

Research Paper

# QFD-FMEA를 이용한 해체공사의 위험평가와 근본원인의 분류 방법

## Assessing Risks and Categorizing Root Causes of Demolition Construction using the QFD-FMEA Approach

유동욱<sup>1</sup> · 임남기<sup>2</sup> · 전재열<sup>3</sup> · 조재호<sup>4\*</sup>

Yoo, Donguk<sup>1</sup> · Lim, Nam-Gi<sup>2</sup> · Chun, Jae-Youl<sup>3</sup> · Cho, Jaeho<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Department of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, TongMyong University, Nam-Gu, Pusan, 48520, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea

<sup>4</sup>Professor(Research Prof), Department of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea

\*Corresponding author

Cho, Jaeho

Tel : 82-31-8005-4016

E-mail :

11991030@dankook.ac.kr

Received : May 30, 2023

Revised : July 3, 2023

Accepted : July 4, 2023

ABSTRACT

The demolition of domestic infrastructures mirrors other significant construction initiatives in presenting a markedly high accident rate. A comprehensive investigation into the origins of such accidents is crucial for the prevention of future incidents. Upon detailed inspection, the causes of demolition construction accidents are multifarious, encompassing unsafe worker behavior, hazardous conditions, psychological and physical states, and site management deficiencies. While statistics relating to demolition construction accidents are consistently collated and reported, there exists an exigent need for a more foundational cause categorization system based on accident type. Drawing from Heinrich's Domino Theory, this study classifies the origins of accidents(unsafe behavior, unsafe conditions) and human errors(human factors) as per the type of accidents experienced during demolition construction. In this study, a three-step model of QFD-FMEA(Quality Function Deployment - Failure Mode Effect Analysis) is employed to systematically categorize accident causes according to the types of accidents that occur during demolition construction. The QFD-FMEA method offers a technique for cause classification at each stage of the demolition process, including direct causes(unsafe behavior, unsafe environment), and human errors(human factors) through a tri-stage process. The results of this accident cause classification can serve as safety knowledge and reference checklists for accident prevention efforts.

**Keywords :** quality function deployment, failure mode effect analysis, root cause, domino theory, human error, human factors

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

근래 국내 해체공사는 중고층을 중심으로 도심지 현장으로 확대되고 있다. 해체공사는 주변 건물 보호와 보행자의 안전 통행을 고려해야함으로 위험성이 다른 공사보다 매우 높은 편이다. 한국산업안전보건공단의 2020년 산업재해통계조사에 의하면 2020년 해체공사 중 발생한 사고 재해자는 약 1,889명으로 떨어짐, 넘어짐, 물체에 맞음 순으로 발생하였다. 사고 사망자는 22명으로 떨어짐, 물체에 맞음, 무너짐, 깔림 및 뒤집힘 순으로 조사되었다. 2021년 6월 한국 광주광역시에서 발생한 해체공사의 사망사고는 비용과 일정을 최우선시하는 현장 문화로 인해 비용 절감을 위한 과도한 성토가 직접적 사고 원인으로 조사 되었다.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해체공사의 사고원인을 구체적으로 살펴보면 작업자의 불안전 행동, 불안전 상태, 작업자의 심리적, 신체적 상태, 현장의 관리적 원인까지 매우 다양하다. 현재 해체공사의 사고통계는 계속 조사, 보고되고 있지만 사고유형에 따른 근원적 원인 분류 정보는 부족한 실정이다. 사고원인에 대한 철저한 분석은 반복되는 사고예방을 위한 필수과정이지만 근본적 원인 분석 및 분류 방법에 관한 연구는 충분하지 않다.

Heinrich[1]의 도미노 이론에 따르면 사고는 직접원인인 불안전 행동과 불안전 상태에 의해 발생되며, 발생원인의 비율은 천재지변이 2%, 불안정한 상태의 사고가 10%, 그리고 불안정한 행동에 의한 사고가 88%라고 제시하였다. 수정된 신도미노 이론에서는 사고예방 방법은 “직접원인 뿐만 아니라 근본원인을 함께 제거하는 것이다.” 라고 주장하였다. 도미노 이론의 재해발생 5단계를 나타낸다. 첫 번째, 인간의 유전적, 사회적 결함, 두 번째, 인간 결함, 세 번째, 불안전 행동과 불안전 상태, 네 번째, 사고발생, 다섯 번째, 재해로 정의하고 있다. 본 연구는 하인리히의 도미노 이론을 기초로 해체공사의 사고유형에 따라 사고의 직접적 원인(불안전 행동, 불안전 상태)과 인적영향과 관련한 휴먼에러 원인 분류를 수행한다.

한국의 ‘산업안전보건용어사전(KOSHA 2012)’에 따르면 불안전 행동이란 “사고의 직접원인으로서 근로자의 불안정한 행동을 말한다.”라고 정의하고 있다. 또한 한국의 ‘산업안전대사전 2004’에 따르면 “불안전 상태는 작업을 수행하려고 할 때의 모든 외적조건에 잠재적 위험성을 가지고 있는 상태를 말한다.”라고 정의하고 있다. 불안전 행동과 불안전 상태는 인간의 지식부족, 기능미숙, 의욕결여, 의도적 위반 등 다양한 인적요인, 인적결함, 휴먼에러와 연관되어 있다. 특히 이론적으로 휴먼에러는 안전하지 않은 행동과 안전하지 않은 상태 모두에 기여할 수 있다. 따라서 불안전 행동과 불안전 상태를 유발하는 인간의 다양한 인적결함 또는 인적실수는 휴먼에러로 분류될 수 있으며 휴먼에러는 인적영향과 밀접한 관계를 가지고 있다.

