

## A Study on the Probabilistic Risk Analysis for Safety Management in Construction Projects

Dong-Yeol Lee\*, Dong-Eun Kim\*

\*Assistant Professor, Dept. of Disaster Construction Safety, Daejeon Health institute of Technology, Daejeon, Korea

\*Assistant Professor, Dept. of Disaster Construction Safety, Daejeon Health institute of Technology, Daejeon, Korea

### [Abstract]

In this study, we proposed the possibility of reliability analysis of risk index by using Monte Carlo simulation as basic data of safety accident occurrence data and expert opinion by construction industry type. Through this, it is expected that risk index for safety accidents according to detailed types of works will be presented stochastically and it will be possible to predict the risk factors and the expected range of damage based on the reliability analysis in the construction safety management plan. It will also reduce many of the planning risks that are common to decision makers in the field of construction management. In identifying risks, road bridge construction was classified into earthworks, drainage works, and bridge construction, and possible safety accidents were classified based on expert data. The risk index was calculated for each detailed construction of road and bridge construction, drainage construction, and bridge construction.

▶ **Key words:** Risk Assessment, Construction Safety, Monte-carlo Simulation, Industrial Safety, Occupational Safety and Health

### [요 약]

건설 분야의 산업재해가 차지하는 비율은 전체 산업의 29%로 고위험군산업에 해당한다. 또한 다양한 공정이 존재하며, 소수의 관리자가 다수의 근로자를 관리하고 감독하는 특성상 위험도 관리가 필수적이다. 따라서 공사의 종류 및 공법에 따라 체계적이고 과학적인 위험도분석 방안을 마련해야 하며, 작업현장의 위험도를 점진적으로 완화하고 개선해야한다.

본 연구에서는 도로 교량공사 공종별 안전사고 발생확률 자료 및 전문가 데이터를 기초로 하고 확률론적 접근 방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 신뢰도 있는 위험지수를 산정할 수 있는 방안을 제시하고 평가하였다. 리스크 식별은 도로 교량공사를 토공사, 배수공사, 교량공사로 구분하여 전문가 데이터를 바탕으로 발생가능한 안전사고를 분류하였다. 도로 교량공사의 토공사, 배수공사, 교량공사의 세부공종별로 위험지수를 도출하였다.

▶ **주제어:** 리스크 평가, 위험도분석, 몬테카를로 시뮬레이션, 건설안전, 산업안전, 산업안전보건

- 
- First Author: Dong-Yeol Lee, Corresponding Author: Dong-Eun Kim
  - \*Dong-Yeol Lee (dylee@hit.ac.kr), Dept. of Disaster Construction Safety, Daejeon Health institute of Technology
  - \*Dong-Eun Kim (kde29@hit.ac.kr), Dept. of Disaster Construction Safety, Daejeon Health institute of Technology
  - Received: 2021. 08. 05, Revised: 2021. 08. 20, Accepted: 2021. 08. 24.

## I. Introduction

2020년 말 발간된 2019년 산업재해현황분석에 따르면, 전체 산업재해보상보험법 적용사업장 중에서 건설업에 종사하는 근로자 2,487,807명의 24.91%인 27,211명이 산업재해를 입은 것으로 조사되었다. 또한 재해자 중 사망자는 업무상 질병으로 인한 사망자 89명을 포함하여 총 517명으로 집계되었으며, 이는 고용노동부에서 조사하는 업종별 사망자 중 25.59%로 가장 높게 나타났다[1].

건설사업은 일반 산업분야와 다른 여러 특징들로 인해 더 많은 리스크에 직접적, 간접적으로 노출된다. 건설 현장의 안전은 생산과정과 계약구조 등 다양한 요소에 따라 영향을 받을 수밖에 없다. 또한 건설 분야의 대형화·고층화·기계화 등에 따른 잠재적인 위험이 점차 확대되고 있으며, 이로 인한 안전사고의 위험 역시 증가하고 있다[2].

건설공사는 다양한 공정과 공종으로 이루어져 있으며, 지상 작업과 고소 작업 등 작업환경이 매우 다양하다. 현장 작업자는 중량 부재의 운반이나 조립, 양중 등의 작업과 건설 장비 등의 사용 등으로 인해 다양한 위험에 노출될 수 있다. 그러나 이와 같은 요인들을 모두 고려하여 위험지수를 예측하기에는 다소 무리가 따를 뿐만 아니라 예측을 위한 신뢰성 있는 자료의 수집에도 한계가 있다. 또한 다양한 분야의 복합공정과 동시다발적 인력 투입으로 인한 특성으로 인해 소수의 관리자로는 다수의 근로자를 관리하고 감독하는데 어려움이 있으며, 건설 분야의 특성상 위험도 분석에서 모든 공사에 대해 일괄적인 안전사고 발생빈도와 피해강도를 적용하는 것에는 어려움이 있다. 따라서 공사의 종류와 공법에 맞게 체계적이고 과학적인 위험도분석방안이 필요하다.

