

터널 붕괴 위험도 지수(KTH-index)에 기반한 터널 설계안의 정량적 사전 위험도 시뮬레이션

신휴성¹, 권영철^{1*}, 김동규¹, 배규진², 이홍규³, 신영완⁴

Quantitative preliminary hazard level simulation for tunnel design based on the KICT tunnel collapse hazard index (KTH-index)

Hyu-Soung Shin, Young-Cheul Kwon, Dong-Gyou Kim, Gyu-Jin Bae, Hong-Gyu Lee, Young-Wan Shin

Abstract A new indexing methodology so called KTH-index was developed to quantitatively evaluate a potential level for tunnel collapse hazard, which has been successfully applied to tunnel construction sites to date. In this study, an attempt is made to apply this methodology for validating an outcome of tunnel design by checking the variation of KTH-index along longitudinal tunnel section. In this KTH-index simulation, it is the most important to determine the input factors reasonably. The design factor and construction condition are set up based on the designed outcome. Uncertain ground conditions are arranged based on borehole test and electro-resistivity survey data. Two scenarios for ground conditions, best and worst scenarios, are set up. From this simulation, it is shown that this methodology could be successfully applied for providing quantitative validity of a tunnel design and also potential hazard factors which should be carefully monitored in construction stage. The hazard factors would affect sensitively the hazard level of the tunnel site under consideration.

Keywords: KICT tunnel collapse hazard index (KTH-index), preliminary evaluation of tunnel hazard level, neural network based sensitivity analysis, tunnel design

요 지 이전 연구를 통하여 터널 굴진에 따른 터널 막장의 붕괴 위험에 대한 잠재 수준을 정량적으로 평가하기 위한 틀인 KTH-index(KICT Tunnel Collapse Hazard index) 지수화된 위험도 수준 표현 틀을 개발한바 있으며, 이는 다수의 시공현장에 성공적으로 적용되어 왔다. 본 연구에서는 제안된 터널 위험도 지수를 기반으로 수행된 터널 설계안의 전 중단구간에 대해 정량적인 위험도 수준을 시뮬레이션 하는 새로운 설계안 적정성 평가 방법을 제안하였다. 본 KTH-index 기반 시뮬레이션에서 가장 중요한 것은 시뮬레이션을 위한 입력항목의 결정이며, 대부분의 설계안 관련 항목과 시공관련 항목은 직접적으로 설계안으로 부터 결정될 수 있으나, 불명확한 지반조건은 설계 당시 때 수행된 시추조사와 전기비저항 탐사를 기초로 준비된다. 이때, 낙관적 시나리오와 비관적 시나리오에 기반한 터널 중단 지반조건 시나리오가 설정되었다. 이러한 위험도 시뮬레이션을 통해서, 시뮬레이션 대상 설계안에 대한 위험도 수준을 사전에 파악할 수 있었으며, 사전에 파악된 요소의 구간은 시공단계와 연결시켜 시공 중 계측이나 막장관찰 시에 요긴하게 활용될 수 있는 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 터널 붕괴 위험도 지수, 사전 위험도 평가, 인공신경망, 민감도 분석, 터널 설계

1. 서 론

사회기반시설의 대형화 및 도심지 시설의 지하화 등 대형 터널에 대한 사회적 요구가 높아짐에 따라 터널 붕괴사고에 대한 체계적인 대응방법과 위험도 정량화 방안이 시급하게 요구되고 있다.

지금까지는 터널 시공에 따라 노출되는 막장에서 조

사와 관찰을 실시하여 정보를 수집하며, 이를 이용한 현장 기술자의 공학적 판단과 계측 결과를 동시에 검토하여 안전성 여부를 판단한 후 향후 굴진 계획을 수립하고 있다. 또한, 터널 공사에 따른 위험도 평가는 다분히 정성적이며 경험에 기초한 판단에 의존하고 있으며, 공사 현장의 터널 붕괴 가능성에 대해 과학적으로 입증할 수 있는 근거가 없어 정부나 각 지자체의 경우도 터널공사 현장의 안전관리 감독에 어려움이 많다. 따라서 갑작스런 지반조건 변화나 시공 중에 발생할 수 있는 취약 시공 조건에 대해 터널 붕괴 위험도라는 개념 위에서 터널 설계를 검토하고 평가하며, 터널 시공이 어느 정도의 위

¹정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

²정희원, 한국건설기술연구원 선임본부장

³정희원, 두산건설 토목사업본부 토목설계팀 부장

⁴정희원, (주)하경엔지니어링 상무이사

* 교신저자: 권영철 (E-mail: kyc@kict.re.kr)

협수준에서 실시되고 있는 지에 대해 정량적으로 제시할 수 있는 범용화된 수단이 필요하다. 이러한 목적으로 다양한 터널현장에 대한 위험도 평가 틀이 제안되어 왔다(Benardos & Kaliampakos, 2004; 김상환과 이충환, 2007; 김영근과 김도형, 2008). 하지만 대부분의 위험도 평가틀 들은 위험도 수준을 지수화 하는 방법을 따르고 있으며, 이러한 지수화 방법에 있어서 공통적으로 결정되어야 하고 지수값에 가장 민감하게 반영되는 것이 설정된 평가인자에 부여되는 가중치이다. 대부분의 제안 틀들은 이러한 가중치의 결정상에서 설문조사나 전문가의 직관 등 인위적인 방법으로 결정되는 경우가 많아, 객관성 확보 상에서 문제가 제기되어 다양한 터널 현장에 범용적으로 적용되지 못한 경향이 있다.

이러한 현실인식을 바탕으로 한국건설기술연구원에서는 상관도 행렬개념과 각 영향인자의 가중치를 산정하는 체계를 기반으로 터널 붕괴 위험도 지수(KICT Tunnel Hazard Index, KTH-Index)라는 새로운 평가 체계를 제안하였다(배규진과 신후성, 2007; 한국건설기술연구원, 2008; Shin et al., 2009). 또한, 터널 위험도 지수는 인공신경망 민감도 해석기법을 활용하고 있으며 이를 위해 한국건설기술연구원 내에 구축된 터널 붕괴 사례 데이터베이스를 분석하여 각 인자간의 민감도를 의미하는 상관도 행렬의 각 항들을 객관적으로 결정할 수 있도록 하였다.

현재까지 터널 붕괴 위험도 지수 평가 시스템은 주로 터널의 설계시공 자료 및 터널 시공 중 얻어지는 막장관찰 자료를 활용하여 터널 굴진 중의 막장 위험도 수준을 파악할 목적으로 활용되어 왔다. 그러나 터널 설계안이 주어진 지반 조건의 불확실성 및 설계 시 상정한 시공 조건 하에서 적절한 위험도 수준을 유지하고 있는지에 대해 검증하여 설계안의 타당성 및 건전성을 사전에 평가하고자 하는 접근법의 개발에 관한 시도가 거의 이루어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널 붕괴 위험도 지수 평가 시스템을 이용하여 터널 설계안에 대한 타당성을 검증하기 위한 사전 평가 목적으로의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 터널 붕괴 위험도 지수 개념과 지수평가 시스템을 활용하여 00덤 비상여수로 터널 설계안에 대한 굴진별 위험도 수준의 변화추이를 검토하였으며, 이를 통해 설계에 반영된 지반조건 및 시공 조건 등의 타

당성을 정량적으로 파악하고자 하였다. 본 검토를 통해 산출된 터널 중단선형에 대한 터널 붕괴 위험도 수준 변화 추이는 추후 시공단계에서 실제 매 막장에서 관찰되는 지반조건 및 지보패턴 변경 등과 같은 시공조건과 연계하여 시공 중 터널 붕괴 위험도 평가 및 관리 시에 직접적으로 활용될 수 있다. 또한 각 구간별로 터널 굴진 중 터널 붕괴 위험도에 민감하게 영향을 미칠 수 있는 주요 인자들을 사전에 파악하고 민감도를 바탕으로 위험도 수준을 저감시키기 위한 효율적인 대책방안을 마련할 수 있는 합리적 근거를 제시하고자 한다.

