

# 확률론적 접근을 통한 터널 위험도 평가 모델

김정흠\*

정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 전임연구원

## Tunnel risk assessment model using a probabilistic approach

Jeong-Heum Kim\*

Research Specialist, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Jeong-Heum Kim, heum@kict.re.kr

### Abstract

This study proposes a new model for the systematic assessment and management of tunnel collapse risks. Tunnel construction is essential for developing infrastructure, including roads, railways, and subways, but managing collapse risks remains critical. To address this, 14 key influencing factors were identified, and their relative importance and weights were determined using the analytic hierarchy process (AHP) method. Monte Carlo method was applied to incorporate the probability distribution of each factor, resulting in a comprehensive risk assessment and the development of a tunnel collapse risk index. The findings indicate that factors such as Joint face conditions, groundwater inflow, auxiliary methods, joint face spacing, support pattern levels, and ground grade significantly affect tunnel collapse risks. The proposed model was validated using collapse accident data from the ○○ Tunnel, demonstrating a strong correlation between the calculated risk index and actual collapse incidents, thereby confirming the model's applicability. The results of this study are expected to enhance the safety of tunnel construction and contribute to minimizing human casualties and economic losses. Future studies should focus on applying this model across diverse tunnel construction sites, conducting further evaluations, and refining the framework to develop a more sophisticated and precise risk assessment model.

**Keywords:** Risk index, Risk analysis, Monte Carlo method, Reliability analysis, Analytic hierarchy process

### 초 록

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도를 체계적으로 평가하고 관리할 수 있는 새로운 평가 모델을 제안 하였다. 터널 공사는 도로, 철도, 지하철 등의 인프라 구축에 필수적이지만, 붕괴 위험 관리가 중요하다. 이를 위해 14개의 주요 영향 인자를 선정하고, AHP (analytic hierarchy process) 기법을 활용하여 각 인자의 상대적 중요도를 평가하고 가중치를 산

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
26(6)761-776(2024)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.6.761>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received October 23, 2024

Revised November 11, 2024

Accepted November 11, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo method)을 통해 각 인자의 확률분포를 반영한 위험도 평가를 수행하여 터널 붕괴 위험도 지수를 도출하였다. 연구 결과, 절리면 상태, 지하수 유입량, 보조공법, 절리면 간격, 지보패턴수준, 지반 등급 등이 터널 붕괴 위험도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. ○○ 터널에서 발생한 붕괴 사고 데이터를 활용하여 제안된 모델의 유효성을 평가한 결과, 사례 데이터의 위험도 지수와 실제 붕괴 현황이 잘 부합하는 것으로 나타나 본 평가 모델의 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 터널 공사의 안전성을 높이고, 인명 피해와 경제적 손실을 최소화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 다양한 터널 공사 현장에서 본 모델을 적용하여 추가적인 평가와 개선을 통해 보다 정교한 위험도 평가 모델을 개발하는 것이 필요하다.

**주요어:** 위험도 지수, 위험도 분석, 몬테카를로, 신뢰성 해석, AHP

## 1. 서론

터널은 지하 공간을 효율적으로 활용하기 위해 도시와 교통 인프라에서 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 터널은 지질 조건, 지하수 상태, 시공 방법 등 다양한 요소에 의해 붕괴 위험에 노출될 수 있으며, 이는 경제적 손실뿐만 아니라 인명 피해와 사회적 혼란을 초래할 수 있다. 이를 예방하고 최소화하기 위한 체계적인 위험도 평가 방법이 필요하다.

터널 붕괴 위험을 사전에 평가하기 위한 다양한 방법론이 제시되었다. Bieniawski (1989)는 암반의 물성 및 절리 조건 등을 종합적으로 평가하는 RMR (rock mass rating) 시스템을 개발하였으며, Deere (1964)는 암반의 질적 평가를 위한 RQD (rock quality designation) 지표를 도입하였다. 또한, Hoek and Brown (1997)은 암반의 특성에 따른 터널 붕괴 위험도를 평가하기 위한 경험적 기준을 개발하였다. 이러한 경험적 방법들은 특정 지질 조건에 유효하며, 변수 간의 복잡한 상호작용을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

Ou et al. (2021)은 터널 붕괴 사례 분석, 지질예측, 그리고 Dempster-Shafer 증거 이론을 바탕으로 새로운 붕괴 위험도 평가 방법을 제안하였다. Xu et al. (2021) 속성 수학 이론에 기반한 터널 붕괴 위험 평가 모델을 개발하고, 이를 터널 프로젝트에 적용하여 붕괴 위험을 평가하였다. Sharafat et al. (2021)은 TBM (tunnel boring machine) 프로젝트의 위험 원인과 결과를 동시에 식별하기 위해 bow-tie 방법을 활용한 새로운 위험 분석 방법을 제시하였다. Sun et al. (2018)은 퍼지 베이지안 네트워크에 기초한 새로운 붕괴 확률 평가 방법을 제안하였다. Shin et al. (2009)은 터널 시공 중 붕괴 위험도에 대한 영향인자를 17개로 구분하고, 인공지능망기반 비선형의 가중치 산정 모듈을 개발하였다. 그리고 터널 붕괴 위험도 지수 산정식과 각 평가영향인자의 등급화를 위한 차트를 제시하여 붕괴위험도가 정량적 지수로 표현될 수 있도록 하였다. Baecher and Christian (2003)은 지반 공학에서의 불확실성을 다루기 위해 확률론적 방법과 통계적 기법의 중요성을 강조하였다. 특히, 몬테카를로 시뮬레이션은 다양한 불확실성을 반영하여 터널 붕괴 위험도를 평가하는데 유용한 도구로 활용된다. Yu et al. (2022)은 퍼지-AHP (analytic hierarchy process) 기반으로 터널 붕괴 위험을 평가하였다. Kwon et al. (2022)은 AHP와 퍼지 이론을

결합하여 터널 위험 요소 간의 중요도를 평가하고 모호성을 반영한 리스크 평가 모델을 제안하였으며, Liu et al. (2023)은 뉴트로소피 수(neutrosophic numbers)와 아크사인 함수를 사용하여 대단면 터널의 불확실한 정보를 포함하는 위험도 평가 방법을 개발하였다. 그러나 이러한 연구들은 불확실성과 모호성을 반영하는 데 주력하여, 확률 기반의 통계적 모델을 통한 종합적인 위험도 평가와 실증적 데이터 기반 검증이 제한적이다.