본 연구는 하인리히의 도미노 이론을 배경으로 해체공사의 사고유형 및 위험평가에 기초하여 사고원인 분류를 목적으로 한다. 원인분류 결과는 근원적 원인에 기초한 안전대책을 수립할 수 있는 기초자료로 활용된다. 위험평가 후 사고원인을 단계적으로 분류할 수 있도록 QFD와 FMEA 기법을 결합한다. 본 연구의 QFD-FMEA 3단계 모델은 다음과 같이 구성되었다. 1)단계: 작업단계별 사고유형과 위험평가, 2)단계: 직접원인으로서 불안전 행동, 불안전 상태의 분류, 3)단계: 근본원인으로서 인적요인과 관련한 휴먼에러의 분류

## 1.2 연구의 절차 및 범위

본 연구는 다음의 절차로 연구를 수행하였다. 첫 번째, 도미노 이론에 기초하여 본 연구의 근본원인 분석 방향을 기술한다. 두 번째, 위험평가와 원인분석과 관련된 기존 연구현황을 조사한다. 세 번째, 본 연구에 중심으로 활용되는 QFD-FMEA, 휴먼에러, 인적요인에 관한 이론을 기술한다. 네 번째, 해체공사의 FMEA기반 위험평가 사례를 제시하고 QFD-FMEA 3단계 적용을 통해 직접원인과 근본원인 분류 결과를 제시한다. 다섯 번째, 본 연구의 주요 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

본 연구의 범위는 해체공사를 대상으로 한정한다. 사례연구는 해체공사 압쇄공법의 기본 FMEA 분석을 토대로 QFD-FMEA 3단계 모델을 적용한다. 본 연구의 주요 도출 내용은 QFD-FMEA 3단계 모델을 통해 근원적 사고원인이 되는 휴먼에러의 순위 분석과 휴먼에러와 관련된 인적요인을 제시한다.

## 2. 근본원인의 분석 방향

Heinrich의 도미노 이론은 작업장 사고가 도미노 사슬이 넘어지는 것처럼 연결된 일련의 사건이나 요인으로 인해 발생한다고 주장한다. 도미노 이론의 단점은 사고의 복잡성을 지나치게 단순화하고 시스템적 요소보다 개인의 행동을 너무 강조한다는 비판을 받아왔다. 그러나 이러한 비판에도 불구하고 하인리히의 이론은 안전 관리 관행에 상당한 영향을 미쳤으며 여전히 작업장 사고 조사 및 작업장 안전 개선을 위한 안전관리 개념으로 널리 사용되고 있다. 본 연구의 사고 원인 분석은

두가지 관점을 가진다. 하나는 사고의 직접원인으로서 불안전행동, 불안전 상태의 관점이고 다른 하나는 휴먼에러와 인적영향의 관점이다. 특이한 사항은 휴먼에러는 사고의 직접원인인 동시에 인적영향과 관련성이 높아 사고의 근본원인으로 인식되고 있다. 그 이유는 휴먼에러를 유발하는 배경으로 인적영향이 필연적으로 작용하기 때문이다. 따라서 본 연구는 사고의 근본 원인을 휴먼에러로 설정하고 해당 휴먼에러를 유발하는 인적영향을 함께 고려하여 사고의 근본 원인으로 분석한다. 다음 Figure 1은 도미노 이론을 배경으로 근본원인과 직접원인을 구분하였다. 첫 번째 직접원인은 불안전행동과 불안전 상태, 두 번째 근본원인은 휴먼에러와 인적요인의 개념을 나타내었다.

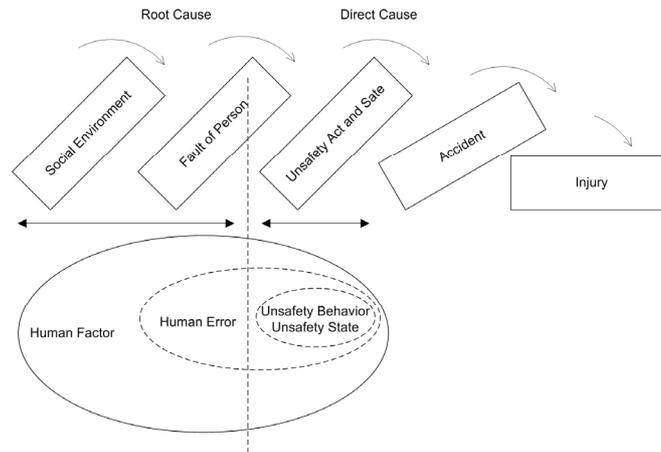


Figure 1. Root and direct causes based on the domino theory

### 3. 기존 연구 및 관련 이론

#### 3.1 위험평가 관련 연구

“위험성평가”란 유해·위험요인을 파악하고 해당 유해·위험요인에 의한 부상 또는 질병의 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정·결정하고 감소대책을 수립하여 실행하는 일련의 과정을 말한다. 위험평가 관련하여 최근 대표적 연구는 다음과 같다.