사전 시뮬레이션에서 가장 중요한 입력데이터를 체계적으로 설정하기 위해 기하학적 특성 등 고정된 설계 정수 이외의 불확실성을 내포하고 있는 지반조건 및 시공 조건은 시추조사가 이루어진 지점에서 RMR 자료 등을 이용하여 각 평가항목과 전기비저항 간의 상관관계를 직선회귀분석을 통해 얻어냈다. 이 결과를 터널 중단방향으로 조사된 전기비저항 값을 이용하여 미시추구간의 지반조건 추정에 확장적용하였으며, 직선 회귀선과 평행하고 상·하방으로 30% 정도의 데이터가 포함된 영역의 경계를 각각 낙관적인 조건과 비관적인 조건으로 설정하여 설계안을 검토하였다.

2. 터널 붕괴 위험도 지수(KTH-Index) 평가 시스템

2.1 시스템의 핵심기술

본 시스템을 구성하는 핵심기술은 인공신경망기법과 이에 기반하여 구축된 비선형 감도 분석 기법이다. 인간은 특정한 문제에 있어 원인과 이에 따른 효과를 이용하여 훈련하게 되면 실제 경험하지 않았지만 훈련 받은 상황과 유사한 문제에 대한 예측이 가능하다. 인공신경망(artificial neural network, ANN) 기법은 이러한 인간의 뇌와 매우 유사한 작용을 하며 뇌의 작용과 같이 훈련을 통해 문제에 대한 패턴을 추론하고 유사 문제를 예측할 수 있는 컴퓨터 해석 기법이다(Hudson, 1992). 본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 개발 구축 중인 터널붕괴사례 데이터베이스를 통해 얻은 자료를 코드화하여 인공신경망 학습엔진을 이용해 학습을 수행하였다. 사용된 인공신경망 구조는 입력층(13개 노드)과 출력층(13개 노드)의 형태와 2개의 은닉층(26개 노드)으로 구

성하였다(그림 1). 본 인공신경망은 mirror형 구조를 갖으며 일반적인 원인과 결과로 이루어진 학습을 통한 추론 목적이 아닌, 각 영향인자들 간의 민감도(1차 편미분값)를 산정하기 위해 사용된다(Shin, 2001). 또한 본 연구에서는 최신의 학습알고리즘인 Resilient propagation algorithm(RPROP)과 최적의 학습을 위해 early-stopping method를 도입하여 인공신경망의 학습을 수행하였다. 인공신경망 기반 비선형 민감도 분석기법은 다양한 지반 공학적 문제에 영향을 미치는 항목들 간의 상호 민감도를 제시하며, 이러한 민감도를 내포한 다양한 형태의 자료를 간단한 인공신경망 학습을 통해 이루어진다. 또한, 본 연구에서는 다수의 항목간의 복잡한 상호연계 상관관계를 개념적으로 표현 가능하게 하는 상관도

행렬(interaction matrix) 개념을 도입하였다. 이러한 영향인자간의 상관도 표현방식은 매우 간단하지만, 이를 정량적으로 활용 하는데는 많은 어려움이 따른다. 먼저 이런 개념을 활용하여 현장자료를 정라분석하고 적용하는데 있어서 각 인자간의 민감도를 나타내는 각 행렬항의 민감도 값을 어떻게 결정하느냐 하는 것이 문제의 핵심이다(Shin, 2001). 따라서 본 연구에서는 상관도 행렬의 각 항을 그림 2와 같이 각 영향인자간의 편미분으로 표현하고, 상기한 인공신경망 민감도 해석기법 연계시켜 인공신경망 학습을 통해 상관도 행렬을 정량적인 민감도 값으로 구성할 수 있는 일련의 계산과정을 개발하였다(배규진과 신휴성, 2007).

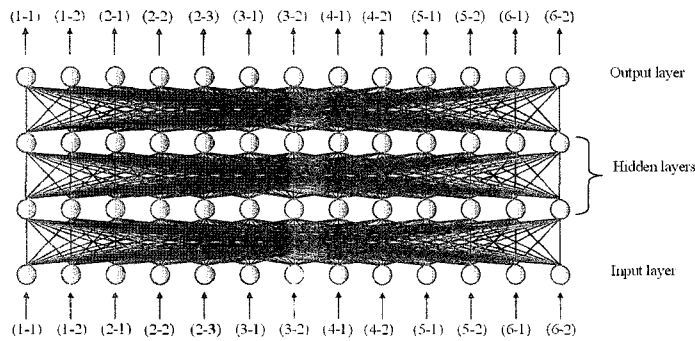


그림 1. 인공신경망 민감도 분석을 위해 사용된 mirror형 인공신경망 구조

Weights	KICT TUNNEL HAZARD INDEX (KTH-INDEX)												Causes C_i	
$W_{1,1}$	(1-1)													$\sum R_1$
$W_{1,2}$	(1-2)													$\sum R_2$
$W_{2,2}$		(2-1)												$\sum R_3$
$W_{2,4}$			(2-2)											$\sum R_4$
$W_{2,1}$				(2-3)										$\sum R_5$
$W_{3,1}$	(3-1)													$\sum R_6$
$W_{3,2}$					(3-2)									$\sum R_7$
$W_{4,1}$						(4-1)								$\sum R_8$
$W_{4,2}$							(4-2)							$\sum R_9$
$W_{5,1}$								(5-1)						$\sum R_{10}$
$W_{5,2}$									(5-2)					$\sum R_{11}$
$W_{6,1}$										(6-1)				$\sum R_{12}$
$W_{6,2}$											(6-2)			$\sum R_{13}$
Effects E_i	$\sum C_1$	$\sum C_2$	$\sum C_3$	$\sum C_4$	$\sum C_5$	$\sum C_6$	$\sum C_7$	$\sum C_8$	$\sum C_9$	$\sum C_{10}$	$\sum C_{11}$	$\sum C_{12}$	$\sum C_{13}$	$\sum R_{13}$

그림 2. 각 영향인자간 편미분으로 표현된 상관도 행렬

2.2 터널 붕괴 위험도 지수의 산정

그림 2에 적용된 상관도 행렬의 기본개념에 의하면, 대상 영향인자 항의 수평 행(row)은 이외의 영향인자들에 대한 대상 영향인자가 미치는 원인(cause)을 의미하며, 결과적으로 상관도 행렬의 각 행의 합은 각 영향인자가 전체 시스템에 미치는 원인을 나타낸다. 같은 개념으로, 대상 영향인자 항의 수직 열(column)은 이외 영향인자들이 대상 영향인자에 미치는 영향을 의미하므로 결과(effect)에 해당된다. 여기에서 각 영향인자(i)가 전체 시스템의 원인에 대한 영향정도는 C_{π} 로 표현되며, 결과에 대한 영향 정도는 E_{π} 로 표현되며 두 값은 다음 식으로 계산된다.

