토교통부(2016), “건설공사 안전관리 업무수행 지침” , 국토교통부 고시 제 2016-718호, pp.12-14.

국토교통부(2017), “설계 안전성 검토 업무 매뉴얼” , pp.93-107.

김경환(2015), “Statistical Approach to Design for Fall Prevention In Construction” , 미국 웨인주립대학교 석사학위 논문, pp.1-25.

김광수(2022), “『중대재해 등 처벌에 관한 법률』의 구성요건에 대한 소고 - 과실의 안전·보건의무 위반 시 처벌 제한을 중심으로 -” , 법학연구, 30(2):29-52

김동산, 백동현, 윤완철(2007), “인적오류 분석기법의 국내외 활용 현황 및 국내 철도 산업에의 적용 방안” , 한국철도학회논문집, 10(1):7-15.

김시은, 정재민, 정재욱(2019), “해외 유사 제도 비교분석을 통한 설계안전성검토 개선 방안” , 한국안전학회지, 34(6):38-49.

김연성, 석호삼, 성도경(2017), “국제표준 경영시스템 통합이 경영성과에 미치는 영향

에 대한 실증적 연구 - 품질, 환경 및 안전·보건 경영시스템 중심으로 -”, 품질경영학회지, 45(4):781-810.

김태우, 한형서, 박세웅(2017), “위험성평가를 통한 산업재해 감소방안에 관한 연구 : 건설안전행정을 중심으로”, 기업경영리뷰, 9(3):219-234.

권재범, 권영국a(2021), “산업현장에서 쉽게 적용할 수 있는 근본원인 사고조사기법 개발에 관한 연구”, 한국안전학회지, 36(5):43-51.

권재범, 권영국b(2021), “한국 산업계에서 사고조사 수행 시 사고조사자의 관점에 관한 연구”, 한국안전학회지, 36(2):58-67.

배계완, 김경환(2021), “다계층·복합구조의 국내 조선소를 대상으로 한 시스템분석기법 적용방안 연구”, 한국안전학회지, 36(4):88-98.

산업안전보건연구원(2019), “산업안전 패러다임의 전환 전략 수립을 위한 연구”, pp.1-7.

서용하, 우인성, 장철, 황명환(2015), “설문조사를 통한 건설업 위험성평가 실효성에 관한 연구”, 리스크관리연구. 23(3):1-27.

송경일, 최병관(2019), “ISO 45001:2018 안전보건경영시스템의 특징과 적용 사례 연구, 대한설비관리학회지, 24(1):19-24.

신원상, 손창백a(2019), “건설프로젝트의 설계안전성 검토에 대한 인식 분석 및 개선방안”, 한국건축시공학회지, 19(4):351-359.

신원상, 손창백b(2019), “발주자 및 설계자의 DFS 업무수행능력 분석 및 향상방안”, 한국건설관리학회 논문집, 20(5):95-103.

안홍섭(2011), “CDM에 내재된 발주자 주도의 안전관리 메커니즘”, 대한건축학회 연합논문집, 13(4):297-304.

염성준, 김준호, 이동훈(2020), “국내 설계 안전성 검토 및 해외 사례 분석을 통한 개선방안 연구”, 한국건설안전학회 논문집, 3(1):25-31.

유성곤, 이근형, 신원상, 손창백(2018), “설계사무소의 D.F.S 인식수준 분석 및 해결방향”, 한국건축시공학회 2018년 춘계학술발표대회 논문집, 8(1):43-44.

이소림, 조성우, 김동언, 유지영, 이은미(2019), “설계안전성검토(DfS) 제도의 개선방안 연구”, 한국건설안전학회 논문집, 2(2):70-75.

임세종, 정성춘, 나예지, 원정훈(2020), “건설공사 발주자의 계획, 설계, 공사단계 안전보건관리 역할 분석”, 한국안전학회지, 35(3):24-31.

정진우(2021), “사업장 위험성평가에 관한 법제의 비교법적 고찰”, 한국산업보건학회지, 31(4):304-316.

지경환, 최병정(2017), “설계안전성 검토 시행에 따른 국내 건설업 주체의 안전개선 연구”, 대한안전경영과학회지, 19(4):63-76.

최윤길, 조근태(2020), “인과지도를 활용한 건설 안전사고 원인 분석 : 안전문화 관점”, 한국안전학회지, 35(2):34-46.

한국산업안전보건공단(2019), “중대재해조사 실무 핸드북”, pp.153-181.

한국산업안전보건공단(2021), “안전보건경영시스템(KOSHA-MS) 인증업무 처리규칙, pp.47-82.

