

건설공사보험 사례를 활용한 건설현장 인명사고 정량화 모델 개발

Quantification Model Development of Human Accidents based on the Insurance Claim Payout on Construction Site

하 선 근¹

김 태 희²

손 기 영¹

김 지 명^{3*}

Ha, Sun-Geun¹

Kim, Tae-Hui²

Son, Ki-Young¹

Kim, Ji-Myong^{3*}

School of Architectural Engineering, University of Ulsan, Nam-Gu, Ulsan, 44610, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Mokpo National University, Mokpo, Jeollanam-do, 58554, Korea ²

Construction Science Department, Texas A&M University, College Station, 77843, USA ³

Accident rate in the construction industry of South Korea is increasing every year, and it represents the highest percentage among industries. This shows that activities performed to prevent safety accidents in the country are not efficient when it comes to reduce the accident rate. In order to resolve this issue, a model for the prediction of human accidents should be established. In addition, it is required a quantification study based on pattern of human accidents. Therefore, the objective of this study is to quantify uncertainty of human accidents risk and predict how to change in various circumstances by using Monte Carlo Simulation. To achieve the objective, first, pattern of human accidents was defined. Second, insurance claim payout and information of human accidents during 14 years in construction site were collected. Third, descriptive analysis is conducted to determine the characteristics of the accident pattern. Fourth, to quantitatively analyze the pattern of the human accidents, the population of each accident occurrence and payout were estimated. Finally, estimated populations was analyzed according to characteristics of distribution by using Monte carlo simulation. In the future, this study can be used as a reference for developing the safety management checklist in construction site and development of prediction models of human accident.

Keywords : Insurance claim payout, risk assessment, monte carlo simulation, human accidents analysis

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

선진국에서의 안전관리는 건설사업의 가격(Cost), 일정(Schedule), 품질까지 영향을 미치며 성공적인 건설사업 수행에 중요한 관리요소로 인식되고 있으나 국내의 경우에는 안전관리비 산출 시 낙찰률 적용문제, 작업환경 변화에 따른

가설물 안전관리 부실 문제 등으로 안전대책의 중요성이 결여되고 있다. 그 결과, 국내의 건설업체들은 체계적인 안전관리를 수행할 수 없으며 많은 건설현장에서 안전사고가 매년 발생하고 있다. 안전보건공단의 2016년 산업재해 발생현황 보고서에 따르면, 2016년 전체 재해자 수 90,656명 중 건설업에 종사하는 근로자의 재해자 수는 26,570명으로 나타났다. 이는 전년도 보다 5.7% 증가하였으며 산업별 비율로서는 29.3%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 또한, 사망자 수도 1,777명 중 554명으로써 31.2%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 전년도 보다 12.4%가 증가하였다 [1,2]. 이는 국가차원에서 재해 예방을 위해 실시하는 공정 안전관리제도 도입, 종합위험관리체제 구축, 클린사업장 조성, 산업재해 예방시설 용자금 지원사업, 산업재해 취약부문

Received : December 26, 2017

Revision received : January 29, 2018

Accepted : February 13, 2018

* Corresponding author : Kim, Ji-Myong

[Tel; 82-2-758-4655, E-mail: jimy6180@gmail.com]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

별 중점 지원 등이 건설업의 재해율 감소에는 큰 변화를 보여 주지 못하고 있음을 나타낸다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있으나 건축물이나 공중에 대한 리스크에 한정되어 있으며 인명사고에 대한 정량화 모델 연구는 아직 전무한 실정이다[3,4,5]. 즉, 국내 건설업의 재해율을 선진국 수준의 재해율에 도달하기 위해서는 무엇보다도 인명사고의 발생형태에 대한 정량화 연구를 통해 인명사고 예측모델에 대한 프레임 구축할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 A 보험사의 실제 건설현장에서 발생한 인명사고 보상지급액 데이터를 토대로 사고분석(계절, 공정률, 지역) 및 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 인명사고 발생형태에 대한 정량화 모델을 개발하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 건설현장 안전관리 체크리스트 개발 및 인명사고 예측 모델 개발의 참고 자료로 활용될 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 절차

본 연구의 목적인 인명사고 정량화 모델 개발을 위해 Figure 1과 같이 5가지 단계로 수행하였다. 첫째, 건설현장에서의 발생한 산업재해의 의미를 정의하기 위해 국내외 선행연구들을 고찰한다. 둘째, 14년(2001~2014)간 국내 건설현장에서 발생한 인명사고 및 보상지급액 데이터를 수집하였으며 근로자의 부상에 한해서 수행되었다. 셋째, 수집된 데이터를 토대로 인명사고 발생형태별 유형 및 특성을 파악하기 위해 기술통계를 실시한다. 넷째, 각 인명사고의 발생형태를 정량적으로 분석하기 위하여 발생형태별 사고발생 확률과 보상지급액의 모수를 추정한다. 다섯째, 추정된 모 집단을 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 사고 발생형태별 분포 특징을 분석한다.

2. 이론적 고찰

2.1 선행연구

국내의 경우, Go et al.[6]은 11년(1992~2002년)간 건설현장에서 발생한 재해사례를 대상으로 공정별 작업을 세부적으로 분류 후 재해발생정도와 위험도를 분석하여 건축공사 공중별 위험도를 제안하였다. 건설공중별 재해를 분석 결과, 거푸집공사 17.4%, 가설공사 11.6%, 철골공사 11.0%의 위험발생 확률을 나타냈으며 이는 1달에 1회 이상의 재해가 발생하는 것을 의미한다.

