

터널 리스크 평가 기법의 적용성에 대한 연구

김상환¹, 이충환^{*2}

The application of simplified risk assessment for tunnel

Sang-Hwan Kim, Chung-Hwan Lee

Abstract Unexpected ground conditions have always been a major problem for the construction of tunnel. Therefore, it is necessary to evaluate the risk capacity before and/or during construction of new tunnel. This paper presents the simplified risk assessment system using modified stability number (N), namely Underground Risk Index (URI) system, to evaluate the tunnel risk possibility in the design stage. URI is a scoring system for risk possibility by rating the each appraisal elements. The modified stability number (N) which is one of risk factor in the Interaction Matrix parameters such as RQD, UCS, weathering, overburden, stability number, ground water-table, RMR, permeability and so on, is used in the system. In addition, the case study is performed in order to verify the applicability of URI-system in practice.

Keywords: Underground risk index (URI), weighting factor, modified stability number

요지 불확실한 지반의 상태는 항상 터널 건설에 있어서 많은 문제점을 일으킨다. 그러므로 새로운 터널의 건설에 앞서 위험에 대한 평가가 필요하다. 이 논문은 수정된 안정계수를 이용한 간편 위험도 평가 시스템인 URI(Underground Risk Index)를 제안하였다. URI의 평가요소들은 각 요소의 등급에 따라 점수화하여 분석함으로서 설계단계에서 위험 가능성에 대한 평가에 이용이 가능하도록 하였으며, 기존의 Interaction Matrix에서 8개의 설계 요소 중(RQD, 일축압축강도, 풍화도, 안정계수, 토피고, 지하수위, RMR, 투수계수) 안정계수 산정방법을 수정하여 보다 신뢰성을 높였다. 또한 현장적용에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 URI 시스템을 실제현장에 적용하였다.

주요어: URI 시스템, 가중치 계수, 안정계수

1. 서 론

한정된 공간에서 폭발적인 인구의 증가는 지상의 시공간 시설물 및 구조물의 폭파를 불러왔으며, 이에 따라 지하시설물 및 터널 건설에 대한 필요성이 커지고 있으며 국가차원의 연구와 건설프로젝트의 발주가 이루어지고 있다.

이러한 건설프로젝트는 건설기술의 발달에 따라 터널이 점점 심부에 위치하고 있으며 대형화, 다양화 추세에 있으므로 설계·시공 등 공사 전반에 대한 체계적인 위험도 분석 및 관리가 필요한 실정이며, 이미 국외에서는 체계적인 위험도 분석기법에 대한 이론과 연구개발 및 시공실적을 가지고 있다(Choi et. al., 1996; Eskeson et. al. 2004; Arends, 2004). 하지만 국내에서는 위험도 분

석기법 및 관리의 필요성을 인식하고는 있으나, 실제로 터널 개념의 위험도 관리 기법의 연구는 미흡한 실정이다.

이와 관련되어 수행된 기존의 연구들을 보면, Einstein (1992)에 의해 소개된 DAT(Decision aids in tunnelling)기법은 연구된 건설비용과 시간계획 그리고 터널 건설을 기준과는 색다른 방법의 형태로 모델링화 하여 터널 리스크 연구가들의 주목을 받았다(Hass et. al., 2002). 또한, Alvarez Grima 등(2000)이 TBM 수행평가에 있어서 기계특성과 지질학적으로 기록된 640개의 터널 프로젝트 자료에 근거 하여 신경 퍼지 모델을 통합하는 다른 접근을 시도하였다. 이렇게 연구에 의해 평가되어지는 설계상의 리스크들은 리스크 사건들에 따라 분류하게 되는데 그 이유는 첫째, 건설기술자로 하여금 어떤 건설프로젝트에 내재되어 있는 리스크들에 대한 인식을 보다 구체화시키기 위해서이다. 둘째, 건설기술자가 리스크의 발생을 줄이기 위하여 택한 대책은 이들

¹호서대학교 토목공학과 교수

²호서대학교 지반연구실 석사과정

*교신저자: 김상환 (kimsh@hoseo.edu)

리스크가 갖고 있는 특성에 좌우되기 때문이다. 하지만 이러한 리스크를 모든 방면에서 고려하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 본 연구에서는 문현고찰을 통하여 최근 Benardos(2004)에 의해 발표된 터널 위험도 평가방법에서 제시한 터널에 가장 큰 영향을 미치는 8개의 위험 요소(risk factor)들 중에서 안정계수를 보다구체적으로 수정 사용하여, 위험 요소들 간의 영향을 고려한 간편 평가방법을 재정리하여 설계단계에서 위험도를 사전에 예측함으로써 설계단계의 안정성 및 적절성을 신속하게 판단하는데 목적이 있다. 또한 이 연구에서 이러한 간편 위험도 평가기법을 실질적인 설계시공 된 기존터널에 적용 평가한 후 현장조사를 통하여 위험도 예측기법의 적용에 대한 신뢰성을 검증하였다.

2. 설계단계의 리스크 분석기법

2.1 방법론적 평가 방법

현재 우리나라의 터널 설계의 대다수는 지반의 여러 가지 불확실성을 모두 포함하지 못한 채 RMR, Q-system 등을 근거로 하여 일률적인 패턴의 해 시행하고 있다. 이러한 터널 설계에서의 불확실성을 줄이고자 본 연구에서는 Benardos (2004)에 의한 제시한 방법론적 평가방법을 적용하였다. 터널 설계의 방법론적 평가 순서는 첫째, 주요 파라메터들의 증명과 여러 가지 값의 등급선정을 위한 평가이고 둘째, 모델 인자들의 거동과 확률적 모델링의 통계학적인 분산을 정의한다. 셋째, 상관분석 매트릭스(Interaction Matrix)를 통해서 터널 시설 프로젝트 과정 중 해석과 선택된 인자들이 가지는 효과를 수집하고 마지막으로, 위험도 지수를 평가한다. 이렇게 도출된 위험도 지수는 실제 현장에서 터널 굴착 시 직면하게 될 리스크의 정도를 정량적으로 표현할 수 있으므로 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 주요 인자등급 분류 기준 및 방법

터널 설계 시 방법론적 평가의 첫 번째 단계인 주요 인자 선정은 획득이 용이하고, 현장의 지반 상태를 대표하고 공학적으로 신용할 수 있는 특성들을 선별하는 것이다. 이러한 주요 인자들은 개별적으로 또는 복합적으

로 지반의 불확실한 거동에 영향을 주게 된다. 터널의 안정성에 영향을 미치는 대표적인 주요 인자들은 RQD, 풍화도, 안정계수, RMR, 일축압축강도, 토피고, 지하수위 및 투수계수 등을 들 수 있다 (Benardos, 2004; 김상환 등, 2006).

