

FMEA 기법을 활용한 크레인 관련 중대 재해의 정량적 분석에 관한 연구

A Quantitative Analysis of Fatal Accidents Related to Cranes Using the FMEA Method

김 흥 현*

Kim, Hong-Hyun

이 강**

Lee, Ghang

Abstract

As buildings become higher, larger, and more complex, safety issues for construction workers working at such environments become more important. We analyzed 83 critical accident cases reported to the KOSHA(Korea Occupational Safety & Health Agency) for construction cranes by types of cranes and by patterns of accidents and causes. There are more number of accidents related to mobile cranes than that related to tower cranes, but the numbers of dead were similar in both cases. The most dominant cause of crane accidents was "fall of materials". We also analyzed the cases of crane accidents using the FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) in order to set up a priority for safety management and also to prioritize research and development items relating tower cranes. In the process, we tried to eliminate subjective indexes such as an expert group survey and use objective and quantitative indexes. As a result, it was found that critical crane accidents occurs most during the "lifting and translating" activity.

키 워 드 : 크레인, 크레인 종류, 재해형태, 중대재해, FMEA
 Keywords : Crane, Crane type, Accident type, Fatal Accidents, FMEA

1. 서 론

1.1 연구배경

건설 산업은 1960년대 이후 국가 주도의 경제개발계획에 따라, 국가경제의 밑거름이 되어 양적으로 급속히 발전해왔다. 그러나 빠른 양적 성장에도 불구하고, 지난 10년간 안전사고율을 살펴 보면(표 1) 그 비율이 크게 줄지 않아, 2006년 현재 건설업의 안전사고 재해자수는 산업 전체 재해자수의 20%를 차지하고 있으며, 제조업과 함께 산업 전체 안전사고의 60%를 차지하고 있다(그림 1).

표 1. 10년간 한국건설업의 재해율 및 사망자만인율 (노동부)

년도 분류	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
재해율 ¹⁾	0.72	0.73	0.60	0.61	0.69	0.72	0.86	0.94	0.75	0.70
사망자만인율 ²⁾	3.14	3.62	3.22	2.75	2.70	2.41	2.89	3.88	2.86	2.48

* 연세대학교 건축공학과 석사과정

** 연세대학교 건축공학과 교수

이 연구는 건설교통부의 2006년 첨단융합건설기술개발사업 "로봇 크레인 기반 고층건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발 (06첨단융합 CO2)"의 연구비 지원에 의해 수행됨

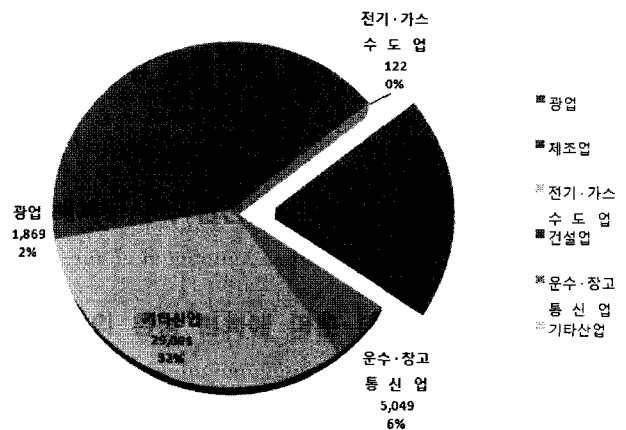


그림 1. 2006년도 산업별 재해자수(노동부)

한국의 건설산업 사망자만인율(즉, 사망자 비율)을 선진국과 비교하여 보아도 높은 수준임을 알 수 있다. 아래 그림 2는 한국, 미국(US Department of Labor 2005)과 싱가포르(Singapore Ministry of Manpower 2005)의 재해율과 사망자만인율을 비교한 것이다. 사망자만인율을 살펴 보면, 한국이 2.86으로 가장 높고, 뒤를 이어 미국, 싱가포르 순으로 싱가포르가 가장 낮다. 그러나 재해율의 경우, 이와는 매우 다른 패턴을 보이는데 한

- 1) 재해율: 전체 재해자를 전체 근로자로 나누어 100을 곱한 값
- 2) 사망자만인율: 전체사망자를 전체근로자로 나누어 10,000을 곱한 값으로 근로자 10,000명당 사망자수

국과 싱가포르가 각각 0.75, 0.7로 낮게 나온 반면, 미국의 경우 5.81로 무려 8배 이상 높은 것으로 나타났다. 이러한 수치에 대한 정확한 이유는 알 수 없으나, 몇 가지 해석이 가능하다. 첫째로 미국의 경우 재해 발생률은 매우 높으나 각종 안전시설 등이 잘 되어 있어 재해가 발생하여도 인명피해와 같이 심각한 재해로 이어지는 경우가 낮다고 해석할 수 있다. 또 다른 해석은 우리나라의 경우 사망자가 발생하지 않은 재해는 공식통계에 신고하는 경우가 많으나, 미국의 경우 한국과 비교하여 그 신고기준이 엄격하여, 재해의 수준이 경미하더라도 공식통계에 모두 포함되어 재해 발생률이 높은 것으로 해석할 수 있다. 두 경우 모두 궁극적으로 재해율에 비하여 심각한 인명피해가 상대적으로 적게 발생하고 있다는 점에서 미국이 안전관리 측면에서 한국을 앞서고 있음을 보여주고 있다.