Kim et al.[2]은 건설재해 빅데이터 분석을 통해 건축공사 공정별 위험도 평가 시스템을 개발하였다. 이 연구는 국토안전관리원의 빅데이터를 활용하여 WBS와 RBS체계를 정의하고 WBS와 RBS의 연관분석을 수행하였다. 그리고 이를 기초로 위험요소를 추출하였다. Lee and Kim[3]는 도로 교량공사의 공종별 안전사고 발생확률 자료와 전문가 데이터를 기초로 확률론적 접근방법에 의한 세부공종별 위험지수를 도출하였다. Park and Han[4]은 건축공사의 안전사고 예방과 위험예측의 목적으로 공종별 안전위험도 평가지수를 개발하였다. 설문조사와 면담조사를 통하여 17개 위험요인을 도출하였다. 위험평가지수는 안전사고의 발생 비율과 발생강도와 전문가 평가를 사용하였다. Haber et al.[5]은 QFD와 퍼지이론을 결합하여 작업에 위험식별과 위험평가를 수행하였다. 이 연구는 위험평가의 일관성을 높이고 주관성 평가의 단점을 줄이기 위해 델파이 방법과 퍼지이론을 모두 사용하였다. Lo and Liou[6]는 위험평가를 위해 FMEA(Failure Mode Effect Analysis)을 사용하고 확률적 접근에 의한 RPN(Risk Priority Number)값을 사용하였다.

위험성 평가기법에 관한 기존연구는 주로 기계, 화학 분야의 위험성 평가와 건설공사를 대상으로 FMEA를 적용하였으나, 해체공사 공정단계를 대상으로 한 본격적인 연구는 거의 없어 QFD기법과 FMEA 기법을 결합하여 위험성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2 원인분석 관련 연구

사고 원인분석 관련하여 최근 대표적 연구 조사는 다음과 같다. Jung et al.[7]은 건설장비관련 사고(CEA)에 대한 시간적 조사를 수행하였다. 이 연구는 OSHA(Occupational Safety and Health Administration) 사고 데이터를 사용하여 장비 유형, 사고 시간 및 사고 원인을 포함한 정보를 추출했다. 데이터 분석결과 사고발생은 시간 및 장비 유형, 시간 및 부상 등급, 시간 및 사고 원인에 따라 사고 빈도가 다름을 제시하였다. Choi and Cho[8]는 인과지도를 활용한 건설공사의 안전사고 원인 분석방법을 제시하였다. 사건의 원인을 분석하기 위해 안전문화의 부정적 상태변수들을 연결함으로써 인과관계도를 만들었다. 이 결과는 사고예방의 관리 우선순위를 제공하였다. Min et al.[9]은 건설사고의 원인을 불안전행동과 휴먼에러의 관점에서 분류하고 이 둘의 상관관계를 분석하였다. 이 연구는 불안전행동과 상관성이 높은 휴먼에러 요인을 복합적으로 고려하여 안전관리 방안을 제안하였다. Kim[10]은 철거작업에서 발생한 안전사고 발생과정에서 사고의 원인과 사고유형 간의 상관관계를 분석하고 안전점검 체크리스트의 구성 방법을 제시하였다. Song et al.[11]은 FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 이용하여 거푸집 공사의 원인분석을 수행하였다. 이 연구는 과거 중대사고(1992~2002년) 문헌을 조사하고 거푸집 작업과정(작업, 제작, 운반, 양생, 해체)에서 사고원인에 의한 사고 발생과정을 제시하였다.

사고원인관련 기존 연구 고찰결과 데이터 마이닝, 인과지도, 시간분석 방법, 상관관계분석, 표준화 방법, QFD와 FMEA의 결합, FTA 기법 등 다양한 방법들이 사용되었다. 사고는 단순히 하나 둘의 단순한 영향이 아닌 다양한 구조와 복합적으로 사고원인이 발생되기 때문에 이들의 각각의 기법들은 사고원인을 단순화 시키는 방법에서는 한계가 있다.

### 3.3 QFD-FMEA 기법

QFD는 품질기능전개(QFD: Quality Function Deployment)는 신제품 개념정립, 설계, 부품계획, 공정계획, 그리고 생산계획과 판매까지 모든 단계를 통해 고객의 요구가 최종 제품과 서비스에 충실히 반영되도록 하여 고객 만족도를 극대화하는데 초점을 맞추고 있는 품질 경영 방법론 중 하나이다. FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)는 공정 및 제품의 잠재적인 결함을 추정하여 예방할 수 있는 분석 도구이다.

Lo and Liu[6]는 건설 산업의 직업적 위험을 줄이거나 예방하기 위해 퍼지기반 QFD-FMEA 모델을 제안하였다. 이 방법은 QFD(Quality Function Deployment) 테이블을 FMEA 기법에 적용한 모델이다. FMEA를 첫단계로 하여 QFD의 전개 개념을 연속 사용한다. 이러한 방법은 위험의 평가, 위험의 유형, 근본원인 까지 필요한 속성을 연속적 관계를 통해 분석하게 된다. Lo and Liu[6]의 QFD-FMEA 모델은 위험의 평가를 위해 퍼지추론 ANP 가중치 기법이 적용되었다. 다음 Figure 2는 QFD-FMEA의 2단계 개념도를 나타낸다. Lo and Liu[6]의 QFD-FMEA 모델은 2단계로 구분되며 먼저 1단계는 위험요소의 중요도 설정, 건설작업, 위험요소의 타입 분류이다. 다음 2단계는 위험원인의 중요도 설정, 위험요소 타입 분류, 위험원인의 순서로 전개 된다. 각각의 가중치는 전문가 평가에 의해 수행되었다.