본 연구에서는 불확실성 하에서의 확률적 위험 평가를 가능하게 하는 몬테카를로 시뮬레이션을 활용한 터널 붕괴 위험도 평가 모델을 제안한다. 몬테카를로 시뮬레이션을 활용해 터널 설계와 시공에 영향을 미치는 주요 변수들의 확률 분포를 반영하고, 이를 통해 다양한 시나리오에서 발생할 수 있는 위험을 예측한다. 또한, AHP 기법을 통해 변수 간의 중요도를 평가하고 가중치를 산정하여 보다 체계적인 위험도 평가 모델을 구축한다. 본 연구는 실제 붕괴 사례에 제안된 모델을 적용함으로써 평가 결과의 유효성을 확인하고, 이를 통해 터널 위험도 평가의 정밀도를 향상시키는데 유용한 모델로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 위험도 평가

몬테카를로 시뮬레이션은 모의적 표본추출 방법(simulated sampling technique)으로, 통계적 기법을 통해 입력 변수의 확률분포(probability distribution) 값을 산출하고, 임의의 난수를 발생시켜 출력값의 분포와 통계량을 바탕으로 각 변수의 발생 가능한 범위를 추정한다. 몬테카를로 시뮬레이션의 결과는 확률 분포로 나타나며, 임의로 산정된 결과 값이 전체 산정된 결과 값에서 차지하는 비율로 표현된다. 본 연구에서는 터널의 막장별 붕괴 위험도 평가를 위한 기준 지수를 산정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

신뢰성 해석 문제는 종종 기본 랜덤 변수들로 구성된 벡터  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ 으로 정식화 된다. 랜덤 변수들에 의해 한계 상태를 나타내는 한계 상태 함수  $g(X)$ 가 정의되며, 한계 상태는 설계 변수의 공간에서 안전과 파괴의 경계를 나타내는  $g(X) = 0$  의로 정의된다. 본 연구에서 한계 상태 함수는 터널의 붕괴 위험도 지수와 그에 대한 붕괴 위험도 평가 기준 지수로 표현되며, 다음과 같은 식 (1)로 표현된다.

$$g(X) = Risk\ index - Collapse\ risk\ index = \left\{ \left( \sum_{i=1}^n W_i G_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n W_i G_i \right) \right\} / 10 \quad (1)$$

여기서, Risk index는 붕괴 위험도 지수를, Collapse risk index는 붕괴 위험도 평가 기준 지수를 의미하며,  $W_i$ 는 각 인자의 가중치,  $G_i$ 는 각 인자의 등급을 의미한다. 이때 붕괴 위험도 확률은 다음과 같이 표현되는 다차원 적분식(2)와 같이 정의된다.

$$P_f = P[g(X) \geq 0] = \int_{g(X) \geq 0} f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n \quad (2)$$

여기서,  $f_X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 은 기본 랜덤 변수들  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 의 결합확률밀도함수(joint probability function)를 의미하며, 붕괴 위험도 영역에 대해 적분을 수행한다. 이 절차는 Fig. 1과 같이 설명할 수 있다. 식 (2)를 통해 위험도 확률을 산정하기 위해, 영향 인자의 변동성과 터널 붕괴 위험도 지수값을 적용한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

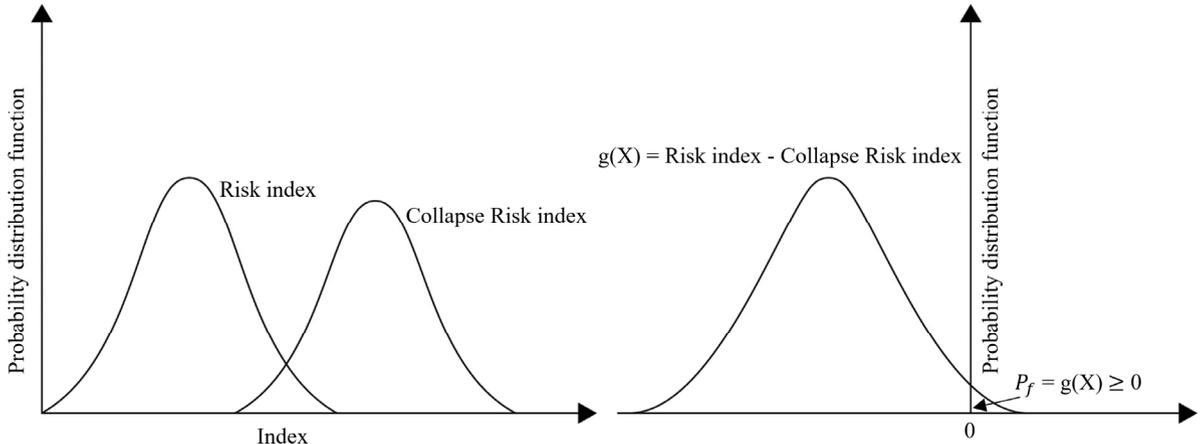


Fig. 1. Reliability analysis

## 2.2 정량적 평가

본 연구는 문헌 조사와 전문가 자문을 통해 터널 붕괴 위험도에 영향을 미치는 14개의 인자를 선정하였으며 (Kim et al., 2017), AHP 기법을 활용하여 이들의 가중치를 산정하고(Kim, 2024b), 각 인자의 등급화 지침을 마련하였다(Kim, 2024a). 영향 인자 간 상대적 중요도를 파악하기 위해 21명의 전문가를 대상으로 설문 조사를 실시하였고, 리커트 9점 척도를 사용해 평가를 진행하였다.

