

터널 안정성 및 환경성을 고려한 위험도 평가기법의 적용

김영근^{1*}, 김도형²

Application of risk analysis and assessment considering tunnel stability and environmental effects in tunnel design

Young-Geun Kim, Do-Hyung Kim

Abstract Recently, because of the various factors by uncertainty of underground, the risks in tunnelling have been occurred increasingly. Therefore, it is very important to estimate and control the risks considering geotechnical conditions for tunnel stability and environmental problems by tunnel construction. In this study, the risk analysis for tunnel stability was carried out by classifying the risk factors such as ground support capacity, ground settlement, the inflow of groundwater into the tunnel and the damage by the earthquake. Also, the risk assessment for the environmental problems was performed by calculating the vibration and noise by blasting and the drawdown of the groundwater level caused by tunnel construction. Each risk factor was evaluated quantitatively based on the probabilistic and statistic technique, then it was analyzed the distribution characteristic along overall tunnel site. Finally, it was evaluated that how much each risk factor influences on the construction cost with a period for tunnel construction, so it is possible to perform reasonable tunnel design which was capable of minimizing the risks in the tunnel construction.

Keywords: Risk analysis, tunnel stability, environmental effect, tunnel design

요 지 터널과 같은 지하구조물의 경우에는 지반의 다양한 변동성과 불확실성으로 인하여 터널 시공단계에서의 위험이 계속적으로 증가하고 있으므로, 터널 설계단계에서 터널 안정성 및 환경성에 영향을 주는 위험요소에 대한 위험도 평가 및 관리가 매우 중요하다. 본 연구에서는 터널굴착으로 인한 안정성에 대한 위험도 분석을 지반자체의 지반능력, 지반침하에 의한 인접구조물 손상, 막장내 지하수 유입량, 지진영향 등의 요소로 구분하여 평가하였다. 또한 환경성에 대한 위험도 분석을 발파로 인한 소음·진동, 운영중 열차운행으로 인한 소음·진동, 지하수위 저하로 인한 환경영향 등으로 평가하였다. 이와 같은 위험요소들에 대하여 위험도를 정량적으로 평가하고 터널 전구간에 걸친 위험도의 분포특성을 파악하였다. 또한 다양한 확률론적 기법과 통계자료를 사용하여 각각의 위험도에 대한 비용(cost)을 분석하므로써 위험도가 터널공사에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 본 위험도 평가기법을 터널설계단계에서 적용하므로써 기존의 방법을 보완할 수 있는 보다 합리적인 위험도 평가방법으로서의 유용성을 검토하였다.

주요어: 위험도 분석, 터널 안정성, 환경성, 터널 설계

1. 서 론

터널공사가 증가함에 따라 도심지구간, 저토피구간, 지질불량구간을 통과하는 경우가 많아지고 있으며, 이러한 경우 시공중 터널의 안정성에 대한 위험성(risk)이 증가하게 되고, 터널 안정성에 영향을 미치는 위험요소(risk factor)가 더욱 다양해지고 복잡해지고 있다. 또한 터널의 안정성뿐만 아니라 터널굴착으로 인해 발생하는 진동, 소음, 지하수위 저하등과 같은 환경영향 문제로 인하여 터널시공에 상당한 제약을 받고 있는 실정이다

(위용곤 등, 2002).

터널은 지하구조물로서 지반의 불확실한 요소로 인하여 시공중 붕락 등의 안전성에 영향을 주며, 이로 인한 공사비의 증가는 많은 문제를 가져오고 있다. 이에 지반공학위험(geotechnical risk)이 터널 공사비에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구가 진행되고 있으며(Arends et al., 2004), 국제터널협회에서는 터널공사중 위험도 관리에 대한 지침(guideline)을 제시한바 있다(Eskesen et al., 2004). 그러나 기존의 연구에서는 위험도에 대한 공학적인 분석이 부족하여 터널구간에 대한 정량화된 위험도를 파악할 수 없어, 터널 설계에서의 활용성이 낮다고 할 수 있다.

따라서 터널 설계단계에서 터널 전구간에 걸쳐 터널 안정성 및 환경성에 영향을 미치는 위험요소를 파악하

¹삼성물산(주) 건설부문 토목ENG팀 부장 (기술사·공학박사)

²(주)삼보기술단 지반부 과장

*교신저자: 김영근 (babokyg@hanmail.net)

고 분석하는 작업이 필수적이라 할 수 있다. 특히 터널과 같은 지하구조물의 경우에는 지반의 다양한 변동성과 불확실성으로 인한 다양한 위험이 항상 존재하기 때문에 이러한 위험요소에 대한 정량적 평가가 매우 중요하다 할 수 있다.

기존의 터널설계에서는 터널구간에 대한 지질, 지반 등 지반공학적 위험에 대하여 각각의 요소에 대한 평가 방법이 사용되어 왔다. 즉 시추 및 물리탐사결과를 이용하여 터널 구간에 걸쳐 암반분류를 실시하고, 단층 등과 같은 지질공학적 위험요소를 포함한 전반적인 지반조사 결과를 터널 지보패턴 및 보강설계에 반영하였다. 그러나 이와 같은 설계과정에서 터널 안정성에 영향을 주는 다양한 위험요소 대한 체계적인 검토가 부족하고, 특히 민원이나 환경에 영향을 주는 위험요소에 대한 평가가 이루어 지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 터널공사에 중대한 영향을 미치는 위험요소를 크게 안정성 위험요소와 환경성 위험요소로 구분하고, 이에 대한 위험도를 정량적으로 평가하고자 하였다. 먼저 안정성 위험요소로는 지반의 지보능력, 지반침하에 의한 인접구조물 손상, 막장내 지하수 유입, 지진에 의한 영향등을 환경성 위험요소로는 발파로 인한 소음·진동, 운영중 열차운행으로 인한 소음·진동, 지하수위 저하로 인한 환경영향 등을 선정하였다. 또한 각각의 위험요소들에 대하여 위험도를 정량적으로 평가하고 터널 전 구간에 걸친 위험도의 분포특성을 파악하고자 하였다.