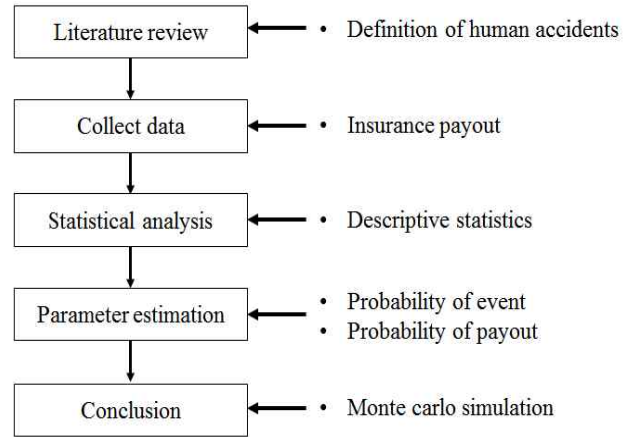


Figure 1. Methodology

Yang et al.[7]은 3년(2005~2007년)간 국내 건설현장에서 발생한 재해사례를 대상으로 직종별 부상재해와 사망 재해를 분석하고 Risk plane과 IRR(index of relative risk for a given trad) 재해 평가 기법을 이용하여 직종별 위험 점수를 산출하였다. 그 결과, 도장공, 방수공, 조적공, 전공, 용접공은 고위험 직종으로 나타났다. 이에 다른 직종보다 우선적이고 집중적인 안전교육과 체계적인 작업인원 배치를 한다면 재해예방효과는 크게 향상될 것이라고 제안하였다.

해외의 경우, Meng et al.[8]은 1)연령, 2)충돌 유닛, 3)차량 유형, 4)음주, 5)조명 상태, 6)충돌 유형, 7)심각도와 같은 7가지 요인을 트리 다이어그램에 적용하였다. 이를 통해, 가능한 모든 사고 시나리오를 식별하였으며 사고 빈도와 장기적 근무지역의 충돌을 결합하여 사상자 위험을 예측하기 위한 새로운 확률론적 QRA모델을 제안하였다.

Sayegh and Monir[9]은 전문가 설문조사를 통해 건설프로젝트의 리스크들을 42가지로 분류하였으며 리스크 영향도를 분석하였다. 그 결과, 물가상승, 발주자의 무리한 공기 일정 요구, 하청 업체의 저조한 실적 및 관리 순으로 건설프로젝트에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 정치적, 사회적, 문화적인 리스크는 영향도가 상대적으로 낮은 범주에 속한 것으로 분석되었다.

이와 같이, 공중 및 세부작업에 따른 리스크, 건설 프로젝트 계획수립 과정 중 리스크 고려사항에 관한 연구는 다양한 측면에서 수행되고 있으나 인명사고의 발생형태에 대한 정량화 모델 및 예측 모델에 관한 연구는 이뤄지지 않고 있는 실정이다.

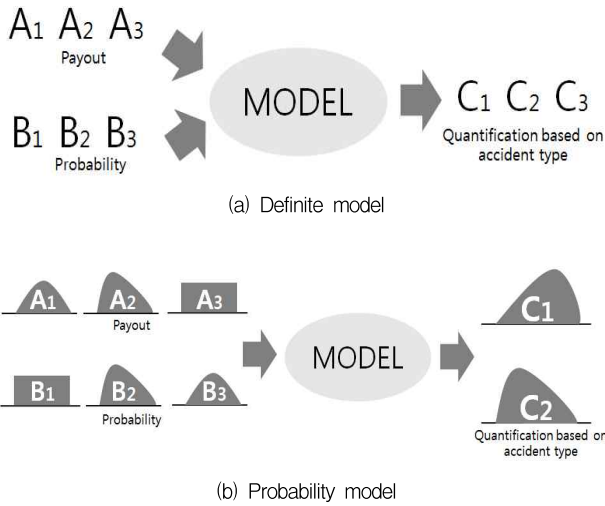


Figure 2. Analytical approach models

2.2 몬테카를로 시뮬레이션

건설프로젝트 내에 존재하는 리스크를 예측하는 모델은 변수들 간의 관계가 확실하여 예측치를 정확하게 찾을 수 있는 확정모형이 아닌 많은 불확실성이 존재하여 예측치를 정확하게 찾을 수 없는 확률모형이다. 즉, 건설현장에서 발생하는 인명사고들은 피해금액과 발생확률이 하나의 값을 가지는 것이 아니며 확률론적인 방법으로 접근해야한다는 것을 의미한다.

다음 Figure 2와 같이, 확정모형과 확률모형에서 구하고자 하는 함수의 해석적 접근방법은 차이가 있다. (a)는 확정모형의 접근 방법을 도식한 것으로서, 방정식을 모형으로 세우고 계산하여 분석적 해(Analytic solution)를 찾을 수 있다. 하지만 (b)는 확률모형의 접근 방법을 도식한 것으로서, 분석적인 방법으로 해를 찾는 것이 불가능한 경우가 대부분이기 때문에 수치적인 방법(Numerical)으로 해를 찾아야 한다. 이 경우, 확률모형의 모수(Parameter)나 변수에 대해 반복적으로 난수를 생성하여 시뮬레이션을 수행하면 원하는 답을 확률적(근사적)으로 구할 수 있는데 이를 몬테카를로 시뮬레이션이라 한다.