최근 산업 기술의 성장으로 대형화·복잡화·첨단화가 이루어지는 건설 산업은 타 산업과 비교했을 때, 비정형적이고 주관적인 경향으로 다양한 불확실 요소를 가지고 있어 리스크 분석이 반드시 요구되는 산업이다[3].

건설 프로젝트에서 위험 사건의 불확실성은 고유의 변량으로 자연적으로 내재되어 있으며, 위험에 대한 가능한 결과와 발생의 변화에 적합한 자료가 충분하지 못하기 때문에 발생한다. 이러한 불확실성으로 인해 발생 가능한 위험의 결과에 대해서 확실성을 가지고 예측할 수 없다.

결정론적 접근방식을 통한 위험지수 산정은 보고자하는 변화가 매우 제한적이고 변화에 대한 민감도가 떨어지나, 확률론적 접근방식은 보다 다양하고 풍부한 정보를 제공할 뿐만 아니라 위험지수에 대한 확률적 범위를 제시하기 때문에 보다 효과적인 활용이 가능하다. 발생가능성과 중요도에

대한 정성적 평가는 위험도분석에 있어서 존재할 수 있는 불확실성을 명확하게 평가하지 못하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 공종별 안전사고 발생확률 자료 및 전문가 데이터를 기초로 하고 확률론적 접근 방법인 몬테카를로 시뮬레이션 활용하여 신뢰도 있는 위험지수를 산정하여 도로 교량공사에서 활용할 수 있는 방안을 제안하였다. 또한 위험지수는 현장에서 발생 가능한 안전사고로 인한 재해의 위험 정도를 발생빈도와 강도를 바탕으로 하는 정량화된 위험지수로 제시함으로써 안전관리의 효율성을 높이고 건설재해 예방에 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 확률론적 위험도 평가 프로세스의 적용 대상으로 도로 교량공사(토공사, 배수공사, 교량공사)를 선정하였다. 토공사의 경우 세부공종을 깎기, 쌓기, 깎기·쌓기 비탈면 보호공, 기존구조물 철거, 지반보강공으로 분류하였다. 배수공사의 경우 종횡배수관, 집수정 설치, 성토부·절토부 배수시설, 다이크 및 L형 측구로 분류하였으며, 교량공사는 기초공사, 교각공사, 상부공사, 신축이음장치, 옹벽공사, 빔, 거더 설치, 교면포장으로 세분화하였다. 공종별 발생가능한 안전사고의 항목과 발생비율을 도출하였으며, 관련분야 실무 전문가의 경험론적 아이디어를 바탕으로 피해강도를 산출하였다. 안전사고별 발생확률과 피해강도의 불확실성을 감안하여 평균값과 표준편차를 매개변수로 한 확률분포함수를 생성하였다. 이를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 안전사고 위험도 지수 산정과 민감도 분석을 수행하고 도로 교량공사에서 발생할 수 있는 위험인자에 대한 우선순위를 도출하였다.

## II. Backgrounds

### 1. Risk Assessment

국내 고용노동부 고시 사업장 위험성평가에 관한 지침에서의 위험성평가는 유해·위험요인을 사전에 찾아 파악하고, 해당 유해·위험요인이 어느 정도 위험한지 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정하여 그 크기에 따라 감소대책을 수립하여 실행하는 것으로 사전준비, 유해·위험요인의 파악, 위험성 추정, 위험성 결정, 위험성 감소 대책 수립 및 실행하는 일련의 과정으로 Fig. 1과 같이 정의하고 있다[4].

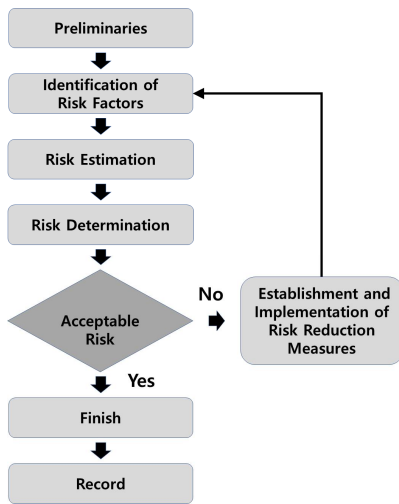


Fig. 1. Risk Assessment Flow

유해·위험요인에 의한 사고의 발생 가능성이나 손실의 중대성을 평가하고 감소대책을 세우고, 위험수준을 허용할 수 있는 범위 안으로 넣기 위해 체계적으로 문서화하고 계속적으로 수정보완하며 피드백이 가능한 시스템이 위험성 평가이다. 즉, 위험성평가는 예측된 유해위험에 대한 개선 대책이 적절한지를 판단하여 사고가 발생하기 전에 위험성을 낮추고 통제하며, 건설현장에서 위험성평가는 모든 작업 활동 전에 잠재된 위험요인을 파악, 위험성평가를 통하여 제한된 자원으로 사업장 특성에 적합한 안전보건활동을 실시하여 사고예방에 기여할 수 있다[5].