전문가들은 터널 설계 및 시공 분야에서 15년 이상의 경력을 가진 교수, 연구원, 엔지니어들로 구성하였다. 설문 결과를 바탕으로 상위 및 하위 계층의 가중치와 우선순위를 산정하였고, 비일관성비율(inconsistency ratio)을 활용해 평가의 일관성을 검증하였다(Saaty, 1982). 본 연구의 비일관성비율은 0.00278로 도출되어 합리적인 수준의 일관성을 확보하였다. 최종 가중치는 상위 계층과 종속된 하위 계층의 가중치를 곱하여 산출하였다(Table 1).

**Table 1.** Weights of influencing factors for tunnel risk assessment

Main hierarchy			Subordinate hierarchy			Overall	
Division	Weights (a)	Priority	Division	Weights (b)	Priority	Composite weights (a*b)	Priority
Geotechnical properties and geometries	0.347	2	Joint face conditions	0.343	1	0.119	3
			Rock mass strength	0.146	5	0.051	10
			Ground grade	0.171	3	0.059	7
			Joint face spacing	0.186	2	0.065	6
			Adjustment for joint orientations	0.155	4	0.054	9
Tunnel geometry conditions	0.058	5	Excavation sectional area	0.655	1	0.038	11
			Depth ratio	0.345	2	0.020	14
Groundwater conditions	0.155	3	Groundwater inflow	0.804	1	0.125	2
			Groundwater level	0.196	2	0.030	13
Excavation conditions	0.091	4	Divided excavation method	0.633	1	0.058	8
			Advance	0.367	2	0.033	12
Support and reinforcement conditions	0.349	1	Support and reinforcement time	0.471	1	0.164	1
			Support pattern level	0.312	2	0.109	4
			Auxiliary method	0.217	3	0.076	5

본 연구에서는 선정된 14개의 영향 인자에 대해, 각 인자가 위험도에 미치는 영향을 10점 척도 내에서 등급으로 구분하여 정량화 하였다(Kim, 2024a). 제시한 등급화 가이드는 전문가가 각 영향 인자별로 점수를 부여할 때 확실적인 기준이 아닌, 전문가들의 주관적인 의견을 일정 범위 내에서 보다 구체적으로 표현할 수 있도록 설계하였다. 지반의 물성 및 형상에 대한 평가 등급은 RMR (Bieniawski, 1989)의 내용을 토대로 암반의 절리면 상태, 절리면 간격, 절리방향에 대한 보정, 암반강도에 대한 등급화에 적용하였으며 Table 2와 같다. 지반등급의 경우, 암반과 지반에 대해서 각각 RQD와 SPT N 값을 등급화에 적용하였다(Deere, 1964).

**Table 2.** Grading of geotechnical properties and geometries

Joint face condition								
Length (m)	< 1	1~3	3~10	10~20	> 20			
Grade score (A)	0~0.40	0.40~0.80	0.80~1.20	1.20~1.60	1.60~2.00			
Spacing of discontinuities (mm)	None	< 0.1	0.1~1	1~5	> 5			
Grade score (B)	0~0.40	0.40~0.80	0.80~1.20	1.20~1.60	1.60~2.00			
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Soft	Very soft			
Grade score (C)	0~0.40	0.40~0.80	0.80~1.20	1.20~1.60	1.60~2.00			
Weathering degree	Not weathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Severely weathered	Completely weathered			
Grade score (D)	0~0.40	0.40~0.80	0.80~1.20	1.20~1.60	1.60~2.00			
Filling material	None	Hard material 5 mm or less	Hard material 5 mm or higher	Soft material 5 mm or less	Soft material 5 mm or higher			
Grade score (E)	0~0.40	0.40~0.80	0.80~1.20	1.20~1.60	1.60~2.00			
Entire score	Grade score (A+B+C+D+E)							
Rock mass strength								
Point load strength (MPa)	> 10	4~10	2~4	1~2	Unconfined compressive strength used			
Unconfined compressive strength (MPa)	> 250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	< 1	
Grade score	0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	6.0~8.0	8.0~10.0			
Ground grade (RQD/N)								
RQD (%) / N value	75~100	50~75	25~50	25~10	RQD < 10			
					N ≥ 50		N < 50	
Grade score	0~1.67	1.67~3.33	3.33~5.0	5.00~6.67	6.67~8.34		8.34~10.0	
Joint face spacing								
Joint face spacing (m)	> 2.0	0.6~2.0	0.2~0.6	0.06~0.2	< 0.06			
Grade score	0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	6.0~8.0	8.0~10.0			
Adjustment for joint orientations								
Joint face	Strike	Excavation perpendicular to the tunnel axis/oriented to slop direction		Excavation perpendicular to the tunnel axis/oriented against slop direction		Excavation parallel to the tunnel axis		Irrelevant to strike
	Slope	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	0~20°
Suitability	Very advantageous	Advantageous	Average rating	Disadvantageous	Very disadvantageous	Average rating	Average rating	
Grade score	0~2.0	2.00~4.00	4.0~6.0	6.0~8.0	8.0~10.0	4.0~6.0	4.0~6.0	

터널 지하학적 조건에 대한 평가 등급은 굴착 단면적과 심도비를 고려하여 분류하였으며 Table 3과 같다(KICT, 2009).