즉, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 추출된 예측 값은 하나의 값이 아닌 평균값과 분산을 가지는 확률분포로 나타나며 다양한 환경에서 어떻게 변화하는지 예측할 수 있다. 이러한 결과 값들을 토대로 건설프로젝트 내에 발생할 수 있는 위험요소들을 정량화 할 수 있기에 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였다.

3. 데이터 수집

3.1 인명사고 발생형태 정의

본 연구에서는 A보험사를 대상으로 2001년부터 2014년까지 14년 간 건설현장에서 발생한 인명사고 및 보상지급액 데이터 156개를 수집하였다. 그 중 사건발생 수가 0 또는 1개인 폭발, 빠짐 및 익사, 감전을 제외하였으며 154개의 데이터를 선정하였다. 사건발생수가 0또는 1인 사고발생형태를 제외한 이유는, 수집된 데이터를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션 모수 추정 시, 각 독립변수(사고 발생형태)의 분산이 0임으로 확률분포를 정의할 수 없는 오류가 발생하기 때문이다[10]. 이에, 재해발생형태별 사건발생 수가 2건 이상인 154개의 데이터를 선정하여 1)넘어짐, 2)떨어짐, 3)깔림 및 뒤집힘, 4)부딪힘 및 물체에 맞음, 5)무너짐과 같이 5가지 발생형태로 분류하였다.

현재 KOSHA의 산업재해원인조사 보고서에 정의되어 있는 사고원인과 산업재해 기록 분류에 관한 지침(KOSHA Guide G-08-2006)의 분류기준이 다소 상이한 경우가 있어 발생형태의 의미가 혼동될 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 인명사고 발생형태에 대한 정의를 KOSHA의 산업재해 원인조사 보고서의 기준을 바탕으로 Table 1과 같이 정의하였다. 부딪힘과 물체에 맞음은 본래의 정의가 있으나 수집된 데이터에서는 이 두 가지 발생형태가 연쇄적으로 발생한 경우가 대부분이기 때문에 그룹화 하였다.

Table 1. Definition of accident pattern

Code	Pattern	Definition
1	Slip	A person slips or trips
2	Fall	A person falls from a height
3	Pin or Overturning	Objects rolled in flat, slope, stairs, slide, overturning
4	Impact or Graze	Run into a object or a person was grazed by flying or falling object
5	Crumble	In case damage was occurred due to collapse of installed building or stacked objects

3.2 기술통계

인명사고의 발생형태를 정량화하기 위해서는 발생형태에 따라 기술통계 및 사고유형분석이 선행될 필요가 있다. 이에 발생형태별 사고빈도, 평균 보상지급액, 편차와 같은 기술통계를 Table 2에 나타내었다. 분석 결과, 사고 빈도의 경우 넘어짐, 깔림 및 뒤집힘, 부딪힘 및 물체에 맞음 순으로 많이 발생하였으며 평균 지급액은 떨어짐이 가장 높았다.

Table 2. Safety accident pattern code(Mil. KRW)

Code	N	average	std	min	max
1	68	6.66	5.98	1.03	25.30
2	11	31.54	39.32	2.17	105.62
3	48	10.81	13.20	1.60	68.39
4	22	11.03	12.32	1.16	45.00
5	5	6.36	8.94	1.00	22.00

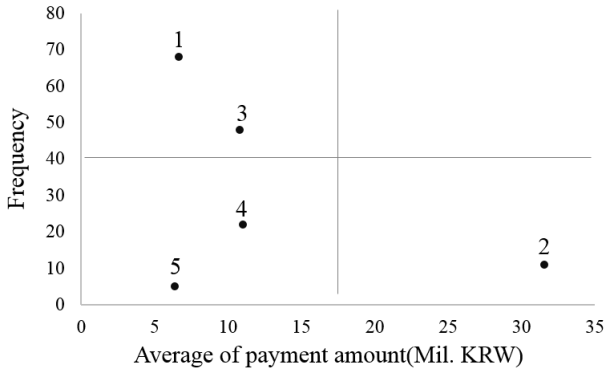


Figure 3. Scatter diagram of accident types

또한, 인명사고 발생형태별 사고유형을 파악하기 위해 산출된 빈도와 보상지급액의 평균을 토대로 Figure 3과 같이 산점도로 나타냈다. 그 결과, 건설 현장에서의 발생할 수 있는 사고유형은 다음과 같다. 첫째, 떨어짐은 사고빈도는 낮지만 보상지급액이 높은 유형, 둘째, 넘어짐, 깔림 및 뒤집힘은 사고빈도는 높지만 보상지급액이 낮은 유형, 셋째, 부

딛힘 및 물체에 맞음, 무너짐은 사고빈도와 보상지급액이 모두 낮은 유형으로 나타났다.

3.3 인명사고 원인 분석

인명사고 발생형태의 특성을 분석하기 위해 Table 3와 같이 사고 발생형태별 누적공정률, 계절, 지역과 같은 3가지 항목으로 구분 후 기술통계분석을 실시하였으며 분석결과는 다음과 같다.