각 주요 인자에 대한 등급분류기준 및 방법에 대하여 Benardos (2004)가 제안된 내용과 수정된 안정계수에 대하여 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

2.2.1 RQD(Rock Quality Designation) (P1)

RQD는 시추코어를 조사하여 암질을 정량적으로 평가할 목적으로 Deere에 의해 개발되었다. Deere의 RQD 지수는 과거 25년동안 특히 북미지역에서 널리 이용되었다. RQD는 Terzaghi의 암반하중 인자를 추정하거나 터널 내 록볼트 지보량을 예측하는데 활용되고 있으나 현재는 RMR과 Q 암반분류법의 중요한 분류변수로 활용되고 있다 (Bieniawski, 1989). 이와 같은 방법으로 지반조사를 통해 RQD의 값이 정량적으로 산정되면 매우 불량, 불량, 양호, 우수, 매우 우수로 분류되며 본 연구에서는 일반적으로 RQD값을 4그룹으로 분류하여 0~3점까지 등급을 정의하여 다음 표 1에 나타내었다.

표 1. RQD에 의한 암반분류 (Benardos, 2004)

RQD(%)	0~25	25~50	50~70	70~100
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.2 풍화도(Weathering degree) (P2)

암석의 풍화정도는 암반의 거동에 매우 중요한 인자로써 암석의 풍화정도에 따라서 6등급(F, SW, MW, HW, CW, RS)으로 나누어지며 풍화등급에 따라 F~SW는 극경암~경암, MW는 보통암~연암, HW는 풍화암, CW~RS는 풍화토로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 풍화도에 따른 인자의 등급은 Benardos가 제시한 표 2와 같이 정의하였다.

표 2. 암석의 풍화정도에 분류방법 (Benardos, 2004)

풍화도	Completely weathered rock	Highly weathered rock	Moderately weathered rock	Fresh rock
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.3 수정안정계수(Modified Stability Number: N) (P3)

안정성계수(N)는 하중계수(Overload Factor)와 같으며, 주어진 응력조건하에서 암반의 자립능력을 나타내는 값이다. 안정성계수 N(P3)은 식 (1)로 정의한다.

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (1)$$

여기서, Q'는 수정 Q 지수(Modified Q Tunnelling Quality Index)를 말하며 A는 암반 응력인자(Rock Stress Factor)로써 심부에 있는 무충진 막장의 자유면에 작용하는 응력의 상태를 반영하는 것으로 무결암의 일축압축강도와 고려하고 있는 굴착 노출면에 평행하게 작용하는 응력으로 결정된다.

구 분	A값
$\sigma_c/\sigma_1 < 2$	A = 0.1
$2 < \sigma_c/\sigma_1 < 10$	$A = 0.1125 \sigma_c/\sigma_1 - 0.125$
$\sigma_c/\sigma_1 > 10$	A = 1.0

B는 절리방향성 보정인자 (Joint Orientation Adjustment)로써 막장의 안정성에서 절리의 영향에 관한 인자이며, 임계 절리면과 굴착면의 방향성 차이에 좌우된다. C는 중력보정인자(Gravity Adjustment Factor)로써 막장 천정의 낙반과 슬래빙 파괴 등 중력의 영향에 대한 보정인자이며, 막장면의 경사에 의해서 좌우되어 진다 (Provin, 1988).

수정 Q 지수인 Q'은 응력보정계수인 SRF를 1.0으로 설정하는 것을 제외하고는 표준 NGI 암반분류법(Q 분류법)과 동일한 방식으로 암반의 구조지질조사 결과로부터 계산된다. 이 시스템은 유출수가 심한 조건에서는 적용하는데 문제가 있기 때문에 지하수 보정계수 Jw는 일반적으로 1.0으로 둔다. 이러한 과정은 절리암반의 강도를 추정하기 위해 사용된 것과 동일하다.

하중계수(N)의 등급계산방법은 개선하였으나 등급에 대하여서는 Benardos (2004)가 제시한 표 3과 같이 5보다 크면 0점, 3~5이면 1점, 1.25~3이면 2점, 1.25보다 작으면 3점으로 정의하였다.

표 3. 하중계수(N)에 의한 분류 (Benardos, 2004)

하중 계수(N)	5이상	3~5	1.25~3	1.25이하
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.4 RMR(Rock mass quality represented) (P4)

RMR(P4)은 Bieniawski(1989)가 제안한 방법으로, 1974년 발표 이 후 여러 해 동안 더 많은 현장사례들을 참고하여 계속해서 개정되었으며, 분류변수들에 대한 평점 부여 방법이 매우 변화되었다. 이 분류체계를 적용하기 위해서는 암반을 지질학적 조건들이 유사한 몇 개의 구조지역으로 나누고 각 지역에 대해 독립적으로 암반분류를 수행한다. 구조지역의 경계는 보통 단층과 같은 주요 구조적 특징이나 암종의 변화 경계와 일치한다. 어떤 경우에는 동일 암종 구간 내에서도 불연속면의 간격과 특징에 큰 변화가 있으면 이 구간을 다시 다수의 소규모 구조지역으로 구분하는 것이 필요할 수도 있다. RMR의 등급은 표 4와 같이 20이하 이면 0점, 20~40 이면 1점, 40~60 이면 2점, 60이상이면 3점으로 정의하였다.