**Table 3.** Grading of tunnel geometry conditions

Excavation sectional area						
Equivalent sectional area of tunnel (m <sup>2</sup> )	Less than 20 (extra-small section)	20~45 (small section)	45~70 (medium section)	70~120 (medium-large section)	120~200 (large section)	Over 200 (extra-large section)
Grade score	0~1.67	1.67~3.33	3.33~5.00	5.00~6.67	6.67~8.34	8.34~10.00
Depth ratio						
Depth ratio of tunnel (Zo/D)	Over 7 (extra-high depth)	1.5~7 (high depth)	2.5~4.5 (medium depth)	1~2.5 (low depth)	Less than 1 (extra-high depth)	
Grade score	0~2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	6.00~8.00	8.00~10.00	

지하수 조건에 대한 평가 등급은 지하수 유입량과 지하수 수위를 기준으로 RMR (Bieniawski, 1989)의 내용을 바탕으로 분류하였으며 Table 4와 같다. 지하수위가 막장보다 높게 위치할 경우, 지하수위에 의한 수압이 작용하여 막장에 가해지는 하중이 증가하고, 암반 내 절리 등에 의한 지하수압의 상승으로 터널 막장의 위험도가 높아진다.

**Table 4.** Grading of groundwater conditions

Groundwater inflow					
Water flow per a length of 10 m (L/min)	0	< 10	10~25	25~125	> 125
General conditions	Dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
Grade score	0~2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	6.00~8.00	8.00~10.00
Groundwater level					
Groundwater level (Zo+D)/(Hw)	1 or less	1~5	5~10	10~20	20 or higher
Grade score	0~2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	6.00~8.00	8.00~10.00

굴착 조건에서 분할 굴착 공법과 굴진장은 터널의 안정성, 경제성, 공사 기간을 결정하는 중요한 요소이다. 도로설계편람(MLTMA, 2012)을 바탕으로 Table 5와 같이 등급화 하였다.

**Table 5.** Grading of excavation conditions

Divided excavation method					
Longitudinally divided excavation	Multi-level bench (3 or more benches) vertically divided excavation	Long bench (bench length of 50 m or higher)	Short bench (bench length of 1D~50 m)	Mini bench (bench length of 1D)	Full face section excavation
Grade score	0~2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	6.00~8.00	8.00~10.00
RMR	2 Lane criteria		3 Lane criteria		
	Advance		Advance		
81 or higher	3.0~3.5 m		2.0~2.5 m		
80~61	3.0~3.5 m		1.5~2.0 m		
60~41	2.0~2.5 m		1.2~1.5 m		
40~21	1.5 m		1.0~1.2 m		
20 or less	1.2 m		0.8~1.0 m		
20 or less for entrance reinforcement	1.0 m		0.8~1.0 m		
Grade score	0~3.33		Criteria > Advance		
	3.33~6.66		Criteria = Advance		
	6.66~10.00		Criteria < Advance		

지보 및 보강 조건은 도로 및 터널 설계 매뉴얼과 RMR (Bieniawski, 1989; KICT, 2009; MLTMA, 2012)을 기반으로 지보패턴수준, 보조공법, 지보 및 보강 시행 시기로 평가 등급을 분류하였으며, Table 6과 같다.

**Table 6.** Grading of support and reinforcement conditions

Support pattern level			
	Support	Standard pattern value	Comparison against standard support pattern
Strength of the standard support pattern	A. Shotcrete thickness (cm)	12 cm	Standard pattern < Applied pattern (grade score : 0~0.83) Standard pattern = Applied pattern (grade score : 0.83~1.67) Standard pattern > Applied pattern (grade score : 1.67~2.50)
	B. Rock bolt length (m)	4 m	
	C. Rock bolt spacing (m)	1.5 m	
	D. Steel support spacing (m)	1.5 m	
Entire score	Grade score (A+B+C+D)		

**Table 6.** Grading of support and reinforcement conditions (continued)

Auxiliary methods					
Ground and structural reinforcement	Crown reinforcement	Large steel pipe reinforced multi-step grouting (105 mm or higher)	Small steel pipe reinforced multi-step grouting (50 mm or less)	Forepolling	No reinforcement
	Grade score (A)	0~1.00	1.00~2.00	2.00~3.00	3.00~4.00
	Face surface reinforcement	Reinforced		No reinforcement	
	Grade score (B)	0~1.00		1.00~2.00	
	Classification code	I		II	
	Invert reinforcement	Temporary invert closing		No invert reinforcement	
	Grade score (C)	0~1.00		1.00~2.00	
Water barrier and drainage measures	-	Water barrier method	Drainage measure	None	
	Grade score (D)	0~0.67	0.67~1.34	1.34~2.00	
Entire score		Grade score (A+B+C+D)			
Support and reinforcement time					
RMR	100~81	80~61	60~41	40~21	20 or less
Average independent period	20 years	1 year	1 week	10 hours	30 minutes
Grade score	0~3.33	Criteria > Performance period or pre-supported			
	3.33~6.66	Criteria = performance period			
	6.66~10	Criteria < performance period			

### 3. 위험도 평가 모델

실제 붕괴 사례 데이터를 수집하고, 본 연구에서 제시된 영향 인자별 등급지수를 산출하였으며, 붕괴 위험도를 비교할 수 있는 평가 기준을 마련하였다. 총 27개의 붕괴 사례 데이터를 수집하였으며, 이 중 도로 터널이 44%, 도시 철도가 26%, 철도 터널이 19%, 전력구 터널과 여수로 터널이 각각 7%와 4%이다. 14개의 영향인자에 대한 가중치는 AHP 분석을 통해 결정된 확정적 값을 활용하였으며(Table 1), 각 영향 인자의 등급 점수는 등급화 가이드를 적용하여 산출하였다(Tables 2~6). 수집된 27개의 붕괴 사례의 각 영향 인자별 등급화 분류 체계의 중간 값을 점수로 적용하였다. 각 영향 인자별로 총 27개의 사례에 대한 등급화 점수가 부여하였으며, 총 14개의 영향 인자가 존재하기 때문에 다양한 난수 추출 경우의 수가 발생한다. 이에 본 연구에서는 총 10,000회의 시물레이션을 실시하였다.