$$C_{\pi} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} (I_{mn}), \quad m = i \quad (1)$$

$$E_{\pi} = \sum_{m=1}^{m_{\max}} (I_{mn}), \quad n = i \quad (2)$$

여기서 I_{mn} 은 $m \times n$ 행렬로 구성된 상관도 행렬 각 항의 값을 의미하며, n_{\max} 는 총 열수, m_{\max} 는 총 행수를 나타낸다. 각 영향인자에 부여되는 영향 가중치의 계산은 시스템의 원인 값(C_{π})과 결과 값(E_{π})의 합에 대한 백분율로써 표현하는 것으로 하며 다음과 같은 식으로 산정할 수 있다.

$$W_i = \frac{(C_{pi} + E_{pi})}{(\sum C_{pi} + \sum E_{pi})} \times \frac{100}{N_{grade}} \quad (3)$$

여기서 N_{grade} 는 각 영향인자 i 에 설정된 등급의 개수

이다. 설정된 영향인자는 터널의 붕괴/붕락에 영향을 미치는 인자들이고 붕괴에 불리하게 작용하는 정도로 등급을 부여하였으므로, 상기의 식으로 계산된 값은 주어진 터널현장의 터널 붕괴/붕락에 대한 ‘위험도’를 나타내는 지수로써 사용될 수 있다. 따라서 붕괴/붕락에 대한 ‘터널 위험도 지수’를 KICT Tunnel Collapse Hazard Index(KTH-Index)로써 명명하며 다음과 같은 식으로 KTH-Index값을 최종적으로 결정하였다.

$$KTH-Index = \sum (W_i V_i) \quad (4)$$

여기서 V_i 는 영향인자 i 에 대한 주어진 현장에서 얻어진 등급을 의미한다. 본 연구에서는 낙관적 시나리오 및 비관적 시나리오를 가정하여 각 영향인자에 대한 등급에 해당하는 입력 데이터를 설정하고 식 (4)를 통해 산정된 터널 붕괴 위험도 지수의 추이를 통해 설계안에 대한 사전검토를 수행하였다.

2.3 터널 위험도 지수 평가도표

산정된 터널 붕괴 위험도 지수는 현장에서 발생한 물리적 현상과 연결 지어 설명되어야 하며, 어느 정도로 위험한 수준인지를 평가하기 위한 적절한 방안이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 평가도표를 작성하기 위하여 현재까지 수집된 100여개의 터널 붕괴사례에 대하여 위험도 지수를 산정하고 각 붕괴사례별 위험도 지수의 표준 통계분석을 실시하였다. 수집된 붕괴사례에서 얻은 위험도 지수의 정규분포곡선(그림 3)과 누적분포곡선(그림 4)을 작성하고 기 설정된 붕괴 확률 수준에 따라 위험도 수준을 총 4개 구간으로 구분하였다.

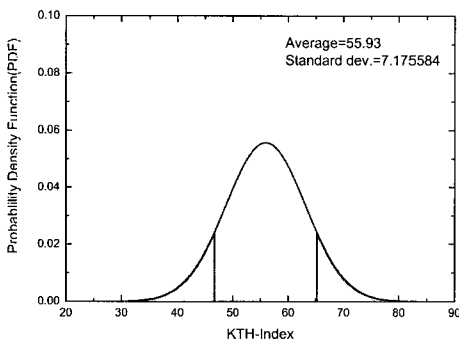


그림 3. 터널 붕괴사례에 대한 KTH-Index값 정규분포곡선

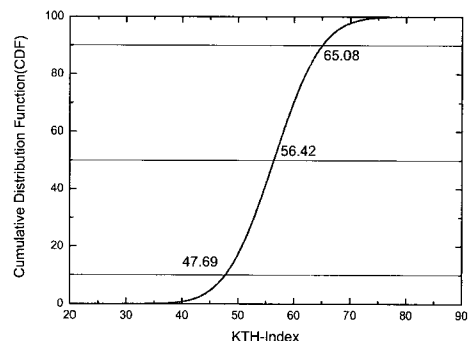


그림 4. 터널 붕괴사례에 대한 KTH-index값 누적정규분포곡선

기본 통계분석을 통해 적용된 붕괴사례의 위험도 지수의 분포현황은 평균값이 56수준이었으며 표준편차는 7.2 정도의 수준이었다. 누적정규분포곡선을 통해 붕괴 사례 중 가장 작은 위험도 지수인 '42'에서 붕괴확률 10%수준의 위험도 지수인 '48'까지의 구간을 위험도 수준 I로 설정하였다. 위험도 수준 II등급은 붕괴확률 50%수준으로 설정하였으며, 이때의 위험도 지수는 '56'이 된다. 같은 방법으로 위험도 수준 III은 붕괴 확률 90%까지는 '65'의 위험도 지수 값을 갖고 있었으며 마지막 등급인 위험도 수준 IV는 65 이상의 값으로 설정되었다. 그림 5는 이와 같은 과정을 통해 결정된 터널 위험도 지수 평가도표를 나타내고 있다. 본 평가도표는 기 확보된 터널 붕괴사례에 기반을 두어 작성되므로, 터널 붕괴사례 데이터베이스가 확장되고 기 확보 자료의

보완이 이루어짐에 따라 지속적으로 수정되며 신뢰도 또한 향상할 것이다.

3. 터널 위험도 지수를 이용한 설계안 사전 검토 사례

3.1 현장 개요

터널 위험도 지수를 이용한 설계안에 대한 사전 검토 사례로 활용된 본 현장은 00댐에서 기존 여수로에 추가로 비상 여수로를 확보하기 위해 시공되었으며 각각 총 연장 558 m와 549 m의 터널 1과 터널 2로 설계되었다. 설계 구간 내 시중점부의 일부 개착구간(총 8 m)을 제외하고 대부분 NATM으로 설계되었다. 그림 6은 대상 구간의 평면도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 터널 1과

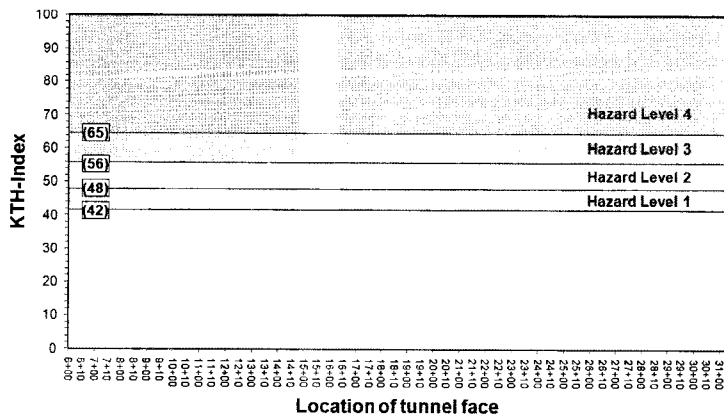


그림 5. 터널 시공 위험도 지수 평가도표

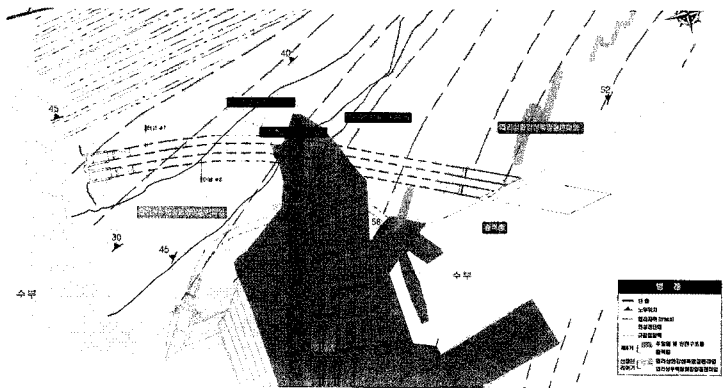


그림 6. 검토 대상 사례인 00댐 비상여수로 평면도

터널 2의 설계조건, 시공조건 및 지반조건이 크게 다르지 않으며 해석 결과 역시 유사한 경향으로 나타났으므로 이하에서는 터널 1에 적용한 사례를 중심으로 기술하였다.

