

터널 지보패턴 결정을 위한 위험도 분석

A risk analysis for the determination of a tunnel support pattern

유광호*¹, 박연준²

You, Kwang-Ho · Park, Yeon-Jun

Abstract

Rock mass is very inhomogeneous in nature and data obtained by site investigations and tests are very limited. For this reason, many uncertainties are to be included in the process of constructing structures in rock mass. In the design of a tunnel, support pattern, advance rate, and excavation method, which are important design parameters, must be determined to be optimal. However, it is not easy to determine those parameters. Moreover if those parameters are determined incorrectly, unexpected risk occurs such as decrease in the stability of a tunnel or economic loss due to the excessive supports etc. In this study, how to determine an optimal support pattern and advance rate, which are the important tunnel design parameters, is introduced based on a risk analysis. It can be confirmed quantitatively that the more supported a tunnel is, the larger reliability index becomes and the more stable the tunnel becomes. Also an optimal support pattern and advance rate can be determined quantitatively by performing a risk analysis considering construction cost and the cost of loss which can be occurred due to the collapse of a tunnel.

Keywords: Risk analysis, factor of safety, Monte Carlo simulation, tunnel support pattern

요 지

암반은 그 특성상 매우 불균질하며, 조사 및 시험을 통하여 얻을 수 있는 자료는 아주 한정적이다. 이러한 이유 때문에 암반 중에 구조물을 구축하는 작업은 많은 불확실성(uncertainties)을 내포하게 된다. 터널 설계에 있어서 주요 설계 파라미터인 지보패턴, 굴진장 및 굴착방법 등은 최적의 값으로 결정되어야 하나 그 결정이 쉽지 않으며, 결정을 잘못할 경우 원하지 않는 risk, 즉 터널 안정성의 저하 혹은 지보재의 지나친 보강으로 인한 경제적 손실을 발생시킨다. 본 연구에서는 터널설계 시 주요한 설계 파라미터인 지보패턴 및 굴진장을 위험도 분석 기법에 근거하여 결정하는 방법을 소개하였다. 지보량이 증가할수록 신뢰지수가 증가하여 터널의 안정성이 증가함을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 터널의 붕괴 등으로 말미암아 발생할 수 있는 손실비용 및 공사비를 고려하여 위험도 분석을 실시함으로써 최적의 지보패턴 및 굴진장을 정량적으로 결정할 수 있었다.

주요어: 위험도 분석, 안전율, Monte Carlo simulation, 터널 지보패턴

1. 서론

암반은 그 특성상 매우 불균질하며, 조사 및 시험을 통

하여 얻을 수 있는 자료는 아주 한정적이다. 따라서 암반 중에 구조물을 구축하는 작업은 많은 불확실성(uncertainties)을 내포하게 된다. 터널 설계에 있어서 주요

*1 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (khyou@mail.suwon.ac.kr)

2 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

설계 파라미터인 지보패턴, 굴진장 및 굴착방법 등은 최적의 값으로 결정되어야 하나 그 결정이 쉽지 않으며, 결정을 잘못할 경우 원하지 않는 risk, 즉 터널 안정성의 저하 혹은 지보재의 지나친 보강으로 인한 경제적 손실을 발생시킨다.

설계자나 결정자 (decision maker)는 결정 및 위험도 분석 (decision and risk analysis)을 통해 당면한 문제를 정리함은 물론 위험도를 분석하고 최적의 해를 결정할 수 있다. 예를 들면, 지하 구조물 시공을 위해 사용될 수 있는 효과적인 결정분석 (decision analysis)의 주요 요소들과 흐름도 (flow chart)는 그림 1과 같다.

본 연구에서는 터널설계 시 주요한 설계 파라미터인 지보패턴 및 굴진장을 위험도 분석 기법에 근거하여 결정하는 방법을 소개하고자 한다. 특히, 터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해, 유 등 (2001)에 의해 제안된 전단강도감소기법에 의거하여 터널의 안전율을 수치해석적으로 구하는 방법이 사용되었다. 또한, 터널 안전율

의 확률분포를 구하기 위해 Monte Carlo Simulation 기법이 사용되었으며, 이를 위해 정규분포를 만족하는 50개의 무작위 값이 지반물성값 (변형계수, 점착력, 내부마찰각)을 위해 생성되어 사용되었다.

2. 정량적 위험도 분석

결정적 모델링 (deterministic modelling)은 모델의 결과를 결정하기 위해 모델 내에서 각 변수의 최적 추정값 (best guess)을 사용한다. 각 변수의 추정값 변화가 모델결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 민감도 분석 (sensitivity analysis)이 수행된다. 이 작업은 각 입력의 추정값을 다양하게 결합하여 선택함으로써 가능하다. 최적의 추정값 근처의 가능한 값들의 다양한 결합들은 일반적으로 “what if” 시나리오로서 알려져 있다.