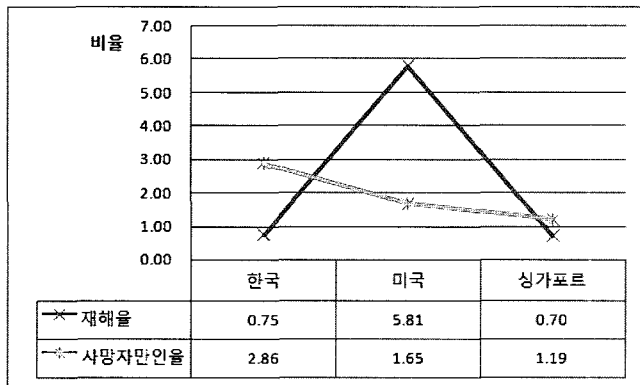


그림 2. 2005년 국가별 건설업의 재해율 및 사망자만인율

정부도 이러한 국내 건설업 안전사고의 문제점 및 개선의 필요성을 인식하고, 2007년 2월 21일부터 공사금액과 종류에 따라 전체 공사금액의 0.91%에서 2.66%까지의 안전관리비의 무적으로 책정하도록 고시하였다³⁾. 그러나 아직 안전관리비 투자의 우선순위나 지침 등이 없다.

본 논문은 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법을 사용하여 여러 건설작업 중 특히 크레인을 이용한 양중작업의 세부단위작업별 재해 가능성 및 심각성 등을 객관적 지표를 통하여 정량화하고, 그 관리 우선순위 및 관련기술개발 우선순위를 추출하고자 한다.

1.2 연구 방법

건물이 지어질 때 자재의 운반은 건물 생산에 있어 중요한 역할을 한다. 특히 건물이 고층화됨에 따라 그림 3과 같이, 자재의 운반을 담당하는 양중기계의 비중은 점점 높아지고 있는 실정이다. 따라서 건설공사에 있어 양중기계의 이용은 필수불가결한 요소라고 말할 수 있다. 그러나 일반적으로 양중작업은 고소(高所)작업이 많기 때문에 재해 발생시 인명피해와 직결되는 위험한 작업이라고 할 수 있다(그림 4).

본 연구는 2007년 8월 현재 한국산업안전공단 웹사이트(한국산업안전공단 2007)에 게시된 총 2971건의 건설업재해사례에서 크레인과 직접적으로 관련된 재해 128건 중 83개의 재해 사례(1997년 2월~2007년 6월)를 대상으로 하였다. 그러나 한

3) 노동부, 「건설업 산업안전보건관리비 계상 및 사용기준」, 노동부 고시 제2007-4호, 2007.02.21

국산업안전공단의 자료는 건설업체가 근로복지공단이나 지방노동관서에 공식적으로 신고한 재해만 등록되어 있기 때문에 경미한 사고를 포함하면 실제로는 더 많은 수의 재해가 있을 것으로 추정된다.

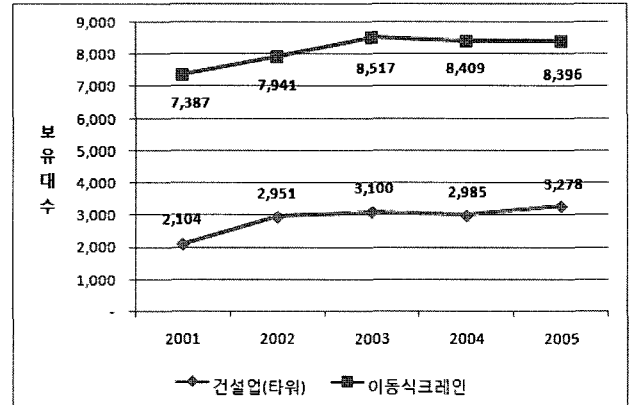


그림 3. 국내의 크레인 보유대수 현황 (최재본 2006)

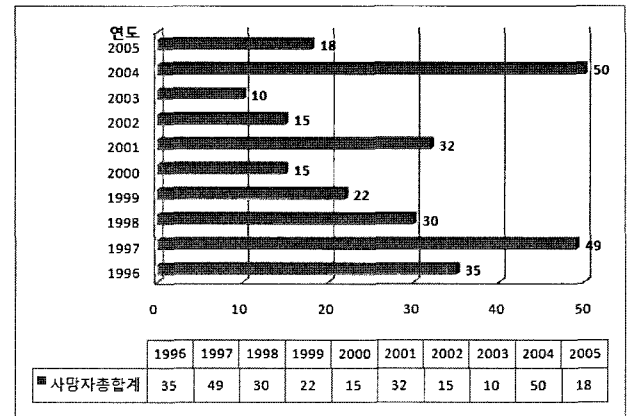


그림 4. 1996년-2005년 크레인 관련 사망자수 (노동부)

중대재해사례를 분석하여 크레인별, 재해형태별로 분류하여 재해율과 재해가 발생한 이유를 살펴보고, 특히 양중과정과 크레인 설치 및 해체별로 재해 패턴의 종류와 잠재 원인에 대해서 파악하고자 한다. 또한 중대재해사례들을 재해 패턴별로 정리하여 FMEA 기법을 적용하고, 이 기법을 적용함에 있어서 전문가의 경험적인 척도를 적용하기보다는 객관적인 척도를 만들어 분석하고자 한다.