3.2 설계안 검토 모델 설정

3.2.1 터널 붕괴 위험도 지수의 평가 인자

터널 붕괴 위험도 지수 평가를 위해서는 그림 7에 나타난 바와 같이 (1) 기하학적 특징, (2) 지질조건, (3) 불연속면 조건, (4) 지하수조건, (5) 굴착조건, (6) 지보/보강 수준의 6개 대분류 카테고리에 따라 총 15개 항목의 입력데이터의 준비가 필요하다. 통상 시공 중 수행하는 터널 위험도 평가에서는 막장관찰 자료를 중심으로 설계도서 및 시공현황 자료를 활용하여 평가를 위한 입력데이터를 준비하지만, 본 터널 설계안 검토에서는 다수의 지반조건 관련 입력항목들이 가상의 모델링 전략 하에 설정되어야 한다. 본 00뎀 비상여수로 공사에 대한 평가에서는 아직 시공이 이루어지기 전에 설계안에 대한 평가이므로 입력데이터를 준비하는데 있어 통계적 방법 및 몇 가지 가정조건을 통해 시추조사가 이루어진 지점의 성과를 미시추 구간을 포함한 전체 구간으로 확장시켜야 할 필요가 있다.

3.2.2 지반정수 모델링 전략 수립

터널 붕괴 위험도 지수를 활용한 터널 설계안 위험도 수준 평가는 시공 중의 붕괴 위험도 평가의 경우와는 달리 위험도에 가장 민감하게 작용하는 지반조건이 제한된 시추조사 결과에 의존하게 된다. 또한, 여굴 발생

등의 다양한 시공조건에 대해서도 설계에서 고려되는 것과 같이 이상적인 상황에서 모델링 하게 된다.

본 논문에서는 보다 체계적인 모델링 접근을 위하여 설계단계에서 가용할 수 있는 시추조사결과와 전기비저항 탐사 결과를 충분히 활용하도록 하였다. 지반조사 결과는 시추공에서 획득한 시추심도별 RMR 평가 자료와 전기비저항 값의 회귀분석을 통해 상관관계를 도출하고 직선 회귀선과 평행하고 상하방으로 30% 정도의 데이터가 포함된 영역의 경계를 각각 낙관적인 조건(upper-bound condition)과 비관적인 조건(lower-bound condition)으로 설정하였다. 낙관적 관계식과 비관적 관계식을 이용해 각 조건별로 미시추구간의 지반정수들을 전기비저항 값을 통해 결정하였다.

그림 8은 터널 굴착 예정지의 종단방향에 따른 전기비저항의 분포를 보이고 있으며, 그림 9는 각각 암석강도, RQD 및 불연속면 상태와 전기비저항과의 관계를 나타내고 있다. 상기 언급한 바와 같이 터널 종단방향 전기비저항 분포 및 직선 회귀선을 중심으로 해당 지점의 입력데이터를 낙관적인 조건과 비관적인 조건에 입각하여 정리하였다.

그림 10은 각각 풍화도와 지하수 유입량의 분포를 나타내고 있다. 이들 두 값은 지반강도 등과 같이 연속적인 값을 갖는 지반정수와는 달리, 등급으로 표현되므로 회귀분석을 이용하여 관계식을 결정하는 것이 어려우며, 따라서 비관적인 조건은 해당항목의 전체 등급 중 하위 20%, 낙관적인 조건은 상위 80%에 해당되는 등급으로 입력치를 설정하여 터널 붕괴 위험도 지수를 산정하였다.

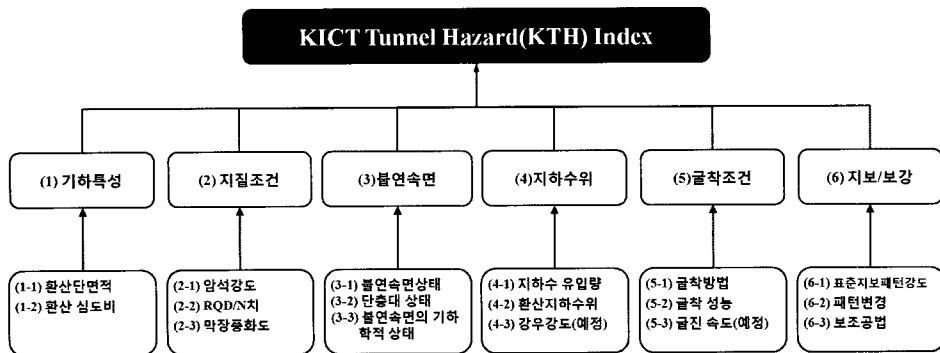


그림 7. 터널 붕괴 위험도 지수의 평가 인자 (주요 위험도 영향인자)