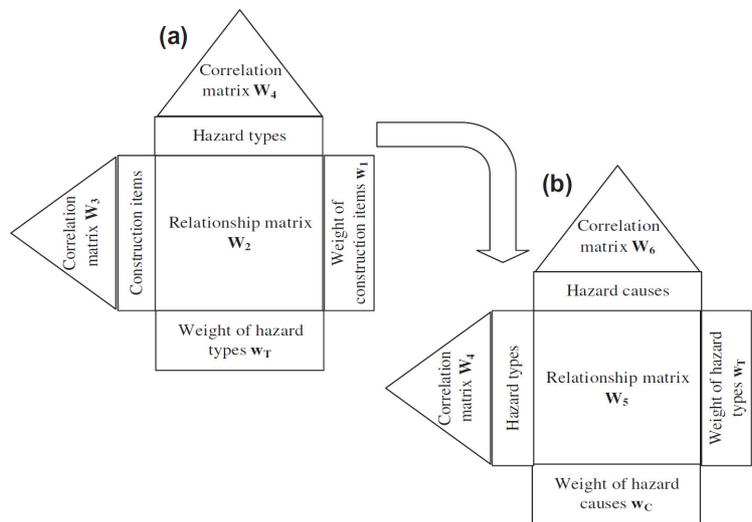


Figure 2. Two-tier QFD-FMEA model by Liu(2012)

### 3.4 휴먼에러

휴먼에러(인적오류)는 심리학용어사전에 따르면 어떤 기계, 시스템 등에 의해 기대되는 기능을 발휘하지 못하고 부적절하게 반응하여 효율성, 안전성, 성과 등을 감소시키는 인간의 결정이나 행동을 말한다. 휴먼에러는 작업이나 활동을 수행하는 동안 인간이 저지른 실수 또는 오류를 설명하는 데 사용되는 용어이다. 인간은 완벽하지 않으며 인지적 한계, 지식 부족, 주의 산만, 스트레스, 피로, 훈련이나 경험 부족 등 다양한 이유로 실수가 발생할 수 있다는 사실을 말한다. 휴먼에러에 관한 공식적 정의는 Reason[12]에 의해서 정립되었다. Reason[12]은 불안전 행동을 의도하지 않은 행동과 의도한 행동으로 구분하고 휴먼에러에 대한 4가지 분류방법을 제안하였다.

- 1) 숙련기반 에러: 일상적이고 숙달된 행동을 수행하는 것에서 발생하는 인적오류 유형, 예로는 어떤 행동을 하려고 했으나 실수로 다른 행동을 했을 때, 산만하거나 피로하거나 스트레스로 인한 착오이다.
- 2) 지식기반 착오: 상황에 대한 특정 지식의 부족으로 인해 적절하지 않은 행동을 수행할 때 발생하는 인적 오류
- 3) 규칙기반 착오: 일반적 규칙 또는 작업 경험/훈련 부족으로 발생하는 인적결함의 유형
- 4) 위반: 규칙이나 절차를 고의적으로 또는 고의로 무시할 때 발생하는 인적 오류의 유형이다. 위반에는 원칙을 무시하거나 편법을 사용하거나 안전 절차를 무시하거나 의도적으로 규칙이나 규정을 위반하는 것이 포함될 수 있다.

### 3.5 인적요인

인적요인(human factors)은 인간과 시스템, 환경 또는 프로세스의 다른 요소 간의 상호 작용을 연구하는 과학 분야를 말한다. International Ergonomics Association(IEA)에서는 인적요인(human factors)을 다음과 같이 정의하고 있다. 인적 요인은 인간과 관련된 모든 분야에서 과학적, 체계적으로 사람과 사람들의 관계와 사람들이 만들어내는 시스템과 제품의 상관관계를 다룬다. 원인 없는 사고가 없는 것처럼 인적요인은 모든 사고의 이면에 존재하는 근본 원인이라고 하였다. 산업안전대사전에서는 인적원인이란 안전관리에 있어서 인적인 관리결함, 심리적 결함, 생리적인 결함 등에 의거해서 재해가 발생했을 때를 말한다. 모든 사고가 불안전 행동과 불안전 상태에서 발생하고 인적결함과 휴먼에러는 이들을 유발하는 사고의 근본 원인이 되고 있다. 산업안전대사전에서는 인적결함이란 작업방법, 개인의 동작 중에 표준적 작업방법, 동작을 일탈한 불안정한 요소를 가지고 있는 것을 말한다. 안전과 관련된 인적 요소는 다음과 같다.

- 1) 개인적 인적오류 및 관리: 인간은 피로, 스트레스, 업무량, 교육 또는 경험 부족과 같은 요인으로 인한 실수
- 2) 커뮤니케이션: 오해, 부적절한 정보 교환 또는 언어 장벽과 같은 잘못된 의사소통
- 3) 작업량: 높은 작업량은 인간의 성과에 부정적인 영향을 미치고 오류 및 사고 가능성을 높일 수 있다.
- 4) 장비 및 기술: 잘못 설계된 장비나 기술은 오류와 사고의 가능성을 높일 수 있다.
- 5) 교육, 경험, 지식: 적절한 교육과 경험을 갖도록 보장하면 오류와 사고의 가능성을 줄일 수 있다.
- 6) 조직문화 및 관리/통제: 안전을 강조하고 실수 보고 및 학습을 장려하는 조직관리, 조직 문화

## 4. 인적요인과 휴먼에러의 관계 분석

휴먼에러와 인적요인은 밀접한 관련이 있다. 인적 요소는 인간이 기술 및 환경과 어떻게 상호 작용하는지에 대한 과학적 연구이며, 인적 오류는 인적 요소와 작업 또는 활동 수행 간의 상호 작용에서 발생하는 현상이다. 인적 요소는 인적 오류 가능성을 줄이는 시스템 및 프로세스를 설계하여 오류를 방지하는 데 도움이 된다. 예를 들어 시스템이 직관적이고 사용하기 쉽도록 설계되면 사용자가 오류를 범할 가능성이 적을 수 있다.