연구 방법은 서론에서 연구 배경, 연구 목적 및 방법 등을 소개하고, 문헌조사를 통하여 기존 연구논문과 문헌 등의 기초 자료들을 정리하고, 중대재해사례를 분석하였다. 다음으로 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 기법을 적용하여 크레인을 이용한 양중 단위작업별 위험성을 평가하였다.

연구의 대상 외에 본 연구가 기존의 우선순위 추출 연구와 구분되는 점은, 기존의 연구가 설문이나 전문가집단면접(FGI: Focused Group Interview) 등을 통하여 수집한 전문가의 주관적 평가치에 의존하였다면, 본 연구는 사고발생회수, 사고의 결과, 안전교육 횟수, 작업의 근무년수 등 객관적인 지표를 사용하고 자 하였다는 점이다.

2. 문헌 조사

2.1 크레인의 정의 및 종류

한국산업안전공단의 안전보건기준⁴⁾과 건설교통부의 건설기계관리법시행령⁵⁾을 보면 크레인을 “혹이나 기타의 달기기구를 사용하여 하물의 권상과 이송을 목적으로 일정한 작업 공간 내에서 반복적인 동작이 이루어지는 기계”라고 정의하고 있다.

아래 표 2는 크레인의 종류를 나타내는 표로써, 건설업에서 일반적으로 많이 사용하는 크레인을 고층 건물을 건설할 때 사용하는 타워크레인⁶⁾과 위치 이동이 편리한 이동식 크레인 그리고 지하철 공사시 지하의 흙을 퍼낼 때 쓰이는 천장크레인 및 갠트릭크레인 등으로 나누고 있다.

표 2. 크레인 종류 및 정의 (노동부, 건설교통부)

종류	정의
타워크레인	수직타워의 상부에 위치한 지브를 선회시키는 크레인, T형 크레인 ⁷⁾ 과 러핑(또는 L형)크레인이 이에 해당된다.
천장크레인	주행레일 위에 설치된 새들에 직접적으로 지지되는 거더가 있는 크레인
갠트릭크레인	다리 모양의 크레인 ⁸⁾ 으로 천장크레인과 비슷한 거더 양쪽에 교각을 세우고 지상에 설치된 레일을 따라 이동한다. 거더, 트롤리(좌우)와 호이스트(상하)로 이루어져 있는 크레인
이동식크레인	무한궤도 또는 타이어식으로 강재의 지주 및 선회장치를 가진 것. 다만(레일)식인 것을 제외한다. 전기동력에 의하여 일정지역에서 이동할 수 있는 크레인

2.2 재해의 정의 및 종류

재해의 발생형태란⁶⁾ “재해 및 질병이 발생된 형태 또는 근로자(사람)에게 상해를 입힌 기인물(재해의 원인이 되는 것)과 상관된 현상”이라고 정의한다. 한국산업안전공단은 산업 전반에서 일어나는 재해발생형태를 21가지⁷⁾로 나누고 있다. 그 중에서 본 연구에서 참고한 발생형태는 추락, 전도·전복, 충돌·접촉, 낙하·비래, 협착·감김, 붕괴·도괴 그리고 전류접촉 등 7가지이다. 그리고 아래 표 3과 같이 분류한 재해발생형태의 기준은 작업자가 상해에 이르는 가장 큰 원인이 무엇인가에 있다. 예를 들어, 작업자가 윗층에서 아래층으로 떨어져 사망하였다라고 가정해 보자. 이 경우의 재해형태는 ‘추락’에 의한 사망이다. 만약 철골이 상부층에서 떨어져, 떨어지는 철골을 맞아 사망한 경우는 ‘낙하나 비래’에 의한 재해이다. 그러나 만약 작업자가 상부층에서 떨어진 물체에 맞아 중심을 잃고 아래층으로 떨어져 사망을 하였을 경우는 주원인이 추락이므로 ‘추락’에 의한 재해로 분류된다.

실제 재해는 복합적으로 발생하는 경우가 많기 때문에, 위 표 3에서 보여주는 재해발생형태의 정의로는 분류하기 어려운 부분들이 있다. 이에 한국산업안전공단은 재해형태를 판단하기

위한 분류기준⁸⁾을 정하고 있다. 아래 표 4는 분류기준을 참고하여 양증장비에 관련된 재해에서 판단하기 어려운 추락과 전도, 그리고 낙하와 비래, 이상온도 노출 및 접촉 또는 유해, 위험물질 노출 및 접촉의 분류에 대해 설명하고 있다.

표 3. 재해발생의 형태 및 정의 (노동부)

종류	정의
추락	사람이 중력에 의하여 건축물, 구조물, 가설물, 수목, 사다리 등의 높은 장소에서 떨어지는 것
전도, 전복	사람이 거의 평면 또는 경사면, 층계 등에서 구르거나 넘어짐
충돌, 접촉	재해자 자신의 움직임, 동작으로 인하여 기인물에 접촉 또는 부딪히거나, 물체가 고정부에서 이탈하지 않은 상태로 움직임(규칙, 불규칙)등에 의하여 접촉, 충돌
낙하, 비래	구조물, 기계 등에 고정되어 있던 물체가 중력, 원심력, 관성력 등에 의하여 고정부에서 이탈하거나 또는 설비 등으로부터 물질이 분출되어 사람에게 가해진 경우
협착, 감김	두 물체 사이의 움직임에 의하여 일어난 것으로 직선 운동하는 물체 사이의 협착, 회전부와 고정체 사이의 끼임, 롤러 등 회전체 사이에 물리거나 또는 회전체, 돌기부 등에 감김 경우
붕괴, 도괴	토사, 적재물, 구조물, 건축물, 가설물 등이 전체적으로 허물어져 내리거나 또는 주요 부분이 꺾어져 무너지는 경우
전류접촉	전기설비의 충전부 등에 신체의 일부가 직접 접촉하거나 유도전류의 통전으로 근육의 수축, 호흡곤란, 심실세동 등이 발생한 경우 또는 특별고압 등에 접근함에 따라 발생한 섬락 접촉, 합선·흔촉 등으로 인하여 발생한 아크에 접촉된 경우