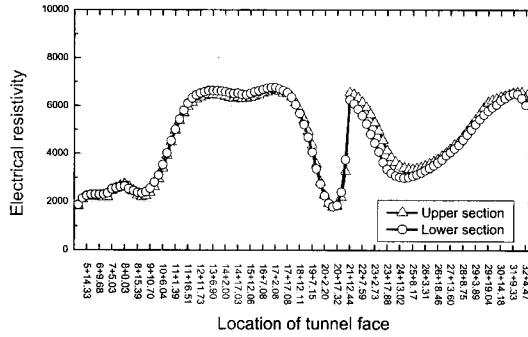


그림 8. 터널 굴착 예정지 종단방향의 전기비저항 분포

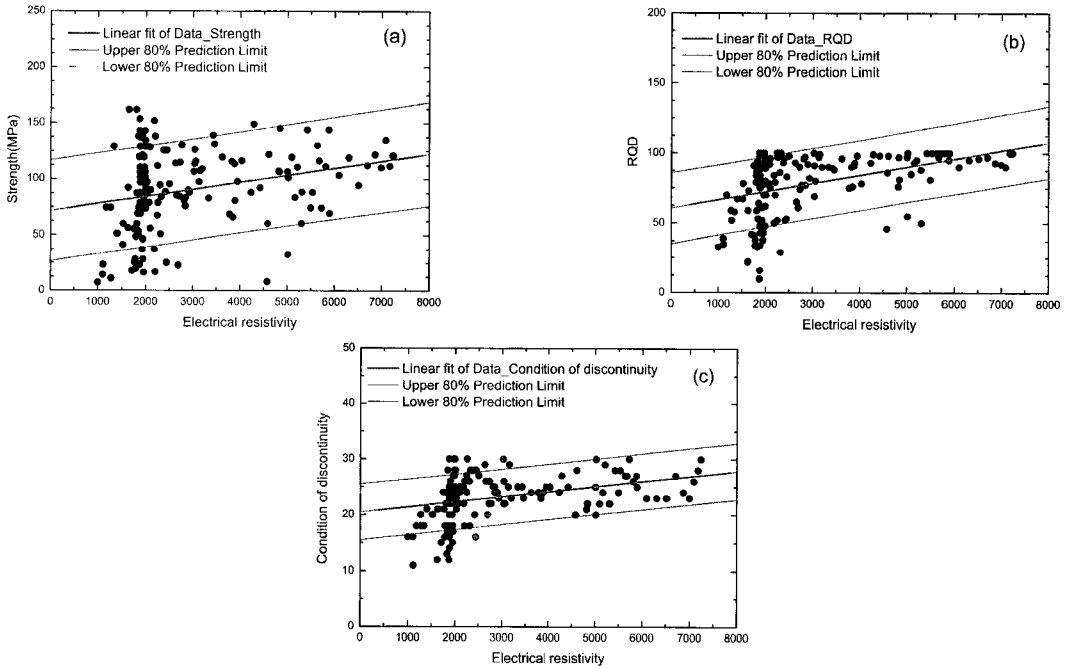


그림 9. 연속값을 갖는 시추조사 항목과 전기비저항의 상관관계

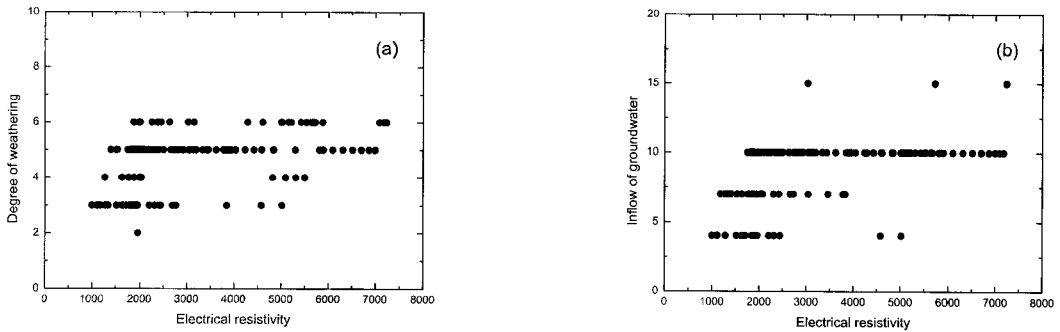


그림 10. 등급으로 표현되는 시추조사 항목과 전기비저항의 상관관계

3.2.3 설계인자와 시공조건 모델링 방법

터널 시공 중에 수행되는 터널 붕괴 위험도 지수 평가에서는 조밀한 간격으로 지수가 산정되어 지수의 변화 추이 관찰이 이루어지지만, 설계안 검토를 위한 위험도 지수 평가에서는 작업의 효율성을 고려해 터널 종방향으로 5 m 간격으로 위험도 지수를 산정하였다. 또한 실제 시공이 이루어지지 않으면 평가가 어려운 시공 조건에 해당하는 여공량 등은 설계시 설정된 페이라인(pay line)을 기준으로 산정하였다.

또한, 환산 굴착단면적 산정에는 상하반 굴진시 각각 굴착되는 토공량을 기준으로 산정하였으며, 환산 심도비 계산은 굴착 후 최종 굴착 단면적으로 기준으로 산정하였다. 따라서 상반 굴착시에는 굴착단면 높이를 기준으로 환산 심도비가 계산되나 하반굴착시의 환산 심도비 계산은 상반을 포함한 최종 터널 굴착높이를 기준으로 산정된 것이다.

3.3 터널 종단선형에 대한 입력데이터 추이

본 연구에서 설정한 지반정수 모델링 전략에 입각하

여 총 4개의 터널 붕괴 위험도 평가 모델이 설정되었다. 모델 설정변수로는 상하반 분할굴착 모델, 셋째는 낙관적인 지반조건과 비관적인 지반조건이다. 그림 11과 그림 12는 각각 낙관적인 조건과 비관적인 조건하에서 터널 종방향으로 변화하는 각 영향인자별 입력 데이터의 변화 추이를 나타내고 있다.

3.4 터널 굴진에 따른 각 입력항목의 가중치 변화 추이(비선형 지수 모델)

본 연구에서는 터널 굴진에 따른 붕괴 위험도 지수 산정시 각 입력항목의 가중치가 변화하지 않는 선형 지수 모델과 각 평가 막장마다 주어진 입력치의 변화에 따라 입력항목의 가중치가 변화하는 비선형 지수모델 등 두 가지 모델을 함께 사용하였다. 비선형 모델 적용시, 터널 굴진에 따라 각 입력항목의 가중치가 변화하고, 변화하는 가중치는 최종 지수 산정에 영향을 미치므로, 각 구간마다의 입력항목의 가중치 변화추이 분석을 통해 지수 산정에 민감하게 작용하게 되는 입력항목(주요 영향인자)들과 그 영향 정도를 추정할 수 있다.