또한 터널 위험도에 대한 파괴확률 및 사회적인 비용을 다양한 확률론적 기법과 통계기법을 이용하여 분석하므로써 위험도가 터널공사에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 정략적 위험도 평가기법을 터널설계에 적용하여 기존의 암반등급위주의 방법을 보완하여, 터널 전구간에 대하여 안정성 및 환경성 위험등급을 평가하므로써 터널공사에서의 위험도를 고려한 합리적인 터널설계를 방법을 제시하고자 하였다.

2. 터널 위험요소 조사 및 선정

2.1 위험도 분석기법

터널과 같은 지하구조물의 설계에서는 허용응력설계법의 안전율 개념을 주로 이용하는데, 이때 안전율은 저

항과 하중의 비로 표현될 수 있다. 그러나 안전율 개념은 암반구조물의 상대적인 신뢰성을 측정하는 데에는 한계를 가지게 되는데 지반자체가 고유의 변동성 및 다양한 불확실성을 가지고 있음에도 불구하고 각 설계정수에 대한 대표값을 할당해야 하기 때문이다.

본 연구에서 적용한 위험도 분석기법에서는 평균적 의미의 지반거동 분석을 바탕으로 수행되어진 기존설계의 단점을 보완하고, 지반조사결과 및 주변 환경요소의 불확실성을 합리적으로 고려하기 위해서 다양한 확률론적인 기법과 통계자료를 활용하도록 하였다. 이를 위해서 터널 설계 및 시공단계에서 발생할 수 있는 위험요소들을 선정하고 그 위험요소들에 대한 위험도를 정량적으로 분석하는 과정이 이루어져야 한다. 각 위험요소의 위험도는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{위험도}(RISK) = \Sigma P_f \times C_f \quad (1)$$

P_f : 구조물의 생애주기 동안의 파괴확률

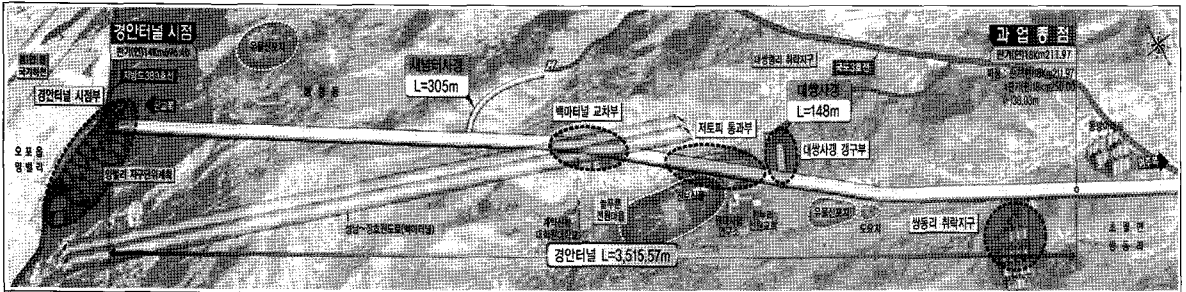
C_f : 파괴비용

위험도 분석에서 가장 중요한 것은 신뢰성 있는 파괴확률의 산정이라 할 수 있다. 신뢰성 분석기법에는 확정적 방법, 확률적 방법, 신뢰성 방법이 있으나, 본 연구에서는 변수들의 불확실성과, 하중 및 파괴모델의 불확실성을 고려한 확률론적인 방법을 이용하였다. 이 방법은 각 설계 변수들의 불확실성을 판단할 수 있는 정보를 제공해 주기 때문에 결정론적 방법보다는 의미가 있다고 할 수 있다. 또한, 민원발생과 같은 환경성 위험요소에 대한 객관적인 평가하기 위해서는 기존의 신뢰성 있는 통계자료로부터 합리적인 자료를 획득하도록 하였다.

2.2 위험요소의 선정

본 연구에서는 주거 밀집지역을 통과하는 철도터널에 대한 위험도 분석사례를 들어 터널에서의 위험도 분석 및 평가 방안에 대하여 고찰하였다. 먼저 터널의 설계 및 시공단계에서 발생할 수 있는 위험요소를 선정하고 그에 대한 각 위험요소의 위험도 분석을 위한 사전조사 항목에 대하여 설명하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 연구대상터널은 복선단면의 철도터널로서 연장이 3,520 m인 산악터널이다. 터널 시점부와 저토퍼 통과부 및 종점부에 대규모의 주거지



터널 연장	NATM	3510 m		경안터널
	개착터널	10 m		
개문형식	벨마우스변형			대쌍사갱
최소곡선반경	R=2000			새넬터사갱
종단경사(%)	+3, -6			

그림 1. 연구 대상터널의 개요도

표 1. 터널에서의 주요 위험요소 선정

구분	위험 요소	비 고
안정성 위험요소	① 지반 상태	무지보상태의 터널굴착시 파괴확률
	② 지반침하	지반침하로 발생하는 인접구조물 손상
	③ 지하수 유입	RMR저감 점수에 따른 파괴확률
	④ 지진영향	지진발생으로 인한 터널 및 인접구조물 손상
환경성 위험요소	① 공사중 발파소음	발파소음으로 인한 민원발생시 피해보상
	② 공사중 발파진동	발파진동으로 인한 민원발생시 피해보상
	③ 운영중 열차소음·진동	열차소음·진동으로 인한 민원발생시 피해보상
	④ 지하수위 저하	지하수위 저하로 인한 주변 관정 피해보상

역이 있으며, 터널노선 상부에 도로터널이 교차한다. 또한, 공사용 사갱 1개소와 환기방재용 사갱 1개소가 계획되어 있다.