황동혁(2022), “중대재해처벌법에 대한 헌법적 고찰 - 중대산업재해를 중심으로 -”, 부산대학교 법학연구, 63(2):1-29

Abstract

Korea has achieved high economic growth in a short period of time, but in terms of occupational safety and health, it is at the lowest level among OECD countries. Despite continuous efforts to reduce industrial accidents over the past 20 years, the industrial accident rate is 4 to 10 times higher than that of European advanced countries such as the UK. In addition, the occasional occurrences of large-scale accidents, such as a trap accident at a thermal power plant in 2018, a fire accident at a logistics refrigerated warehouse construction site in 2020, and a collapse and burial accident that occurred during concrete pouring at a residential-commercial construction site in 2022, have created social anxiety. It is known that the root cause of these industrial accidents is due to the lack of safety culture and the absence of a Occupational Safety and Health(OSH) management system that discovers and eliminates hazard on their own.

As a result, in 2021, the Severe Accident Punishment Act was enacted, which imposes duties on the establishment and implementation of the workplace OSH management system to owner & board of directors. The establishment of a self-discipline prevention system to identify and control hazard was emphasized in 2022. In the case of the construction industry, since important decisions related to safety, such as construction cost, period, and process, are made before construction starts, Design for Safety(DfS) was introduced through the revision of the Construction Technology Promotion Act in 2016. What is noteworthy here is that the safety and health management system, the self-discipline prevention system, and Design for Safety all have risk assessment as a key tool.

Risk assessment is the process of establishing and implementing hazard identification and risk elimination or reduction measures in the workplace when the risk, which can lead to death, injury, or disease of workers, is out of the allowable range. It is an ongoing accident prevention activity. It has been about 10 years since the risk assessment was enacted and implemented through the revision of the Occupational Safety and Health Act in 2013, but it has not been properly established in the workplace. It was found that the reason for this is due to difficulties in identifying

hazard and choosing proper risk control measures during the risk assessment process. Therefore, this study considered that risk assessment should be properly implemented in order to improve OSH management system in the workplace. Accordingly, this study suggested application of Accident Analysis and Design Solution as a method for strengthening the implementation of risk assessment.

In this study, the US Department of Energy(DOE)'s accident analysis technique based on the epidemiological model was selected as an accident analysis method. The DOE method categorizes the cause of the accident into direct causes, contributing causes that did not directly cause the accident but increased the possibility of the accident, and root causes related to the defects in the management system of the workplace. In addition, DOE method can make proper recommendation to prevent recurrence of homogeneous accidents, based on the three types of cause. Therefore, this study considered that the DOE method should be used as a supplement to the hazard identification and the selection of risk control measures in risk assessment. In addition, the effectiveness was verified by applying the DOE technique to two fatal accident cases occurred in the construction and manufacturing industries. According to Heinrich's disaster occurrence pyramid (1:29:300), 29 minor accidents and 300 near misses occur before one major accident occurs. Therefore, if accident analysis technique is applied to near-miss and minor accidents and the results are fed back to the risk assessment, it is expected that serious accidents can be prevented more effectively.

Design for Safety(DfS) is a accident prevention activity in which a designer conducts a risk assessment at the design stage before construction begins, and reflects the results in design documents. However, DfS has not been properly established due to the designer's lack of knowledge and experience in risk assessment and construction. In previous studies, it was found that designers consider the degree of task difficulty of deriving hazards and establishing proper design solutions very high during risk assessment through design document review. Therefore, this study suggests utilizing the design safety technique (Design solution) as a method that can help designers in their risk assessment.

This study analyzed whether fatal accidents could be prevented when applying design solutions, targeting fatal falls (680 cases) that occurred in

Korea over the past 3 years. The design solutions applied in this study were selected from some advanced safety countries such as the UK. In addition, a chi-square cross-tabulation was conducted on the relationship between accident characteristics (construction type, construction cost, work type, fall location) and design for safety. As a result of the analysis, construction type, construction cost, work type, and fall location all showed significant differences in the frequency of accidents related to design solutions. Construction type to which design solutions can be applied (maintenance, factories/warehouses, small-scale housing/retail stores), work type (steel work, roof/panel work, demolition work, painting/waterproof work), construction cost (Less than 2 billion won) can be used when identifying areas to which design solutions are applied and formulating policies. In particular, it was found that the fall location where the victim was right before the fall had a high correlation with design solutions. It is regarded that these results can be used by designers to identify fall-related hazards and select appropriate design solutions during risk assessment.