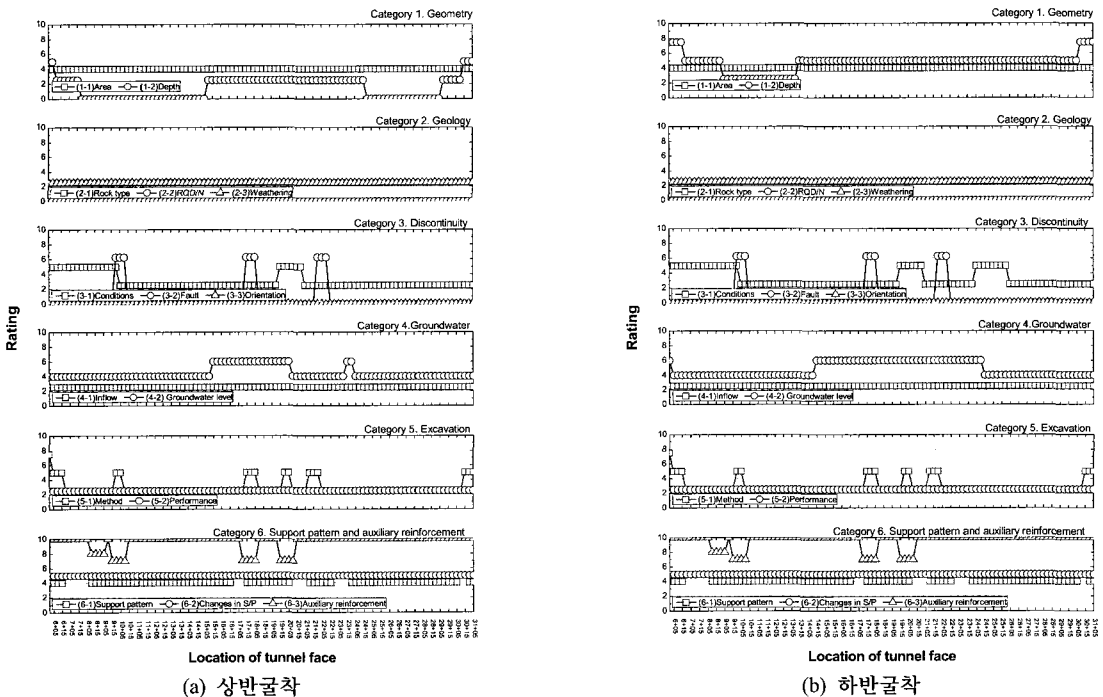


그림 11. 낙관적인 지반조건하에서의 입력데이터 변화 추이

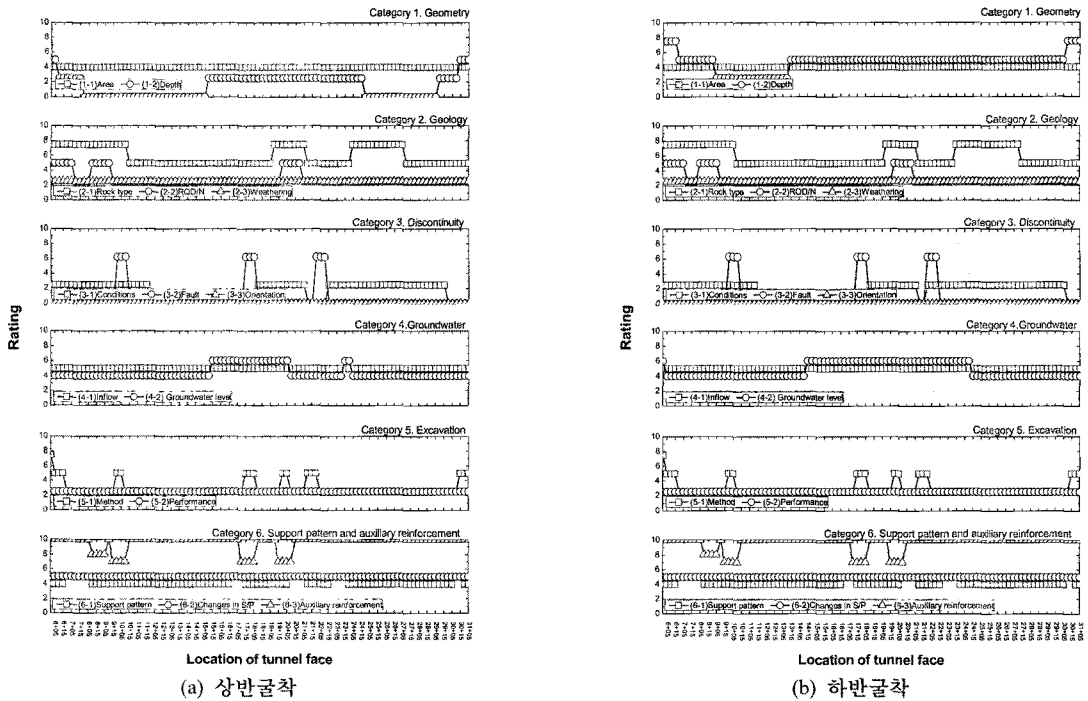


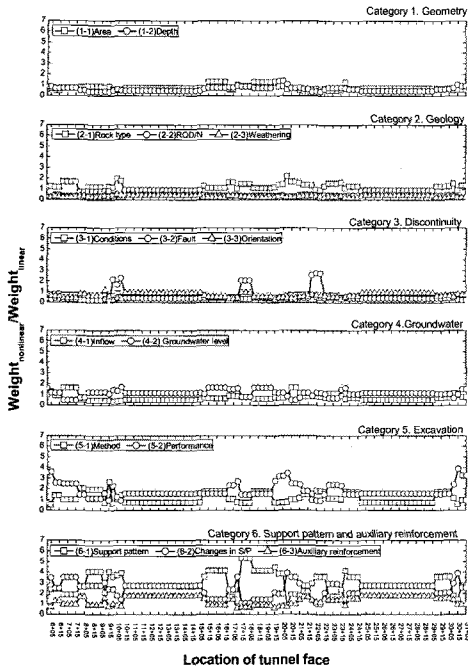
그림 12. 비관적인 지반조건하에서의 입력데이터 변화 추이

본 연구에서 수행한 사전 평가를 통해 구간별 각 입력 항목의 가중치 변화추이 분석을 통해 실제 터널 굴진 중에 특히 관심을 가져야 하는 영향인자들이 어떤 것인지를 제시할 뿐만 아니라, 위험도 수준 저감을 위해 가장 효율적으로 조정될 수 있는 영향인자를 제시할 수 있게 된다. 즉, 상대적으로 가중치가 큰 영향인자의 조정은 보다 큰 폭의 위험도 지수 저감효과를 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 13과 그림 14은 앞에서 언급된 총 15개의 영향인자에 대한 비선형 가중치 변화추이를 선형 가중치에 대한 비율로 도시한 그림이다.

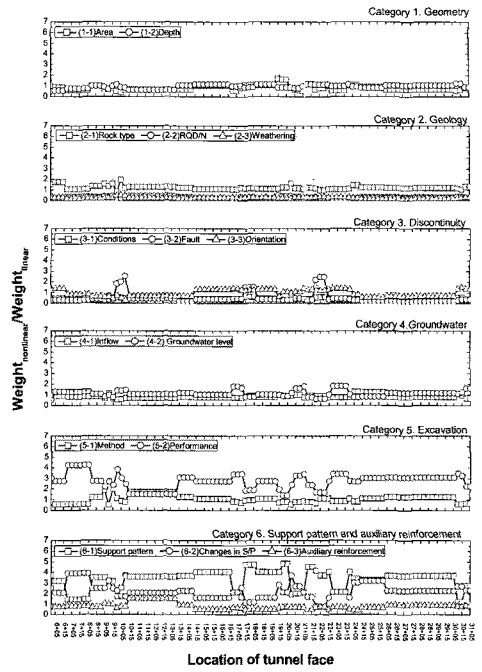
낙관적인 지반조건을 가정한 그림 13를 통해서도 터널 단면과 토피고 등 중단선형 관련 설계 항목인 터널의 기하학적 특성의 민감도는 그다지 높지 않는 것을 파악할 수 있다. 또 No. 17과 No. 20 구간과 같은 일부 구간에서는 단층대와 지하수위 항목이 상대적으로 높은 민감도를 유지하고 있었다. 본 해석 결과를 통해 주목할 점은 시공 관련 항목의 높은 민감도 수준이다. 설계 항목인 보조공법 관련 항목(6-3)은 크게 민감하게 작용하고 있지 않은 것으로 분석되었으나 그 외의 시공항목인

지보패턴의 강도(6-1) 항목과 지보패턴 조정여부(6-2) 및 굴착 성능(5-2) 항목이 전 구간에 걸쳐 매우 민감하게 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다. 특히 단층대 및 암반등급이 낮은 구간을 통과하는 때에는 ‘지보패턴 조정관련 영향인자’가 매우 지배적으로 위험도 지수에 영향을 미치게 되므로, 해당 구간을 굴진하는 도중에 막장 관찰 등을 통해 위험요인이 인지된다면 즉각적인 지보패턴 조정으로 매우 효율적인 위험도 수준 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 그림 13에서 알 수 있듯이, 암반등급이 양호한 구간을 포함한 전체적인 구간에서 지보패턴 조정이 위험도 지수 변화에 매우 민감하게 영향을 미치므로, 암반등급이 양호한 구간에서도 지보패턴을 하향 조정하는 경우에 면밀한 현장 위험도 요인 조사를 수행하는 등 주의가 필요할 것으로 판단된다.