본 터널의 설계단계에서 고려해야할 위험요소를 크게 안정성 위험요소와 환경성 위험요소로 구분하였다. 터널 안정성에 대한 위험요소로는 터널굴착에 대한 지반의 지보능력, 지반침하에 의한 인접구조물 손상, 막장내 지하수 유입, 지진에 의한 영향을 선정하였다. 또한 환경성에 대한 위험요소로는 공사중 터널발파로 인한 소음과 진동, 운영중 열차운행으로 인한 소음과 진동, 지하수위 저하로 인한 주변 관정피해 영향을 선정하였다. 표 1은 터널의 위험도 분석에 선정된 위험요소를 나타낸다.

2.3 위험도 분석을 위한 조사

터널에서의 위험요소를 선정할 후, 각 위험요소에 대한 위험도를 분석하기 위한 상세한 사전조사 및 분석과정이 수행되었다. 상세한 지반조사를 통해 암반강도 특성의 불확실성에 대한 확률론적인 파악과 현장조사를 통하여 터널노선 부근의 인접구조물의 현황과 주거가구에 대한 조사를 수행하였다.

또한 전단강도기법을 통한 무지보 상태의 터널안전율, 터널노선 주변의 지표침하량의 산정, 터널구간별 막장내 유입수량 및 지진가속도에 대한 충분한 양의 데이터를 수치해석을 통하여 획득하였다. 또한, 민원발생을 인한 피해보상액의 과거 판례사례 및 관련기준들에 대한 조사를 수행하였다. 표 2는 안정성 위험요소와 환경성

표 2. 위험요소 평가를 위한 사전조사

위험 요소		위험도 분석을 위한 자료	조사 자료의 분석 및 활용
안정성 위험요소	① 지반 상태	강도정수 c (점착력), ϕ (마찰각)값의 확률분포	전단강도 감소기법을 통한 지반안전율 산정
	② 지반 침하	연속체 수치해석 물성치 인접구조물 현황 및 보상기준	지반침하로 인한 인접구조물의 손상도 평가
	③ 지하수 유입	암반등급별 투수계수 초기상태의 지하수위	터널내 유입수량 산정을 통한 암반분류의 불확정성 반영
	④ 지진 영향	동적해석 물성치 지진계수	지반증폭현상 파악에 의한 지진가속도 산정
환경성 위험요소	① 발파소음	민원예상 현황 및 피해보상액 기준 소음·진동 규제기준 소음·진동 추정식	소음·진동 영향평가를 통한 규제 기준초과로 인한 사회적 비용산출
	② 발파진동		
	③ 열차소음·진동		
	④ 지하수위 저하	수리학적 물성 시추공 초기 지하수위	지하수 거동분석을 통한 지하수위 저하 영향권 평가

위험요소에 대한 사전조사항목에 대하여 나타내었다.

3. 터널 위험도 분석 및 평가

3.1 안정성에 대한 위험도 평가

3.1.1 지반 상태에 대한 위험도 분석

먼저 지반정수들의 불확실성에 의한 위험성에 대한 사회적 비용을 산정하므로서 지반지보능력에 대한 위험도를 분석하였다. 지반의 특성을 완벽하게 파악할 수 있을 정도의 충분한 지반조사를 수행한다는 것은 매우 어렵기 때문에 지반조사 결과로 도출된 강도정수는 불확

실성을 포함하게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 강도정수들의 불확실성을 표현하는 변동계수와 지반자체의 안전율과의 관계를 통하여 파괴확률을 산출하였다.

일반적으로 변동계수 C_v (coefficient of variation)을 표현하는 방법은 식 (2)와 같이 표준편차와 평균의 비로서 나타낼 수 있다.

$$C_v = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} = \frac{\sigma}{m} \times 100\% \quad (2)$$