표 4. RMR에 의한 분류 (Benardos, 2004)

RMR	20이하	20~40	40~60	60이상
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.5 암석의 일축압축강도 (P5)

암석의 일축압축강도(P5)는 암의 자립특성을 나타내는 인자로 현장에서 보통 점하중 강도 또는 Schmidt hammer를 사용하여 추정하게 된다. 점하중 강도를 이용할 때는 통상 ASTM이나 ISRM에서는 암종이나 지질학적 생성 과정에 관계없이 직경방향 점하중 강도의 23 배(ASTM) 혹은 20~25배(ISRM)로 추정하며, 이는 1975년 Bieniawski에 의해 검증된 경험식에 의한다. 이러한 암석의 일축압축강도를 등급에 따라 점수화 시켰을 때 그 등급은 표 5와 같이 30MPa이하 0점, 30~70MPa이면 1점, 70~100MPa이면 2점, 100MPa이상이면 3점으로 나타낼 수 있다.

표 5. 암의 일축압축강도에 의한 분류 (Benardos, 2004)

일축압축 강도	30MPa 이하	30~70 MPa	70~100 MPa	100MPa 이상
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.6 토피고 (P6)

토피고(P6)는 지표로부터 터널의 천단부까지의 거리로 다음 그림 1에 나타낸 것과 같다.

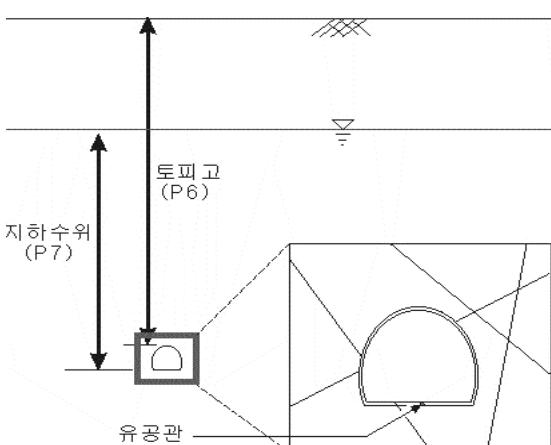


그림 1. 지하 공간의 개념도

터널 굴착시 토피고가 굴착 크기에 따른 영향 반경을 고려하였을 때 토피고가 충분치 못할 경우 연직토압의 급격한 변화를 일으킬 수 있으며 이로 인한 천단변위가 증가와 지하공동의 막장에 작용하는 수평응력이 수직응력보다 커질 수 있는 가능성으로 인해 막장의 위험도가 증가한다. 또한 아침효과와 이완하중에 의한 주변지반의 하중전이 현상 등을 고려하여 토피고에 따른 등급을 점수화하면 7.5m보다 작으면 0점, 7.5m~12.5m 이면 1점, 12.5m~17.5m 이면 2점, 17.5m 이상이면 3점으로 표 6과 같이 나타날 수 있다.

표 6. 토피고에 의한 분류 (Benardos, 2004)

토피고	7.5m 이하	7.5m~ 12.5m	12.5m~ 17.5m	17.5m 이상
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.7 지하수위 (P7)

그림 1에 나타내어진 것처럼 지하수위(P7)는 지하수위 지점부터 터널의 인버트(바닥)까지의 거리이다. 암의 절리(joint)를 따라서 지하수가 터널내부로 유입되면 터널 외곽 배면을 따라 하부 인버트의 유공관으로 집수하게 되기 때문에 실제 수두의 높이는 지하수위로부터 터널 바닥까지의 높이를 말한다. 지하수위가 막장보다 높게 위치할 경우 지하수에 의한 수압의 작용으로 막장에 가해지는 하중이 증가하며 암반의 투수계수 및 절리 등에 의한 지하수의 침투류 및 침투압 등을 고려하였을 때 막장의 위험도가 증가하게 된다. 따라서 지하수위가 막장에 거의 영향을 미치지 않는 터널 바닥 높이 이하의 지하수위를 최적으로 하였을 때 Benardos (2004)가 제시한 기준에 따라 등급을 점수화 하면 그 등급은 10m 이상 0점, 5m~10m 1점, 0~5m 2점, 0 이하 3점으로 표 7과 같이 정의할 수 있다.

표 7. 지하수위에 의한 분류 (Benardos, 2004)

지하수위	10m 이상	5m~10m	0~5m	0 이하
등급	0점	1점	2점	3점

2.2.8 암반의 투수계수(P8)

암반의 투수는 암반의 절리면을 따라서 이루어지는데 대표적인 투수시험법은 Lugeon Test(수압시험)이다. 이 시험법은 균열암반에서 특정구간에 대해 일정압의 압력을 주입하여 주입압력과 주입량과의 관계로부터 대상 지반의 투수성을 파악하고 수압파괴가 일어날 수 있는 최소압력을 구하기 위하여 사용한다. 다공질 매체뿐만 아니라 균열 암반까지 거의 모든 매체에 적용 가능하며 매체의 투수성에 따라서 Lugeon 값이 달라지며 1 Lugeon은 주입압력 10kgf/cm^2 (10bar) 하에서 주입길이 1m당 주입량을 ℓ 단위로 나타낸 것으로 분당 1 ℓ 의 주입량을 보일 때를 말하며 이는 투수계수 10^{-8}m/s 와 거의 같다. 일반적으로 Lugeon값이 5미만인 지층을 완전 불투수층으로 보고 있으며 1Lugeon일 때의 투수계수를 최적으로 보고 투수계수에 따른 등급을 점수화하면 그 등급은 10^{-4}m/s 이하 0점, $10^{-4} \sim 10^{-6}\text{m/s}$ 이면 1점, $10^{-6} \sim 10^{-8}\text{m/s}$ 이면 2점, 10^{-8}m/s 이상일 경우 3점으로 표 8과 같이 구분할 수 있다.