비관적인 지반조건을 가정한 그림 14의 경우에도 전체적인 경향은 낙관적인 지반조건을 가정한 경우와 크게 다르지 않았다. 하지만 상반굴착 시 No. 24~No.29는 막장의 RQD 값이 위험도에 상대적으로 민감하게 작용

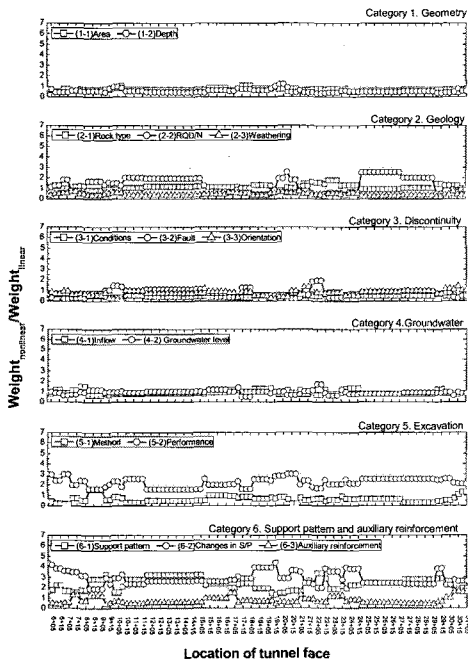


(a) 상반굴착

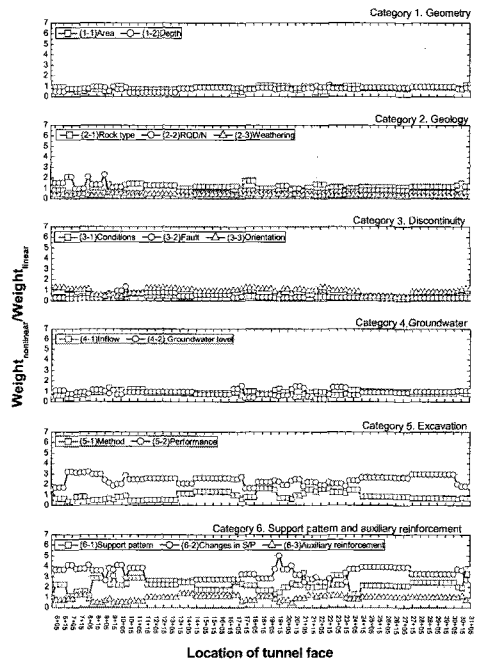


(b) 하반굴착

그림 13. 낙관적인 지반조건하에서의 각 영향인자별 가중치 변화 추이



(a) 상반굴착



(b) 하반굴착

그림 14. 비관적인 지반조건하에서의 각 영향인자별 가중치 변화 추이

하고 있었다. 따라서 본 해석 결과를 바탕으로 판단하면 굴진 중 비관적인 지반조건을 가정한 경우와 유사한 상황이 재현되는 경우 해당 구간에서는 RQD 항목에 대해 각별한 관찰과 주의가 필요하다는 점을 사전에 인지할 수 있다. 또한, 낙관적인 지반조건을 가정한 경우에서와 마찬가지로 굴착성능(5-2) 항목과 표준지보패턴강도(6-1) 및 지보패턴 변경(6-2)이 다른 영향인자에 비해 상대적으로 높은 민감도 수준을 유지하고 있었으나 비관적인 지반조건을 가정한 경우에는 표준지보패턴강도의 영향이 낙관적인 지반조건을 가정한 경우에 비해 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 설계안의 사전 검토 결과를 이용하여 막장의 위험요인이나 붕괴 지후 등이 발견되면 보강공법의 투입이나 표준지보패턴강도를 상향 조정하는 것 보다는 지보패턴의 조정

을 통해 효율적인 위험도 지수의 저감효과를 기대할 수 있다는 점을 굴착이전에 파악하여 선제적으로 대응할 수 있다.

3.5 터널 붕괴 위험도 지수 산정 결과

그림 15는 미시추 구간에서 결정하기 어려운 지반조건을 전기비저항에 기반하여 낙관적으로 가정하였을 때의 터널 붕괴 위험도 추이를 나타내고 있다. 각 영향인자의 가중치가 고정되는 선형 위험도 평가 지수의 변화 추이는 전 구간에 걸쳐 안전수준을 유지하고 있는 것으로 평가되었다. 그러나 동일한 모델 하에서 상반굴착시 No. 17구간에서 No. 24구간 사이에서 가중치가 가변적인 비선형 붕괴 위험도 지수의 일부가 10% 붕괴확률을 의미하는 위험도 수준 I에 포함되었으나 즉시 안정 상

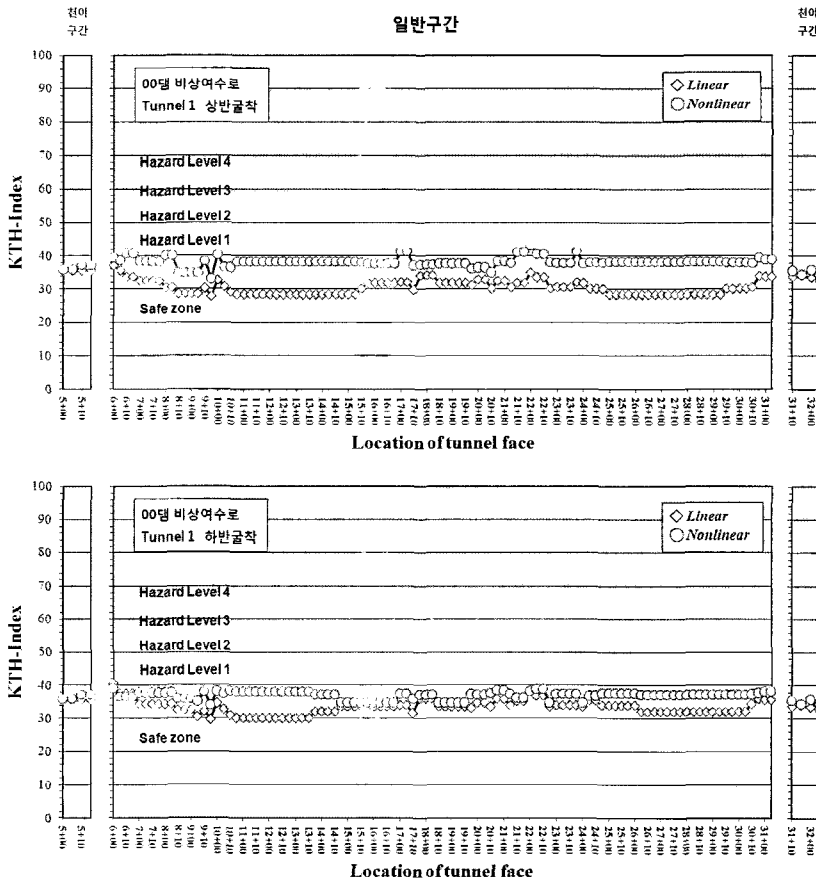


그림 15. 낙관적인 지반조건 하에서의 붕괴 위험도 지수 변화 추이

태로 복귀되는 경향을 보여 전체적으로 매우 양호한 수준의 붕괴위험도 변화추이로 평가되었다. 또한 하반 굴착시는 상반굴착보다 더 안정된 위험도 추이를 보이고 있다는 점을 확인할 수 있었다.

비관적 지반조건은 최악의 지반조건 조합의 80% 정도 수준으로 매우 불리하게 설정된 모델이며, 설계안의 안전측 사전검토 모델로 판단할 수 있다. 그림 16은 비관적인 지반조건을 가정한 경우의 터널 붕괴 위험도 지수 추이를 보이고 있다. 우선 선형모델에 의한 위험도 지수는 전체 구간에서 상하반 굴착 공회 안전구간을 유지하는 것으로 분석되었다. 하지만 비선형 해석결과와 선형 지수 산정모델에 경우보다 약간 위험도 수준이 상향 평가되었다.