시물레이션 과정에서 추출된 각 영향 인자별 등급 점수는 해당 가중치와 곱해져 각 영향 인자의 지수를 산정

한다. 이렇게 산정된 각 영향 인자 지수의 총합을 “터널 붕괴 위험도 지수”로 제안하며, 식 3과 같이 정의된다.

$$Collapse\ risk\ index = \sum_{i=1}^{14} W_i G_i / 10 \quad (3)$$

여기서,  $W_i$ 는 각 인자의 가중치,  $G_i$ 는 각 인자의 등급을 의미한다. 본 연구에서는 터널 붕괴 위험도 지수 산정에 확률분포 함수 중 삼각분포함수를 사용하였다. Vose (2008)는 최소값, 최빈값, 최대값을 알고 있는 경우 삼각분포를 통해 유효한 확률분포를 구축할 수 있다고 설명하며, 이러한 특성으로 인해 삼각분포가 엔지니어링 및 리스크 분석 분야에 사용된다고 언급하였다. 본 연구에서는 14개 영향 인자별 등급 점수의 최소값, 최빈값, 최대값을 이용해 각 분포의 특성을 표현하였다. 총 10,000회의 시뮬레이션이 수행되었으며, 이로부터 10,000개의 결과값이 도출되었다. 도출된 결과값의 분포와 발생 확률을 정리하여 확률밀도함수로 제시하였으며, PALISADE사의 @RISK 분석 툴을 활용하여 산정하였다. 이러한 방법을 통해 붕괴 사례 데이터를 기반으로 터널 붕괴 위험도 지수를 도출하였으며 Fig. 2와 같다.

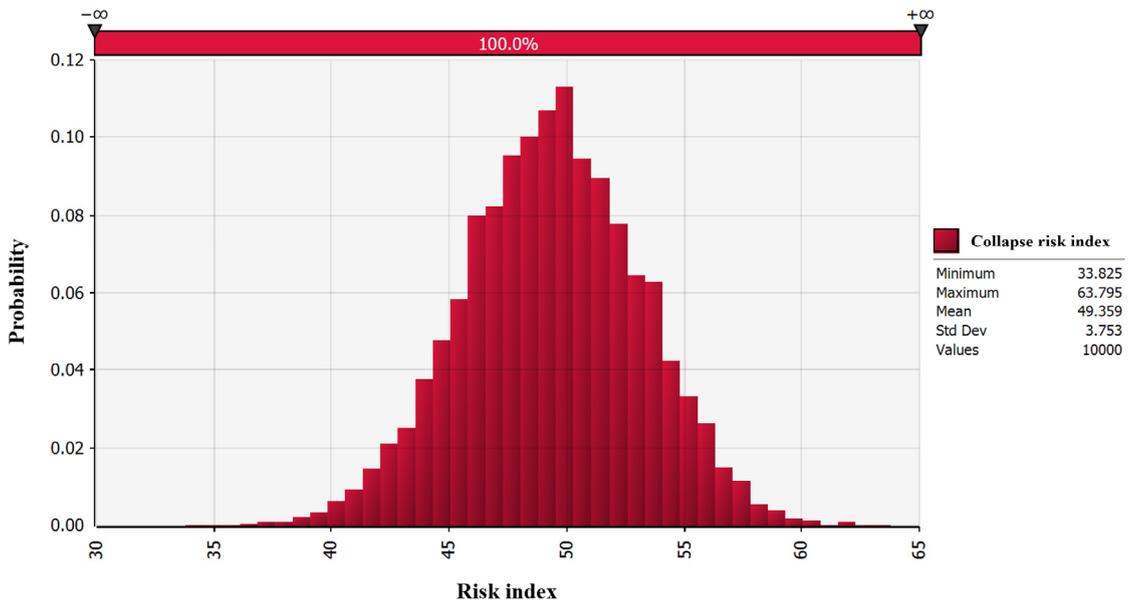


Fig. 2. Tunnel collapse risk index based on case data

분석결과, 붕괴 위험도 지수의 최소값, 평균값, 최대값은 각각 33.825점, 49.359점 및 63.795점으로 도출되었다. 붕괴 위험도 지수의 평균값인 49.359점은 터널 붕괴 위험도에 대한 막장별 평가 결과와 비교하여 해당 막장의 붕괴 위험도 수준을 평가하는 데 활용할 수 있다. Table 7은 각 영향 인자에 대한 붕괴 위험도 지수를 보여주며, 평균값은 붕괴 위험도가 높은 영향 인자를 분석하는데 활용된다.