표 1은 건설 프로젝트의 공사비를 결정하는 간단한 모델을 보여준다. 이 모델에서는 프로젝트의 공사비를 5가지의 별도의 항목으로 세분했다. “what if” 분석에서 사용할 값으로 3점 (최저값, 최적의 추정값 및 최대값)이 사용될 수 있다. 5가지의 공사비 항목과 각 항목 당 3가지 값이 존재하기 때문에 가능한 “what if” 결합 수는 $3^5=243$ 이 된다. 분명히 이 값은 실용적으로 사용되기에는 너무 큰 값이다. 이 방법은 2가지의 결점을 갖고 있다. 첫째로는 각각의 변수에 있어서 단지 3개의 값만을 사용한다는 것이고, 둘째로는 최적의 추정값이 최저값과 최대값 보다 더 많이 발생한다는 사실을 반영하고 있지 못하다는 것이다.

Monte Carlo simulation을 사용한 정량적 위험도 분석 (quantitative risk analysis) 방법은 가능한 시

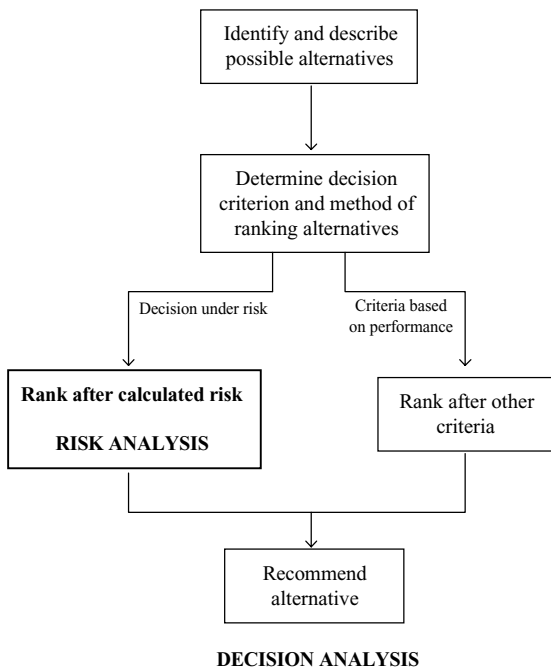


그림 1. 지하 구조물 시공을 위한 추천된 결정과정 (after Sturk et al., 1996)

표 1. 공사비 모델

공정	최저값	최적 추정값	최대값
굴착	30,500	33,200	37,800
기초	23,500	27,200	31,100
구조물	172,000	178,000	189,000
지붕	56,200	58,500	63,700
서비스와 마감	29,600	37,200	43,600

나리오의 수를 생성하는 “what if” 시나리오와 유사하지만, 각각의 가능한 시나리오를 그 발생 확률에 따라 가중치를 고려한 진일보된 것이다. 그림 2는 널리 사용되는 몇몇 분포의 예를 보여준다. x축(수평축)은 변수가 취할 수 있는 값의 가능한 범위를 취하며, y축(수직축)은 범위내의 각각의 값에 확률 가중치를 준다.

이러한 정량적 위험도 분석의 목적은 모델 결과의 확률 분포를 구하기 위해 모델 매개변수들의 변화 (variability)가 결합될 때 나타나는 영향을 구하는 것이다. 결과 분포 (outcome distribution)를 구하기 위해 개발된 기법에는 다음과 같은 방법들이 있다.

2.1 모멘트법

모멘트법 (method of moments)은 각 변수의 불확실

성을 그 것의 평균과 분산으로 대치하고, 확률법칙을 이용하여 모델 결과의 평균과 분산을 평가한다. 이 모멘트법은 상당히 많은 제한 조건을 가지며 나누기, 지수, power 함수 등에는 사용될 수 없다.