3.3.1 넘어짐

넘어짐으로 인한 사고는 주로 주변 환경에 대한 부주의로 발생하였다. 넘어짐은 사물에 걸려 넘어지거나 도로 빙결 등으로 인해 미끄러짐으로 항시 일어날 수 있는 사고이다. 계절의 경우, 겨울보다 봄과 여름에 많이 발생하였는데 이는 Kim et al.[11]의 연구 결과와 같이, 겨울철에는 길이 미끄러워 근로자가 속도를 줄이고 안전에 대해 주의하기 때문이다. 또한, 토질의 강도가 높은 가을이나 겨울철에 넘어짐 사고가 발생하게 되면 부상의 위험수준이 높기 때문에 평균 보상지급액도 높은 것이라 판단된다[12].

3.3.2 떨어짐

관리자와 근로자들은 떨어짐에 대해 안전을 제고하고 있지만 주로 안전시설문제 등의 이유로 사고가 발생하였으며 다른 사고 발생형태보다 심각한 부상을 초래하며 더 심하게는 사망할 수 있다. 공정률의 경우 80~100%구간에 사고가

Table 3. Descriptive statistics based on accident pattern

Code		1	2	3	4	5					
Categorization	Classification	Freq.	Ave*	Freq.	Ave.*	Freq.	Ave.*	Freq.	Ave.*	Freq.	Ave.*
Accumulate rate	0%~20%	5	11.26	-	-	7	9.88	3	12.50	-	-
	20%~40%	17	7.70	1	24.79	8	15.98	1	6.94	-	-
	40%~60%	13	6.53	1	20.54	8	8.56	-	-	-	-
	60%~80%	12	5.95	1	51.89	16	10.38	8	10.99	2	13.79
	80%~100%	21	5.21	8	31.22	9	9.72	10	11.03	3	1.41
Season	Spring	27	5.68	1	8.90	10	5.83	3	17.94	1	5.58
	Summer	21	5.79	4	18.87	15	7.46	9	5.66	2	1.62
	Fall	11	9.07	5	48.41	10	15.31	4	9.52	1	22.00
	Winter	9	8.70	1	20.54	13	15.04	6	16.63	1	1.00
Location	Metropolis	40	7.00	7	41.51	25	9.43	15	11.40	1	1.06
	urban	21	5.69	3	10.53	12	14.08	5	8.14	4	7.69
	the country	7	7.78	1	24.79	11	10.38	2	15.50	-	-

*Mil. KRW

집중적으로 발생하는 것으로 났으며 공사 후반부인 60~100% 구간이 20~60%에 비해 보상지급액이 높은 것으로 나타났다. 이는 건설 프로젝트가 진행됨에 따라 건물의 높이는 증가하게 되며 고층에서 추락할 경우 부상의 정도가 크기 때문이다[12]. 위치의 경우에는 대도시 구간이 63.6%를 차지함으로써 가장 많이 발생하였으며 평균 보상지급액도 41.51백만원으로 가장 높았다. 현재의 아파트, 오피스텔과 같은 고층건물들은 도심지에서 활발하게 진행되고 있으며, 추락 높이가 높을수록 부상의 강도 또한 증가하기 때문에 보상지급액이 가장 높게 도출된 것이라 판단된다.

3.3.3 깔림 및 뒤집힘

깔림 및 뒤집힘은 주로 안전펜스 쓰러지거나, 건설장비 및 이동장비가 노면불량의 이유로 전도 및 전복되는 사건이 주로 발생하였다. 위치의 경우, 대도시에서 발생한 사고가 전체사고에 52.1%를 차지하였다. 이는 도심지의 건설현장은 다른 위치에 비해 현장의 부지활용 및 야적장 규모와 같은 내, 외부 환경의 제약을 받으며 현장작업장 밀도가 증가하게 된다. Chang et al.[13]에 따르면, 현장작업장의 밀도는 현장작업의 위험성 의미하며 현장작업장 밀도가 증가한다는 것은 사고 유발가능성이 증가한다는 것이다.

3.3.4 부딪힘 및 물체에 맞음

계절의 경우, 봄과 겨울의 평균 보상지급액이 다른 구간에 비해 높은 것으로 나타났다. 이는 한국의 봄과 겨울은 다른 계절에 비하여 평균 풍속이 빠른 특성과 연관이 있는 것으로 판단된다[14]. 돌풍에 의해 날아오는 물체에 충돌하는 경우, 날아오는 물체의 속도는 풍속에 의해 결정되며 물체의 속도가 높을수록 부상의 크기도 증가하기 때문이다. 이에 평균 보상지급액이 높게 도출된 것으로 판단된다.

3.3.5 무너짐

무너짐은 단 5건만이 발생했으며 전체 사고빈도의 3.2%를 차지하였으며 평균 보상지급액은 6.36백만원으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 공정률의 경우 공사 후반부인 60~100% 구간에서만 사건이 발생하였다. 이 시기에는 골조, 커튼월, 마감과 같은 다양한 공종이 동원되며 많은 물자가 투입됨으로 현장의 복잡성은 증가한다. 이에 건설장비 및 운송장비들은 현장의 복잡성으로 인해 사고 발생 가능성이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 몬테카를로 시뮬레이션

4.1 확률모형 설정

몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 안전사고 발생형태별 위험도를 평가하기 위해서 다음 식(1)과 같이 인명사고 원인의 정량화를 위한 함수식을 나타내었다.

$$R = F \times P \text{ ----- (1)}$$

R = 사고 발생형태별 위험도

F = 프로젝트 내의 사고발생 확률

P = 사고 발생형태별 보상지급액

식(1)에서 프로젝트 내의 사고발생 확률과 사고 발생형태별 보상지급액은 추정모형을 위한 변수로 설정하여 목표지수인 인명사고 발생형태에 대한 위험도를 파악하고자 하였다. 여기서, 프로젝트 내의 사고발생 확률은 한 프로젝트 내에서 발생할 수 있는 전체 형태에 대한 인명사고 발생확률이며, 사고 발생형태별 보상지급액은 사고 발생형태에 따라 한 사고에서 발생할 수 있는 손해액을 나타낸다.