이와 같이 위험성평가를 위해 Prak 등은 건설현장의 안전사고 사례를 조사 및 분석 하고 공사단계의 사고유형을 분류하여 안전사고가 발생하는 원인을 도출하였으며, 건설현장의 안전사고 관리측면에서 통계데이터를 관리하기 위하여 공종분류와 공정별 건설안전 위험도 평가지수를 산정하는 방안에 대해 연구 하였다[6]. Kim 등은 추락재해 발생에 영향을 끼치는 다양한 요인들을 분석하고 각 위험요인들의 발생빈도에 대하여 객관적인 재해데이터 분석과 주관적인 설문조사 분석을 수행하여 그 결과를 비교하였다[7]. Jang 등은 중·소규모 건설현장의 재해율 저감을 위해 재해현황과 실태조사를 통한 건설현장의 안전관리 문제점을 도출, 분석하여 재해 다발요인의 중점 위험항목과 선제적이고 실천 가능한 위험성 평가 방안을 제시하기 위한 연구를 수행하였다[8].

2. Monte-Carlo Simulation

몬테카를로 시뮬레이션이란 불확실한 상황에서의 의사결정을 목적으로 확률적 시스템(Probabilistic system)의 모의실험에 이용되는 절차를 말한다. 몬테카를로 시뮬레이

션의 핵심은 모델의 확률요소들에 대한 실험인데 이는 확률적 또는 우연결과(Chance outcomes)를 발생시켜주는 도구를 이용하여 수행된다. 이 도구는 모델에서 가정한 확률분포에 따라 랜덤 샘플링(Random sampling)에 의해서 우연결과를 발생시켜 주는데 이용된다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션을 모의적 샘플링기법(Simulated sampling technique)이라고 한다[9].

몬테카를로 시뮬레이션은 하나의 변수에 대한 모든 경우의 수를 따져보면서 예측 결과 값에 대해 평균, 표준편차, 최빈수, 최대값, 최소값 사이의 확률적 범위를 갖는 통계 정보로 표현한다는 점에서 결정론적 접근방식의 한계를 극복할 수 있는 장점이 있다.

변수의 관계가 확실한 경우의 확정적인 모형과는 달리 안전사고에 따른 부상발생은 결과를 정확하게 예측하기 어려운 확률모형을 갖게 된다. 이러한 경우 정의된 구간의 난수를 반복 생성하여 시뮬레이션 하는 몬테카를로 시뮬레이션 기법이 가장 효과적이다. 생성된 난수를 통해 단위 변수의 패턴을 도출하여 예측을 목표로 하는 함수가 가진 확률 변수들의 확률분포를 추정하는 작업을 수행한다.

몬테카를로 시뮬레이션을 위해서는 예측 결과 값에 영향을 미치는 변수의 확률분포를 결정해야 한다. 확률분포 함수는 정규분포, 삼각형분포, 균등분포 등 다양한 모형이 존재하며, 시뮬레이션의 목적과 활용할 수 있는 매개변수, 조건에 따라 적절한 모형의 선택이 요구된다.

세부공종의 위험도 지수는 세부공종의 작업을 수행할 때 발생할 수 있는 수치화된 피해정도로 정의할 수 있으며, 해당 세부공종의 수행 시 발생할 수 있는 다양한 안전사고의 확률과 각각의 해당 안전사고에 대한 피해강도를 바탕으로 도출한다. 먼저 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 위험도 분포를 도출하기 위해서는 발생확률과 피해강도에 대한 확률분포함수를 선정해야 한다. 본 연구에서는 안전사고 발생확률을 일상에서 발생하는 사건 및 현상의 설명에 적합한 정규분포를 따르는 것으로 가정하였다.

III. The Proposed Method

본 연구에서는 확률론적 기반의 분석방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 보다 신뢰도 있는 위험도를 평가할 수 있는 프로세스를 제안하였다(Fig. 2).

이를 통해 종합적으로 공종 및 세부공종을 분류하고, 발생가능한 안전사고의 항목과 발생비율을 도출하고 관련분야 전문가의 경험론적 아이디어를 바탕으로 피해강도를

산출한다. 안전사고별 발생확률과 피해강도의 불확실성을 감안하여 평균값과 표준편차를 매개변수로 한 확률분포함수 생성과 이를 기반으로 안전사고 위험도 지수를 산정하는 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 궁극적으로 세부공종별 리스크 매트릭스를 작성하여 안전관리 우선순위를 도출함으로써 안전관리를 위한 지침을 수립하고, 건설현장 작업 환경 개선 및 안전관리 효율성 향상을 위한 방향 제시가 가능하다.