2.2 엄밀대수해 방법

각 확률분포는 그것의 형태를 수학적으로 정의하는 확률분포 (밀도) 함수에 관계된다. 대수적 방법들이 변수들의 몇몇 결합에 대해 확률분포함수를 구하기 위해 개발되어 왔으며 따라서 간단한 모델에 대해서는 결과분포를 규정하는 방정식을 직접 찾아낼 수 있다. 예를 들어, 두 개의 독립분포의 합의 확률분포함수를 계산하는 것은 매우 쉽다. 따라서, 위험도 분석 모델이 몇몇 간단한 분포의 합이라면, 정확한 결과분포를 구하기 위해 식을 반복

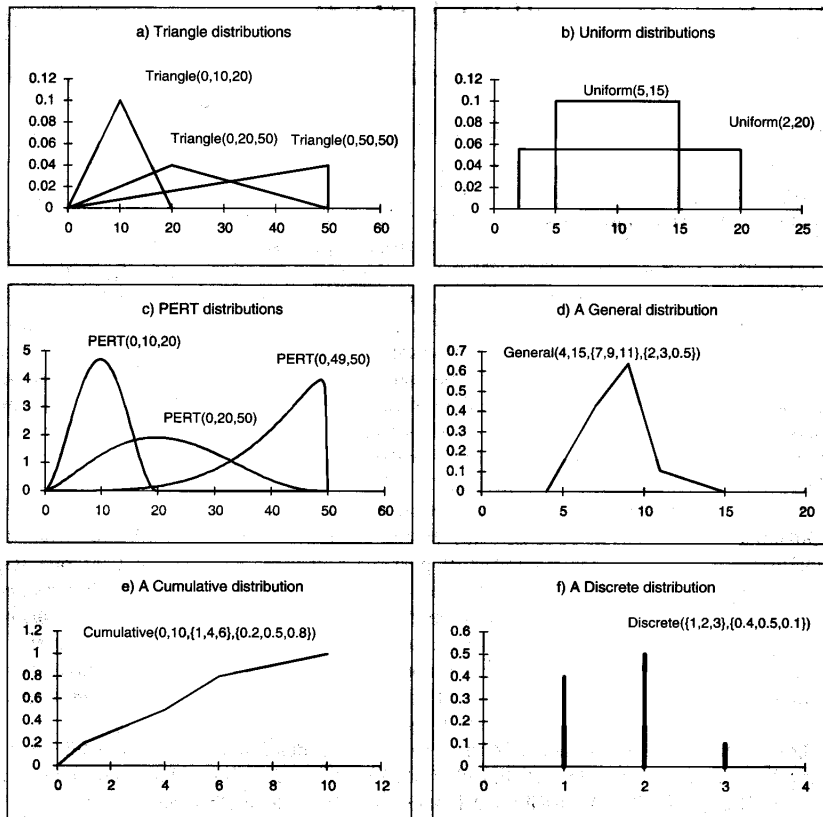


그림 2. 확률분포의 예

적으로 사용할 수 있다. 이 접근방법은 몇 가지의 장점을 가지는데, 예를 들면, 해가 정확하고, 매개변수 값 변화의 효과를 즉시 볼 수 있고, 모델 매개변수의 결과에 대한 민감도 조사를 위해 미적분학을 사용할 수 있다. 하지만, 위험도 분석 모델에 사용되는 분포들이 이와 같이 간단한 조작으로 풀리지 않기 때문에 엄밀대수해 (exact algebraic solutions) 방법은 종종 풀 수 없을 정도로 매우 복잡해지는 단점이 있다.

2.3 Monte Carlo Simulation

Monte Carlo Simulation 기법은 모델 내에서의 각 확률 분포를 임의로 택하여 수백 또는 수천 개의 시나리오를 작성하여 반복 수행하는 것이다. 각각의 확률 분포는 해당 분포 형상을 재생하는 형태로 선택된다. 따라서 해당 모델에 대하여 계산된 값들의 분포는 그 값이 나올 확률을 반영한다. Monte Carlo simulation은 상기한 다른 기법에 비하여 많은 장점을 갖는다. Monte Carlo simulation은 종종 근사법이라고 비판되기도 하지만, 적어도 이론적으로는 simulation에서의 반복 회수를 증가시킴으로써 요구되는 정도를 얻을 수 있다. 이 방법에서의 문제점으로는 무작위 숫자 (random number)를 발생시키는 알고리즘으로부터 생성되는 무작위 숫자의 제한, 그리고 반복에 따른 컴퓨터 계산시간의 증가이다. 그러나 이러한 문제점들은 대부분의 경우 해당되지 않거나 모델의 구조를 잘 설정함으로써 피할 수 있다.

3. 위험도 분석의 터널설계에의 적용

불확실성을 표현하는 가장 간단하고 잘 알려진 방법은 이것을 분포 (distribution)의 형태로 표현하고, 이것을 정해진 성과 한계값 (그림 3) 또는 역시 분포의 형태로 표현되는 필요한 성과 (performance) (그림 4)와 관련시키는 것이다. 이러한 접근방법은 널리 사용되는 안전율 (safety factor)을 대신할 수 있다는 것이다 (Einstein, 1996).