실제 데이터를 기반으로 확률분포 모형을 추정하기 위해 Crystal Ball 프로그램의 분포적합기능을 활용하였다. 또한, 분포형태를 결정하고 Anderson-Darling 검정을 실시하였다. 분포 적합도 검정 결과 A-D통계량이 1.50보다 작고 P-value가 0.05이상이면 분포가 적합하다고 볼 수 있다 [15].

4.2 프로젝트 내의 사고발생 확률분포

몬테카를로 시뮬레이션 수행 시, 변수의 확률분포가 우선 가정되어야 한다. 이에 수집된 데이터를 바탕으로 모수의 확률분포를 가정하였다. 식(2)는 한 프로젝트 내에서 1년에 발생할 수 있는 사고발생 확률을 함수식으로 나타낸 것이다.

$$F = A \times B \text{ ----- (2)}$$

F = 프로젝트 내의 사고발생 확률

A = 1년에 발생하는 사고 빈도

B = 사고 발생형태별 비율

각 프로젝트별로 사고 빈도를 분석하고, 이를 프로젝트 기간으로 나누어 한 프로젝트에서 매년 발생할 수 있는 사고 빈도(A)를 나타내었다. 그 결과, 78개의 프로젝트에서 매년

평균 0.83회, 표준편차 0.9338회로 나타났다. 또한 분포적합도를 이용하여 모수 추정한 결과, 로그분포로 나타났으며 A-D값은 0.4991, P-value는 0.14로써 적합하다고 검증되었다.

Table 4. Occurrence rate based on accident pattern

Code	1	2	3	4	5
Probability(%)	43.31	3.18	30.57	14.01	7.01

추정된 확률분포와 Table 4에서 제시된 사고 발생형태별 비율을 곱하여 한 프로젝트에서 발생할 수 있는 프로젝트 내의 사고발생 확률(A)을 추정하였다.

Table 5. Descriptive analysis of simulation results based on accident pattern

Code	1	2	3	4	5
Distribution	Log	Log	Log	Log	Log
Trial	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Average	0.35	0.06	0.25	0.11	0.03
Median	0.24	0.04	0.17	0.08	0.02
Standard Deviation	0.37	0.06	0.26	0.12	0.03
Variance	0.14	0.00	0.07	0.01	0.00
Skewness	4.83	4.76	4.35	4.18	4.27
Kurtosis	58.10	51.58	42.99	38.58	41.51
Coeff. of Variability	1.05	1.05	1.03	1.02	1.02
Minimum	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00
Maximum	13.16	1.53	8.28	3.06	0.81
Mean Std. Error	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

몬테카를로 시뮬레이션을 10만 번 수행하여 도출된 사고 발생형태별 확률분포는 Table 5와 같다.

4.3 피해액 확률분포

분포적합도를 이용하기 위해선 15개 이상의 데이터가 확보되어야 한다. 1,3,4번 요인은 데이터가 15개 이상 확보되었으며 분포적합도를 수행한 결과 Table 6과 같이 확률분포 함수가 도출되었다. 하지만 2,5번 요인은 15개 미만으로 나타났다. 이에 2,5번 요인에 대해서는 데이터가 부족하여 확률분포를 추정하지 못하고 정규분포로 가정하는 방법을 사

용하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 모수의 확률분포를 가정할 시 데이터가 정규성을 만족하는지에 대한 선행분석이 수행되어야 한다[16].

Table 6. Probability distribution

Code	AD	P-value	Location	Average	Standard deviation
1	0.3898	0.293	0.71	6.78	7.27
3	0.3578	0.379	1.37	10.89	16.07
4	0.4034	0.229	0.00	11.37	16.33

2,5번 요인에 대해 정규성 검정을 실시한 결과 정규성을 만족하지 못한 것으로 나타났다. 이에 식(3)과 같이 루트함수를 이용하여 데이터를 치환시켜 정규성 검정을 실시하였다.

$$y = \sqrt{x} \text{ ----- (3)}$$

y = 루트함수 데이터
x = 보상지급액

그 결과, Table 7과 같이 정규성을 만족하는 것으로 나타났으며 확률분포형태는 2번 요인에 대해 평균 4.66백만원, 표준편차 0.99백만원, 5번 요인에 대해 2.11백만원, 표준편차 2.99백만원으로 나타났다.