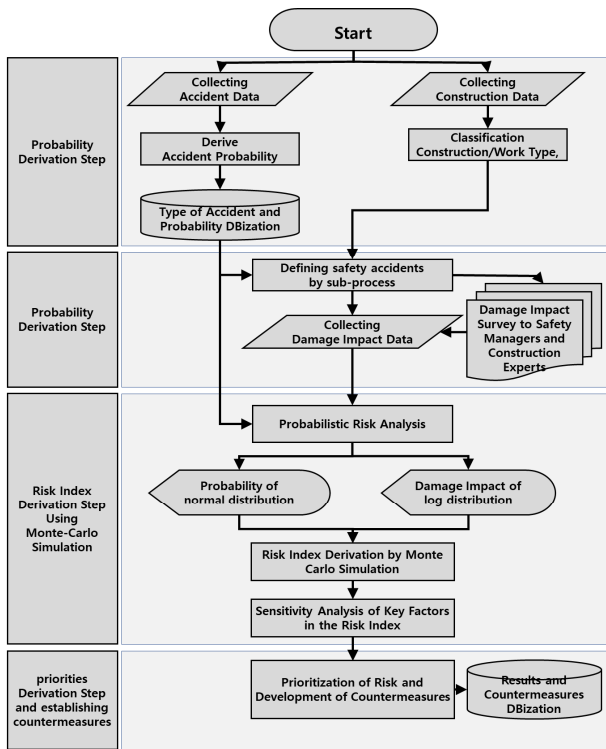


Fig. 2. Probabilistic Risk Analysis Process

1. Basic Data Collection and Analysis

도로공사의 위험도 평가를 위해서는 도로공사의 공종-세부공종 별로 안전사고가 발생하는 공종과 해당공종에서 발생하는 위험인자인 안전사고를 정의하는 것이 선행되어야 하며, 본 연구에서는 도로 건설 공사에서 수행되는 공사의 종류를 정의하고 이를 공종과 세부공종으로 세분화하여 분류한다. 또한 기존의 재해사례를 기반으로 구축된 Database의 발생빈도 정보와 피해강도를 이용하여 통계적인 방법으로 위험지수를 도출하여 세부공종의 우선순위 및 고위험군 공종을 도출한다.

건설공사는 용도와 수행되는 기관, 주변환경 등을 고려하여 공정에 따라 여러 공종과 이에 따른 다수의 공법으로 수행되는 세부공종으로 이루어진다. 그러나 건설공사의 특성상 공종과 세부공종에 따른 다양한 공법을 일괄적으

로 정의하는 것은 한계가 있으므로 공사별 공사시방서와 내역서 등의 자료를 수집하여 공종과 세부공종을 분류하여야 한다. 본 연구에서는 연구범위인 교량공사의 공종을 도로공사 표준시방서, 도로교 표준시방서, 고속도로 전문시방서를 바탕으로 토공사, 배수공사, 교량공사로 이루어지는 공종과 그에 따른 세부공종을 분류하고 해당분야의 전문가 자문과 인터뷰를 통한 수정·보완을 거쳐 Table 1.과 같이 각 공종별 세부공종을 정의하였다[10-12].

건설공사의 안전과 관련된 위험요소들에 대한 자료를 수집하는 것은 위험도 평가에 앞서 선행되는 것으로 필수적이라고 할 수 있다. 공종에 따른 다수의 세부작업으로 이루어진 건설공사에서 발생할 수 있는 재해의 요인은 다양하며 이로 인해 안전사고가 발생하게 된다. 본 연구에서는 위험요인으로 발생하는 안전사고의 종류의 정의와 분류로 고용노동부에서 제시한 건설업 재해발생 사례에 따른 25개의 재해유형을 사용한다[1].

Table 1. Construction Type Classification

Construction Type	Detailed Construction Types
Earth Work	Cutting
	Banking
	Slope Protection Banking
	Slope Protection Cutting
	Remove Existing Structure
Drainage Work	Earth Reinforcing
	Drain Pipe (Longitudinal and Lateral)
	Collector Well
	Banking Section Drainage
	Cutting Section Drainage
Bridge Construction	Dyke and L-Shoulder
	Foundation
	Pier
	Upper Structure
	Extention Joint
	Retaining Wall
	Beam/Girder
Bridge Deck Pavement	

2. Risk Assessment

본 연구에서는 기존의 자료를 바탕으로 안전사고의 발생 빈도를 도출하고, 공사 시공자 및 관련 전문가의 설문을 통한 발생확률과 피해강도에 대한 데이터를 취득하는 방안을 제안한다. 또한 기본 발생빈도 데이터베이스와 발생확률, 피해강도 평가결과를 바탕으로 확률론적 방법을 사용하여 안전사고 위험도 지수를 예측할 수 있는 방안을 제안한다.

본 연구에서는 리스크 관련 국제표준규격인 'ISO31000'을 만족하는 Victorian Healthcare Association(VHA)의 위험성 평가 항목인 발생확률과 피해강도 기준을 적용하

였다. 위험성 평가에 있어서 부상 또는 질병의 발생가능성과 발생하는 피해의 강도에 대한 내용 각각 Table 2., Table 3.과 같이 제안하고 있다[13].

발생확률은 평가의 절대적인 척도가 될 수는 없으며, 공사의 종류, 현장의 여건 및 공사장 주변 환경 등의 영향을 고려하여 변경할 수 있어야 한다.