분포를 사용하는 대신에 “신뢰도 다이어그램 (reliability diagrams)”을 사용할 수도 있는데, 이것은 예상

성과 (예를 들면, 기댓값 등)가 한계성과로부터 얼마나 멀리 떨어졌나를 보여준다 (그림 5). 신뢰도 역시 Hasofer 및 Lind의 신뢰도 지수 (reliability index), β 에 의해 표현될 수도 있다 (Einstein, 1996):

$$\beta = \frac{E(x) - X_c}{\sigma_x} \quad \text{또는} \quad \frac{X_c - E(x)}{\sigma_x} \quad (1)$$

여기서, X_c 는 변수 X의 한계값이며 $E(x)$ 및 σ_x 는 각각 기댓값과 표준편차이다. 이 표현은 한계값과 기대성과와의 차이가 표준편차로 표현되는 그림 3과 전적으로 동일하며, 변수의 개수와 관계없이 적용될 수 있다는 장점이 있다.

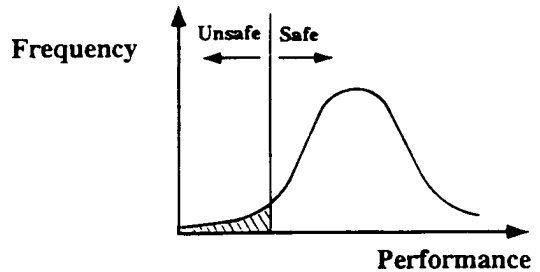


그림 3. 성과 분포와 정해진 성과 한계값 (after Einstein, 1996)

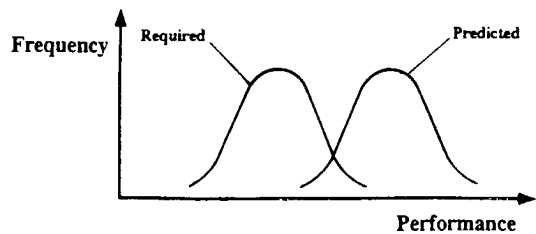


그림 4. 예상 및 요구되는 성과 분포 (after Einstein, 1996)

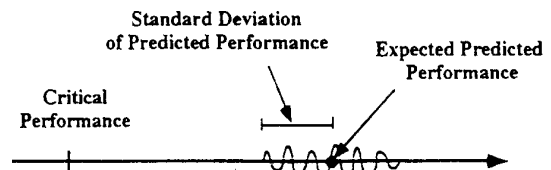


그림 5. 신뢰 다이어그램 (after Einstein, 1996)

예상된 성과는 일반적으로 나쁜 성과 (poor performance)의 영향을 고려하지 않고, 단지 요구되는 성과와 단순히 비교되는 단점이 있는데, 이는 위험도 (risk)를 다음과 같이 성과의 불확실성과 손실 (loss)의 잠재적 가치의 결합으로 표현하는 위험도 분석을 통해 해결될 수 있다.

$$\text{Risk}(R) = P[\text{Performance}] \times \text{Potential worth of loss} \quad (2)$$

여기서 손실은 인명손실, 자산손실 또는 비경제적 환경적 영향 등을 포함할 수 있다. 위험도를 가장 간단하게 표현할 수 있는 방법은 손실의 잠재적인 가치를 결과에 대한 비용 (cost of consequence)과 같다고 가정하는 것이다.

$$R = P[\text{Failure}] \times \text{Cost of Consequences} \quad (3)$$

한편, 안전율을 사용할 경우, 위험도는 “안전율에 대응하는 비용”과 구조물 공사비의 합으로 대치된다. 여기서 “안전율에 대응하는 비용”이란 구조물이 파괴되었을 경우, 발생할 수 있는 모든 손실을 비용으로 환산한 손실 비용을 의미한다. 즉, 손실비용은 인명피해, 공기지연 등으로 인해 발생하는 비용 및 복구에 요구되는 비용을 합한 총비용을 의미한다 (Einstein, 1996).

$$R = \text{손실비용} + \text{공사비} \quad (4)$$

일반적으로, 그림 6과 같이 안전율이 클수록 이에 해당하는 손실비용이 작아진다고 가정될 수 있다.