표 8. 암반의 투수계수에 의한 분류 (Benardos, 2004)

암반의 투수계수	10^{-4} m/s 이하	$10^{-4} \sim 10^{-6}$ m/s	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ m/s	10^{-8} m/s 이상
등급	0점	1점	2점	3점

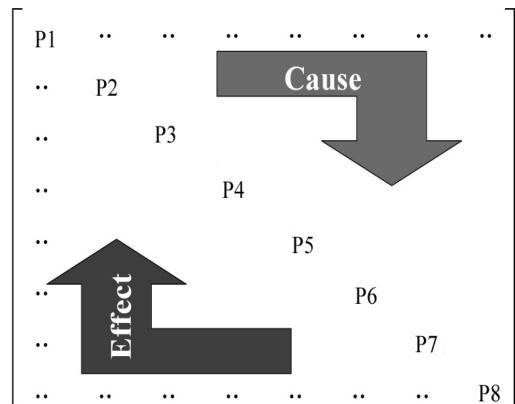
2.3 주요인자 상호연계성 고찰

지금까지 터널 조성 시 리스크를 가져올 수 있는 가장 중요한 요소 8가지를 설명하였다. 이 8가지에 대해서 이론적으로 모든 인자는 각각에 대해서 독립적이며, 최종 결과가 편중될 가능성이 있으므로 중복적인 계산은 피해야 하지만 위의 인자들 중에는 서로 중복되어있는 것도 있을 수 있다.(RQD와 RMR 등) 그럼에도 불구하고, 각각의 파라메타가 일어날 수 있는 문제들에 대해서 특정한 결과로 사용되어지는 어려움 때문에 본 연구에서는 이러한 것은 고려하지 않았다. 예를 들어 RQD 값은 암반의 파쇄정도를 표현하는데 사용 되는데 반해서 RMR은 암반의 질을 표현하고 굴착면의 자립시간의 평가지표로 사용된다. 따라서, 이러한 자료를 포함하는 선택은 모델의 식별 능력을 더욱더 향상되게 하고, 총체적인 리스크지수 뿐만 아니라 발생 가능한 문제 또는 파괴 모드 표시를 도울 수 있다. 예를 들면 같은 RMR 값을 가진 경우이고, 유사한 거동이 기대된 곳이라 할지라도, 파쇄와 절리가 다르면 상이한 안정성 조건에 이르게 된다.

3. Interaction Matrix System

터널의 지반 내에 설치되는 구조물은 많은 변수들과 그들 간에 존재하는 메커니즘들의 동역학적인 process-response에 의해 지배되는 매우 복잡한 시스템일 뿐만 아니라 주변 환경을 이루는 여러 시스템들과 질량과 에너지를 끊임없이 교환하며 상호작용관계를 맺고 있는 open system 이기도하다. 따라서 시스템이 보유하고 있는 모든 변수들과 그들의 상호관계를 충분히 표현할 수 있는 다양한 메커니즘들에 의한 연동문제를 충분히 고려할 수 있는 시스템적 접근 방법론이 요구된다. Hudson(1992)은 Interaction Matrix를 이용하여 암반 공학적 문제를 해결할 수 있도록 시스템적 접근 방법에 기초한 RES (Rock Engineering System) 개념을 제안하였다. Interaction Matrix는 복잡한 시스템에서 야기되는

많은 변수들과 메커니즘들을 각각 주대각선 항과 비대각선 항에 수용할 수 있다. 이러한 방법을 그림 2에 나타내었다.

**그림 2.** Interaction Matrix의 개념도

위와 같은 개념으로 8가지의 리스크 주요 인자들을 배치한 후 그들 간의 상호 작용성 여부를 다음 표 9에 따라 점수를 부여한다.

결국 터널 굴착 시 리스크의 Interaction Matrix는 다음 그림 3과 같이 표현되어지는데, 이를 분석한 결과 RQD(P1)는 풍화도(P2)에 절대적으로 영향을 미치고, RMR(P4)과 투수계수(P8)는 강한 상호 작용(Strong interaction)을 가진다. 마찬가지로, 투수계수(P8)는 토피고(P6)와 무관하고 압축강도(P5)와는 약간의 상호관계(Weak interaction)가 있는 것으로 나타난다.

표 9. 상호관계정도와 등급

등급	상호관계정도
0	무관 (No interaction)
1	약한 상호관계 (Weak interaction)
2	보통의 상호관계 (Medium interaction)
3	강한 상호관계 (Strong interaction)
4	절대적인 상호관계 (Critical interaction)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
C1	RQD	4	1	4	1	1	4	3
C2	2	풍화도	1	4	4	1	2	4
C3	3	1	안정계수	2	2	3	0	2
C4	1	2	2	RMR	3	0	2	4
C5	3	1	3	4	압축강도	2	0	1
C6	3	1	4	2	1	토피고	3	1
C7	4	4	2	4	3	1	지하수위	2
C8	1	2	3	2	1	0	3	투수계수

그림 3. 리스크의 Interaction Matrix

4. URI (Underground Risk Index)

각각의 인자가 시스템이 미치는 가중치를 얻기 위해 서는 다음의 절차를 따라 계산되어야 한다. 먼저, Matrix는 시계방향의 규칙을 사용하는 인자들의 ‘원인’(Cause: C)과 ‘효과’(Effect: E)로 표현된다. 더욱 더 구체적으로, 그림 2 처럼 시스템 내에서 다른 모든 인자와의 영향으로 표현된 P_i 를 통해서 행을 따라가면 각각의 값들은 I_{ij} 가 되고 부호화된 값들을 합하게 되면 ‘원인’(Cause: C)이 되고 반대로 위의 방법과 같이 열을 따라서 값을 합하면 ‘효과’(Effect: E)가 된다. 이러한 평가방법을 수식화 하면 식 (2)와 식 (3)과 같이 정의 된다.

$$C_{Pi} = \sum_{j=1}^n I_{ij} \quad (2)$$

$$E_{Pj} = \sum_{i=1}^n I_{ij} \quad (3)$$

여기서 E_{Pj} 는 인자가 시스템에 의해서 영향을 받는 범위를 말하며, C_{Pi} 는 인자가 시스템에 영향을 주는 범위를 나타낸다. 이렇게 각각의 인자가 서로 영향을 미치는 정도의 값을 C 와 E 의 값을 합산하여 나타내고 ($C+E$) 시스템 내에서 인자의 중요성의 지표로서 활용한다. 이러한 방법으로 선택된 등급을 통한 $C+E$ 막대그래프는 그림 4와 같이 나타난다.