피해강도는 사고의 발생으로 인명의 손실이 발생했을 경우, 사회.경제적 파급력과 영향력을 판단하는 근거가 된다. 피해의 강도는 사고의 발생으로 인한 손실비용 또는 재해일수 등으로 표현하는 것이 바람직하다. 그러나 부상의 정도나 범위, 부상부위 등에 따라 발생하는 비용은 매우 다양하기 때문에 이를 직접 사용하여 피해강도를 산정하는 것에는 한계가 있다. 본 연구에서는 피해강도를 작업자가 해당 공종에서 안전사고가 발생하였을 때 작업자가 부상을 입을 수 있는 강도를 나타낸 것으로 정의하였다.

Table 2. Accident Probability

Category	Probability	Value
Highest	Very high likely to damage	5
High	High likely to damage	4
Medium	Possible damage caused by carelessness	3
low	Low chance of damage	2
Lowest	Very unlikely to cause damage	1

Table 3. Accident Impact

Category	Impact	Value
Highest	Death or Disability	5
High	Injuries requiring closure (over 3months)	4
Medium	Injuries requiring closure (2weeks~3months)	3
low	Unnecessary closure injury	2
Lowest	Minor injury (non-therapy)	1

안전사고가 발생할 수 있는 위험도는 정량적인 방법을 통하여 안전관리자가 효과적으로 안전사고에 대한 위험성에 대하여 판단할 수 있는 근거자료로 활용할 수 있다. 그러나 안전사고가 발생할 수 있는 위험성에 대한 평가는 설문자나 평가자의 경험과 견해가 반영된 정성적인 자료이기 때문에 취합된 자료와 정보를 통계적인 분석을 통하여 수치적이고 객관적인 결과로 도출하여 활용해야 한다. 또한 일반적인 위험도의 산정 방법의 프로세스는 건설사업 관계자 또는 전문가의 경험이나 직관 또는 주관에 의존하기 때문에 같은 조건하에서의 결과가 일관적이지 못한 경

향을 보인다. 위험도 지수 산정시 발생확률에 비해 정성적인 요인인 피해강도와 같은 항목을 고려하기 위해 확률개념을 활용하는 모델을 수립함으로써 보다 합리적인 의사결정이 가능하다.

### 3. Derivation of Risk Index

세부 공종의 발생가능 안전사고는 고용노동부에서 제공하는 25가지 안전사고의 발생형태와 동일하여 데이터를 분류하고 분석된 결과를 바탕으로 평균값(%)을 도출하고 도출된 평균값과 표준편차(평균의 20% 범위)를 매개변수로 고려한다. 세부 공종의 안전사고 발생가능과 피해강도는 5등급으로 세분화된 분류표를 해당프로젝트 관리자, 현장관리자, 안전관리자 등급에 준하는 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하여 세부공종의 발생가능한 안전사고별 피해강도의 평균과 표준편차를 산출한다. 피해강도는 음수가 될 수 없으므로 임의의 변수가 하한에서 유한값으로 한정되는 로그정규분포를 따르는 것으로 가정하며, 산출된 평균값과 표준편차를 매개변수로 활용한다.

세부공종별 발생가능 안전사고의 위험도 지수는 일반적으로 발생확률과 피해강도의 곱으로 나타내며 <식 1>과 같이 예상 발생확률( $P_s$ )과 안전사고의 예상 피해강도( $I_d$ )로 표현된다. 안전사고 발생확률과 사고별 피해강도의 확률분포를 고려하여 산정된 세부공종별 발생가능 안전사고의 위험지수의 총합을 예측변수로 설정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 범용 소프트웨어인 Crystal Ball을 활용한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 위험지수의 분포를 확률적으로 도출하며, 신뢰범위 99.9% 수준에서 위험지수의 최소, 최대, 평균값을 산정하여 세부 공종별 위험도의 우선순위를 도출하고 민감도 분석을 통해 변수별 분산기여도를 도출한다.

$$\text{<식1> } Risk\ Index = \sum_{i=1}^n (P_{is} \times I_{id})$$

본 연구에서 제안하는 위험도 지수를 활용하면 설문조사를 통해 세부공종별로 발생할 수 있는 사고별 발생확률과 피해강도를 얻을 수 있다.

Table 4.는 토공사의 쌓기 세부공종에서 발생할 수 있는 안전사고의 종류와 발생확률, 피해강도를 도출한 결과이며, 이를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 Fig. 3.과 같은 위험지수의 분포와 평균, 표준편차 등을 도출하며 민감도 분석을 실시하여 해당 공사의 위험지수 영향인자와 기여도를 도출할 수 있다.