In conclusion, this study presented Accident Analysis and Design Solution as effective measures to strengthen the implementation of risk assessment. In addition, it was verified that accident analysis and design solution could be used complementary to the problem of predicting hazard and selecting appropriate measures in risk assessment through the application of accident analysis to fatal cases and statistical analysis. However, since the utilization of accident analysis techniques in domestic industrial sites is insignificant and the related professional manpower is insufficient, follow-up studies such as development of guides and educational programs for accident analysis techniques are needed. In addition, in this study, only the applicability of design solutions for fall prevention was analyzed, and research on additionally developable techniques other than the existing solutions was not conducted. Therefore, it is deemed necessary to conduct additional research and development on the applicability of new design solutions.

※ **Keywords** : Occupational Safety and health management system, risk assessment, Accident Analysis, DOE technique, Design for Safety, Design Solution, Fall Prevention, Fall Location

[부록 1] 본 연구에 적용된 설계안전기법(14종)

설계안전기법	내용	페이지	출처
① (지붕에서 추락 예방) 지붕 앵커 설계	- 안전대 결이 고정점 (Anchor) 설계	66	미국 OSHA 제휴 프로그램
② (지붕에서 추락 예방) 채광창 단부 안전 난간 설치, 채광창에 와이어메쉬 설치, 강도가 확보된 재료 사용 등	- 지붕 채광창 발빠짐 예방을 위한 채광창 강도확보, 단부 안전난간 설치 등	67	미국 OSHA 제휴 프로그램
③ (지붕에서 추락 예방) 옥상 단부에 파라펫 설계	- 지붕, 옥상단부에 추락방지용 파라펫 설계	68	미국 OSHA 제휴 프로그램
④ (지붕에서 추락 예방) 전기·통신설비 등을 지붕 단부에서 4.5m 이격하여 설치토록 설계	- 지붕 위에서 전기통신설비 수리 중 추락사고 예방을 위해 위치 조정	69	미국 OSHA 제휴 프로그램
(철골에서 추락 예방) ⑤ 철골기둥 0.5m/1.0m 높이에 와이어로프 설치용 구멍 설계, ⑥ 철골기둥 측면에 보 거치용 T형강 설계	- 안전대 결이용 또는 안전난간용으로 와이어로프를 설치하기 위함 - 철골보 설치 중 흔들림 등에 의한 추락사고 예방	70	미국 OSHA 제휴 프로그램
⑦ (철골에서 추락 예방) 프리패브, 안전난간, 파이프 랙 등이 포함된 철골계단 틀 지상에서 제작	- 지상에서 제작하여 고소작업에 따른 추락위험을 근원적으로 차단	71	영국 DBP(Design Best Practice)
⑧ (철골에서 추락 예방) 지상에서 철골계단 유닛을 선 조립	- 지상에서 제작하여 고소작업에 따른 추락위험을 근원적으로 차단	72	영국 DBP(Design Best Practice)
⑨ (단부에서 추락 예방) 안전난간 시스템 설계 / 본 난간 조기 설치	- 근로자 작업 이전에 안전난간을 조기에 설치	73	미국 OSHA 제휴 프로그램
⑩ (천장에서 추락 예방) MEWP 접근이 가능한 천장구조 설계	- 천장내부에서 작업 시 천장재 강도부족에 따른 추락사고 예방	74	영국 DBP(Design Best Practice)
⑪ (사다리에서 추락 예방) 지붕, 옥탑으로 이동 가능한 고정식 사다리 설계	- 유지보수를 위해 이동식 사다리로 이동 중 빈번히 발생하는 추락·전도사고 예방	75	미국 OSHA 제휴 프로그램
⑫ (트럭 적재함에서 추락 예방) 안전하게 하물 적재 또는 하역이 가능하도록 발판 및 승강로 제작	- 트럭적재함에서 하물 적재·하역 시 단부로 추락하는 사고 예방	76	미국 OSHA 제휴 프로그램
⑬ (고소작업 시 추락 예방) 모듈러 공법, 지상에서 구조물의 각 유닛을 선 조립	- 지상 작업방법으로 변경하여 추락위험을 근원적으로 차단	77	미국 OSHA 제휴 프로그램
⑭ (에어컨 실외기 설치 중 추락 예방) 실외기를 지상높이에 설치하기 위한 받침대 설계	- 에어컨 실외기를 지상에 설치하여 추락위험 근원적 차단	78	호주 설계안전지침

구분	지붕에서 추락 예방 : 지붕 앵커 설계
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFETY DESIGN SOLUTION #5
DESIGN CATEGORY: ROOF
HAZARD: FALL FROM ROOF
DESIGN SOLUTION: ROOF ANCHORS



This design solution reduces the risk of serious falls from roofs during the construction and maintenance activities over the life of a building. Falls from roofs result in about – about 71 fatalities per year [BLS, 2008] Permanent anchors provide a convenient, safe place to tie off when personal fall arrest systems are needed. They also reduce the chance a worker will not use a personal fall arrest system because there is no place to tie off, or the worker connects to something that may not be structurally sound or certified by a registered Professional Engineer (PE).