변동계수는 서로 다른 표준편차와 평균을 갖는 개별적 데이터의 분산정도를 나타내는 척도이며, 평균과 상

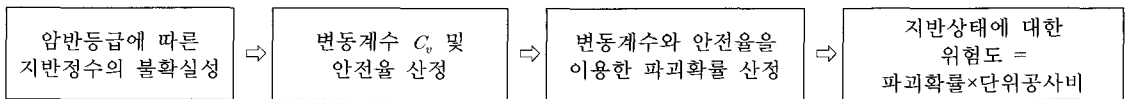


그림 2. 지반상태 위험도 분석 절차

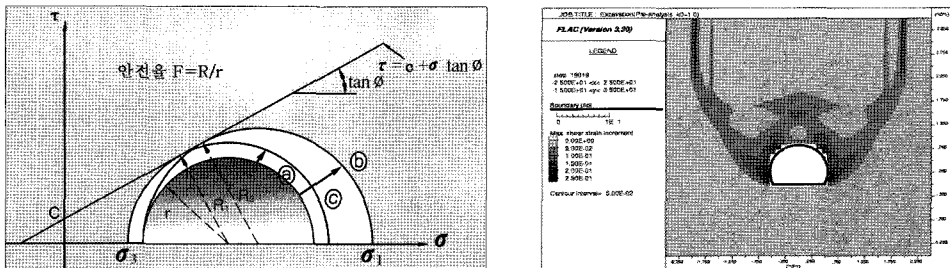


그림 3. 전단강도 감소기법에 의한 안전율 산정

관없는 데이터의 분산정도를 백분율(%)로 표현함으로써 각 데이터들 간의 절대적인 비교를 할 수 있다. 지반 자체가 가지는 지보능력을 나타내는 지반안전율은 지반의 전단강도(c, ϕ)를 터널이 파괴상태에 도달할 때 까지 감소시켜가며 반복적인 수치해석을 수행하여 터널의 파괴라인과 안전율을 산정하는 전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction Method, SSR)을 사용하여 산정할 수 있다. 그림 3은 전단강도감소기법에 의한 안전율 산정의 개요도를 나타내었다(유광호 등, 2001).

위에서 구해진 지반 강도정수의 변동계수와 지반안전율을 가지고 파괴확률을 식 (3)과 유도하여 계산할 수 있으며, 구해진 파괴확률과 단위구간의 터널공사비를 곱하여 파괴비용을 산출하였다.

$$p_f = 1 - \Phi\left[\frac{\nu_c - 1}{\sqrt{\nu^2 C_{vR}^2 + C_{vR}^2}}\right]$$

$$p_f = \left[\frac{\ln \nu_c \sqrt{\frac{1 + C_{vQ}^2}{1 + C_{vR}^2}}}{\sqrt{\ln(1 + C_{vQ}^2) \ln(1 + C_{vR}^2)}} \right] \quad (3)$$

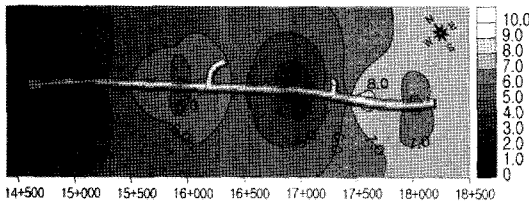


그림 4. 지반안전율 분포도

여기서, p_f : 파괴확률

ν_c : 안전율

C_{vR} : 저항력의 변동계수

C_{vQ} : 하중의 변동계수

$\Phi()$: 정규분포 함수

$$\psi(h) = \frac{1}{2\pi} \int_0^h \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx$$

그림 4에는 터널 전구간에 대한 지반 안전율 분포를 보여 주고 있으며, 그림 5는 파괴비용으로 표현된 지반 지보능력에 대한 위험도 분석결과가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 중앙부에 위치한 저토포 구간에서의 위험도가 가장 높게 산정됨을 확인할 수 있다.

3.1.2 지반침하에 대한 위험도 분석

터널굴착중 지반침하로 발생하는 인접구조물의 손상에 대한 위험도 분석 절차는 그림 6에서 보는 바와 같다. 수치해석과 경험식을 바탕으로 지표침하저동 분석으로부터 인접구조물의 부등침하량 및 기울기를 산정하여

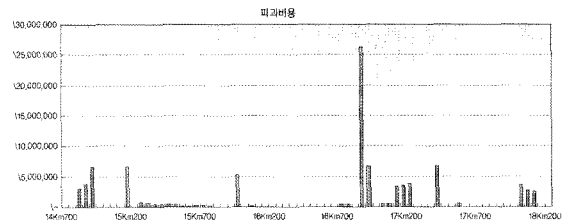


그림 5. 지반상태 위험도분석 결과

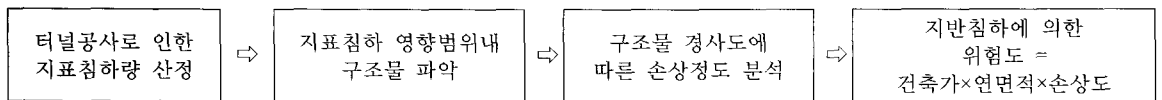
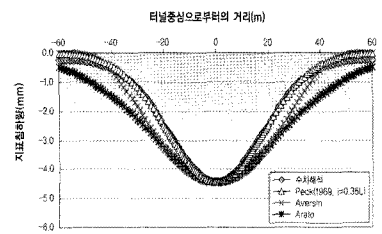


그림 6. 지반침하 위험도 분석 절차

표 3. 지표침하곡선 산정의 경험식

구분	산정식
Peck (1969)	변곡점 i 를 최대 침하량의 60.6%(S/S_{max}) 지점으로 정의 $S(x) = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \Rightarrow S(x) = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{0.25L^2}\right)$
Aversin (1953)	$S(x) = S_{max} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{4.54} \exp\left(\frac{4.54x}{L}\right)$
Arato (1992)	$S(x) = S_{max} \left(\frac{0.75}{\exp(2x/L)} + \frac{0.25}{\exp(2x/L)^4}\right)$



L: 침하형상곡의 절반, i: 변곡점, x: 최대침하량(S_{max})발생 지점으로부터 임의점까지의 거리

각 구조물의 손상정도를 평가하여 지반침하에 대한 위험도를 분석하였다.