Table 4. Accident Frequency of Occurrence (Banking)

Accident	Probability		Impact	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Slip	15	0.3	3.07	0.78
Collision	9	1.8	4.31	0.72
Entrapment	8	1.6	3.93	0.84
Pin, Overturn	3	0.6	4.12	0.92

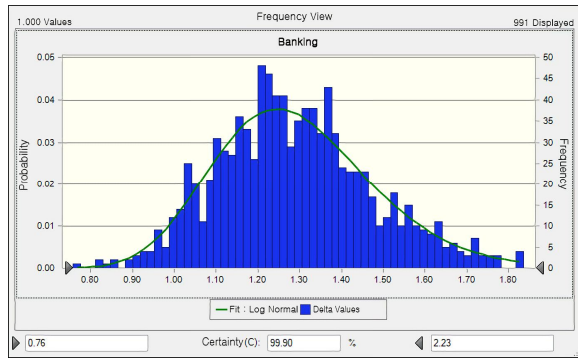


Fig. 3. Risk Index Distribution

#### IV. Implementation

본 연구의 검증을 위해 실제 교량을 선정하여 교량 공사 에서 발생할 수 있는 안전사고의 종류와 안전사고 발생에 따른 피해강도에 대한 산정과 위험도 평가를 실시하였다.

##### 1. Basic Data Collection

본 연구에서 제안하는 건설공사의 위험도 지수를 도출 하기 위해 위험성 평가 수행을 위한 다양한 교량의 종류 중에서 비교적 보편적으로 적용되고 있는 PSC 교량을 대 상으로 선정하여 해당 교량의 기본 정보를 수집하였으며 그 기본제원은 Table 5.와 같다.

Table 5. Specification of Target Bridge

Length (m)	Width (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Upper Structure Type	Bridge Deck Pavement
225	12	2,662	PSC	Concrete
Extention Joint	Height (m)	Number of Span	Maximum Span Length (m)	Pass Height (m)
Rail	15	5	45	13

피해강도에 대한 산정을 위해 안전전문가 및 한국도로 공사 현장 담당자 20명에게 본 연구에서 제안하는 공종과

세부공종에 따른 안전사고 발생 종류와 발생확률, 피해강 도에 대한 조사를 엑셀시트 형태의 설문지 배포를 통해 실 시하여 위험도 지수 도출을 위한 기본 정보를 수집하였다.

#### 2. Construction Risk Assessment

도출된 세부공종의 안전사고의 종류와 발생확률, 피해 강도의 조사결과를 바탕으로 Crystal Ball 프로그램으로 1,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 토공사(Fig. 4.), 배수공사(Fig. 5.), 교량공사(Fig. 6.)의 안전사고 위험 도 지수의 범위를 정량적으로 도출하였으며, 세부 공종별 최대, 최소, 평균값은 Table 6.과 같이 도출되었다.

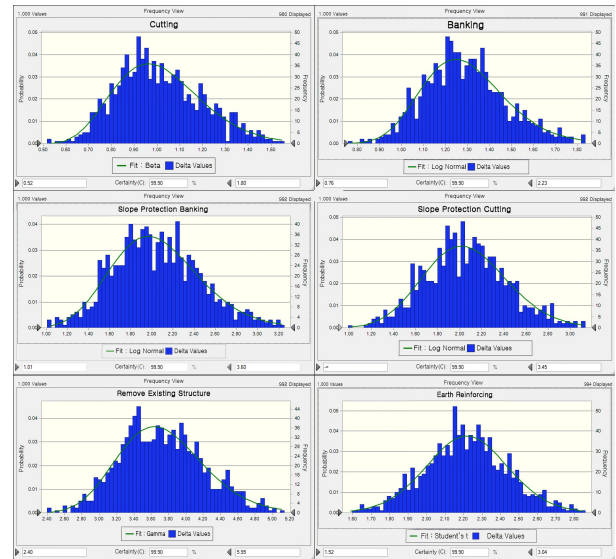


Fig. 4. Risk Index Distribution(Earth Work)

토공사의 세부공종 중에서 기존 구조물 철거의 안전사 고 위험도 등급은 3.74로 리스크 매트릭스 상 비교적 고위험군으로 분류되었다. 지반 보강공(2.22), 깎기.쌓기 비탈면 보호공(2.06) 등의 위험도는 이보다 낮았으나 영향등급 2 수준의 위험분류로 정의할 수 있어 공사 수행 시 안전관 리에 주의를 기하고 위험지수를 계속적으로 저감시킬 수 있는 방안마련 및 시행을 계속적으로 추진해야 할 것으로 판단된다.

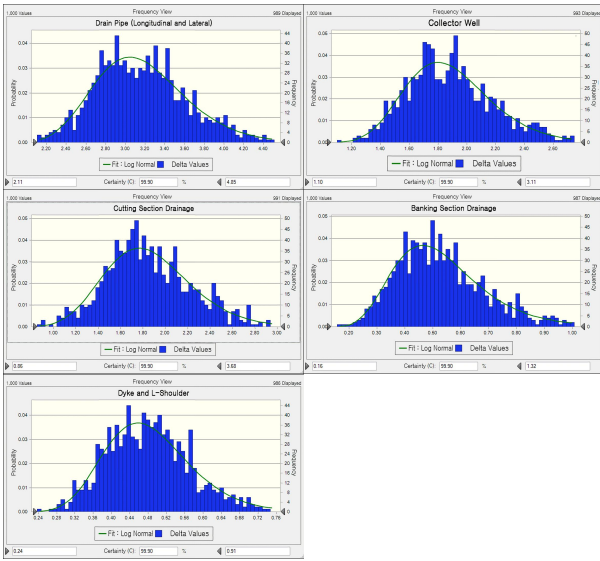


Fig. 5. Risk Index Distribution(Drainage Work)