SOLUTION

Planning the construction and future maintenance of a building can identify areas where permanent anchors should be installed. There are many vendors that design and install roof anchors. Anchors should be capable of sustaining a load of at least 5000 pounds without fracture or failure in the most adverse loading direction. The potential for material degradation due to environmental factors such as temperature, salt, and humidity should be considered.

There are many different methods of securing an anchor to a structure in order to meet the load requirements. Through bolting with a backup plate is the preferred installation method. An H-frame can be designed and installed between bar joints when installing roof anchors to bar joists. Once installed it is generally the responsibility of the building owner to inspect and maintain roof anchors to ensure their continued and reliable performance.



Figure 1 Planning the construction and future maintenance of a building can identify areas where permanent anchors should be installed.



Figure 2 Residential roofing has a high incidence of falls. Installing residential roof anchors provides a place for workers to tie off.

BACKGROUND INFORMATION

구분	지붕에서 추락 예방 : 채광창 단부 안전난간 설치, 채광창에 와이어 메쉬 설치, 강도가 확보된 재료 사용 등
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

Roof-lights and Fragile Roofing Materials Detailed Design Guidance

The Problem / Challenge

Roof-lights and fragile roofing materials are economic, sustainable and aesthetically desirable features which should not be eliminated from design projects purely for reasons of safety.

The Risks

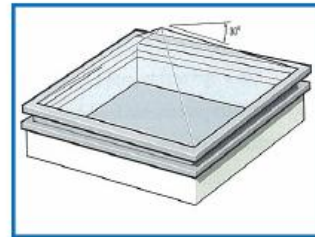
Falls through fragile roofing materials are statistically high and often highly injurious or fatal



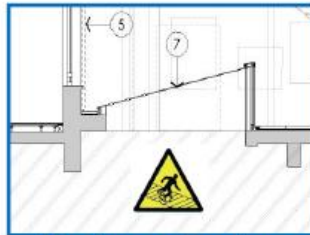
Designated Walkways



Handrail Protection



High Pitched Lights



Warnings on Drawings



Mesh Protection

The Solution

- Construction Phase - Important to identify existing and new fragile roof lights and other fragile roofing materials on drawings as a method of informing the contractor to control the risk of falls through these materials during construction.
- Contractors to recommend methods of temporary protection in tender or construction phase plan proposals to show their response .
- In-use - Additional protection measures are required for the longer term in use condition such as metal railings, barriers, wire mesh or non - fragile walk on type roof lights.
- Avoid in-plane roof-lights or sheeting.

The Benefits

Natural daylighting is a human right and engenders healthy and sustainable environments

Key Points

- Walk-on roof lights tend to be very expensive so control mitigation measures are necessary.
- Use Symbols on drawings to warn of hazards.
- Safe Cleaning methods also need to be considered.

For Further Information Contact Paul Bussey (Scott Brownrigg) Tel 0207 240 7766

DBP00215

구분	지붕에서 추락 예방 : 옥상 단부에 파라펫 설계
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFETY DESIGN SOLUTION #9
DESIGN CATEGORY: ROOF
HAZARD: FALLS FROM ROOF EDGE
DESIGN SOLUTION: SPECIFY SUFFICIENT WALL HEIGHT TO ALLOW PARAPETS TO FUNCTION AS FALL PREVENTION



This design solution protects against the risk of serious falls from roofs or platforms during construction, maintenance, and demolition activities over the life of a building. Falls from roofs can result in serious death or injury - there were 161 fatal falls from roofs reported in 2007 [BLS, 2009]. A parapet is a low wall or railing used to protect the edge of a platform or roof. Parapets are not used on every building, but where they are used they can be designed to provide fall protection. Parapet/guardrail combinations are also commonly used on bridges.

SOLUTION:
Specify parapet wall heights to be at least 39 inches high and strong enough to support 200 pounds. This allows the parapet wall to function as an effective barrier against falls. The International Building Code requires that parapet walls be at least 30 inches high (IBC 704.11.1) for fire spread, but this height is insufficient to meet regulatory requirements and insufficient to function as an effective perimeter guard against falls.

A parapet that can function as a perimeter guard also eliminates the need to provide temporary fall protection for construction and maintenance activities on the roof thus reducing total costs over the building life cycle.



This photo shows a parapet wall around the roof edge.



This photo shows a parapet wall installed on a bridge.