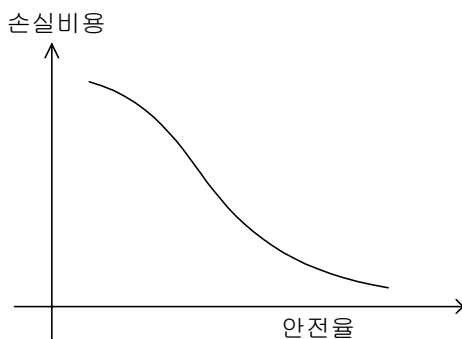


그림 6. 안전율 vs 손실비용

4. 지보패턴 결정을 위한 위험도

4.1 대상 터널 및 터널의 안전율 산정

대상터널은 OO-OO 터널로, 본 연구에서는 터널의 지보패턴을 결정하기 위해 선정된 몇 개의 대표단면 중에, STA. 5K685 지점의 단면을 대상 단면으로 설정하였는데, 수치해석을 위한 RHR에 의한 지층의 암반분류 등급 및 해석영역은 그림 7과 같다.

터널의 안전율은 유 등 (2001)에 의해 제안된 전단강도감소기법에 의한 수치해석적 방법에 의해 구해졌다. 이 방법은 터널의 안전율을 구하는 과정에 지보재의 파괴를 허용강도설계법에 의해 판별한다. 수치해석을 위해 사용된 프로그램은 미국 Itasca Consulting Group, Inc. (1999)에 의해 개발된 지반범용 해석 프로그램인 FLAC이 사용되었다.

4.2 터널 안전율의 확률분포 산정

OO-OO 터널 설계에 있어, 지반 물성치 (변형계수 E, 점착력 c, 내부마찰각 ψ)의 불확실성을 고려하여 대상 단면의 적정한 지보패턴을 결정하기 위해 그림 8과 같이 Monte Carlo simulation을 이용한 위험도 분석을 실시하였다.

대상 지점에 있어서 터널이 굴착될 위치에서의 암반상태가 RMR 등급 III으로 보통 상태일 것으로 추정되어, 후보 지보패턴을 표준지보패턴 중 P2, P3, P4의 3가지

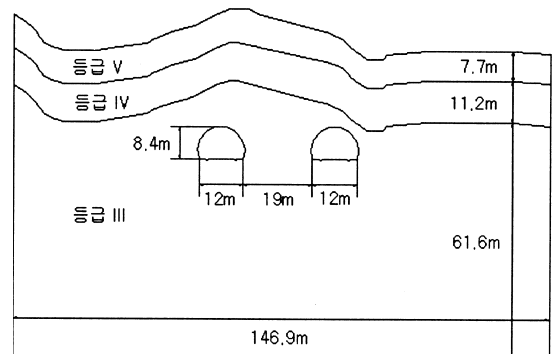


그림 7. 대상 단면 및 해석영역

로 한정하였으며, 각 지보패턴 별 지보재 규격, 굴진장 및 굴착방법은 표 2에 정리된 바와 같다. 표 2에서 지보 패턴 P4의 경우, lattice girder (LG)가 강지보공으로 사용되었다. 단, 수치해석의 용이성을 위해 강지보공과 라이닝은 고려되지 않았다. 한편 슛크리트는 강섬유 슛

크리트로 1차 soft 슛크리트 (탄성계수= $5 \times 10^5 \text{tf/m}^2$) 타설후 2차 hard 슛크리트 (탄성계수= $15 \times 10^5 \text{tf/m}^2$) 가 타설되는 것으로 하였다. 록볼트 (탄성계수= $2 \times 10^7 \text{tf/m}^2$)는 직경이 25mm 이형철근이 사용되었다.

Monte Carlo simulation에 사용된 지반물성치는 정규분포를 만족하도록 생성되었는데, 이 때 사용된 매개 변수 (평균값과 표준편차)는 다음 표 3과 같다. 즉, 터널이 위치하는 층을 기준층으로 하여 먼저 정규분포를 만족하는 50개의 물성치 (변형계수, 점착력, 내부마찰각)를 생성하고, 나머지 층의 물성치는 기준층과의 비율이 유지되도록 생성되었다.

Monte Carlo simulation 결과 얻어진 터널 안전율 분포로부터 식 (1)을 사용하여 신뢰지수 (β)를 구했다. 단, 본 연구에서는 모두 사면의 건기 시 허용안전율을 참고하여, 터널의 안전율에 대한 한계값 X_c 를 1.5로 정하여 신뢰지수를 구하였다.