표 4. 분류가 어려운 재해형태의 기준

종류	정의
추락과 전도의 분류	재해 당시 바닥면과 신체가 떨어진 상태로 더 낮은 위치로 떨어진 경우에는 (추락)으로, 바닥면과 신체가 접해있는 상태에서 더 낮은 위치로 떨어진 경우에는 (전도)로 분류 신체가 바닥면과 접해 있었는지 여부를 알 수 없는 경우에는 작업발판 등 구조물의 높이가 보폭(약 60cm)이상인 경우에는 신체가 구조물과 바닥면에서 떨어진 것으로 판단하여 (추락)으로 분류하고, 그 보폭 미만인 경우는 (전도)로 분류
낙하와 비래, 이상온도 노출 및 접촉 또는 유해, 위험물질 노출 및 접촉의 분류	물체 또는 물질이 낙하 또는 비래되어 타박상 등의 상해를 입었을 경우에는 (낙하, 비래)로 분류 고·저온 물체 또는 물질이 낙하·비래되어 화상을 입었을 경우에는 (이상온도 노출, 접촉)으로 분류 낙하·비래 또는 비산된 물체 또는 물질의 특성에 의하여 상해를 입은 경우에는 (유해·위험물질 노출, 접촉)으로 분류

2.3 위험성 평가 기법과 FMEA

크레인의 위험을 미리 검토하고자 할 때는 적절한 평가 방법이 필요하다. 그리고 평가 분석은 두 가지 검토사항이 있다.

4) 한국산업안전공단, 2001
5) 건설교통부, 2000
6) 한국산업안전공단, 2006
7) 한국산업안전공단, 2006

8) 한국산업안전공단, 2006

먼저 역사적인 자료, 즉 비슷한 제품이나 서비스에 대한 자료 분석이나 보증된 자료, 고객의 불만사항 그리고 그 밖에 신뢰성이 있는 적절한 자료를 사용해서 실패를 정의하는 것이다. 그리고 두 번째로 이미 가지고 있는 통계자료, 수학적 모델, 시뮬레이션, 동시공학, 신뢰성 공학은 실패를 확인하고 정의하는데 사용된다⁹⁾.

위험성 평가 기법들로는 FTA(Fault Tree Analysis), FMA(Failure Mode Analysis), FMCA(Failure Mode and Critical Analysis), FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 등이 있다¹⁰⁾. 위의 네 가지 기법이 많은 유사성을 가지고 있으나 약간의 차이점이 있다. 1961년 Bell Telephone Company에서 개발한 FTA는 프로세스 모델 기법과 유사한 표기법을 이용하여, 문제점의 원인, 결과 그리고 위계체계를 그래픽하게 보여줄 수 있다는 특징이 있어 복잡하고 역동적인 시스템 분석에 유용하다. FTA와 FMEA는 상호보완적인 관계를 가지고 있다. FMA는 실패원인, 빈도 등을 통하여 기존에 발생하였던 문제점을 분석하는 기법으로 개발되었기 때문에, 새로운 시스템이나 시스템 변경으로 인해 발생하지 않은 문제점을 예측할 때는 FMEA가 유리하다. FMCA는 FMEA와 가장 유사한데, 중요도(criticality) 관점에서 실패원인, 빈도, 실패 상태 등을 분석한다는 점이 다르다. FMEA란 이 넷 중 가장 범용적인 위험성 분석 기법으로 실패의 빈번도 (Occurrence), 심각도 (Severity), 검출도 (Detection)에 기초하여 잠재적인 실패, 문제, 오류 등을 사전에 정의, 예측하고 제거하는 방법이다¹¹⁾. FMEA 기법은 평가기법 중에서 가장 좋다고 말할 수는 없지만, FMEA기법이 디자인 단계에서 잠재적인 위험성을 다른 기법들보다 효율적이고 상대적으로 빠른 시간에 미리 검토할 수 있는 정량적, 정성적 방법이라는 점에서, 본 연구에서는 FMEA 기법을 사용하였다.

FMEA 기법은 빈번도 (Occurrence), 심각도 (Severity), 검출도 (Detection)를 정량적으로 평가하여 위험등급(RPN: Risk Priority Number)을 산출한다. 각각의 평가요소별 정의는 아래 표 5와 같다.

표 5. FMEA 평가 요소에 대한 설명

평가 요소	내용
빈번도 (Occurrence)	실패가 반복적으로 일어나는 정도
심각도 (Severity)	실패의 심각성 및 영향을 나타내는 정도
검출도 (Detection)	고객에게 도달 전에 실패를 검출할 수 있는 정도
위험등급 (RPN: Risk Priority Number)	빈번도와 심각도 그리고 검출도를 곱하여 큰 값을 기준으로 위험우선순위를 정함

각 평가요소별 평가등급 범위는 표준화된 기준은 없지만, 보통 1 ~ 5 등급과 1 ~ 10 등급을 두 가지 기준을 사용하는데, 보통 1 ~ 10 등급 범위가 폭넓게 사용된다.