결국 위의 사항을 이용하여, 각각의 인자가 시스템에 미치는 기중치를 얻는 방법은 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$k_i = \frac{(C_i + P_i)}{(\sum_i C_i + \sum_i E_i)} (\%) \quad (4)$$

여기서 C_i 는 i 번째 파라메타의 원인을 말하며, E_i 는 i 번 째 파라메타의 효과를 나타낸다. 그리고 i 는 주요 파라메타들의 개수를 말한다. 즉, 기중치(k_i)는 각 파라메타들의 원인과 효과의 총 합을 합한 값과 i 번째의 원인과 효과의 합에 대한 비를 말한다. 위의 식을 이용하여 (P1)~(P8)까지의 기중치를 분석한 결과 다음 표 10과 같이

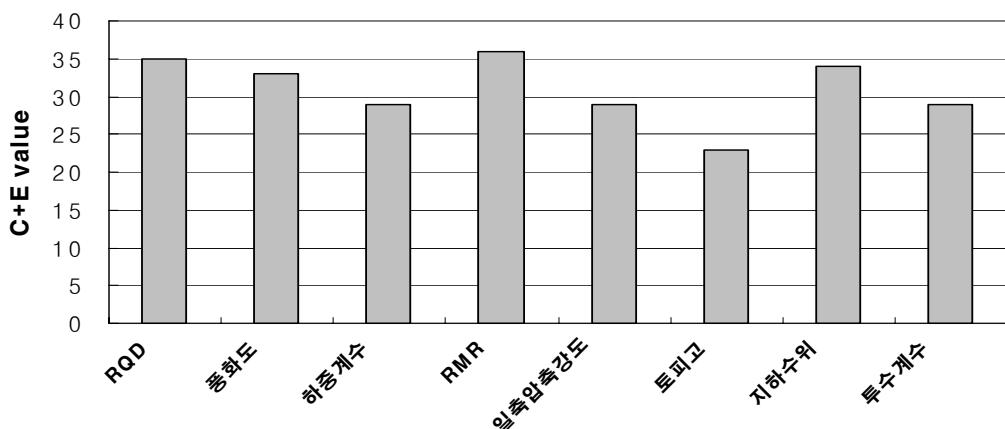


그림 4. 주요 인자와 Cause + Effect 값 (Benardos, 2004)

표 10. 주요 인자의 가중치 (Benardos, 2004)

주요 인자	RQD	풍화도	N	RMR	일축압축강도	토피고	지하수	투수계수
k_i (%)	14.11	13.31	11.69	11.69	11.69	9.27	13.71	11.69

표 11. URI의 범주 (Benardos, 2004)

낮은 URI (I)		중간 URI (II)		높은 URI (III)	
I a	I b	II a	II b	III a	III b
0	33		66		100
매우 적음	적음	보통	보통이상	위험	매우 위험

나타난다.

결국 이들은 파라메타 가중치 k_i 와 각 i 번째 해당하는 배점(P_i)들의 선형조합으로 이루어지며 n개의 인자들의 총합으로 계산할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 거쳐서 터널 조성 시 위험도의 지표가 되는 URI (Underground Risk Index)를 산정하게 되는데 그 식은 식(5)과 같다.

$$URI = \left(100 - \sum_{i=1}^n k_i \frac{P_i}{P_{\max}} \right) \quad (5)$$

여기서, P_{\max} 는 정규화 요소로서 변수가 취할 수 있는 최대값이다. 이와 같은 방식으로 산정한 URI는 Benardos (2004)의 제안과 동일하게 표 11에 나타난 바와 같이 0~100의 백분율로 표현이 되며, 양호한 조건(URI가 낮음)에서 리스크가 많은 불량한 조건(URI 높음)으로 판별할 수 있다.

이를 3개의 범주로 분류한다면 0~33, 33~66, 66~100의 범주로 나눌 수 있다.

결국 위와 같은 위험도 예측기법을 따라서 URI 평가를 수행하게 되면 특정 구간의 위험도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 여러 방면의 리스크를 사전에 예측·대책 수립을 할 수 있을 것이다.

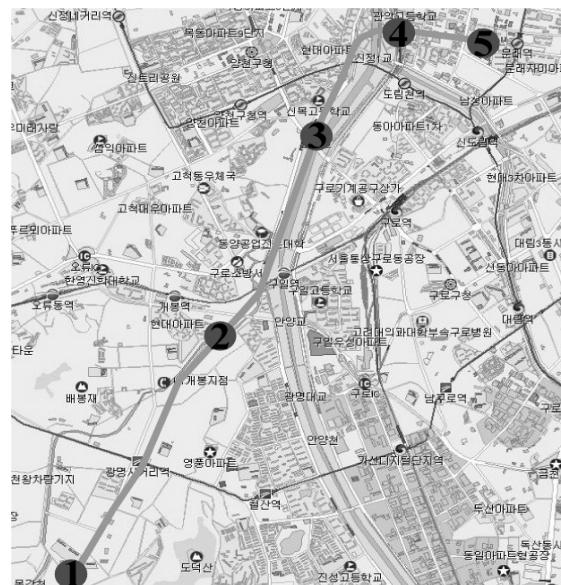
5. 설계 리스크 평가 시스템의 현장 적용

5.1 개요

본문에서 제안한 URI system의 현장 적용성을 검증하기 위하여 대상터널에 대한 설계 리스크 평가를 실시하였다. 또한, 현장조사를 통하여 평가결과와 비교분석하여 신뢰성을 검증하였다. 이를 결과에 대한 내용을 구

체적으로 설명하면 다음과 같다.