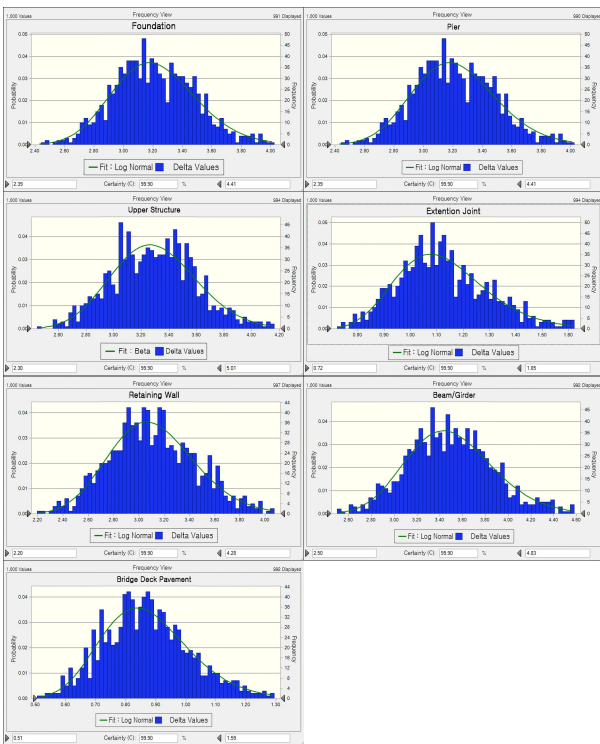


Fig. 6. Risk Index Distribution(Bridge Construction)

배수공사의 세부공종 중에서 종횡배수관의 안전사고 위험도 등급은 3.18로 리스크 매트릭스 상 비교적 높은 위험군으로 분류되었다. 또한 배수관거의 매립이나 집수정 설치 시 추락으로 인한 부상위험이 큰 것으로 조사되었으므로 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

교량공사의 세부공종별 부상발생 예상 분포에 따른 안전사고 위험도 지수 산출결과 신축이음장치, 교면포장 공종을 제외한 모든 공종의 위험도가 비교적 높은 것으로 분

석되었다. 특히 위험지수가 높은 빔, 거더 설치(3.50), 기초공사(3.50), 상부공사(3.30), 옹벽공사(3.12) 등은 안전사고 관리에 각별한 유의가 필요하며 효과적인 대책 마련과 시행 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Risk Index Analysis Results

Work Type Detailed Construction Types	Risk Index			Rank
	Max.	Min.	Average	
Cutting	1.80	0.52	1.02	15
Banking	2.23	0.76	1.29	12
Slope Protection Banking	3.60	1.01	2.06	9
Slope Protection Cutting	3.45	1.00	2.06	9
Remove Existing Structure	5.95	2.40	3.74	1
Earth Reinforcing	3.04	1.52	2.22	8
Drain Pipe (Longitudinal and Lateral)	4.85	2.11	3.18	6
Collector Well	3.11	1.10	1.89	11
Banking Section Drainage	1.32	0.16	0.54	17
Cutting Section Drainage	3.68	0.86	1.86	11
Dyke and L-Shoulder	0.91	0.24	0.48	18
Foundation	5.01	2.30	3.50	2
Pier	4.41	2.39	3.22	5
Upper Structure	4.33	2.45	3.30	4
Extension Joint	1.85	0.72	1.13	14
Retaining Wall	4.28	2.20	3.12	7
Beam/Girder	4.83	2.50	3.50	2
Bridge Deck Pavement	1.59	0.51	0.87	16

## V. Conclusion

본 연구에서는 확률론적 접근에 기반을 둔 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 도로교량 공사(토공사, 배수공사, 교량공사)의 세부공종별 위험도를 평가할 수 있는 방안을 제안하였다.

발생확률과 피해강도를 바탕으로 한 위험도 분석을 통해 토공사, 배수공사, 교량공사의 세부공종별로 위험지수를 도출하였으며, 전체 18개의 세부공종 중에서 기존구조물 철거(3.74), 기초공사(3.50), 빔, 거더 설치(3.50) 등은 평균 위험지수가 3.5 이상으로 비교적 고위험군에 포함되었다. 또한 상부공사(3.30), 교각공사(3.22), 종횡 배수관(3.18), 옹벽공사(3.12) 등은 평균 위험지수 3 이상으로 전체 세부공종의 위험도 평가 결과에서 비교적 중-고 위험군

에 포함되었다.