Table 7. Normality test

Code	Kolmogorov-Smirnov					
	Original Data			Conversion Data		
Statistic	Degrees of freedom	P-value	Statistic	Degrees of freedom	P-value	
2	0.295	11	0.008	0.189	11	0.200
5	0.709	5	0.012	0.260	5	0.200

도출된 평균값과 표준편차를 바탕으로 정규분포를 가정하고 시뮬레이션을 10만번 실시하였다. 도출된 시행값은 식(4)와 같이 제곱함수를 이용하여 역치환을 실시하였다.

$$y = x^2 \text{ ----- (4)}$$

y = 추정된 보상지급액
x = 루트함수 데이터

역치화된 데이터는 시뮬레이션을 통해 모수 추정된 보상 지급액을 의미하며 확률분포는 정규분포로써 2번 요인에 대해 평균 22.73백만원, 표준편차 9.37백만원, 5번 요인에 대해 4.94백만원, 표준편차 2.99백만원으로 나타났다.

추정된 모든 사고 발생형태의 확률분포에 대해 시뮬레이션을 10만번 수행하여 난수를 발생시킨 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. Descriptive analysis of simulation results based on payout by accident pattern

Code	1	2	3	4	5
Probability distribution	Log	Nomal	Log	Log	Nomal
Trial	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Average	6.765	22.703	10.858	11.438	4.951
Median	4.602	22.728	6.183	6.535	4.954
Standard Deviation	7.580	9.351	16.463	16.504	2.993
Variance	57.451	87.433	271.033	272.393	8.957
Skewness	15.452	-0.007	11.349	7.617	0.004
Kurtosis	1231.135	3.031	349.244	158.030	3.03
Coeff. of Variability	1.120	0.412	1.523	1.445	0.605
Minimum	0.781	20.526	1.395	0.049	8.007
Maximum	797.642	65.136	959.049	768.682	17.473
Mean Std. Error	0.024	0.030	0.052	0.052	0.009

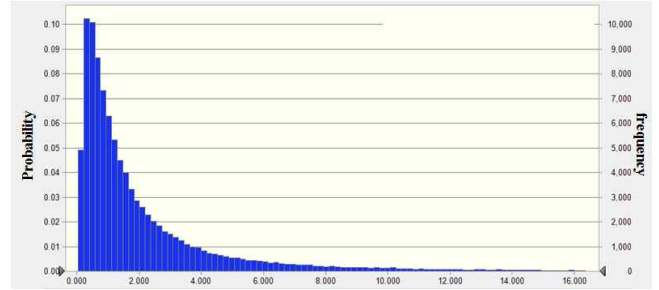
4.4 사고원인별 확률분포

건설현장에 존재하는 리스크들은 변수들의 관계가 불확실하여 예측치를 정확하게 찾을 수 없는 특성을 가지고 있어 확률론적 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 사고 발생형태별 발생확률과 보상 지급액을 추정하였다. 또한, 도출된 결과값들은 식(1)을 통하여 사고 발생형태별 위험도 수준을 계량적으로 분석해 보았다.

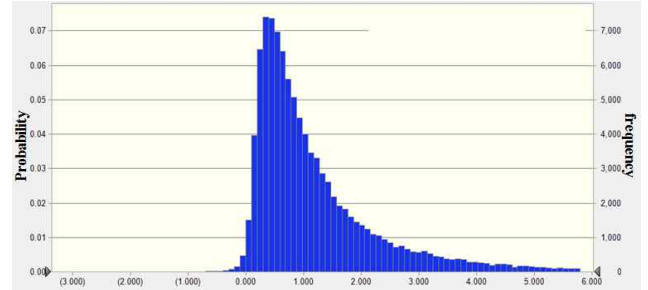
Figure 4는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 추출된 리스크 위험도의 예측 값이며 평균값과 분산을 가지는 확률분포이다. 히스토그램에서 X축은 보상지급액, Y축은 발생확률을 의미한다. 이를 통해, 다양한 환경과 조건 속에서 사고 발생형태별로 위험성이 어떻게 변화하는지 예측할 수 있다.

4.4.1 위험도

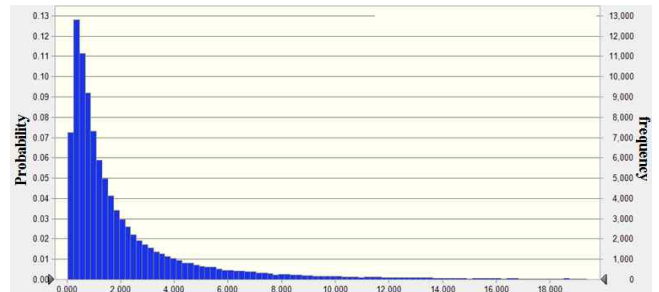
사고 발생형태별 위험도의 평균값을 비교한 결과, 깔림 및 뒤집힘(2.74), 넘어짐(2.44)이 다른 사고 발생형태에 비해 위험도가 높은 것으로 도출되었으며 떨어짐(1.33), 부딪