5.2 대상터널의 현황 및 지형특성

**그림 5.** 주 대상터널의 위치 및 수직구 구간

대상터널은 00지역의 국내 터널구간을 Shield TBM과 Open TBM을 병행으로 시공한 곳으로써, 소단면의 전력구 터널이다. 하상 퇴적물과 불연속면의 발달 또는 석회공동이 예상되는, 대부분이 심하게 풍화된 경암층에 시공되었다. 심도는 깊고 지하수의 수위가 높은 지역으로써, 리스크요소가 잠재되어 있는 곳이었다. 본 지역 일대의 산계는 노선의 남동부에 △△산 등 해발 200m 이내의 노년기 구릉성산지가 분포하며 노선 경과지에는 일부 구간을 제외하고는 거의 전 구간에 걸쳐 충적층이

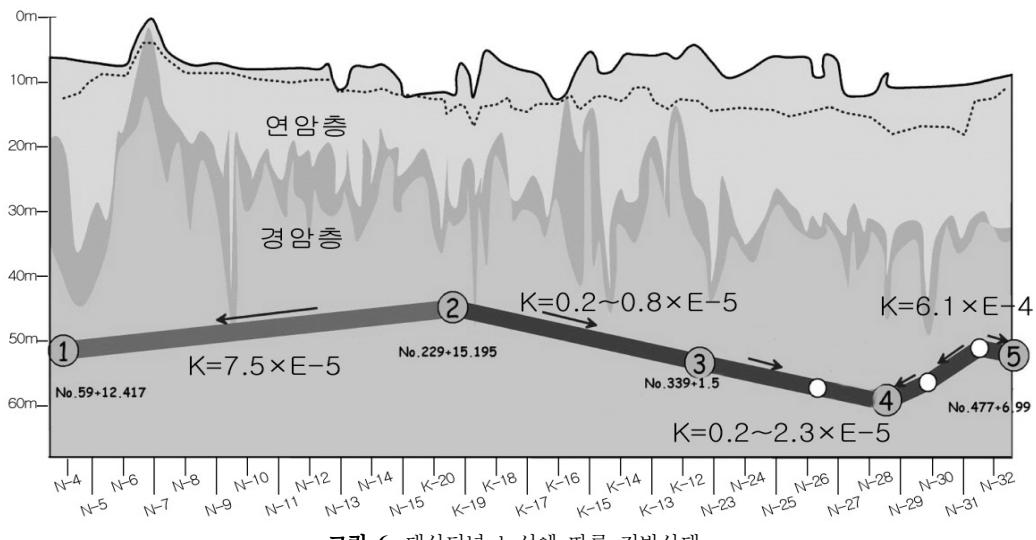


그림 6. 대상터널 노선에 따른 지반상태

표 12. 대상터널 노선에 따른 지반특성 분석

구분	1~2수직구구간(A) < N-4 ~ N-11>	1~2수직구구간(B) < N-11 ~ K-19>	2~3수직구구간 < N-19 ~ K-12>	3~4수직구구간 < K-12 ~ N-28>	4~5수직구구간 < N-28 ~ N-32>
분포	매립층 - 퇴적층 - 풍화대 - 기반암				
기반암	흑운모 호상 편마암	흑운모 호상 편마암	흑운모 편마암	흑운모 호상 편마암	
지하수위(m)	-13.1 ~ -16.6	-0.8 ~ -20.2	-2.38 ~ -8.04	-2.65 ~ -2.59	-0.91 ~ -8.5
암반등급	4~5	3~5	3등급이상	3등급이상	2~3
투수계수 (cm/sec)		토사층 (7.4×10^{-4}) 암반층 (7.5×10^{-5})	$0.2 \sim 8.0 \times 10^{-5}$	$0.2 \sim 2.3 \times 10^{-5}$	토사층 6.1×10^{-4}
특이사항	석회암지대로 TBM 굴진 시 다량의 용출수 발생	불량한 암반층에서 작업구내 오수유입			비교적 신선한 상태, 부분적으로 단층 및 단층점토가 발달

분포한다. 이 층적층은 계획노선 구간에 위치한 하천들의 범람에 의하여 형성된 것으로 예측되며 터널노선에 따른 지반을 나타내면 그림 6과 같고, 터널의 노선별로 지반특성에 대한 분석 결과는 표 12와 같다.

5.3 간편 위험도 평가 (URI-System 적용)

URI-system을 이용한 위험도 평가는 터널 건설 시 발생할 수 있는 위험도를 설계 단계에서 전문적인 현장 조사기법 없이 얻을 수 있는 기본적인 지반 조사 자료만을 가지고 손쉽게 예측할 수 있는 평가 시스템이다. URI

평가를 위해 선정된 주요 파라메타들은 암반의 종합적인 거동에 영향을 미치는 대표적인 파라메타들만을 선정하였다.

직용대상터널 구간의 URI를 평가하기 위하여 터널 노선에 따른 지반특성 분석 결과를 이용하여 상기 선정된 파라메타들의 등급을 점수화 하여 각 구간별로 분석하였으며, 그 결과는 그림 7(a)~(h)와 같다. 선정된 주요 파라메타의 점수화된 등급은 URI 평가를 위한 입력자료이며, 이렇게 계산된 각 파라메타들의 분석에 따른 결과를 보았을 때, RQD와 RMR은 Interaction Matrix