3. 크레인 관련 재해사태의 통계적 분석

FMEA 기법을 적용하여 크레인 관련 재해의 위험등급을 산출하기에 앞서 크레인 관련 재해의 통계적 특성을 살펴보았다. 자료는 전술한 바와 같이, 한국산업안전공단에 게시된 크레인 관련 재해사태 83건을 통계 분석하였다.

3.1 크레인 종류별 재해사태 분석

표 6은 크레인 종류별로 사망자 및 부상자수를 분석한 것으로, 크레인별 안전사고 사례수를 분석하여 보면 이동식 크레인 사고가 전체 83건 중 50건으로 가장 많고, 그 다음으로 T형 크레인, 천장형 크레인, 러핑크레인 순이다. 네 가지 종류의 크레인 중 이동식 크레인의 사고발생건수가 많은 것은 이동식 크레인이 가격과 이동성이 좋아 2.5배 이상 사용이 되고 있으며 (그림 3 참조), 이동식 크레인이 다른 크레인에 비하여 지지대가 약하여 쉽게 전복이 되기 때문이다. 또, 수치상으로 보면 지난 10년간 러핑크레인의 재해사태가 1건으로 가장 안전하다고 할 수 있다. 그러나 과거에는 러핑크레인이 고가이고 조장이 어려워 사용 사례가 적었고, 최근에는 도심고층공사 증가와 함께 공간권(空簡權)이 강조되면서 많이 사용되기 시작하였기 때문에, 객관적인 상대적 비교가 어렵다.

표 6. 크레인 종류별 재해 분석

크레인 분류	사망자 (명)	부상자 (명)	사상자비율 (%)	사례수 (건)	사례수비율 (%)
이동	52	7	54.6	50	60.2
타워	24	10	31.5	23	27.7
러핑	2	4	5.6	1	1.2
천장	9	0	8.3	9	10.8
합계	87	21	100.0	83	100.0

재해발생건수 대비 사상자수를 보면, 수치상으로 러핑크레인이 가장 높은 것으로 나타나지만 재해사태가 통계적 의미를 갖기에는 너무 적다고 볼 수 있겠다. 재해건수별 사망자수와 부상자수를 비교하여 보면, 재해건수당 사망자수는 약 1명으로 크레인 종류와 관계없이 유사하였으나, 건당 부상자수는 고소작업이 많은 T형과 러핑 크레인이 재해건수당 4명으로 높았다.

3.2 재해발생형태별 분석

표 7. 재해발생형태별 분석

재해 형태	사망자 (명)	부상자 (명)	사상자비율 (%)	사례수 (건)	사례수비율 (%)
낙하	27	2	26.9	26	31.3
추락	24	5	26.9	24	28.9
도괴	8	7	13.9	7	8.4
감전	9	2	10.2	9	10.8
전도	10	1	10.2	8	9.6
기타	9	4	12.0	9	10.8
합계	87	21	100.0	83	100.0

※ 천장크레인에 갠트리크레인 사례도 포함됨

9) Omdahl, 1998; ASQC 1983

10) Stamatis, 2003

11) Stamatis, 2003

재해발생형태별 재해사례를 분석하여 보면, 낙하와 추락이 모두 26.9%로 가장 높은 사상자 비율을 차지하고 있다(표 7). 낙하와 추락재해가 많은 이유를 분석해 보면, 크레인을 이용한 작업은 지상에서 높은 장소로 자재 등을 옮기는 작업이 많기 때문에 낙하 및 추락 재해가 많은 것으로 추측된다.

3.3 양중단위작업별 재해 분석

양중단위작업별 재해사례를 분석하여 보면, 공중에서 자재를 양중하고 이동할 때 재해발생율이 34.9%로 가장 높았고, 그 다음 크레인 설치 및 상승작업(16.9%), 자재 하강 작업(13.3%), 크레인 해체(12%), 로프를 자재에 묶은 후 들어 올리는 약 2m 이하의 양중 작업(12%) 순으로 나타났다(표 8). 특히 2m 이하의 낮은 높이에서 사고가 많이 발생하는 이유는 로프에 인장력이 가해지지 않아, 균형이 맞지 않는 상태에서 자재를 들어 올리면서 문제가 발생하기 때문이다.

표 8. 양중과정, 크레인 설치 및 해체별 재해 분석

번호	분류	발생건수	비율
1	로프 묶기	2	2.4
2	2m 이하 양중 (로프가 인장력을 받지 않은 상태)	10	12.0
3	공중 양중 및 이동 (인양, 회전, 트롤리 이동)	29	34.9
4	하강	11	13.3
5	방향잡기	2	2.4
6	자재설치	2	2.4
7	로프풀기	0	0.0
8	크레인설치 및 텔레스코핑 작업	14	16.9
9	크레인 해체	10	12.0
10	기타	3	3.6
합 계		83	100.0