마찬가지로 작업이 간단하고 간단하도록 설계되거나 사용자가 작업을 이해하는 데 도움이 되는 교육 및 지원이 제공되는

경우 사용자가 실수할 가능성이 적을 수 있다.

다음은 휴먼에러의 분류와 각각에 관련된 인적요인을 나타내었다. 다음 Figure 3의 관련된 가중치는 전문가 3인(20년 이상 경력의 건축공사 및 해체공사 전문가 3인)의 평가를 통해 도출되었다.

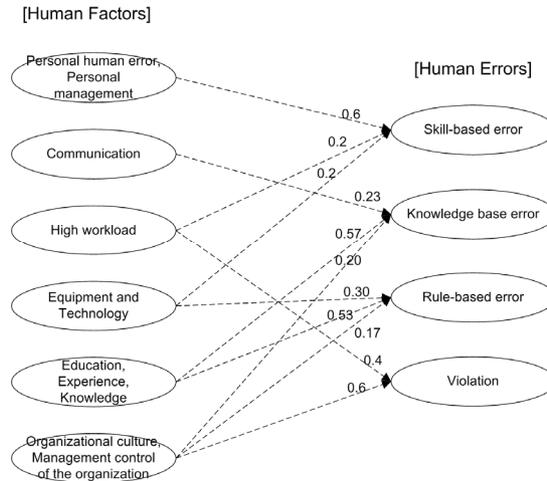


Figure 3. Analysis of the correlation between human factors and human error

### 5. QFD-FMEA 3단계 모델

QFD-FMEA 3단계 모델의 목적은 작업위험요인에 대한 원인분류 방법이다. 원인 분류를 순차적으로 진행하기 위해 최초 위험요인에 근거하여 1차로 불안전 행동, 불안전 상태를 분류하고 2차로 근본원인이 되는 휴먼에러와 휴먼에러를 유발하는 인적요인을 연관하여 분류한다. 다음 Figure 4는 QFD-FMEA 3단계 모델을 나타내었다. FMEA기법은 위험평가를 통해 고위험, 중위험, 저위험 등을 구분하는 방법이며 안전대책을 수립하는데 매우 용이하다. 반면 FMEA-QFD 기법은 사고 원인 분류를 위해 사용되며 위험에 대한 고위험, 중위험, 저위험 평가값은 원인분류의 순위평가로 사용된다.

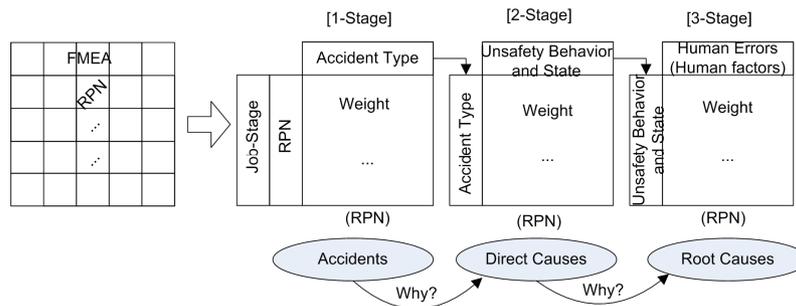


Figure 4. Three-tier QFD-FMEA model

RPN의 값은 작업 단계( $J$ )를 구분하고 작업 단계별 작업자 ( $W_J$ )와 발생 가능한 사고위험요인( $RE_J$ ; Risk Elements)을 나열한다. 작업 단계별 사고위험요인( $RE_{J,N}$ ; Risk Elements)과 사고유형( $AT_H$ ; Accident Type)을 상호 매칭하고 FMEA에서 사용되는 RPN(Risk Priority Number) 값을 설정한다. 식 (1)은 작업단계별 위험요인( $RE_{J,N}$ ; Risk Elements)과 매칭되는 사고유형( $AT_H$ ; Accident Type)의  $RPN_{J,H}$  값을 나타낸다.

$$RE_{J_i, n} = \begin{vmatrix} AT_1 & \dots & AT_H \\ RPN_{J_i, 1} & \dots & \dots \\ \dots & RPN_{J_i, h} & \dots \\ \dots & \dots & RPN_{J_i, H} \end{vmatrix} \quad (1)$$

$RPN_{J_i, H}$  값은 FMEA에서 산정하는 식을 사용한다.  $RPN_{J_i, H} = \text{심각도} \times \text{빈도} \times \text{검출도}$  (2)

$AT_H$ 의  $RPN_{J_i, H}$ 은 다음의 식에 의해 산출된다.  $RPN(AT_H) = \sum_{i=1, h=1}^{I, H} W_{i, h} \times RPN_{J_i, h}$  (3)

### 6. 사례분석

사례 연구는 해체공사의 압쇄공법을 대상으로 3인의 현장 전문가를 통해 FMEA 위험평가를 수행하였다. 분석된 FMEA 자료를 근거로 QFD-FMEA 3단계 모델을 적용하였다. 압쇄공법의 일반적 순서는 다음과 같다. (1) 가설방음벽 설치, (2) 비계 가림막 설치, (3) 석면철거, (4) 내부철거, (5) 구조보강, (6) 굴착기 인양, (7) 지상층 건축물 철거, (8) 폐기물 반출. 다음 Figure 5는 해체공사 압쇄공법의 고층부와 저층부의 작업계획서와 압쇄공법의 작업단계를 구분하고 FMEA 수행사례이다. 위험평가를 위해 전문가 3인(20년 이상 경력의 건축공사 및 해체공사 전문가 3인)을 통해 RPN 값이 설정되었다.