**Table 7.** Collapse risk index of influencing factors

Division	Influence factors	Min	Max	Mean
Geotechnical properties and geometries	Joint face conditions	3.6369	10.6574	7.2747
	Rock mass strength	0.5387	4.5288	2.6486
	Ground grade (RQD/N)	0.5678	5.7697	3.1932
	Joint face spacing	1.9722	5.7827	4.0885
	Adjustment for joint orientations	0.5989	4.8341	2.9388
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	0.3401	2.2121	1.2346
	Depth ratio	0.2085	1.3901	0.8223
Groundwater conditions	Groundwater inflow	1.3736	11.1101	6.5027
	Groundwater level	0.7757	2.7782	1.7197
Excavation conditions	Divided excavation method	0.5954	5.1345	2.7431
	Advance	0.5764	2.7657	1.6702
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	2.8183	8.1910	5.8031
	Support pattern level	0.5077	6.7329	3.5326
	Auxiliary method	3.9515	6.1799	5.1870

영향 인자별 분석된 지수를 살펴보면, 절리면 상태가 7.2747점으로 가장 높은 반면, 심도비가 0.8223점으로 가장 낮았다. 이는 각 영향 인자별 가중치의 크기에 따른 결과로 판단된다. 가중치에 비해 지수가 높게 산정된 영향 인자는 절리면 상태, 암반강도, 지반등급(RQD/N), 절리면 간격, 절리방향에 대한 보정, 지하수위, 보조공법으로 분석되었다. 지반의 물성 및 형상, 지하수 조건에 관련된 인자가 붕괴 위험도 및 민감도가 높게 나타났으며, 지보 및 보강 조건 중 보조공법도 매우 높게 분석되었다. 반면, 터널 기하학적 조건은 민감도가 상대적으로 낮게 나타났다. 본 연구에서 제시한 터널 붕괴 위험도 지수는 향후 막장별 평가 결과와 비교를 통해 해당 막장의 붕괴 위험도가 높은지 낮은지 평가할 수 있다. 또한, 확률적 분석 결과를 활용한 신뢰성 해석에도 활용할 수 있다.

#### 4. 사례 연구

터널 붕괴 위험도 지수의 적정성, 데이터의 효용성 및 신뢰성을 판단하기 위해 새로운 붕괴 사례 데이터를 활용하여 평가를 진행하였다. 본 ○○ 터널은 2차로 병렬 터널로서 시공 중 여러 차례 소규모 붕락 사고가 발생하였으며, 종단 방향의 지층 변화가 심한 구간이다. 본 터널에서 발생한 붕괴 사고에 대한 현황은 Table 8에 나타난 바와 같다.

**Table 8.** Overview of collapse accidents

Site location	STA No. 2+778~782
Collapse date	○○ Month, ○○○○ Year
Tunnel specifications	Length (0.8 km), Cross section (D = 12.0 m, H = 10.0 m), Depth of overburden (21.18 m)
Type of structure	Road tunnel
Collapse mode	Ceiling collapse and sinking of the soil layer
Reason for collapse	Weathering, fractured and joints
Status of collapse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• While changing support pattern after judging that the rock quality was poor upon observing the tunnel face during excavation, shotcrete placement work, a follow-up process according to NATM, was conducted after completing excavation. Incidents of falling occurred during the excavation.</li> <li>• The diameter of the surface sinking area was 16 m and its depth was approximately 5 m.</li> </ul>
Geological status	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contained weathered soil in the upper part and weak weathered rock, hard rock, shale and sandstone beds were found in the tunnel face.</li> <li>• Comprised of weathered phyllite with highly developed fractured and joints.</li> </ul>

Table 9는 붕괴 위험도 지수 평가를 위해 새로운 붕괴 사례 데이터의 입력값을 나타낸 것이다. 막장관찰지, 설계 자료 및 지반 조사 보고서 등을 활용하여 등급화 분류 체계에 해당하는 등급 점수의 중간값을 부여하였다.

**Table 9.** Case data for the assessment of collapse risk index

	Category	Grading score
Geotechnical properties and geometries	Joint face conditions	7
	Rock mass strength	7
	Ground grade (RQD/N)	5.84
	Joint face spacing	9
	Adjustment for joint orientations	9
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	5.84
	Depth ratio	7
Groundwater conditions	Groundwater inflow	3
	Groundwater level	4.17
Excavation conditions	Divided excavation method	3
	Advance	5
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	5
	Support pattern level	5.82
	Auxiliary method	8.18

분석 결과 Fig. 2와 같이 사례 데이터 위험도 지수(risk index from case data) 평균값은 58.7533점으로 도출되었다. 이는 터널 붕괴 위험도 지수 값인 49.359점과 비교했을 때 기준 지수를 초과한 값으로, 확정적 결과로 볼 때 해당 구간이 붕괴될 수 있는 상태로 평가할 수 있다. 그러나 확정적 결과가 어느 정도의 차이와 확실성 및 불확실성을 포함하고 있는지를 판단하기 위해, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 도출된 확률 분포를 활용하여 평가 데이터의 위험도 지수 결과에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석 방법은 사례 데이터의 위험도 지수의 확률 분포에서 터널 붕괴 위험도 지수의 확률 분포를 차감하는 방식으로 이루어졌다. 이때, 터널 붕괴 위험도 지수 값을 넘어서지 않은 확률 분포 값은 안전한 상태로 해석하고, 터널 붕괴 위험도 지수 값을 초과한 확률 분포 값은 위험한 상태로 해석한다. Fig. 3은 평가 데이터의 붕괴 위험도 신뢰성 해석 결과이다.