표 3에 나타난 경험식과 수치해석 결과를 분석하여 지표침하에 대한 영향범위를 산정하며, 영향범위내에 존재하는 구조물의 최소 손상정도를 기준으로 하여 위험도를 산출하였다. 그림 7은 터널노선을 따른 구조물 경사도의 분포도를 나타내며 그림 8은 지반침하에 대한 위험도 분석결과가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 중앙부에 위치한 저토퍼 구간에서 지반침하에 의한 위험도가 가장 높게 나타남을 볼 수 있다.

3.1.3 지하수 유입에 대한 위험도 분석

지하수 유입에 대한 위험도는 터널공사중에 막장내의 지하수 유입량으로 인한 RMR 저감점수에 따른 파괴확률 및 파괴비용을 산정을 통하여 분석하였다. 그림 9에는 지하수 유입에 대한 위험도분석의 절차를 나타나 있다.

RMR 암반분류법은 5가지 평가요소로 구성된 할당점수의 합으로 산정된다. 할당된 점수는 평가요소의 일정 범위의 경우에 대해서 단일 점수로 표현되므로 연속적인

점수의 할당이 불가능하여 특정 파라미터에 대해서는 과대 또는 과소평가된다. 지하수 파라미터의 중간값 전후의 값에 대한 점수 매김은 양호한 단계의 해당 RMR값을 고려하여 보간법을 처리하며 단계별로 연속적으로 점수를 매김으로서 최소와 최대상의 파라미터 값에 대한 연속적인 RMR값을 나타낼 수 있다.

지하수의 연속 RMR 그래프는 점수를 0까지만 나타내고 있지만 유입수량이 클 경우 점수는 음(-)의 값을 갖으며 이를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{RMR 저감점수} = -8 \times [\text{유입수량}(\ell/\text{min}/10 \text{ m}) - 0.125] \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 유입유량에 따른 RMR 저감 점수를 계산하며, RMR 등급이 저감됨에 따라 나타나는 파괴확률의 변화를 고려하면 터널굴착으로 인한 터널내 지하수 유입량에 따른 위험도를 정량적으로 산출할 수 있게 된다. 또한 연속적인 RMR점수에서 각 구간의 확률밀도를 구할 수 있으며 RMR의 점수를 정규분포로 표현할 수 있다. 표 4는 RMR 저감점수에 따른 파괴확률

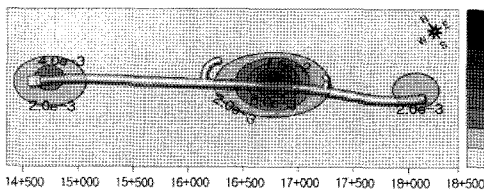


그림 7. 구조물 경사도 분포도

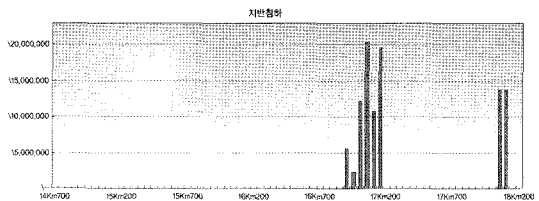


그림 8. 지반침하 위험도분석 결과

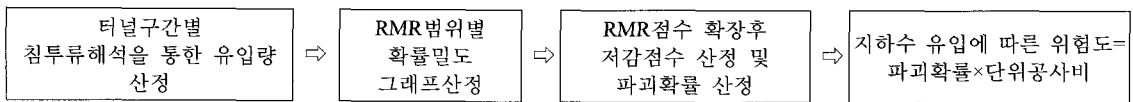
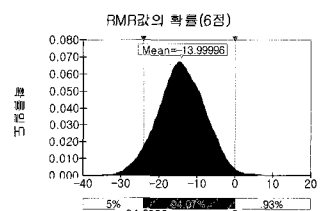
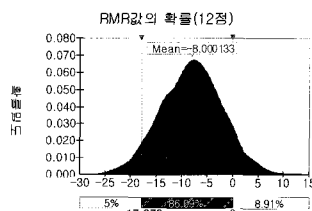


그림 9. 지하수 유입 위험도 분석 절차

표 4. RMR 저감점수에 따른 파괴확률

저감점수	파괴확률	저감점수	파괴확률
12	8.91%	6	0.93%
11	7.04%	5	0.65%
10	5.12%	4	0.42%
9	3.47%	3	0.22%
8	2.62%	2	0.22%
7	1.76%	1	0.07%



를 나타내었다.

그림 10과 그림 11은 각각 수치해석으로 산정된 지하수 유입량의 분포도와 위험도 분석 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 시점부 갱구부와 중앙부 저토피 구간에서의 지하수 유입량의 위험도가 높음을 확인할 수 있다.

3.1.4 지진영향에 대한 위험도 분석

터널과 같은 지하구조물에서는 구조물이 위치하는 지

층에서의 지진 응답이 중요하므로 터널구간의 암반특성을 고려한 지반증폭현상을 파악하여 지진에 대한 상대적인 영향정도를 검토할 수 있다. 그림 12는 지진영향에 대한 위험도 분석절차, 그림 13은 지반증폭현상을 파악하기 위한 평가방법을 나타내었다.