N
☞

구분	지붕에서 추락 예방 : 전기 · 통신설비 등을 지붕 단부에서 4.5m 이격하여 설치토록 설계
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFETY DESIGN SOLUTION #3

DESIGN CATEGORY: ROOF
HAZARD: FALLS FROM ROOF EDGE

DESIGN SOLUTION: MINIMIZE NEED TO GO ONTO ROOF OR NEAR ROOF EDGE



This design solution reduces the risk of serious falls from a roof edge during the construction and maintenance activities during the life of a building. Falls from roof edge can result in death or serious injury – about 47 fatalities per year [BLS, 2008] are reported.

SOLUTION

Designers should try to minimize the need to go onto a roof and/or near the edge of a roof. Mechanical equipment should be placed at ground level whenever possible. This eliminates the need to go onto the roof during installation and routine maintenance. Roof vents, mechanical equipment, and communication equipment should be located at least 15 feet back from the roof edge. The 15 foot distance reduces the risk of a fall when servicing equipment. Specify permanent guardrails when equipment must be closer to the roof edge. Specify multiple roof anchors to provide convenient tie off points when workers must be near the roof edge.



This photo shows equipment located on a roof. Positioning equipment at least 15 feet back from the roof edge will reduce the risk of falling when installing and servicing the equipment.



This photo shows permanent roof anchors. Specifying multiple roof anchors will provide convenient tie off points when working near the edge of the roof.

BACKGROUND INFORMATION

- Applicable US Safety Regulations
 OSHA Construction standards

구분	철골에서 추락 예방 : ① 철골기둥 0.5m/1.0m 높이에 와이어로프 설치용 구멍 설계, ② 철골기둥 측면에 보 거치용 ㄱ형강 설계
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFETY DESIGN SOLUTION #4
DESIGN CATEGORY: ENVELOPE/INTERIOR
HAZARDS: FALLS FROM STRUCTURAL STEEL



This design solution reduces the risk of serious falls from structural steel during the construction of a building. Falls from structural steel can result in death or serious injury – about 36 fatalities per year [BLS, 2008] are reported.

SOLUTION

Designers can specify features that make it safer and easier to erect structural steel. For example, hanging connections should be avoided. Safety seats at column connections would eliminate this by providing support for girders during the connection process.

Perimeter safety cables should be installed as soon as the metal decking has been installed. Specifying holes in columns at 42 inches plus or minus 3 inches and 21 inches above each floor slab make it easy to install cable or wire perimeter cables.



Specify holes in columns at 21 and 42 inches above the floor slab. This design feature makes it easy to install cable or wire perimeter cables.



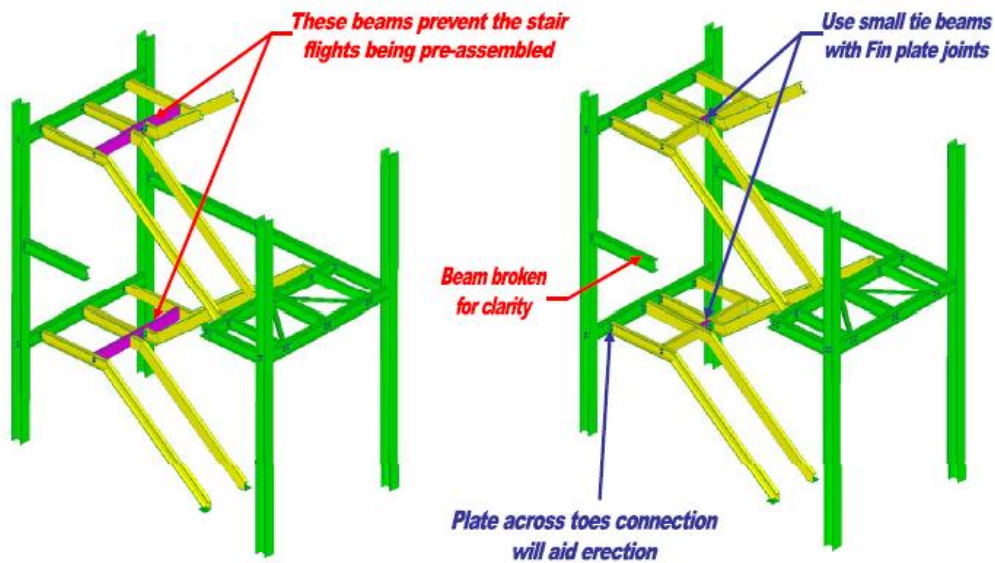
Design safety seats (see arrow) at column connections. The safety seats eliminate hanging connections making the connection process easier.