도출된 위험도 평가의 결과가 비교적 높은 위험군의 세부공종들의 공통점은 교량공사의 특성상 장비의 반출입과 크레인과 같은 중량 장비 및 자재의 이용으로 인한 부상위험이 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 대부분의 공종이 높이에 따른 추락으로 인한 부상위험이 큰 것으로 조사되었으므로 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 제안된 확률론적 기반의 위험도 평가방법은 세부공종별 안전사고에 대한 위험지수를 확률적으로 제시하고 건설 안전관리 계획 시 신뢰성 분석에 근거한 위험요소와 피해예상범위를 사전에 예측하여 계획상의 많은 리스크를 감소시켜주는 역할을 할 수 있다. 또한 기존 건설 안전관리 데이터의 부재로 인해 의사결정에 많은 어려움을 겪고 있는 건설안전 관리 책임자가 위험도 저감에 대한 중장기 정책 수립 시 이에 대한 타당성을 확보할 수 있는 공학적 해법을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 더불어 향후 건설현장 발생 재해에 대한 빈도와 피해강도에 대한 데이터의 지속적인 확보를 통해 종합적인 데이터베이스를 구축하여 최적화된 확률분포함수를 도출한다면, 보다 정확하고 신뢰도 있는 위험지수 산정이 가능할 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Daejeon Health Institute of Technology Research Grant.

## REFERENCES

- [1] Ministry of Employment and Labor, "2019 Industrial accident status," 2020, Available online: [https://www.moel.go.kr/policy/policydata/view.do?bbs\\_seq=20210101255](https://www.moel.go.kr/policy/policydata/view.do?bbs_seq=20210101255) (accessed on 28 Jun 2021)
- [2] Shim Gyubeom and Moon Ji-Sun, "Major issues and countermeasures in Construction industrial safety," Construction & Economy Research Institute of Korea, Nov. 2011. <http://www.cerik.re.kr/report/research/detail/1360>
- [3] Park Jong-Bae, Cho Yong, Kwon Ki-Bum, Paek Joon-Hong, "Feasibility analysis model study of real estate development: focused on construction project development of apartment and stores," Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction), No.3, pp. 179-186, 2008.
- [4] Korea Occupational Safety and Health Agency, "Risk Analysis Guide manual," 2020, Available online: <https://kras.kosha.or.kr/board/index/5#isReadOnlyMode=4270> (accessed on 28 June 2021)
- [5] Jang Se-Eun, "A Comparative Study of Risk Assessment System on Construction Sites," Kyonggi University the degree of Master thesis, 2011.
- [6] Park Hwan-Pyo and Han Jae-Goo, "Development of Risk Assessment Index for Construction Safety Using Statistical Data," Journal of the Korea Institute of Building Construction Vol.19, No.4 pp.361-371, 2019. DOI:10.5345/JKIBC.2019.19.4.361.
- [7] Kim Do-Su and Shin Yoon-Seok, "A Study on the Risk Factors according to the Frequency of Falling Accidents in Construction Sites," Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol.19, No.2, pp.185-192, 2019. DOI:10.5345/JKIBC.2019.19.2.185.
- [8] Jang Yun-Ra and Go Seong-Seok, "A Risk Assessment Counterplan for Reducing the Accident Rates in Medium and Small sized Construction Sites," Korean Journal of Construction Engineering and Management, Vol.19, No.5, 2018. DOI:10.6106/KJCEM.2018.19.5.090.
- [9] Kim Min, "A Method of Calculating Optimal Duration and Costing Using Monte Carlo Simulation and Linear Programming," Pukyong National University the degree of Master thesis, 2003.
- [10] Minister of Land, Infrastructure and Transport, "Road Construction Standard Specification," 2016, Available online: <https://www.kcsc.re.kr/File/3/CIGCSSF90042/CIGCSSF90042.pdf> (accessed on 28 June 2021)
- [11] Minister of Land, Infrastructure and Transport, "Bridge Standard Specification," 2016, Available online: <https://www.kcsc.re.kr/File/3/CIGCSSF90048/CIGCSSF90048.pdf> (accessed on 28 June 2021)
- [12] Korea Expressway Corporation, "Highway Construction Specialized Specification," 2018, Available online: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConWrkDtlSch.do?gubun=constd&pMetaCode=CIGCOS200031> (accessed on 28 June 2021)
- [13] Victorian Healthcare Association(VHA), "Managing Clinical Risk in Primary Health Care," 2009, Available online: <http://healthcaregovernance.org.au/docs/vha-clinical-risk-manual-print.pdf> (accessed on 28 June 2021)



## Authors



Dong-Yeol Lee received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Civil Engineering from Chungnam National University, Korea, in 2008, 2010 and 2019. He interested in construction safety management, disaster

response and management. He is currently a assistant professor in the Department of Disaster Construction Safety, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon, Korea, in 2019.



Dong-Eun Kim received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Fire and Disaster Protection Engineering from Hoseo University, Korea, in 2010, 2012 and 2015. He interested in fire disaster protection, fire safety management.

He is currently a assistant professor in the Department of Disaster Construction Safety, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon, Korea, in 2017.