4. 중대재해사례를 이용한 FMEA 활용 방안

양중작업의 위험등급(RPN: risk priority number)을 결정하기 위하여 앞 장에서와 같이 단순히 재해발생비율, 즉 빈번도(occurrence)로만 평가할 수도 있다. 그러나 자동차 사고와 같이 자주 발생하여도 인명피해로 이어지는 사례가 적은 경우와 비행기 사고와 같이 자주 발생하지 않아도 큰 인명피해로 이어지는 경우가 있기 때문에, 재해의 심각성(severity)을 고려한다면 더 정확하게 위험등급을 결정할 수 있을 것이다. 여기에 FMEA기법은 사전예방 가능성(detection)을 추가하여 위험등급을 산출하고 있다. 본 장에서는 FMEA 기법을 이용하여 각 양중단위작업별 위험등급을 결정하기 위하여 각 평가요소별 평가지표를 정하였다. 일반적으로 평가지표 도출 연구에서 객관적 지표 설정의 어려움, 관련 자료 입수 등의 어려움으로 전문가 설문이나 인터뷰 방식 등에 의존하는 경우가 많다. 그러나 전문가 설문 등은 분야 전문가들의 의견이긴 하지만, 주관적 판단에 근거한다는 본질적인 문제점을 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 분석결과의 객관성을 높이기 위하여 가능한 객관

적이면서도 자료 수집이 용이한 공개된 지표를 사용하고자 하였다.

다만 등급 범위는 표준화된 기준이 없기 때문에¹²⁾, 본 연구에서는 최대한 미국의 모든 산업에서 사용하는 1 ~ 10 범위를 사용하도록 한다.

4.1 평가 척도

4.1.1 빈번도(Occurrence)

앞에서 언급한대로 빈번도는 실패가 반복적으로 일어나는 정도를 나타내는 평가 척도이다. 본 연구는 앞의 표 8에서 분류한 10가지 양중단위작업 항목을 기준으로 전체 재해사례수에 대한 각 항목의 발생수를 비율로 나타낸 발생비율을 고려하여, 빈번도의 등급 범위를 나누었다. 빈번도의 등급범위는 표 9와 같다.

표 9. 빈번도의 등급 범위

등급	분류	범 위 (%)
10	가장 빈번히 일어남	91 ~ 100
9		81 ~ 90
8		71 ~ 80
7		61 ~ 70
6		51 ~ 60
5		41 ~ 50
4		31 ~ 40
3		21 ~ 30
2		11 ~ 20
1		0 ~ 10
일어나지 않음		

4.1.2 심각도(Severity)

심각도는 실패의 심각성 및 영향을 나타내는 평가 요소이다. 심각도의 평가 요소는 노동부의 산업재해분석 보고서에서 재해자 요양기간 분류를 참고하여 등급 범위를 나누었다(표 10). 본 연구는 중대재해사례를 활용하였기 때문에 모든 사례가 사망자가 있다. 따라서 모든 사례는 심각도 등급이 10이다.

표 10. 심각도의 등급 범위

등급	분류	범 위
10	가장 심각함	사망자
9		중증 장애
8		단기 장애
7		6월 ~ 1년 이하
6		91일 ~ 180일
5		29일 ~ 90일
4		22일 ~ 28일
3		15일 ~ 21일
2		8일 ~ 14일
1		7일 이하
심각성 없음		

12) Stamatis D. H., Failure Mode and Effect Analysis, ASQ, p30, 2003

4.1.3 검출도(Detection)

검출도는 사용자가 사고 발생 전에 이를 미리 감지할 수 있는지에 대한 평가척도이다. 재해를 사전에 예방하기 위해 크레인 전자 센서를 이용한 안전장치를 설치하여, 재해의 위험이 운전자에게 도달하기 전에 미리 경고하거나 크레인 자체적으로 작업을 중단할 수 있도록 한다면, 재해 발생 전에 예방이 가능함과 동시에, 재해발생이 줄게 된다. 그리고 크레인 운전기 사에게 정기적으로 교육을 실시하여, 작업 중 항상 긴장을 늦추지 않도록 함으로써 재해를 예방할 수 있을 것이다. 또한 운전자의 숙련도에 따라 경험을 갖춘 숙련자라고 말할 수 있는데, 운전자의 숙련도가 높을수록 과거 경험을 활용하여 문제점을 파악하고 적절히 대처할 수 있을 것이다. 끝으로 크레인 작업은 바람의 영향을 많이 받기 때문에, 바람이 많이 부는 날에 작업을 하게 되면 재해발생 확률이 높아질 것이다.

본 연구에서는 위에서 열거한 모든 지표, 즉 안전장치의 유무, 풍속의 세기, 크레인 운전자의 숙련도 및 근속년수 그리고 안전 교육의 실시 여부에 근거하여 검출도를 설정하였다.

아래 표 11에서 표 14까지는 검출도에 대한 변수의 척도를 나타내고 있다.

표 11. 안전장치유무의 척도

안전장치유무	척도
설치되어있지 않음	3
세밀하게 설치되어있지 않거나 사용하지 않음	2
설치되어있음	1

오래된 크레인이 아니라면 일반적으로 과부하방지, 권상방지, 안전난간 등 안전장치가 설치되어 있다. 다만 CCTV 나 감시모니터 그리고 고성능 센서는 옵션으로 설치할 수 있는데, 가격이 비싸서 현재 현장에서는 거의 사용하지 않았다. 그러나 최근 안전관리비 의무책정 등으로 그 사용이 점차 늘고 있는 추세이다.