구분	철골에서 추락 예방 : (프리패브) 안전난간, 파이프 랙 등이 포함된 철골계단 틀 지상에서 제작
출처	영국 DBP(Design Best Practice)

Staircase Framing to Aid Erection



The framing of a staircase will decide if a flight of stairs can be pre-assembled at ground level for modular lifting or if the stairs need to be assembled piece small at height.



Non Modular Staircase Layout
Bracing & treads omitted for clarity ❌

Modular Staircase Layout
Bracing & treads omitted for clarity ✅

Disadvantages of a Non-Modular Staircase:-

1. Staircases being erected piece small will require the steel erector working at height for longer making them more at risk to accidents.
2. Erecting stair treads at height is dangerous practice and should always be avoided.

Advantages of a Modular Staircase:-

1. Modular stairs can be assembled at ground level which reduces the erecting time at height making it quicker, easier, safer and more economical.
2. The bulk of the handrail is already in place so the stairs can be used quicker helping with access for construction.
3. Connecting the stair stringers to the main beams using a plates across the toes type connection means the flight of stair can be lifted and dropped into position vertically making erection quicker, easier and safer.

Therefore always frame a staircase to allow for modular erection!

For further information contact Daniel O'Brien (Peers) – Tel 01204 558529.

DBP00156

구분	철골에서 추락 예방 : 지상에서 철골계단 유닛을 선조립
출처	영국 DBP(Design Best Practice)



Handrails Designed into Staircase

This initiative was driven from the desire to reduce working from height (incl. scaffolders installing edge protection). As may be seen from the photographs below, the staircase to be used for construction access was installed in conjunction with the steel frame. The handrail protection to the staircase was installed at ground level and lifted as a complete unit into place.

Crucially, the design team did not want to drill holes for the temporary sockets which hold the scaffold uprights and further holes for the permanent handrail as this would damage the intumescent paint. This necessitated the designers talking to the company that would install the permanent balustrades to see where they would require fixings. These holes were drilled during the staircase manufacturing process and used for the temporary edge protection (as seen) as well as the fixing of the permanent balustrade.

Temp. stair handrails installed at ground level (Same holes were later used for the permanent handrail)

Staircase with Edge Protection being lifted into the Structural Steel Frame



Benefits

- Minimises work at height (including scaffolders).
- Quicker to install protection at ground level rather than moving all materials to the staircase and also reduces manual handling risks.
- Handrail was installed by scaffolders away from the main erection process thus no conflict of trades working in the same area.
- Purpose made fixings for the scaffold uprights make this a much sturdier form of edge protection than is typically found on staircases.
- Fixings for the permanent handrail were already in place which was a time and quality saving (no damage to intumescent paint).

Drawbacks

- Need to have design from the permanent handrail designer/installer at the structural steelwork stage of project design.

For further details contact Gary Lewis (James Killelea & Co. Ltd) on 01706 229411

DBP00128

구분	단부에서 추락 예방 : 안전난간 시스템 설계 / 본 난간 조기 설치
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

**CONSTRUCTION SAFETY
DESIGN SOLUTION #2**
DESIGN CATEGORY: INTERIOR
HAZARD: FALLS FROM FLOOR



This design solution reduces the risk of serious falls from floor openings during the construction and maintenance activities during the life of a building. Falls from floor openings can result in death or serious injury – about 31 fatalities per year [BLS, 2006] are reported.

A 20-year-old male drywall mechanic (the victim) died after falling about 10 feet from an open-sided second floor landing and striking his head on a concrete floor. The victim was working alone sanding a ceiling constructed of sheetrock. The victim was operating a sander and apparently unaware of his position in relation to the open-sided floor. The victim fell about 10-feet, hitting the concrete floor face first. A temporary or permanent guardrail system along the open-sides of the floor would have prevented this tragedy.

SOLUTION

Designers should specify guardrail systems around floor openings except at the entrance to stairways. Designers should work with contractors to install permanent guardrails as soon as possible in the construction process so that workers will not be exposed to fall hazards. Cast-in sockets can be specified around floor openings. The sockets make it easy for contractors to install temporary guardrails during the construction phase. The sockets can then be used for permanent railings or filled in.



This photo shows cast sockets along the open side of a stairway. The sockets make it convenient to install temporary or permanent guardrails.



This photo shows guardrails installed along an opening. Installing guardrails early on in the construction process can eliminate the risk of a fall through an opening.