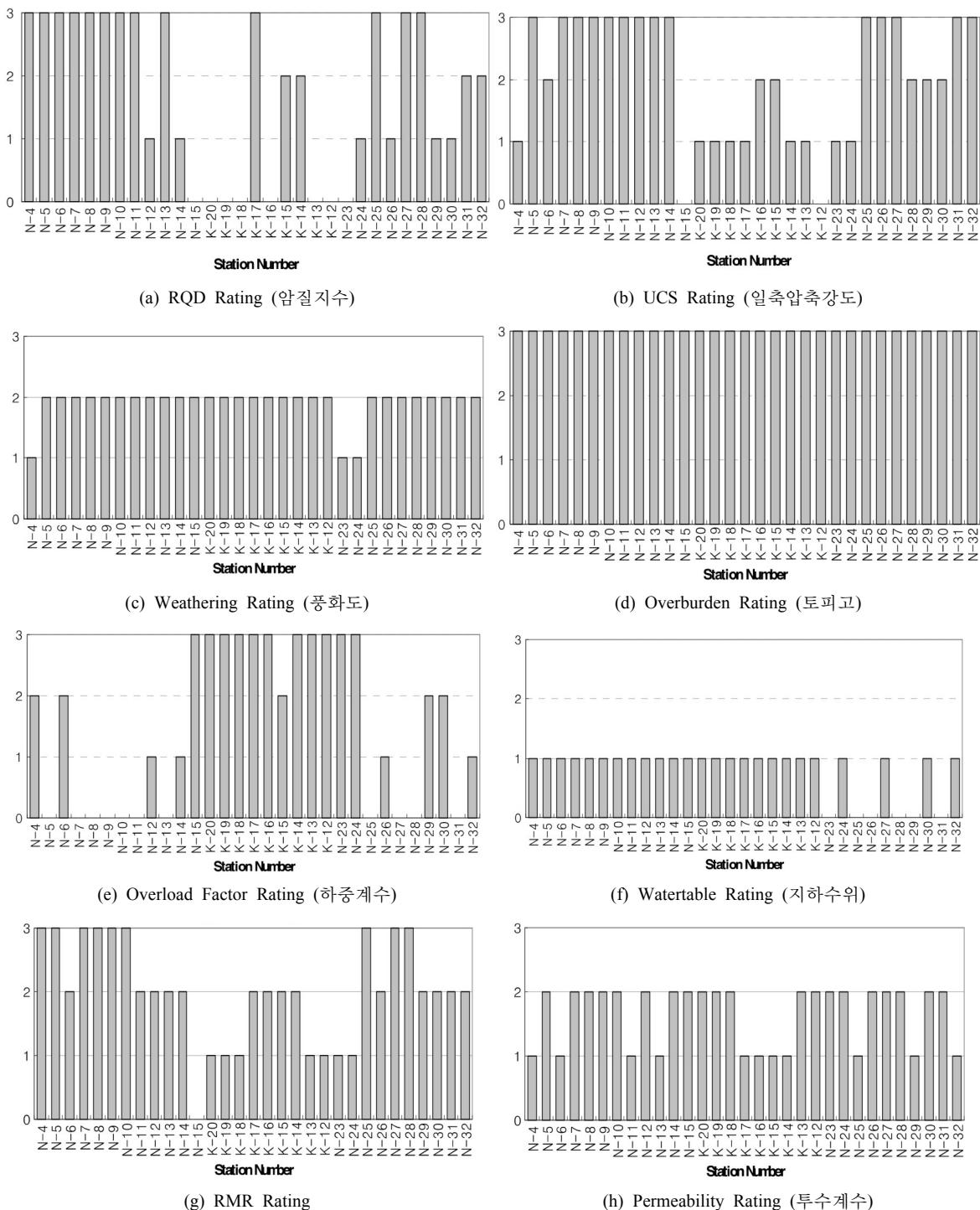


그림 7. 각 구간별 선정 파라메타 등급

표 13. 적용대상터널 URI 평가

	URI 0 20 40 60 80	Station No.	URI 값	위험도 평가	현장 조사
N-4	37	적음(I b)	보통(II a)	부분적으로 단층 및 단층점토가 발달하였으나 비교적 신선한 상태의 암반이 분포함에 따라 URI 40 이하의 양호한 상태로 실제 시공시 별다른 문제 없었음	
N-5	27		적음(I b)		
N-6	33		보통(II a)		
N-7	27		적음(I b)		
N-8	27		보통(II a)		
N-9	27		보통(II a)		
N-10	27		보통(II a)		
N-11	35		보통(II a)		
N-12	39		보통(II a)		
N-13	35		보통(II a)		
N-14	39		보통(II a)		
N-15	60		보통이상(II b)	불량한 암반층으로 다른 구간에 비해 굴진속도 저하된 것으로 조사됨	
K-20	47		보통(II a)		
K-19	47		보통이상(II b)		
K-18	51		보통(II a)		
K-17	34	보통(II a)	불량한 암반층에서 작업구내 오수 유입이 발생		
K-16	45				
K-15	38				
K-14	39				
K-13	51				
K-12	55				
N-23	56				
N-24	51	보통이상(II b)	석회암 지대로 TBM 굴착시 다량의 용출수가 발생하였으나 URI가 비교적 양호하게 평가된 것은 지하수 파라메타의 배점이 다소 낮게 평가된 것으로 판단 배점기준 변경필요.하지만 안전에는 큰 문제가 없는 것으로 조사됨		
N-25	35				
N-26	39				
N-27	27				
N-28	36				
N-29	48	적음(I b)			
N-30	40				
N-31	41				
N-32	37				

에서 서로 절대적인 상호관계를 가지고 있지만, 그림 7에서와 같이 구간별로 등급의 차이를 보이는 것은 앞서 언급한 듯이 두 파라메타가 중복되는 경향이 있지만 서로 나타내는 것에 차이가 있고 그에 따른 영향이 다르기 때문이다. 따라서 이는 중복되는 경향이 있는 인자들의 사용이 타당함을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 또한, 수정안정성계수(N)는 식 (1)에서 계산하고 factor A의 결정은 공동경계면에 작용하는 유도 압축응력에 대한 무결암 강도의 비(σ_o/σ_1)로 결정되어지는데, 안정성계수(N)의 값이 작을수록 등급의 배점이 높아지므로 계산 factor A의 값이 작아야 한다. 이는 일축압축강도의 값이 작아져야함을 의미하는 것으로 그림 7에서 일축압축강도(UCS)와 안정성계수(N)를 비교하였을 때 일축압축

강도의 배점이 낮은 구간에서 안정계수(N)의 배점이 높음을 알 수 있다.

5.4 사례연구 결과 및 분석

표 13은 각 위치별로 산정된 위험도 지수인 URI를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 위치별로 차이가 있지만 대상구간의 위험도 지수인 URI는 최저 27에서 최고 60의 범주에 속하며 평균 40에 해당한다. 이를 부분적으로 살펴보면 굴착초반구간에는 URI가 40 이하로 비교적 양호한 값을 나타내고 있는데 실제 이 구간 시공 중에는 별다른 문제없이 굴착이 진행된 것으로 확인되었다. 한편 N-15, K18, K13~N24구간은 URI가 50이상을 보이고 있어 IIa 단계 이상의 위험도를 가

지고 있으며, 시공 구간들을 분석한 결과 이 구간의 굴진속도가 다소 줄어든 것으로 파악되었으나 지반조사결과 RMR이 평균 30점대로 예측되었기 때문에 굴착 중 큰 어려움은 없는 것으로 파악되었다.