신뢰지수가 작을 경우에는 터널 안전율에 대한 신뢰지수의 증가에 따라 터널이 붕괴되어 발생할 수 있는 손실비용은 급격히 작아질 것이나, 신뢰지수가 큰 경우에는 신뢰지수 증가에 따른 손실비용의 변화는 완만할 것이며 신뢰지수가 무한히 커지면 손실비용은 0에 수렴할 것이라고 추측할 수 있다. 이와 같은 신뢰지수와 손실 비용의 관계를 잘 반영하는 곡선으로는 그림 9에 도시된 정규분

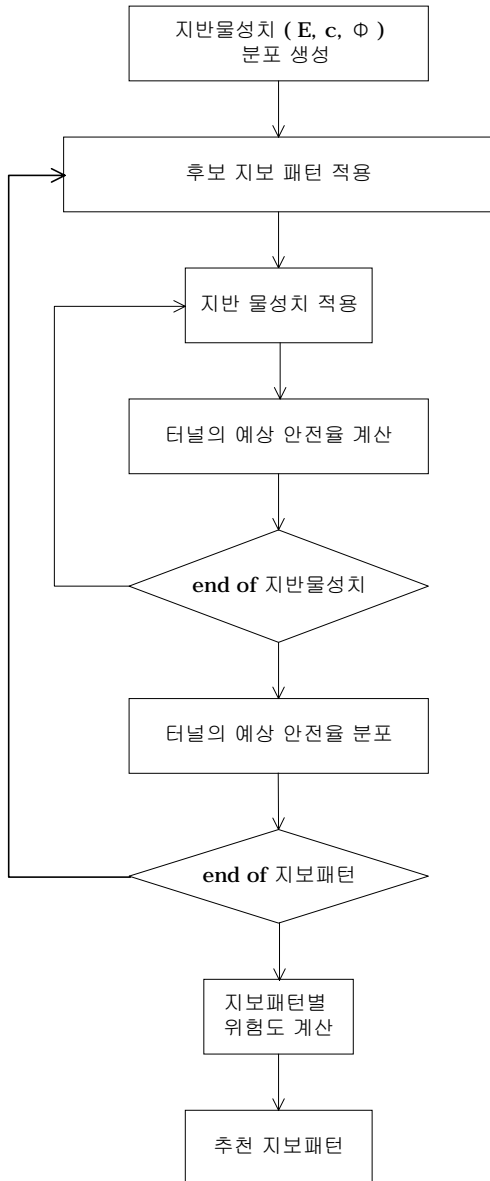


그림 8. 지보패턴 결정을 위한 위험도 분석

표 2. 지보패턴 별 굴착 및 지보 제원

지보패턴	P2	P3	P4	
RMR	80~61	60~41	40~21	
Q	40~4	4~1	1~0.1	
굴진장 (m)	3.0	2.0	1.5/1.5 (3.0)	
굴착방법	전단면	전단면	상하분할	
스틉크리트	종 류	강섬유	강섬유	강섬유
	두 께	50mm	80mm	120mm
록볼트 (D25)	중간격	3.0m	2.0m	1.5m
	횡간격	2.0m	1.5m	1.5m
	길 이	3.0m	4.0m	4.0m
강지보공	-	-	LG-50×20×30	
라이닝	두 께	300mm	300mm	400mm
	보 강	무근	무근	철근

표 3. Monte Carlo simulation에 사용된 지반물성치의 정규분포 매개변수

지반등급	변형계수 ($\times 10^3$ kgf/cm ²)		점착력 (kgf/cm ²)		내부마찰각 (degree)		단위중량 (tf/m ³)	포아손비
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차		
III	82.82	19.11	9.67	2.25	45.76	1.32	2.5	0.25
IV	18.05	3.82	5.15	1.00	35.88	0.69	2.3	0.30
V	6.00	0.50	0.93	0.21	31.40	0.83	2.0	0.33

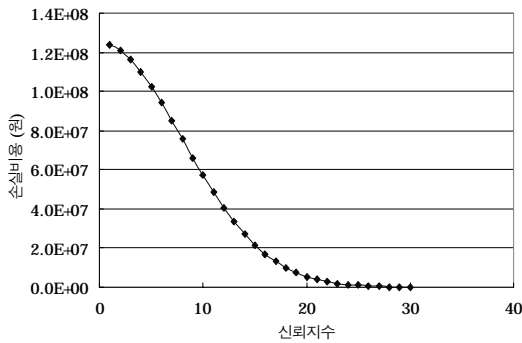


그림 9. 신뢰지수 vs 손실비용

포곡선을 들 수 있다. 따라서 단위 m당 손실비용을 계산하기 위하여 정규분포 곡선식에 근거한 다음의 식 (5)를 사용하였다.

$$\text{손실비용} = \frac{2.5 \times 10^9}{\sqrt{2\pi \times \sigma^2}} \times e^{-\frac{\text{신뢰지수}^2}{2 \times \sigma^2}} \quad (5)$$

지보패턴 별 risk는 식 (4)를 사용하여 구하였고, 이때 가장 적은 risk 값을 주는 지보패턴을 설계 지보패턴으로 결정하였다. 다만, 지보패턴 별 공사비는 표 4와 같이 기존 OO터널 시공자료로부터 개략적으로 산출된 값을 사용하였다.