FMEA Risk Assessment(Crash method)										
Project : Seoul, 00gu, 00dong dismantling works										
NO.	Activity	Utility	4M	Direct risk factors	Accident type	Elements of RPN			RPN	Person in charge
						Severity	Frequency	Degree of detection		
1	Temporary sound barrier	Foreman, crane operator, forklift operator, signalman	Media	- Risk of accidents due to damage to underground facilities (electricity, gas, communication, etc.) in the work area	Fire/ Electric shock	4	2	5	40	Manager
			Machine	- Risk of collision between forklifts and workers when unloading or loading materials	Crash/ Stricture	3	3	3	27	Manager
			Machine	- Risk of falling or tipping due to collision when lifting H-beam and poor outrigger installation	Fall/ Overturned	4	2	3	24	Manager
			Man	- Poor safety belt hook fastening and risk of material falling when working at height	Fall	4	2	2	16	Manager
2	Scaffolding, screen Disassembly	Foreman, scaffolding	Media	- Conversion and collapse due to different structural review and construction conditions	Overturned	4	1	4	16	Manager, Demolition supervisor
			...	...	...	...	...	...	...	...
3	Asbestos demolition	Foreman, asbestos demolition worker	Media	- Slip/fall due to non-compliance with horse scaffolding standards	Overturned/ Fall	2	2	2	8	Manager
			...	...	...	...	...	...	...	...
4	Interior demolition	Foreman, worker	Management	- Collision due to non-setting of work zone and poor arrangement of signalmen	Crash	3	2	2	12	Manager
			...	...	...	...	...	...	...	...
5	Structural reinforcement	Foreman, installer, equipment operator	Management	- Overturning when handling the jack support	Overturned	3	2	2	12	Manager
			...	...	...	...	...	...	...	...
6	Excavator lifting	Foreman, crane operator, excavator operator, signalman	Machine	- Overturning and falling due to not reviewing the rigging plan before work	Fall/ Overturned	4	2	2	16	Manager
			...	...	...	...	...	...	...	...
7	Ground floor Demolition of buildings	Drivers, signalmen, water sprayers, safety officers	Media	- Lack of expertise in drafting construction plans	Others	5	1	3	15	Approver
			...	...	...	...	...	...	...	...
8	Waste removal	Waste transport vehicle driver, signalman	Machine	- Collision due to failure to set up a pedestrian passage when moving equipment	Crash	4	2	3	24	Manager
			Man	- Collision between workers and pedestrians when entering and exiting external roads	Crash	4	2	2	16	Manager
RPN(SUM)									553	

Figure 5. Work scheme for high-rise and low-rise demolition work, and corresponding FMEA

### 6.1 QFD-FMEA 1단계

1단계는 압쇄공법의 작업항목 마다 직접 위험요인이 다수, 복수로 존재함으로 위험요인의 수만큼 위험평가를 수행하였다. 또한 위험요인에 따라 사고유형이 다양하게 발생되기 때문에 발생가능한 사고유형을 모두 분류한다. 정의한 사고유형으로는 화재/감전, 충돌/협착, 낙하/충돌/전도/추락, 붕괴/전도, 질병, 기타로 분류되었다. RPN 순위에 의해 사고유형 중 붕괴 95(1위), 충돌 86(2위), 전도 84(3위), 추락 72(4위)로 분석되었다(Figure 6. 참조).

Stage	Job activity	Activity Details	Crews	Accident type										
				Fire/ Electric shock	Crash/Stricture		Fall/Crash/Overturned				Collapse/Overturned		Disease	Others
				RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN	RPN
1	Temporary sound barrier	1_01	Foreman, crane operator,...	40										
		1_02	Foreman, crane operator,...			27								
		1_03	Foreman, crane operator,...				24							
		1_04	Foreman, crane operator,...						16					
2	Scaffolding, screen Disassembly	2_01	Foreman, scaffolding									16		
		2_02	Foreman, scaffolding									12		
		2_03	Foreman, scaffolding									12		
		2_04	Foreman, scaffolding						16					
		2_05	Foreman, scaffolding		18									
3	Asbestos demolition	3_01	Foreman, asbestos demolition worker							8				
		...	...							...				
4	Interior demolition	4_01	Foreman, worker		12									
		...	...							...				
5	Structural reinforcement	5_01	Foreman, installer, equipment operator									12		
		...	...								...			
6	Excavator lifting	6_01	Foreman, crane operator, ...				16							
		...	...									...		
7	Ground floor Demolition of buildings	7_01	Drivers, signalmen, water sprayers, ...											15
		...	...									...		
8	Waste removal	8_01	Waste transport vehicle driver,...		24									
		8_02	Waste transport vehicle driver,...		16									
				RPN										
				40	86	27	40	40	72	16	95	84	8	45
				6	2	7	6	6	4	8	1	3	9	5
				553										

Figure 6. Stage 1 QFD-FMEA and accident type analysis

### 6.2 QFD-FMEA 2단계

2단계는 사고유형과 직접 위험요인을 기초로 불안전 행동, 불안전 상태를 분류하였다. 분류체계는 Kim et al.[9]을 참조한다. 직접 위험요인은 불안전 행동 11개 항목, 불안전 상태 5개 항목에 따라 매칭 되었다. 매칭된 항목마다 가중치가 정의되고 가중치와 직접 위험요인의 RPN 곱에 의해 불안전 행동, 불안전 상태의 RPN 값이 계산된다. 분석 결과 불안전 행동 중 RPN 순위는 안전장치의 기능제거 75.6(1위), 기계기구의 잘못 사용 65.7(2위), 위험장소의 접근 65.5(3위), 감독 및 연락 불충분 41.2(4위)로 분석되었다. 불안전 상태 중 RPN 순위는 장소 또는 시설자체의 결함(1위), 경계표시의 결함 45.5(2위)로 분석되었다(Figure 7 참조).