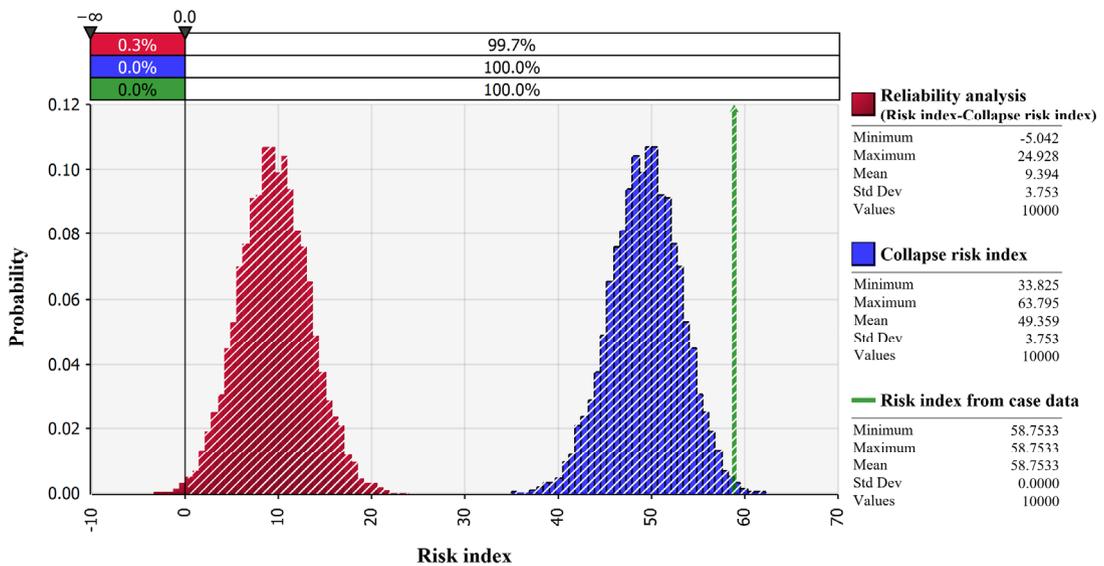


Fig. 3. Reliability analysis of the collapse risk index from case data

사례 데이터 분석결과의 신뢰성 해석 결과, 붕괴 위험도가 위험한 상태로 평가될 확률이 99.7%로 매우 높게 나타났으며, 이에 따라 붕괴된다고 분석된 결과의 신뢰도 역시 매우 높다. 보다 면밀한 분석을 위해 사례 데이터의 각 영향 인자별 신뢰성 해석결과를 고찰해 보았으며, Table 10과 같다.

Table 10. Reliability analysis by influencing factors of case data

Influence factors	Risk index from case data			Collapse risk index			Reliability analysis (risk index from case data - collapse risk index)			Collapse probability (%)
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	
Joint face conditions	8.3300	8.3300	8.3300	3.6369	10.6574	7.2747	-2.3274	4.6931	1.0553	75.0
Rock mass strength	3.5490	3.5490	3.5490	0.5387	4.5288	2.6486	-0.9798	3.0103	0.9010	85.0
Ground grade (RQD/N)	3.4631	3.4631	3.4631	0.5678	5.7697	3.1932	-2.3066	2.8953	0.2699	59.4
Joint face spacing	5.8050	5.8050	5.8050	1.9722	5.7827	4.0885	10.0223	3.8328	1.7165	100
Adjustment for joint orientations	4.8420	4.8420	4.8420	0.5989	4.8341	2.9388	0.0079	4.2431	1.9032	99.9
Excavation sectional area	2.2192	2.2192	2.2192	0.3401	2.2121	1.2346	0.0071	1.8791	0.9846	99.6
Depth ratio	1.4000	1.4000	1.4000	0.2085	1.3901	0.8223	0.0099	1.1915	0.5777	99.8
Groundwater inflow	3.7290	3.7290	3.7290	1.3736	11.1101	6.5027	-7.3811	2.3554	-2.7737	10.5
Groundwater level	1.2677	1.2677	1.2677	0.7757	2.7782	1.7197	-1.5105	0.4920	-0.4520	14.7
Divided excavation method	1.7280	1.7280	1.7280	0.5954	5.1345	2.7431	-3.4065	1.1326	-1.0151	14.9
Advance	1.6700	1.6700	1.6700	0.5764	2.7657	1.6702	-1.0957	1.0936	-0.0002	50.2
Support and reinforcement time	8.2200	8.2200	8.2200	2.8183	8.1910	5.8031	0.0290	5.4017	2.4169	100
Support pattern level	6.3380	6.3380	6.3380	0.5077	6.7329	3.5326	-0.3949	5.8303	2.8054	99.6
Auxiliary method	6.1923	6.1923	6.1923	3.9515	6.1799	5.1870	0.0124	2.2408	1.0053	100

절리면 상태, 절리면 간격, 절리 방향에 대한 보정은 결과값에 대해 붕괴될 확률은 각각 75.0%, 100%, 99.9%로 나타났다. Table 8의 붕괴 사고 현황을 살펴보면, 해당 구간은 절리가 많이 발달된 풍화성 천매암으로 구성되어 있으며, 막장 관찰지에서도 절리를 포함하는 항목이 낮은 등급 점수를 나타내어 높은 위험도 등급 점수를 보였다. 이를 통해, 절리를 포함하는 항목에 대해 위험도 지수가 높게 산정된 결과의 신뢰도가 높다고 평가할 수 있다. 암반강도와 지반등급(RQD/N)에 의해 붕괴될 확률은 각각 85.0%와 59.4%로 나타났으며, 이는 막장관찰지에서 나타난 낮은 등급 점수를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이러한 분석 결과를 종합해 보면, 현재 막장의 지반 상태가 좋지 않으며, 저심도 구간을 통과하기 때문에 심도비에 따른 붕괴 확률도 99.8%로 나타났다. 이는 지표면 함몰 및 붕락의 내용을 대변하고 있는 것으로 판단된다.

보조공법, 지보 및 보강 시행 시기, 지보패턴 수준에 의해 붕괴될 확률은 각각 100%, 100%, 99.6%로 나타났다. 막장의 안정성 확보를 위해 보조공법 적용, 지보 및 보강 시행 시기 단축, 지보패턴 수준을 상향 조정이 필요했으나, 설계 정보와 시공 정보를 검토한 결과, 이에 대한 언급은 없었다. 이는 현장에서 막장 정보를 반영한 붕괴 위험도에 대한 적절한 조치가 수행되지 않은 것으로 판단된다.