또한, 대상 단면에서 최적 굴진장을 구하기 위해 굴진장을 3 가지 (1.5m, 2.0m, 2.5m)로 변화시켜 Monte Carlo simulation을 수행하여 터널 안전율의 확률분포를 구하였다. 굴진장 변화의 효과는 수치해석 시 하중분담율을 적절히 조정하여 고려하였다.

표 4. 지보패턴 별 공사비 원가

지보패턴	m당 공사비 (원)
P2	3,605,343
P3	4,314,068
P4	6,246,734
P5	7,084,135

표 5. 대상 단면의 위험도 분석 결과

지보패턴	예상 터널 안전율			손실비용 (원)	Risk(원)= 손실비용 + 공사비
	평균 값	표준 편차	신뢰 지수		
P2	2,044	0,246	2,211	119,996,343	123,601,686
P3	2,100	0,242	2,479	118,823,792	123,137,860
P4	2,220	0,252	2,857	116,966,846	123,213,580

4.3 해석결과

Monte Carlo simulation 결과 얻어진 터널의 안전율 분포와 신뢰지수는 표 5와 같다. 이 때 굴진장은 2.0m로 하였고, 하중분담율은 굴착, soft shotcrete 및 록볼트 타설, hard shotcrete 타설에 대해 각각 50%, 25%, 25%를 적용하였다.

표 5에서 알 수 있듯이, 지보패턴이 P2, P3, P4 순으로, 즉 지보량이 증가할수록 신뢰지수는 증가하나, 터널의 붕괴 등으로 발생할 수 있는 손실비용 및 공사비를 고려하는 경우에는 대상 단면에서의 최적 지보패턴은 P3임을 알 수 있다. 단, 산정된 risk는 단위 m당 추정되는 비용이다.

표 6은 지보패턴을 P3로 고정하고 굴진장을 변화시켰

표 6. Monte Carlo simulation 결과

번호	내부마찰각 (°)	점착력 (kgf/cm ²)	변형계수 (kgf/cm ²)	굴진장 (지보패턴 III)		
				1,5m	2,0m	2,5m
1	48,19	14,18	121,101	2,5	2,5	2,5
2	47,26	12,57	107,441	2,3	2,3	2,3
3	46,49	11,22	96,137	2,1	2,1	2,3
4	46,33	10,95	93,812	2,1	2,1	2,1
5	46,88	11,91	101,916	2,3	2,3	2,3
6	45,16	8,92	76,677	1,9	1,9	1,9
7	45,02	8,67	74,608	1,9	1,9	1,9
8	45,90	10,20	87,574	2,1	2,1	2,1
9	46,10	10,55	90,479	2,1	2,1	2,1
10	45,35	9,24	79,419	1,9	1,9	1,9
11	44,63	7,99	68,838	1,7	1,9	1,9
12	47,80	13,51	115,392	2,5	2,5	2,5
13	46,25	10,81	92,620	2,1	2,1	2,1
14	45,76	9,96	85,464	2,1	2,1	2,1
15	45,70	9,86	84,597	2,1	2,1	2,1
16	45,21	9,01	77,452	1,9	1,9	1,9
17	47,05	12,20	104,383	2,3	2,3	2,3
18	47,18	12,44	106,320	2,3	2,3	2,3
19	47,16	12,39	106,014	2,3	2,3	2,3
20	46,79	11,75	100,642	2,3	2,3	2,3
21	44,54	7,85	67,615	1,7	1,7	1,7
22	46,25	10,81	92,650	2,1	2,1	2,1
23	44,56	7,87	67,849	1,7	1,7	1,7
24	45,73	9,91	85,087	2,1	2,1	2,1
25	45,94	10,28	88,155	2,1	2,1	2,1
26	47,90	13,68	116,922	2,5	2,5	2,5
27	45,25	9,07	77,961	1,9	1,9	1,9
28	47,08	12,24	104,791	2,3	2,3	2,3
29	45,56	9,62	82,610	1,9	1,9	2,1
30	44,54	7,85	67,635	1,7	1,7	1,7
31	43,38	5,82	50,520	1,5	1,5	1,5
32	47,87	13,63	116,514	2,5	2,5	2,5
33	46,26	10,83	92,813	2,1	2,1	2,1
34	45,55	9,60	82,446	1,9	1,9	2,1
35	46,21	10,74	92,080	2,1	2,1	2,1
36	45,15	8,91	76,585	1,9	1,9	1,9
37	46,87	11,89	101,774	2,3	2,3	2,3
38	47,14	12,35	105,708	2,3	2,3	2,3
39	45,02	8,68	74,628	1,9	1,9	1,9
40	47,99	13,84	118,247	2,5	2,5	2,5
41	46,12	10,58	90,703	2,1	2,1	2,1
42	45,03	8,69	74,760	1,9	1,9	1,9
43	45,84	10,11	86,707	2,1	2,1	2,1
44	48,13	14,09	120,285	2,5	2,5	2,5
45	45,86	10,13	86,922	2,1	2,1	2,1
46	46,47	11,19	95,892	2,1	2,1	2,1
47	43,89	6,71	58,022	1,7	1,7	1,7
48	47,06	12,21	104,485	2,3	2,3	2,3
49	44,83	8,34	71,835	1,9	1,9	1,9
50	46,55	11,34	97,085	2,1	2,3	2,3