Accident type		Direct Causes											Job stage number	RPN
		Unsafe behavior						Unsafe state						
		Hazardous location access	Elimination of function of safety device / Insufficient supplementation	Misuse of protective equipment	Misuse of machinery	...	Defects in work order (process)	Faulty protective device	Faults in clothing protection	Defects in the place or facility itself	...	Flaws in landmarks		
Fire/ Electric shock	Fire/ Electric shock	0.5								0.5			1_01	40
	Crash				0.5								2_05	18
Crash/ Stricture	Crash									0.5			4_01	12
	Crash												7_04	16
	Crash										0.5		8_01	24
	Crash										0.5		8_02	16
	Crash/ Stricture	0.5										0.5	1_02	27
	Crash/ Stricture												1_03	24
Fall/Crash/ Overturned	Fall/ Overturned		0.5										6_01	16
	Fall/ Overturned				0.7					0.3			4_02	12
	...												4_03	8
	Overturned/ Fall				1.0								5_02	16
Collapse/ Overturned	Collapse/ Overturned		0.5		0.5								5_03	24
	Collapse/ Overturned		0.4							0.3			5_04	16
	...		1.0										6_02	32
	Overturned	0.5								0.5			3_02	8
Disease	Disease	0.5		0.5									7_01	15
Others	Others				0.5								7_05	30
	Others									0.5				
RPN		65.5	75.6	31.2	65.7	...	10.5	0.0	0.0	127.0	...	45.5		
Rank		3	1	5	2	...	7	3	3	1	...	2		
380.5								172.5						
553.0														

Figure 7. Stage 2 QFD-FMEA and direct cause analysis

### 6.3 QFD-FMEA 3단계

3단계에서는 불안전 행동과 불안전 상태를 결합하여 직접원인으로 정의하고 직접원인과 휴먼에러와의 상관관계를 설정하였다. 직접원인은 직접 위험요인에 기초하여 RPN 값을 가진다. 직접원인의 RPN은 휴먼에러와 관련된 가중치 곱에 의해 휴먼에러의 RPN이 계산된다. 휴먼에러 관점에서 분류된 RPN의 결과는 위반(의도한 행동, 관리 부족) 345.0(1위), 규칙기반(부주의 또는 교육 부족) 111.6(2위), 지식기반(지식부족과 교육 부족) 68.5(3위), 숙련기반에러(개인관리 및 통제부족) 27.9(4위)로 분석되었다(Figure 8. 참조).

Direct Causes. Num.	Unsafe behavior	Unsafe state	Human error				Direct risk factors	RPN
			Knowledge base (lack of knowledge and lack of education)	Rule-based (carelessness, lack of education)	Skill-based (personal care and lack of control)	Violation (intentional conduct, lack of control)		
			Cognitive/Judgment Absence or lack of cognitive abilities; (Possible through education)	Aware, but inattentive/insufficient (cognition/judgment)	Inattention (forgetting/remembering), out of control	Intended plan or action		
1	Hazardous location access	Defects in the place or facility itself	0.3	0.7			- Risk of accidents due to damage to underground facilities (electricity, gas, communication, etc.) in the work area	40
2	Misuse of machinery		0.3	0.4		0.3	- Worker crash due to falling materials and tools	18
3	Insufficient supervision and communication	Defects in the place or facility itself		0.5		0.5	- Collision due to non-setting of work zone and poor arrangement of signalmen	12
4	Insufficient supervision and communication					1.0	- Collision due to non-arrangement of control personnel when dumping waste	16
5	Neglect in an unsafe state/ Insufficient review	Flaws in landmarks				1.0	- Collision due to failure to set up a pedestrian passage when moving equipment	24
6	Neglect in an unsafe state/ Insufficient review	Flaws in landmarks		0.5		0.5	- Collision between workers and pedestrians when entering and exiting external roads	16
...	...	...				...	...	...
31	Neglect in an unsafe state/ Insufficient review	Defects in the place or facility itself				1.0	- 2nd disaster due to failure to secure evacuation routes in case of emergency	30
			68.5	111.6	27.9	345.0		
			3	2	4	1		
			553.0					

Figure 8. Stage 3 QFD-FMEA and root cause analysis

### 6.4 사례분석 소결

QFD-FMEA 1단계에서는 해체공사 작업단계별 위험요인과 사고유형을 분류하였다. 2단계에서는 불안전 행동, 불안전 상태에 관한 직접원인 파악을 위해 사고유형과의 관계를 매칭하였다. 사고유형과 불안전 행동, 불안전 상태의 관계는 복수의 관계가 발생하기 때문에 사용자(전문가) 정의에 의한 가중치를 적용하였다. 가중치 적용값은 0.0~1.0의 값을 배분하였다. 모든 가중치의 합은 1.0이다. 3단계에서는 2단계에서 분석된 불안전 행동, 불안전 상태에 기초하여 사고의 근본원인이 되는 휴먼에러(인적결함)와의 관계를 매칭 하였다. 마찬가지로 직접원인 항목은 휴먼에러 항목과 복수의 관계가 발생한다. 가중치는 1.0을 최대값으로 하여 해당항목에 0.0~1.0 가중치 값을 배분하였다.