표 12. 풍속의 척도

풍속	척도
1 m/s 미만	10
1m/s ~ 2m/s 미만	9
2m/s ~ 3m/s 미만	8
3m/s ~ 4m/s 미만	7
4m/s ~ 5m/s 미만	6
5m/s ~ 6m/s 미만	5
6m/s ~ 7m/s 미만	4
7m/s ~ 8m/s 미만	3
8m/s ~ 9m/s 미만	2
9m/s ~ 10 m/s 이상	1

풍속은 현장에서 타워크레인을 이용하여 작업을 할 때 고려되는 안전기준이다. 따라서 산업안전기준에 관한 규칙 제117조의 3 (강풍시 타워크레인의 작업제한)¹³⁾을 참고하여 변수의 척도를 설정하였고, 척도가 높을수록 미리 검출이 불가능한 것으로

13) 노동부, 산업안전기준에 관한 규칙 제117조의3

로 설정하였다.

표 13. 운전자 숙련도 및 근속년수의 척도

운전자 숙련도 및 근속연수	척도
6월 미만	10
6월 ~ 1년 미만	9
1년 ~ 2년 미만	8
2년 ~ 3년 미만	7
3년 ~ 4년 미만	6
4년 ~ 5년 미만	5
5년 ~ 10년 미만	4
10년 ~ 15년 미만	3
15년 ~ 20년 미만	2
20년 이상	1

표 14. 안전 교육 실시여부의 척도

안전 교육 실시여부	척도
교육 받지 않음	10
2년 이상에 한 번	9
2년에 한 번	8
1년에 한 번	7
6개월에 한 번	6
분기별 한 번	5
한 달에 한 번	4
2주일에 한 번	3
1주일에 한 번	2
하루에 한 번	1

위에서 언급한 검출도의 변수를 재해사례에 적용하기 위해서, 각 변수들의 해당 척도 수치를 곱한 값 중 최대값과 최소값 선택한다. 그런 후에 최대값과 최소값 사이를 10등분하여 등급을 설정하여 적용하였다. 표 15는 검출도의 범위를 나타낸다.

표 15. 검출도의 등급 범위

등급	분류	범 위
10	미리 검출 불가능	3,000
9		2,400 ~ 2,700 미만
8		2,100 ~ 2,400 미만
7		1,800 ~ 2,100 미만
6		1,500 ~ 1,800 미만
5		1,200 ~ 1,500 미만
4		900 ~ 1,200 미만
3		600 ~ 900 미만
2		300 ~ 600 미만
1		검출 가능

4.2 FMEA 적용

앞에서 살펴본 평가척도를 이용하여 간단한 FMEA 시트를 만들고, 빈번도와 심각도 그리고 검출도를 이용하여 위험등급(RPN)을 추출함으로써, 재해 원인 중 우선적으로 관리해야 하는 대상을 추출하였다. 한국산업안전공단에 게시된 재해사례를 보면, 검출도의 등급 범위를 산정할 변수들 중 풍속과 안전장

치의 유무만을 알 수 있기 때문에, 본 연구에서는 검토한 여러 변수 중 이 두 가지 변수만을 이용하여 검출도를 산정한 후, 검출도의 범위를 모두 100으로 나누어 재배열하였다(표 16).

표 16. 수정된 검출도

등급	분류	범 위
10	미리 검출 불가능	30
9		24 ~ 27 미만
8		21 ~ 24 미만
7		18 ~ 21 미만
6		15 ~ 18 미만
5		12 ~ 15 미만
4		9 ~ 12 미만
3		6 ~ 9 미만
2		3 ~ 6 미만
1		검출 가능

아래 표 17은 FMEA 기법을 이용하여 위험등급을 산출한 시트를 나타낸 것이다. 분석 결과를 보면, 양중 및 이동(상승, 회전 그리고 트롤리 이동)이 360점으로 가장 높은 위험등급순위를 나타내고 있으며, 뒤이어 하강작업, 크레인 설치 및 텔레스코핑 작업, 크레인 해체, 2m 이내 높이에서 양중 등의 순으로 나타났다.

위험등급이 높다는 것은 바뀌어 말하여 안전사고에 있어서 우선관리대상이라고 할 수 있으며, 안전관리비 투자에 있어서도 높은 효과를 기대할 수 있는 항목이라고 하겠다. 최근 크레인에 충돌방지 시스템 및 모니터링 시스템 등 회전 및 양중 중에 발생할 수 있는 문제를 방지할 수 있는 다양한 장치가 개발되거나 상용화되고 있다. 그러나 아직 섬세한 기능을 수행할 수 있는 제품은 개발이 되지 않은 상태이며 이 부분에 대한 연구개발이 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 1997년부터 2007년까지 한국산업안전공단에 보고된 크레인 관련 중대재해사태 83건을 크레인별, 재해형태별 그리고 양중작업별로 분석하고, FMEA 기법을 활용하여 각 양중단위작업별 위험등급을 산출하였다. 그 결과로 이동식 크레인 과 타워크레인의 재해가 다른 크레인에 비해 많게 나타났으나, 재해건수당 사망자 수는 크레인 종류와 관계없이 유사한 것으로 나타났다. 단, 재해건수당 부상자수는 고소작업이 많은 T형과 러핑 크레인에서 더 발생하는 것을 알 수 있었다. 재해 유형별로 살펴보았을 때, 고소작업이 많은 양중작업의 특성상 낙하 및 추락 재해가 많이 발생함을 알 수 있었다. 양중작업별로는 양중 및 회전 작업시 중대재해가 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 추가적으로 FMEA기법을 도입하여 양중단위작업별 위험등급을 산출하였다. 여러 단위작업 중 자재의 양중 및 이동이 가장 위험등급이 높게 나왔으며, 그 다음으로 자재의 하강, 그리고 크레인 설치 및 텔레스코핑 작업이 위험등급이 높은 것으로 나타났다. 이러한 자료는 현장에서 안전관리비 집행의 우선투자대상 및 연구개발 우선순위를 결정하는데 사용되어질 수 있을 것이다.