비선형 지수모델에서 상반 굴착의 경우, 분명히 낙관

적인 모델의 경우보다 전체적으로 위험도 수준이 높아졌으나, 전기비저항 탐사에 의해 조사된 상대적 취약 지반구간인 N.17~No.19구간과 No.22~No.24에서 위험도 수준이 국부적으로 등락을 반복하는 경향을 보이고 있다. 매우 취약한 지반조건을 가정하였음에도 지수 상승이 억제된 것은 제시된 설계안에 반영된 보강공법 등의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

하반 굴착의 경우에는 상반 굴착시 보다 전체적으로 위험도 수준이 약간 상향된 것을 알 수 있다. 하지만 설계안에서 파악될 수 있듯이 상대적으로 취약한 지반등급을 갖으며 대규모 단층대가 2개소 위치할 것으로 예상되는 No.17~No.19 구간에서는 적절한 보강공법이 투입되면서 위험도 수준이 안전 수준을 유지하고 있으나, No.20~No.27 구간에서는 비선형 위험도 지수가 위험도

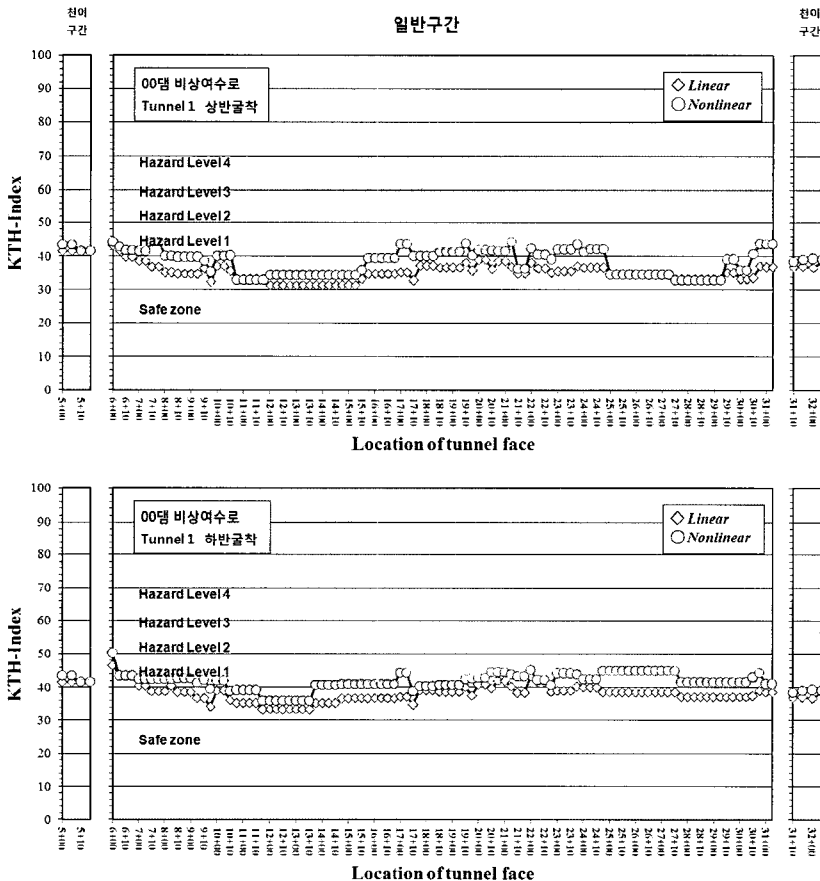


그림 16. 비관적인 지반조건 하에서의 붕괴 위험도 지수 변화 추이

수준 I의 하단부에 포함되고 있다. 일단 위험도 수준 I은 붕괴확률 10% 이하의 '주의' 수준으로 직접적인 설계변경이 요구되는 위험구간은 아니며, 시공시 막장에 안정성 유지에 민감하게 작용하는 것으로 파악된 영향인자를 주시하며 시공한다면 큰 무리는 없을 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도 지수 개념과 지수 평가 시스템을 활용하여 00담 비상여수로 터널 설계안에 대한 터널 굴진별 위험도 수준의 변화추이를 사전 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 수행된 터널 설계안에 대한 사전검토 사례를 통해, 터널 붕괴 위험도 평가 시스템은 현재 시공 중 막장의 위험도 관리뿐만 아니라, 지반조건 모델링 전략 하에 설정된 다양한 지반조건 시나리오를 바탕으로 설계안을 붕괴 위험도 개념 하에 다각적으로 검토할 수 있는 유용한 사전 검토 수단으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.
2. 터널 종단방향에 따른 터널 붕괴 위험도 지수의 추이 변화를 이용하여 설계 구간 내 취약구간의 위험도 수준을 정량적으로 파악할 수 있으며 이를 통해 보강방안의 재수립 등 설계안의 수정이 필요한 구간이나 상세 검토가 수행되어야 할 구간을 구체적으로 제시할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 터널 붕괴 위험도 지수에 영향을 미치는 영향인자의 민감도를 선형 모델에 대한 비선형 모델의 가중의 변화로 정의하여 검토하였으며, 이를 통해 위험도 지수에 대한 영향인자 중 가장 민감하게 영향을 미치는 항목을 결정할 수 있었다. 제시된 민감 영향인자는 향후 터널 굴진 시에도 요주의 항목으로서 지속적으로 관리되어야 하는 항목이 되며, 실제 시공 중 터널 붕괴 위험도 지수가 소정의 위험도 수준 이상으로 상승하였을 경우 현장에서 취할 수 있는 가장 적절한 대응 방안에 대한 합리적인 의사결정 수단으로 활용될 수 있다.
4. 본 연구에서는 미시추구간의 지반 조건을 판단하기 위해 시추조사가 이루어진 시점에서 얻어진 전기비

저항과 각종 지반 정보와의 관계를 간단한 선형회귀 분석으로 얻어냈다. 그러나 미시추구간에 있어 지반 조건의 합리적 설정은 간단한 작업이 아니며, 지반 조건은 평가된 위험도 지수의 신뢰성과 직결되는 만큼 미시추구간의 지반 조건을 체계적으로 결정하기 위한 선행연구(신휴성과 권영철, 2009) 등을 활용하는 등 향후 연구에서는 합리적인 지반정보 파악 가능한 접근법 개발과 연계되어 연구 개발이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상환, 이충환 (2007), "터널 리스크 평가 기법의 적용성에 대한 연구", 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제9권, 제1호, pp. 63-74.
2. 김영근, 김도형 (2008), "터널 안정성 및 환경성을 고려한 위험도 평가기법의 적용", 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제10권, 제1호, pp. 1-15.
3. 배규진, 신휴성 (2007), "터널 붕괴 위험도 (KTH) 지수 및 평가도표 개발", 대한토목학회 논문집, 제27권, 제3호, pp. 221-227.
4. 신휴성, 권영철 (2009), "미시추구간의 정량적 지반 등급 분류를 위한 원도우-쉬프팅 인공 신경망 학습 기법의 개발", 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제11권, 제2호, pp. 151-162.
5. 한국건설기술연구원 (2008), 터널공사 재해최소화 및 예방기술 개발 (V), 기본과제 연차보고서, 건기연 2008-056.
6. Bernardos, A.G. and Kaliampakos, D.C. (2004), "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling-illustrated by the Athens Metro, Greece", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 41, pp. 987-999.
7. Hudson, J.A. (1992), "Rock Engineering Systems: Theory and Practice", Horwood, Chichester.
8. Shin, H., Kwon, Y., Jung, Y., Bae, G. and Kim, Y. (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. 5, pp. 1072-1087.
9. Shin, H.S. (2001), "Neural network based material models for finite element analysis", Ph.D. thesis: C/Ph/250/01. Department of Civil Engineering, University of Wales Swansea.

접수일(2009.10.22), 수정일(2009.10.28), 게재확정일(2009.11.2)