굴착단면적과 굴진장에 의해 붕괴될 확률은 각각 99.6%와 50.2%로 나타났으며, 분할굴착공법에 의해 붕괴될

확률은 14.9%로 나타났다. 설계자와 현장 전문가는 막장면을 분할 굴착하여 막장의 안정성을 확보하고자 한 것으로 판단된다.

본 간략한 평가를 통해 터널 붕괴 위험도 지수 값의 적정성을 확인하였으며, 사례 데이터의 붕괴 위험도 평가 결과가 실제 붕괴 현황 및 현장 자료와 비교적 잘 부합하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

터널 붕괴 위험도를 분석하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 활용한 확률론적 접근 방법을 제안하였다. 이를 통해 터널 붕괴의 위험성을 사전에 예측하고 관리할 수 있는 체계적인 평가 모델을 개발하였다.

우선, 터널 붕괴에 영향을 미치는 14개의 주요 영향 인자에 대해 AHP 기법을 통해 각 인자의 상대적 중요도를 평가하여 가중치를 산정하였다. 전문가의 의견을 바탕으로 등급화 지침을 마련하고, 이를 통해 각 영향인자의 등급 점수를 산정하였다. 이러한 체계적인 접근을 통해 터널 붕괴 위험도 지수를 도출하였다.

몬테카를로 시뮬레이션을 통해 각 영향인자의 확률분포를 반영한 평가를 수행하였다. 10,000회의 시뮬레이션을 통해 터널 붕괴 위험도 지수를 산정하고, 이를 확률분포 형태로 표현하였다. 연구 결과, 절리면 상태, 지하수위, 보조공법, 절리면 간격, 지보패턴수준, 지반등급 등이 터널 붕괴 위험도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

실제 터널 붕괴 사례를 활용해 제안된 평가 모델의 유효성을 확인하였다. ○○ 터널에서 발생한 붕괴 사고 데이터를 활용하여 평가를 실시한 결과, 해당 터널의 붕괴 위험도가 매우 높은 것으로 평가되었다. 이는 제안된 터널 붕괴 위험도 지수의 신뢰성을 뒷받침하는 객관적인 근거가 되었다. 또한, 사례 데이터의 위험도 지수와 실제 붕괴 현황이 비교적 잘 부합하는 것으로 나타나 본 평가 모델의 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도를 체계적으로 평가하고 관리할 수 있는 새로운 방법을 제시함으로써, 터널 공사의 안전성을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 다양한 터널 공사 현장에서 본 모델을 적용하여 추가적인 평가와 개선을 통해 보다 정교한 위험도 평가 모델을 개발하는 것이 필요할 것이다.

## 저자 기여도

김정흠은 연구 개념 및 설계, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성 및 검토를 하였다.

## References

1. Baecher, G.B., Christian, J.T. (2003), Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons, West Sussex, pp. 619.
2. Bieniawski, Z.T. (1989), Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Son, New York, pp. 51-72.
3. Deere, D.U. (1964), "Technical description of rock cores for engineering purposes", Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. 1, No. 1, pp. 16-22.

4. Hoek, E., Brown, E.T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.
5. KICT (2009), Development of technologies for minimizing and preventing the disaster on tunnel construction (VI), Final Technical Report, KICT 2009-071, Korea Institute of Construction Technology, pp. 867.
6. Kim, J.H. (2024a), "A study on the risk index for tunnel collapse", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 26, No. 5, pp. 421-433.
7. Kim, J.H. (2024b), "A study on the weighting of influence factors for tunnel collapse risk analysis", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 26, No. 4, pp. 315-326.
8. Kim, J.H., Kim, C.Y., Lee, S.S., Lee, J.H. (2017), "A study on influence factors for tunnel collapse risk analysis using Delphi method", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 165-172.
9. Kwon, K., Kang, M., Kim, D., Choi, H. (2022), "New tunnel risk assessment model combining AHP and fuzzy set theory", *SSRN Electronic Journal*, pp. 1-17.
10. Liu, S., Xia, C., Ye, J. (2023), "Risk assessment method for large-section tunnel using neutrosophic numbers similarity measure based on arcsine function", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 45, No. 6, pp. 9335-9345.
11. MLTMA (2012), Construction safety management guidelines, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Notice, No. 2012-935.
12. Ou, G.Z., Jiao, Y.Y., Zhang, G.H., Zou, J.P., Tan, F., Zhang, W.S. (2021), "Collapse risk assessment of deep-buried tunnel during construction and its application", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 115, 104019.
13. Saaty, T.L. (1982), "The analytic hierarchy process: a new approach to deal with fuzziness in architecture", *Architectural Science Review*, Vol. 25, No. 3, pp. 64-69.
14. Sharafat, A., Latif, K., Seo, J. (2021), "Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 111, 103860.
15. Shin, H.S., Kwon, Y.C., Jung, Y.S., Bae, G.J., Kim, Y.G. (2009), "Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 1072-1087.
16. Sun, J., Liu, B., Chu, Z., Chen, L., Li, X. (2018), "Tunnel collapse risk assessment based on multistate fuzzy Bayesian networks", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 34, No. 8, pp. 1646-1662.
17. Vose, D. (2008), *Risk Analysis: A Quantitative Guide* (3rd ed.), John Wiley & Son, Chichester, pp. 752.
18. Xu, Z., Cai, N., Li, X., Xian, M., Dong, T. (2021), "Risk assessment of loess tunnel collapse during construction based on an attribute recognition model", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 80, pp. 6205-6220.
19. Yu, Y., He, X., Wan, F., Bai, Z., Fu, C. (2022), "Dynamic risk assessment of karst tunnel collapse based on fuzzy-AHP: a case study of the LianHuaShan Tunnel, China", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2022, No. 1, 4426318.