N-25~N-27 구간에는 석회암이 분포하였는데, 일반적으로 석회암구간은 공동의 발달로 인하여 용출수가 많을 가능성이 내재되어 있다. 실제 이 구간은 공사 당시 다양한 용출수를 내뿜는 공동이 발견되었으며, 이후 같은 수맥권으로 보이는 대형의 석회암 공동이 추가 발견되었다. 그러나 N-25~N-27 구간에 평가된 URI는 27 ~39로 30점대 중반인 비교적 양호한 II-a 구간에 속하여 URI가 제대로 평가되지 않았는데, 이는 석회암 공동을 조사당시 예측하지 못하여 지하수 파라메타의 위험도가 현장보다 다소 낮게 평가된 것에 기인한 것으로 파악된다. 상기사례연구를 통하여 본 논문에서 개발한 간편 위험도 분석기법의 적용성이 사전 터널의 위험도를 예측하는데 매우 유용함을 알 수 있었다. 특히 URI 값과 터널전진시공속도의 상관관계에 있어서는 그림 8과 같이 위험도가 높을 수록, 즉, URI 값이 클수록 터널 전진시공속도가 감소됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 간편 위험도 분석을 통하여 사전에 터널시공기간예측등에도 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

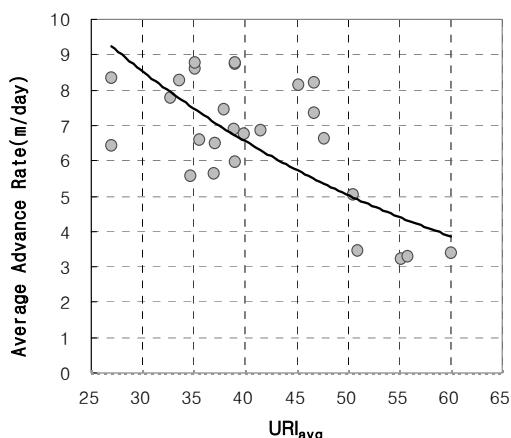


그림 8. URI 와 터널전진속도의 상관관계

6. 결 론

현재 지하 공간 시스템 설계 및 해석에 적용되는 기준

의 방법론들은 시스템이 보유하는 모든 변수들과 그들의 상호관계를 충분히 표현할 수 없을 뿐만 아니라 다양한 메커니즘들에 의한 연동문제도 충분히 고려하지 못하므로 Hudson (1992) 및 Benardos (2004)에 의하여 제안된 위험도평가방법에서 Interaction Matrix System을 이용하여 그중 수정안전계수를 사용하여 터널 건설시 위험도를 간편하게 평가해내는 URI기법을 제시하였다.

이와 같은 연구는 기존의 위험도 분석 평가에 관한 연구들과는 달리 이상화된 건설공사에 대해서 위험도 분석을 실시한 것이 아니라 실제 건설되어진 지하공간에 URI를 직접 적용함으로서 실질적인 위험도의 정량화를 나타내었다는데 큰 의의를 둘 수 있다. URI 평가를 수행하게 되면 특정 구간의 위험도를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 여러 방면의 위험을 사전에 예방할 수 있을 것이다. 설계단계는 RQD, 암반의 풍화도, 수정안정계수, RMR, 일축압축강도, 토피고, 지하수위, 암반의 투수계수의 평가요소를 기준으로 확립하여 정량화하고, 이에 따라 설계 단계의 간편하게 위험도를 평가하는 시스템을 제시하였다.

본 논문에서는 터널의 위험도를 평가할 때 입력 파라메타가 여러 가지 불확실성을 가지므로 하나의 값으로 표현되는 한계를 가지고 있으므로 향후 기존 방법에서 위험요소의 산정방법이 수정된 위험도 분석 기법에 확률론적인 분석 방법인 몬테카를로 시뮬레이션 방법 등 다양한 확률론이 포함된 방법으로 파라메타 값들을 재평가하여 불확실성을 줄인다면, 현재의 평가 기법보다 지하공간 설계시 위험도를 평가 하는데 체계적이고 합리적인 기법이 될 것으로 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 “대단면터널 굴착안전에 대한 위험 분석 연구”(과제번호 : 20040378)로써 호서대학교 교내연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상환, 고경국, 이준식, 방규민 (2006), “지하공동 굴착안전에 대한 위험도 분석연구”, 한국지반공학회 가을학술발표, pp. 769.

-
2. Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C. (2004), "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 41, Issue 6, September pp. 987-999.
 3. Bieniawski, Z. T. (1989), "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons, pp. 51-72.
 4. Eskesen, D., Tengborg, P., Kampmann, J., Holst, V. T. (2004), "Guidelines for tunnelling risk management", International Tunnelling Association, Working Group No. 2-1", Tunnelling & Underground Space Technology, pp. 259-269.
 5. Einstein, H. H., Dutt, J.P., Halab, V. B., Descoudres, F. (1992), "Decision Aids in Tunneling Principle and Practical Application Monograph", Swiss Federation Office of Transportation, pp. 207-231.
 6. Arends, G., Bielecki, R., Castle, J., Drabek, S., Haack, A., Nedbal, F., Nordwark A., Sterling, R. (2004), "Risk Budget management in progressing underground works, International Society for Trenchless Technology (ISTT) and International Tunnelling Association (ITA) Joint Working Group Report", Tunnelling and Underground Space Technology 19, pp. 29-33.
 7. Hudson, J.A. (1992), "Rock engineering systems: Theory and practice", Chichester, UK, Ellis Horwood Limited.
 8. Choi, H.H., Cho, H.N. (1996), "Risk assessment methodology for underground construction projects", Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 11, pp. 108-120.
 9. Hass, C., Einstein H.H. (2002) "Updating the decision aids for tunnelling", J. Construct. Eng. Manage. Volume 128, Issue 1, pp. 40-48.
 10. Grima M. A., Bruines P.A., Verhoef, P.N.W. (2000), "Modelling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods." Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 15, Issues 3, pp. 259-269.



김상환

호서대학교
토목공학과
교수

E-mail: kimsh@hoseo.edu



이충환

호서대학교
지반연구실
석사과정

E-mail: supermidas@hanmail.net