QFD-FMEA 3단계 모델은 FMEA에서 평가된 위험요인과 해당되는 RPN값을 2단계에서는 직접 원인별로 3단계에서는

근본 원인별로 RPN 값이 배분되었다. 배분된 RPN값은 해당 분류항목으로 각각 집계되어 직접원인에 관한 순위 및 근본 원인에 관한 순위를 분석할 수 있는 체계를 제공하였다.

## 7. 결론

본 연구는 해체공사 압쇄공법을 대상으로 1) 작업 단계별 위험평가, 위험요인 분석, 2) 위험요인에 따른 직접원인(불안전 행동/불안전 상태) 분석, 3) 직접원인에 관련된 휴먼에러와 이와 관련한 인적요인(근본원인)을 분석하였다. 본 연구는 원인 분류를 보다 단순화 하고 직접원인에 따른 근본원인 분석을 위한 QFD-FMEA 전개방식을 제시하였다. 본 연구의 사례 분석 결과 해체공사 압쇄공법에서 사고발생의 주된 근본원인은 작업계획 위반이 가장 높은 순위로 분석되었다. 이것은 근본원인은 사고위험에 대한 작업자의 안이한 태도(무시)와 현장 안전문화 결여 및 통제 부족으로 나타났다. 사고 예방을 위해서 현장 안전 문화의 향상과 관리/통제/교육이 보다 적극적으로 이루어져야 할 것이다. 향후 연구로서 사고원인분류 사례를 통해 작업일보와 연계한 안전 체크리스트 적용에 관한 실증연구를 수행하고자 한다.

## 요약

사고 원인에 대한 철저한 분석은 사고 재발 방지를 위한 필수적인 과정이다. 해체공사 사고의 원인을 살펴보면 작업자의 불안정한 행동, 불안정한 상태, 심리적·신체적 상태, 현장관리 원인 등 매우 다양하다. 현재 해체공사 사고통계는 지속적으로 조사·보고되고 있으나 사고 유형에 따른 보다 근본적인 원인 분류 정보가 필요하다. 본 연구에서는 하인리히의 도미노 이론을 바탕으로 해체공사 사고의 유형에 따라 사고원인(불안전한 행동, 불안정한 조건)과 휴먼에러(인적요인)를 분류하였다. 본 연구에서는 해체공사시 사고유형에 따라 사고원인을 체계적으로 분류하기 위해 QFD-FMEA(Quality Function Deployment - Failure Mode Effect Analysis) 3단계 모델을 사용하였다. 사고원인 분류 결과는 사고예방을 위한 안전지식 및 체크리스트로 활용할 수 있다.

키워드 : 품질기능전개, 고장모드영향분석, 근본원인, 도미노이론, 휴먼에러, 인적요인

## Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2021R1F1A1062639).

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(Grant RS-2023-00246154).

## Acknowledgement

This result was developed and submitted as a presentation paper at the Architectural Institute of Korea conference in May 2023.

## ORCID

Donguk Yoo,  <http://orcid.org/0009-0007-9555-4557>

Nam-Gi Lim,  <http://orcid.org/0000-0002-2419-0537>

Jae-Youl Chun,  <http://orcid.org/0000-0003-2434-9808>

Jaeho Cho,  <http://orcid.org/0000-0002-5706-4385>

## References

1. Heinrich HW. Industrial accident prevention – a scientific approach. 1st ed. NY: McGraw Hill Book; 1931. 366 p.
2. Kim TH, Kim KN, Lee MJ. Development of work safety management platform based on construction accident big data analysis. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2023 Jan;39(1):331-6. <https://doi.org/10.5659/JAIK.2023.39.1.331>
3. Lee DY, Kim DE. A study on the probabilistic risk analysis for safety management in construction projects. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*. 2021 Aug;26(8):139-47. <https://doi.org/10.9708/jksci.2021.26.08.139>
4. Park HP, Han JG. Development of risk assesment index for construction safety using statistical data. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2019 Aug;19(4):361-71. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.4.361>
5. Haber N, Fargnoli M, Lombardi M. A fuzzy-QFD approach for the enhancement of work equipment safety: a case study in the agriculture sector. *International Journal of Reliability and Safety*. 2018 Jan;12(3):306-26. <https://doi.org/10.1504/IJRS.2018.10016368>
6. Lo HW, Liou JJH. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. *Applied Soft Computing*. 2018 Dec;73(1):684-96. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.09.020>
7. Jung HH, Choi BS, Kang SY, Kang YC. Temporal analysis of the frequency of accidents associated with construction equipment. *Safety Science*. 2022 Sep;153:105817. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105817>
8. Choi YG, CHO KT. A cause analysis of the construction incident using causal loop diagram: safety culture perspective. *Journal of the Korean society of safety*. 2020 Apr;35(2):34-46. <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2020.35.2.34>
9. Min KH, Cha YW, Han SW, Hyun CT. An analysis of relationship between unsafe acts and human errors of workers for construction accident prevention. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2019 May;35(5):161-8. [https://doi.org/10.5659/JAIK\\_SC.2019.35.5.161](https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2019.35.5.161)
10. Kim JH. A study on prevention plan of accident through the analysis of cause for safety accident in the demolition work. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2012. Dec;14(4):271-8.
11. Song H, Park HG, Go SS. Study on the analysis of accident cause of form work using FTA(Fault Tree Analysis) system. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2006 Jun;22(6):119-27.
12. Reason J. *Human Error*. England (UK): Cambridge University Press. 1990. p 302.