대상터널의 지역계수를 기준으로 산정된 지진가속도를 초과하는 구간에서는 지진발생시 위험범위내의 구조물은 완파된다고 가정하고 구조물의 건축단가를 기준으로 파괴비용을 산출하였다. 그림 14는 수치해석으로 구

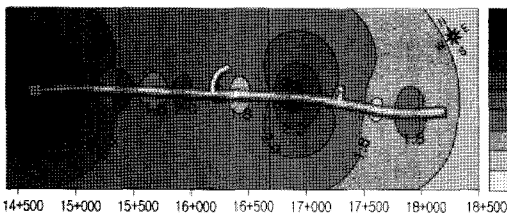


그림 10. 지하수 유입량 분포도

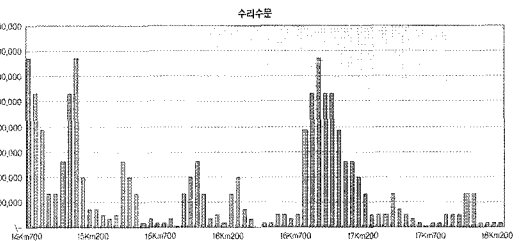


그림 11. 지하수 유입 위험도 분석 결과

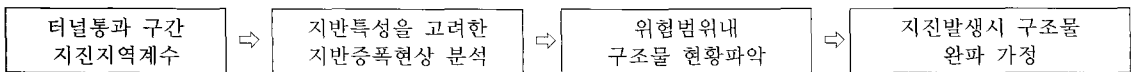


그림 12. 지진영향 위험도 분석 절차

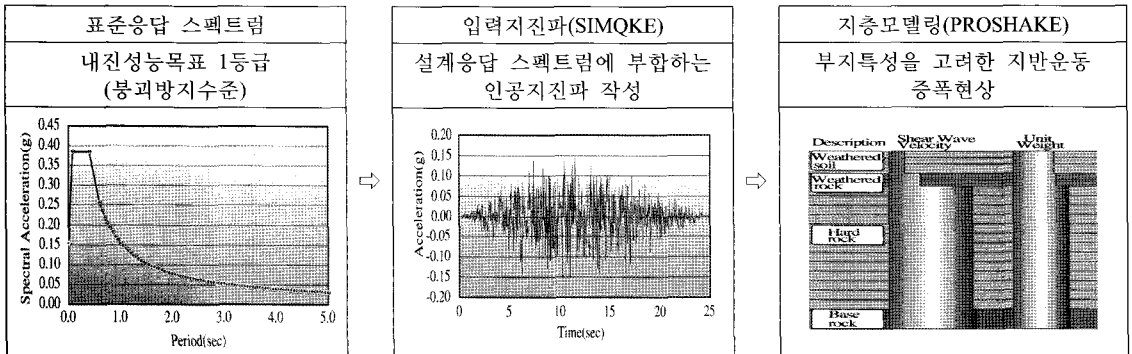


그림 13. 지진영향 평가방법

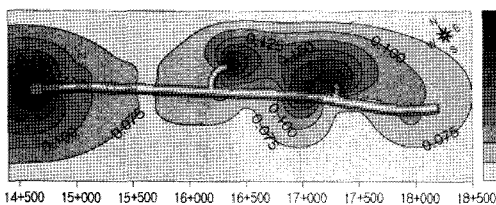


그림 14. 지진가속도 계수 분포도

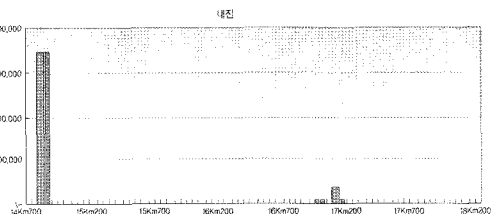


그림 15. 지진영향 위험도 분석 결과

해진 터널구간의 지진가속도 계수의 분포도를 나타내며, 그림 15는 지진영향에 대한 위험도 분석의 결과를 나타낸다.

3.2 환경성에 대한 위험도 평가

3.2.1 발파소음에 대한 위험도 분석

발파소음에 대한 위험도는 발파소음에 의한 정신적 피해와 피해보상의 사례별 피해량과 피해액을 기준 판례의 자료를 근거로 하여 회귀분석을 통한 추정식과 피해량 환산표를 이용하여 산정한다. 그림 16에는 발파소음에 대한 위험도 분석절차가 나타나 있다.

시공중 터널발파로 인한 발파소음은 중앙환경분쟁조정위원회(1997)의 제안식으로 예측할 수 있다.

$$dB(A) = -16.02 \log(D/W^{1/3}) + 95.195 \quad (5)$$

(방폭매트 설치시)

소음 피해량은 소음도와 피해소음의 지속시간과의 관계로 나타난다. 소음도에 따라서 인체의 경우 일시적인 난청 증세를 나타내며 청력은 본래의 상태로 복구하지만 지속시간이 길 경우 청력 손실의 피해를 입을 수 있고, 가족의 경우 성장지연, 번식효율저하, 유사산 및 폐사에 이르기기도 한다. 발파소음에 의한 피해는 갱구부에서 발생하며 피해량 산정식은 식 (6)과 같다.

$$M = 12.5D \times 102.5 \quad [D : \text{피해량 환산표} \quad (5)]$$

(중앙환경분쟁위원회, 1997)]

식 (6)은 일인당 피해액 산출식으로 총 거주인 수를 곱함으로써 배상액을 산정할 수 있으며 한 가구당 거주인수는 4인으로 가정하였다. 일반적인 발파공법에서 적용되는 장약량을 기준으로 발파소음을 산정하고 소음기준치를 초과하는 지역에 대한 거주인구수를 파악하여 일반발파공법 적용시에 발생하는 배상액을 산정할 수 있다. 그림 17에는 갱구부와 공사용 사갱에서의 발파소음 영향평가 결과이며, 그림 18에는 터널 전구간에 대한 발파소음의 분포도로서, 터널 갱구부와 사갱 갱구부에서 높게 나타남을 알 수 있다. 표 5에는 발파소음에 대한 위험도 분석결과를 정리하여 나타내었다.