BACKGROUND INFORMATION

- Applicable US Safety Regulations
OSHA Construction standards
1926.501(b)(1) Unprotected sides and edge. Each employee on a walking/working surface (horizontal and vertical surface) with an unprotected side or edge which is 6 feet or more above a lower level shall

구분	천장에서 추락 예방 : MEWP 접근이 가능한 천장구조 설계
출처	영국 DBP(Design Best Practice)

Access Through Suspended Ceilings

The Problem / Challenge

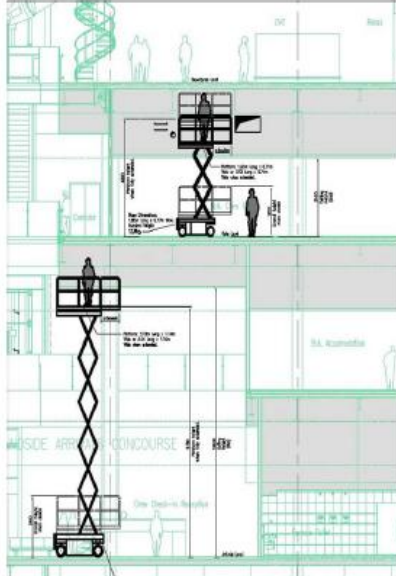
A major transport infrastructure client recognised that high and deep ceiling voids could be problematic to inspect and maintain. They found that it was often impractical to close off buildings to facilitate scaffold access. Ceiling access panels were traditionally too small to allow for safe access and deep beams and large ducts & other services running in the ceiling void prevented access platforms reaching up into the space.

The Risks

Falls from height associated with unsuitable access equipment.
 The unavailability of suitable access for tools, equipment and replacement parts.

The Solution

- The selection of 600 x 600 panel size was challenged and large ceiling panels were substituted. These enable access by systems such as mobile elevated work platforms (MEWPs).
- Panels were hinged or had sliding mechanisms so that they could be safely opened.
- The openings in the ceiling and the services running in the voids were designed to provide adequate space for a working platform to be raised between them, giving access to the full height of the void.
- No services were placed in any remaining inaccessible areas.



The Benefits

- There was a significantly reduced level of risk associated with work at height during maintenance.
- The improved access arrangements meant that the impact on the operational building from maintenance activities was reduced.

Key Points

- The design team planned ahead to improve access for maintenance.
- There was coordination across design disciplines to produce the final design
- There was willingness and commitment to challenge the norm.

Originator – BAA / ARUP Edited – HSE – *For more information please post on the forum.*

DBP00195

구분	사다리에서 추락 예방 : 지붕, 옥탑으로 이동 가능한 고정식 사다리 설계
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFETY DESIGN SOLUTION #6
DESIGN CATEGORY: ROOF/INTERIOR
HAZARD: FALL FROM LADDERS
DESIGN SOLUTION: SPECIFY FIXED LADDERS OR STAIRWAYS



Ladders are mostly used to access an upper level or a roof. Falls from ladders is the number one cause of fatalities in construction-about 78 fatalities per year [BLS, 2008]. Ladders can be hazardous when placed improperly, not secured, or used inappropriately. This design solution reduces the risk of serious falls from ladders during maintenance activities or when accessing a roof, platform, mezzanine, or upper level of a building.

SOLUTION

Designers can contribute to reducing falls from ladders by specifying fixed ladders or stairways whenever possible. This would eliminate the need for a portable ladder when accessing a roof, work platform, mezzanine, or upper level. The chance that a worker may use a defective ladder, an improper ladder, or not use the ladder properly is eliminated. Many building codes require a stairway or alternating tread device for roof access in commercial buildings.



Fixed ladders should be specified to access a work platform, mezzanine, upper level, or a roof.



Fixed industrial stairs can also be specified to access an a work platform, mezzanine, upper level, or a roof. Alternating tread devices can be specified if there is limited space.

구분	트럭 적재함에서 추락 예방 : 안전하게 하물 적재 또는 하역이 가능하도록 발판 및 승강로 제작
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION WORKPLACE
DESIGN SOLUTION #1
DESIGN CATEGORY: SITE
HAZARD: FALLS FROM NON-MOVING
VEHICLES
• DESIGN SOLUTION: PROVIDE SAFE
ACCESS FOR LOADING AND
UNLOADING TRUCKS



This design solution reduces the risk of serious falls from non-moving vehicles. When a truck is on the road, it is controlled by DOT regulations. However, when vehicles are stopped for loading and unloading, or when a trailer is used for storage, the truck bed or trailer is in effect a working/walking surface. While OSHA 1926 excludes trucks and trailers from the agencies definition of "working/walking surface" thereby exempting these areas from fall protection requirements, workers are injured or killed in falls from non-moving vehicles. The same safety precautions that apply to open sided floors six feet above a lower level would also apply in preventing fall injuries during loading and unloading of trucks. Falls from non-moving vehicles can result in death or serious injury – about 22 fatalities per year [BLS, 2006] are reported.