기존 유사연구방법과 대별되는 점으로는 평가지표 설정에 있어서 전문가 설문이나 인터뷰 등 주관적 지표를 사용하는 경우가 많은데, 본 연구는 FMEA 기법의 적용에 있어서 가능한 객관적이고 정량화 가능한 지표를 사용하여 분석의 신뢰성을 높이고자 하였다. 다만 본 연구에서 제시한 위험등급 평가방법을 적용함에 있어서 해당 운전기사의 근무년수 등 몇몇 정보의 부족으로 인해 분석이 제한적이었지만, 실제 현장에서는 이러한 정보를 쉽게 구할 수 있으므로 건설현장 적용에는 큰 무리가 없으리라 예상된다. 본 연구에서 도출된 결과는 크레인 관

표 17. FMEA 적용한 간단한 시트

번호	양중과정	잠재적 원인	빈번도 등급	심각도 등급	검출도				RPN값	순위
					풍속	안전 장치	급	등급		
1	로프 묶기	로프로 자재 묶을시 작업 영역 내 전선 감전	1	10	8	3	24	9	90	6
2	2m 이하 양중 (로프가 인장력을 받지 않은 상태)	최초 2m이내 상승시 주위건물 및 작업자 간섭	2	10	8	3	24	9	180	2
3	공중 양중 및 이동 (인양, 회전, 트롤리 이동)	인양 운반시 외력에 의한 흔들림	4	10	8	3	24	9	360	1
4	하강	운반 위치로 하강시 운전 오작동 위험	2	10	8	3	24	9	180	2
5	방향잡기	자재 설치 위해 방향 잡을 때 축에서 이탈	1	10	8	3	24	9	90	6
6	자재설치	자재 설치시 외력에 의한 흔들림	1	10	7	3	21	8	80	7
7	로프풀기	자재에서 로프 풀 때 운전 오작동 위험	해당 재해사태 없음							
8	크레인설치 및 텔레스코핑 작업	크레인 설치 및 상승작업시 외력 작용	2	10	8	3	24	9	180	2
9	크레인해체	크레인 해체시 외력 작용	2	10	8	3	24	9	180	2
10	기타	기타 위험요인	1	10	8	3	24	9	90	6

련 안전관리 계획, 안전관리비 투자 우선순위 결정, 및 연구항목 도출 등에 사용되어질 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 건설기계관리법시행령, 별표1 건설기계의 범위(제2조 관련), 개정2000.6.27 대통령령 제16872호
2. 김용국, 박대식, 구문희, 고광일, 타워크레인 안정성 및 운전자 안전 확보 방안 연구, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원, 2003.12
3. 김원기, 크레인 사망 재해 실태와 안전 대책에 관한 연구, 계명대학교 산업기술대학원 석사학위논문, 2003
4. 김용성, 건설에서의 시공FMEA적용 방안 연구, 한국건설관리학회 학술발표대회, 제3회, pp271 ~ 274, 2003.11
5. 김홍현, 이강, 크레인 관련 중대재해사례를 통한 재해 유형 및 원인 분석, 한국건축시공학회 학술논문발표대회, v.7 n.1, pp109 ~ 112, 2007.04
6. 노동부, 건설업 산업안전보건관리비 제상 및 사용기준, 노동부고시 제2007-4호, 2007.02.21
7. 노동부, 산업안전기준에 관한 규칙, 제117조의3(강풍시 타워크레인의 작업제한), 2005.10.07 본조신설
8. 노동부, 산업재해분석, 한국산업안전공단, 1996 ~ 2005
9. 노동부, 산업재해통계, 한국산업안전공단, 2006 ~ 2007
10. 최재분, 크레인(기중기) 표준화 현황, 산업자원부 기술표준원, 기술표준, p48, 2006.05
11. 한국산업안전공단, 안전보건기준. 크레인 제작기준, 안전기준 및 검사기준, 제1장 제3조(용어의 정의), 개정2001.10.10 고시 제2001-57호
12. 한국산업안전공단, 크레인 관련 재해사례, www.kosha.or.kr, 1997. 01 ~ 2007.06
13. 한국산업안전공단, KOSHA CODE G-8-2006. 산업재해 기록, 분류에 관한 지침, pp23 ~ 27, 2006. 7. 1 공표
14. 홍영탁, 유정호, 임경호, 이현수, FMEA를 이용한 초고층 건축시공의 공기영향요인 평가, 대한건축학회지, v.20 n.10, pp183 ~ 192, 2004.10
15. Omdahl, T. P, ed. Reliability, availability and maintainability dictionary. Milwaukee: ASQC Quality Press., 1988
16. Singapore Ministry of Manpower, Occupational Safety and Health Division Annual Report 2005, pp53~54, 2005
17. Stamatis D. H., Failure Mode and Effect Analysis, ASQ, 2003
18. U.S. Department of Labor - Occupational Safety & Health Administration, Workplace Injury, Illness and Fatality Statistics in 2005, 2005