3.2.2 발파진동에 대한 위험도 분석

발파진동에 의한 위험도는 발파진동에 의한 사회적 비용(정신 피해와 재산 피해)을 반영하여 중앙환경분쟁조정위원회에서 발간한 『진동으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구』를 바탕으로 산출하였다. 그림 19에는 발파진동에 대한 위험도 분석절차를 나타내었다.

진동초과 노출총량은 식 (7)을 사용하여 산정할 수 있다.

$$E_{vt} = \Sigma(V_e - V_l) \times T \quad (7)$$

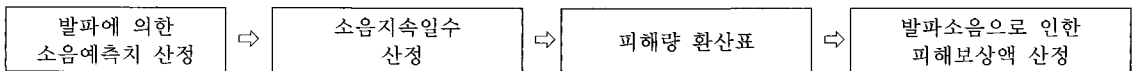


그림 16. 발파소음 위험도 분석 절차

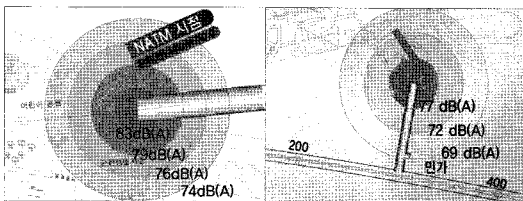


그림 17. 발파소음 영향평가

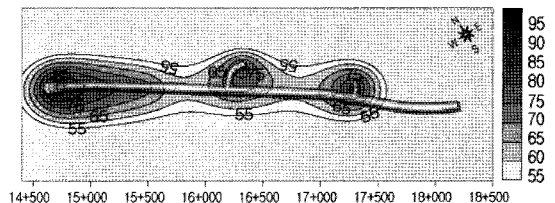


그림 18. 발파소음 분포도

표 5. 발파소음에 대한 위험도 분석결과

인구수	예측소음(dB(A))	피해량 환산표(D)	단위배상액	전체배상액
210명	82	109	350원	0.12억원

E_{ot} : 진동 초과노출 총량(Total over exposure of vibration, dB·일)

V_e : 계측, 추정노출량(Evaluated vibration level, dB(V))

V_t : 판정기준(Threshold vibration level, dB(V))

T : 노출기간(Exposure time, 일)

배상액의 산정은 식 (8)을 사용하여 산정할 수 있다.

$$D = E_{ot} \times P \quad (8)$$

D : 배상액(damage, 원)

E_{ot} : 진동 초과노출 총량

P : 단위 배상액, 단위노출량당 배상금액(원/dB·일)
350원

재산피해로 인한 사회적 비용의 산출은 건물의 감정가와 진동기여도를 고려하여 산출할 수 있다. 발파진동의 예측치가 피해인정 기준이하라 하더라도 사회적 환경을 고려 손상정도 10~15%를 적용하였다. 그림 20에는 재산피해의 경우 발파진동의 위험도 분석절차가 나타나 있다.

$$\text{피해배상액} = \text{감정가} \times \text{진동기여도} \quad (9)$$

$$\text{진동기여도} = \frac{\text{작용진동수준}}{(15 - \text{건축물상태평가}) + \text{작용진동수준}}$$

$$\text{작용진동수준} = \left(\frac{\text{진동속도측정치또는추정치}}{\text{진동속도기준치}} \right)^{1.5} \times 4$$

그림 21에는 발파진동의 분포도가 나타나 있으며, 그림 22에는 발파진동에 의한 위험도 분석결과가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 시점부와 저토피 구간에서 높게 나타났으며, 종점부에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

3.2.3 열차 소음·진동에 대한 위험도 분석

열차운행에 따른 소음의 영향은 갱구부에서 발생되며 터널 설계수명을 30년으로 가정하여 산출하였다. 중앙환경분쟁 조정위원회에서 제시한 피해량 환산량에서는 최대 720일 기준까지 제시하였으며 소음의 지속도와 소음 감지도의 관계를 이용하여 30년 소음 감지도로 환산하여 피해량을 환산하였다. 열차 운행의 소음영향은 다음 식을 이용하여 산정하였다.

$$L_a = 59 - 20 \log d \text{ [dB(A)]} \quad (10)$$

d : 터널 구조물로부터 건물까지의 거리

중앙환경분쟁 위원회에서는 소음발생기간이 증가할수록 사람이 느끼는 소음은 본래의 소음보다 식 (12)와

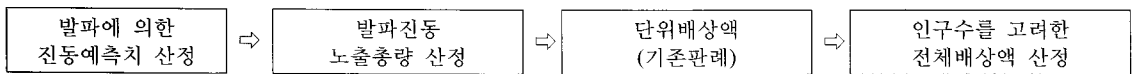


그림 19. 발파진동 위험도 분석 절차(정신 피해)

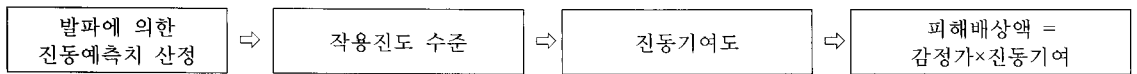


그림 20. 발파진동 위험도 분석 절차(재산 피해)