SOLUTION

The bed of the truck or trailer should have a safe access, such as a stairway with railings, and guardrails around all open sides of the truck bed or platforms. Designers working with contractors can provide safe designs for access stairways, railings, and guardrails for loading and unloading trucks on a construction site, or when a trailer is used for storage. Permanent or movable stairway/platform/guardrail systems can be designed for loading and unloading areas of permanent buildings and structures.



The above two photos show how movable platforms with guardrails can be used around the open sides of a truck bed when loading and unloading trucks

구분	고소작업 시 추락 예방 : (모듈러 공법) 지상에서 구조물의 각 유닛을 선 조립
출처	미국 OSHA 제휴 프로그램

CONSTRUCTION SAFTY DESIGN SOLUTION #10
DESIGN CATEGORY:
ROOF/ENVELOPE
HAZARD: FALLS FROM HEIGHT
DESIGN SOLUTION: PRE-FABRICATION AND ASSEMBLY AT GROUND LEVEL TO REDUCE OVERALL TIME EXPOSURE AT HEIGHT



This design solution reduces the risk of serious falls from a height during the construction and maintenance during the life of a building. Falls from height can result in death or serious injury – about 22 fatalities per year [BLS , 2008] are reported.

SOLUTION

This design solution reduces the total exposure to falls from heights by a factor of greater than 70% when installing the large duct and attachments typical to coal plant air quality projects by pre-fabricating and assembling the duct sections on the ground.

The duct goes through an assembly line set-up where insulation and insulation covering is installed from a scaffold inside a large tent. The duct then has catwalks, permanent lighting, handrails and miscellaneous attachments installed while at ground level. When the duct is lifted into place very little high work is then required to join the sections. The scaffolding is much safer and able to be easily maintained inside the tent than if the scaffold had to be built from the ground up to insulate the duct if it was installed without insulation. The permanent lighting, handrails, cable trays installed at ground level greatly reduce the exposure to heights that would be required otherwise.



Figure 1-This photo shows the C Section of duct going into the tent.



Figure 2 – This photo shows work inside the tent.

구분	에어컨 실외기 설치 중 추락 예방 : 실외기를 지상높이에 설치하기 위한 받침대 설계
출처	호주 안전설계 지침

3. 호주의 사례

공종명	에어컨 실외기 설치
위험요소	작업자 떨어짐
위험요소 추가설명	·지붕 또는 고층 벽에 에어컨 실외기 설치 시, 설치작업 중 및 유지관리·보수작업 시 작업자 또는 실외기 떨어짐 발생
대책	·에어컨 실외기를 최대한 지반면에 가까운 벽체에 고정 설치하여 설치작업 중 및 유지관리·보수작업 시 떨어짐 위험성을 제거

관련 자료
(사진 등)



(안전설계 적용 전, 초안)



(안전설계 적용 후, 변경안)

* Guidance on the principles of safe design for work(2006), Australian safety and compensation council

[부록 2] 추락사망재해와 설계안전기법 연관성 분석 매트릭스도

		설계안전기법													
		① 지붕앵커설계	② 채광창등 추락방지 (메쉬 / 난간 / 재료강도 확보)	③ 옥상단부파라펫설계	④ 전기통신설비지붕단부에서이격설계	⑤ 철골기둥에와이어로프설치용구멍설계	⑥ 철골기둥측면에철골보거치용 T형강설계	⑦ (프리패브)난간등이포함된철골계단틀설계	⑧ 지상에서철골계단유닛선조립	⑨ 계단등단부에안전난간시스템설계	⑩ MEWP 접근 가능한 천장 구조설계	⑪ 지붕옥탑으로 이동 가능한 고정식 사다리설계	⑫ 트럭적재함 작업용 발판 승강로설계	⑬ (모듈러공법) 지상에서 각 유닛 선조립	⑭ 에어컨실외기 지상설치용 받침대설계
추락발생형태 (추락발생지점)	콘크리트 지붕·옥탑에서 단부로 추락	●		●	●										
	채광창을 뚫고 추락		●												
	슬레이트 지붕을 뚫고 추락		●												
	이동식사다리를 통해 지붕·옥탑 위로 이동 중 추락										●				
	철골구조물에서 수평이동 중 추락					●									
	MEWP로 수직상승 후 철골로 이동 중 추락							●							
	철골계단에서 이동 중 추락							●							
	철골보 조립작업 중 추락						●								
	콘크리트 계단 단부에서 추락									●					
	발코니 등 단부에서 추락									●				●	
	천장을 뚫고 추락										●				
	캐노피에서 추락		●									●			
	트럭적재함에서 작업 중 추락												●		
	차량탑재형 고소작업대에서 에어컨실외기 설치 중 추락														●