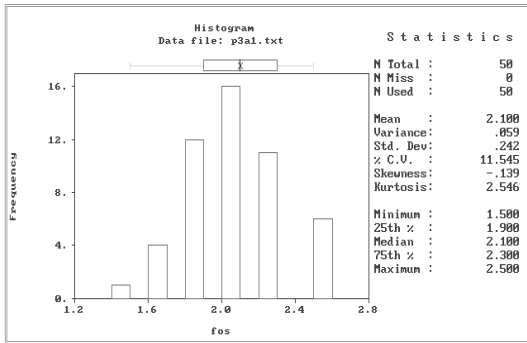


그림 10. 지보패턴 P3, 굴진장 2.0m인 경우 터널 안전율 확률분포

표 7. 대상 단면 굴진장 별 예상 안전율

굴진장 (m)	예상 터널 안전율		
	평균값	표준편차	신뢰지수
1.5	2,104	0.251	2,406
2.0	2,100	0.242	2,479
2.5	2,092	0.246	2,407

을 때의 결과이다. 이 때 굴진장이 1.5m와 2.5m인 경우, 하중분담율은 굴착, soft shotcrete 및 록볼트 타설, hard shotcrete 타설에 대해 각각 46%, 27%, 27% 및 54%, 23%, 23%를 적용하였다. 그림 10은 이 경우 Monte Carlo simulation 해석으로부터 얻은 터널 안전율의 확률분포를 보여준다.

표 7은 식 (1)을 사용하여 신뢰지수를 구한 것인데, 굴진장이 터널 안정성에 미치는 효과가 그다지 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 굴진장이 시공 경제성에 미치는 영향을 무시하고, 단순히 터널의 안정성만을 고려할 경우, 최적의 굴진장은 신뢰지수가 가장 큰 2.0m가 최적임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 터널 안전율의 확률분포를 Monte Carlos simulation을 통해 산정하여 위험도 분석을 실시함으로써 지반물성치의 불확실성을 고려한 최적의 터

널 지보패턴 및 굴진장을 구하는 방법을 소개하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

지보량이 증가할수록 신뢰지수가 증가하여 터널의 안정성이 증가함을 정량적으로 확인할 수 있었다. 또한, 터널의 붕괴 등으로 발생할 수 있는 손실비용 및 공사비를 고려하여 위험도 분석을 실시함으로써 최적의 지보패턴을 정량적으로 결정할 수 있었다.

본 연구의 대상단면에 있어서, 지보패턴이 P3인 경우, 굴진장의 변화가 터널의 안정성에 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

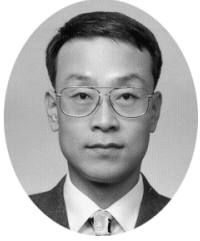
추후에는 보다 정확한 위험도 분석을 위해서는 신뢰지수와 손실비용과의 정확한 관계의 정립이 선행되어야 할 것이며, 굴진장이 굴착 싸이클 등의 시공 경제성에 미치는 영향도 위험도 분석에서 고려되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구에 필요한 자료를 제공해 주신 (주)에스코컨설팅의 정명근 상무님을 비롯한 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Einstein, E. E. (1996), "Risk and risk analysis in rock engineering", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp.141-155.
2. Sturk, R., Olsson, L. and Johansson, J. (1996), "Risk and Decision Analysis for Large Underground Projects, as Applied to the Stockholm Ring Road Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 157-164.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (1999), *FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 3.4., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
4. 유광호, 박연준, 배규진, (2001), "터널 안정성 평가의 정량화 기법 제안", 2001년도 한국암반공학회 터널기술분과위원회 기술세미나 논문집, 서울대학교, pp. 82-95.



유광호

수원대학교 토목공학과 교수
khyou@mail.suwon.ac.kr



박연준

수원대학교 토목공학과 교수
yjpark@mail.suwon.ac.kr