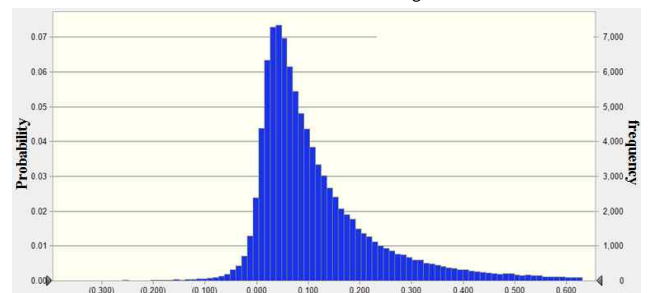
(a) Slip



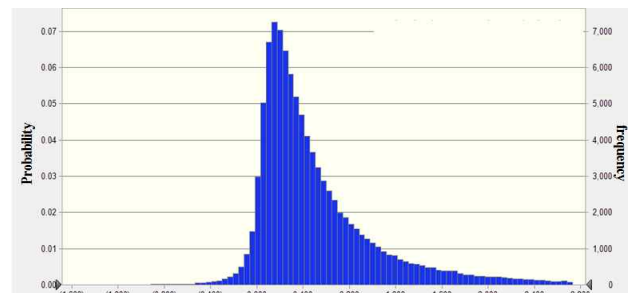
(b) Fall



(c) Pin and overturning



(d) Impact or graze



(e) Crumble

Figure 4. Simulation results about human accident pattern

힘 및 물체에 맞음(0.576), 무너짐(0.130) 순으로 나타났다. 이는 건설현장 내에서 안전관리를 수행할 때 깔림 및 뒤집힘, 넘어짐을 다른 발생형태보다 중점적으로 주시해야 한다는 것을 의미한다.

4.4.2 위험도의 변화폭

표준편차와 첨도를 활용하여 위험도의 변화폭을 분석할 수 있으며 모든 발생형태에 대해 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 변동 폭이 클 경우에는 최소와 최댓값의 범위가 넓어지는 문제가 발생할 수 있으나, 범위를 넓히는 것이 극단적인 값을 더 잘 테스트할 수 있는 장점으로 작용한다[15]. 깔림 및 뒤집힘(5.93, 325.91), 넘어짐(4.973, 3044.76), 떨어짐(1.594, 62.9), 부딪힘 및 물체에 맞음(0.768, 46.79), 무너짐(0.179, 123.25) 순으로 나타났다. 이는 깔림 및 뒤집힘과 넘어짐이 다른 발생형태에 비해 리스크의 범주가 넓은 것을 의미한다.

4.4.3 최댓값

도출된 위험도의 최댓값을 통해 극단적으로 발생할 수 있는 고위험의 사고발생확률을 예측할 수 있다. 넘어짐(639.486), 깔림 및 뒤집힘(294.399)이 떨어짐(46.211), 부딪힘 및 물체에 맞음(20.751), 무너짐(9.163)보다 매우 높은 것으로 나타났다. 즉, 극단적인 상황에서 인명사고 발생형태를 비교하였을 시, 넘어짐과 깔림 및 뒤집힘이 다른 발생형태보다 강도 높은 위협(Threat)이 된다는 것을 의미한다.

5. 결 론

건설현장에 존재하는 리스크들은 불확실한 특성을 가지고 있으며 국내 건설업의 재해율을 선진국 수준의 재해율 수준으로 향상시키기 위해선 확률론적인 시뮬레이션 방법을 통해 인명사고 발생형태별 정량화 분석이 수행되어야 한다. 이를 위해 A보험사를 대상으로 14년 간 건설현장에서 발생한 인명사고 및 보상지급액 데이터를 수집하였고 사고 발생형태별 특성을 파악하기 위해 기술통계를 실시하였다. 그리고 각 사고형태를 상대적으로 비교분석함으로써 사고 유형을 분석한 결과 1)떨어짐은 사고빈도는 낮지만 보상지급액이 높은 유형, 2)넘어짐, 깔림 및 뒤집힘은 사고빈도는 낮지만 보상지급액이 높은 유형, 3)부딪힘 및 물체에 맞음, 무너짐은 사고빈도와 보상지급액이 모두 낮은 유형으로

나타났다.

몬테카를로 시뮬레이션 활용을 위해 각 발생형태의 발생 확률과 보상지급액의 확률분포를 모수 추정하였다. 추정된 확률분포는 10만번의 시뮬레이션을 수행을 통해 시행값들을 분석해 보았다. 도출된 시행값들은 인명사고 위험도 산정식을 통하여 정량화된 위험도를 산출할 수 있으며 다양한 환경에서 위험도가 어떻게 변화하는지 예측할 수 있다.

사고원인별 위험도의 평균값을 비교한 결과, 깔림 및 뒤집힘(2.74), 넘어짐(2.44)은 떨어짐(1.33), 부딪힘 및 물체에 맞음(0.576), 무너짐(0.130)에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 표준편차와 첨도를 통하여 위험도의 변화폭을 분석한 결과, 모든 원인에 대해 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났으며 깔림 및 뒤집힘(5.93, 325.91), 넘어짐(4.973, 3044.76), 떨어짐(1.594, 62.9), 부딪힘 및 물체에 맞음(0.768, 46.79), 무너짐(0.179, 123.25) 순으로 나타났다. 최댓값을 통해 극단적으로 발생할 수 있는 고위험의 사고발생확률을 예측할 수 있다. 넘어짐(639.486), 깔림 및 뒤집힘(294.399)이 떨어짐(46.211), 부딪힘 및 물체에 맞음(20.751), 무너짐(9.163)보다 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 건설 현장내의 안전관리 계획수립 및 수행에 있어서 깔림 및 뒤집힘, 넘어짐을 다른 사고 발생형태들보다 중점적으로 관리해야 한다는 것을 의미한다.

본 연구의 결과는 5가지 발생형태에 한해서 수행되었기 때문에 다양한 발생형태에 대한 데이터를 수집 및 분석하는 추가적인 연구가 필요하다. 하지만, 본 연구에서 수행한 5가지 발생형태에 대해서는 건설 프로젝트 계획 수립 시, 계획 단계에서 종로단계까지 발생할 수 있는 인명사고를 예측할 수 있으며 프로젝트 규모, 공정률, 계절과 같은 다양한 상황에 적합한 인명사고 예방 전략 수립에 기여할 것이다. 또한, 건설 현장 내에서 발생하는 인명사고 발생형태를 정량화하기 위한 기초 연구로 수행되었으며 향후 건설현장 안전관리 체크리스트 개발 및 인명사고 예측 모델 개발의 참고 자료로 활용될 것으로 기대된다.

요 약

한국 건설업의 재해율은 매년 증가하고 있는 추세이며 다른 산업에 비해 월등히 높다. 이는 국가차원에서 재해예방을 위해 수행하는 안전활동들이 건설산업의 재해율 감소에는

효과를 보이지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는, 인명사고 예측모델에 대한 프레임이 구축되어야 하며, 인명사고 발생형태에 대한 정량화 연구가 필요하다. 이에, 본 연구는 인명사고 발생형태의 불확실성을 정량화하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 다양한 환경에서 어떻게 변화하는지 예측하고자 한다. 이를 위하여 첫째, 선행연구 고찰을 통해 인명사고 발생형태를 정의한다. 둘째, 14년 간 국내 건설현장에서 발생한 인명사고 및 보상지급액 데이터를 수집한다. 셋째, 발생형태별 특성을 파악하기 위해 수집된 데이터를 토대로 기술통계분석을 실시한다. 넷째, 인명사고 발생형태를 정량적으로 분석하기 위하여 발생형태별 사고 발생 확률과 보상지급액의 모수를 추정한다. 마지막으로 추정된 모집단을 토대로 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하여 인명사고 발생형태별 분포 특징을 분석한다. 본 연구의 결과는 향후 건설현장 안전관리 체크리스트 개발 및 인명사고 예측 모델 개발의 참고 자료로 활용될 것으로 기대된다.

키워드 : 보험 보상지급액, 리스크 정량화, 몬테카를로 시뮬레이션, 인명사고 분석

Acknowledgement

This research was supported by a grant (NRF-2016R1A2B4009909) from the National Research Foundation of Korea by Ministry of Science, ICT and Future Planning.

References

1. Lee HS. Current status of industrial accident occurrence in 2016 [Internet]. Seoul(Korea): Ministry of Employment and Labor; 2017 Mar [cited 2017 Apr 12]. 27 p. Available from: http://www.kosha.or.kr/cms/generate/FileDownload.jsp?content_id=370792&category_id=554&version=5.1&file_name=370792_2016.hwp
2. Lee HS. Current status of industrial accident occurrence in 2015 [Internet]. Seoul(Korea): Ministry of Employment and Labor; 2016 Mar [cited 2016 Apr 24]. 767 p. Available from: http://www.kosha.or.kr/cms/generate/FileDownload.jsp?content_id=363787&category_id=554&version=12.0&file_name=363787_2015.hwp
3. Park KJ, Chun JY, Roh DS. A study on the cost risk management method in the apartment housing construction, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 1999 Apr;15(4):141-9.
4. Kang LS, Kim CH, Kwak JM. Analysis for the importance of risk factors through the project life cycle, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2001 Aug;17(8):103-10.
5. Hwang JS, Lee CS. Weight evaluation of risk factors for early construction stage, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 2004 Apr;5(2):115-22.
6. Go SS, Song H, Lee, JY. A study on the hazard of work types for building construction, *Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction)*, 2004 May;20(5):137-44.
7. Yang YS, Park JH, Lee CS. Accident risk analysis of construction workers by occupation, *Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction)*, 2009 Oct;25(10):149-56.
8. Meng Q, Weng, J, Qu X. A probabilistic quantitative risk assessment model for the long-term work zone crashes, *Accident Analysis & Prevention*, 2010 Nov;42(6):1866-77.
9. Sayegh E, Monir S. Risk assessment and allocation in the UAE construction industry, *International Journal of Project Management*, 2008 May;26(4):431-8.
10. Yu YJ, Son KY, Kim JM. Risk analysis using construction insurance claim payouts, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2016 Aug;16(4):349-57.
11. Kim HH, Kim YW, Cho KA, Cho MH, Kim JH, Cho DY, Yoo CY, Park JS. A study on the prevention of musculoskeletal disease in Cleaners, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 2011 Oct;10(1):78-85.
12. Suh JH, Eo EK, Jung KY. Original articles: the height of fall as a predictor of fatality of fall, *Journal of the Korea Society of Traumatology*, 2005 Oct;18(2):101-6.
13. Chang CK, Sung YK, Park HS. Benefits of prework and suggestion for successful implementation, *Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction)*, 2008 Mar;24(5):157-64.
14. Byun JY, Choi YJ, Seo BK. Characteristics of a wind map over the Korea peninsula based on mesoscale model WRF, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2010 Jun;20(2):195-210.
15. Jornadan M. Analyze future risk using simulation, 1st ed, Seoul (Korea): Eretec; 2005. 549 p.
16. Kim DG, Park JS, Lee JH. Evaluation on intersection safety with respect to signalization and left-turn treatments, *Seoul Studies*, 2008 Sep;9(3):107-18.