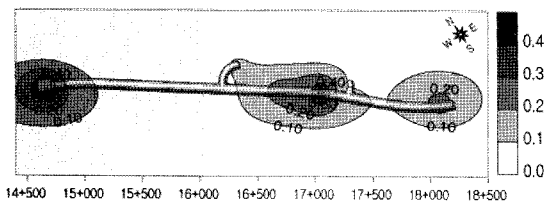


그림 21. 발파진동 분포도

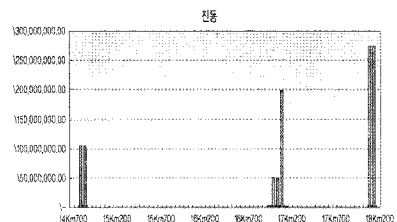


그림 22. 발파진동 위험도 분석

같이 증가한다고 가정하였다.

$$\Delta L = \frac{5}{\log 3} \times \log T \quad [dB] \quad (11)$$

그림 23에는 운영중 열차소음에 대한 분포도가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 시점부와 저토피 구간 그리고 종점부에서 크게 나타남을 확인할 수 있다.

운영중 열차소음에 의한 피해량은 소음 예측치와 소음 지속일에 영향을 받으므로 예측치가 기준치보다 조금 초과할지라도 지속일수가 상대적으로 많으므로 피해액이 발파소음을 인한 피해액보다 매우 큰 값을 가지게 된다(그림 24).

3.2.4 지하수위 저하에 대한 위험도 분석

터널 굴착으로 인한 지하수 저하로 인근 지역의 관정에 대한 피해비용을 산출하였다. 시추공별 초기 지하수위와 지하수 유동해석을 통하여 산정된 터널굴착후의 지하수위로부터 지하수위의 저하가 발생하는 영향범위를 산정하였다. 또한, 영향범위내의 관정개수를 파악하

여 피해배상액을 산정하였다. 그림 25는 지하수위 저하에 대한 위험도 분석 절차를 나타내었다.

본 연구에서는 실제 관례에서 참고로 하고, 지하수층의 불확실성을 고려하여 관정 1개당 1,500만원의 개발비가 소요된다고 가정하였다. 그림 26은 터널 구간에서의 시추공별 지하수위 분석결과를 보여 주고 있으며, 3차원 지하수 유동해석결과를 바탕으로 터널 전구간에 대한 지하수위 영향정도를 평가하였다. 그림 27은 지하수위 저하 영향범위를 나타낸 것으로 그림에서 보는바와 같이 터널 갱구부, 저토피부 그리고 종점부에서 영향정도가 높게 나타남을 알 수 있다.

4. 터널설계에의 적용 및 활용

4.1 위험요소별 위험등급 산정

본 연구에서는 위에서 설명한 각각의 위험요소들에 대한 위험도 분석결과로부터 터널구간의 상대적인 위험등급을 산정하였다. 즉 표 6에서 보는 바와 같이 각각의 위험요소에 측정치에 대하여 위험등급을 매우 위험, 위험, 보통, 안정, 매우 안정의 5등급으로 구분하였다.

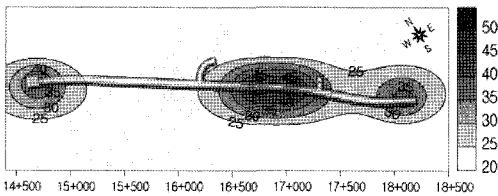


그림 23. 열차 소음 분포도

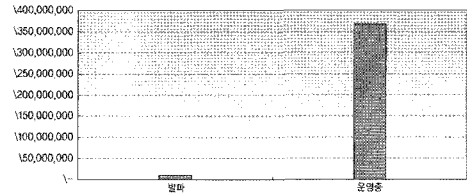


그림 24. 발파소음과 열차소음 피해액 비교

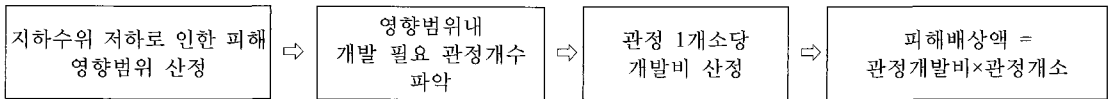


그림 25. 지하수위 저하 위험도 분석 절차

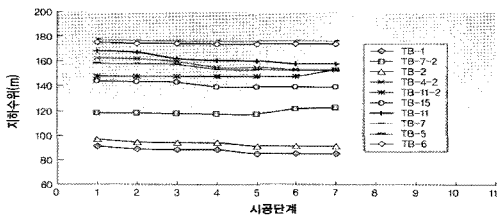


그림 26. 시추공별 지하수위 저하 분석

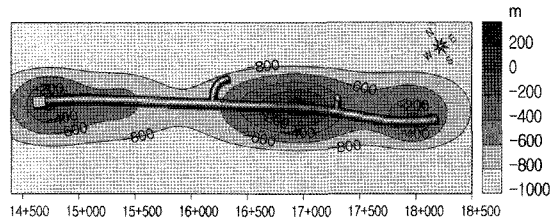
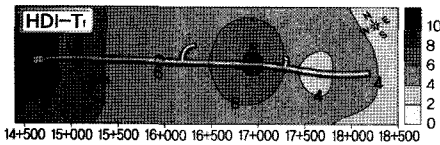


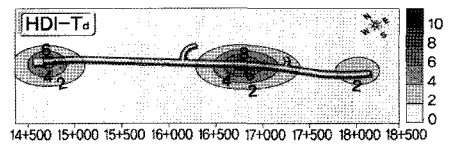
그림 27. 지하수위 저하 영향 범위

표 6. 위험 요소별 위험 등급 평가

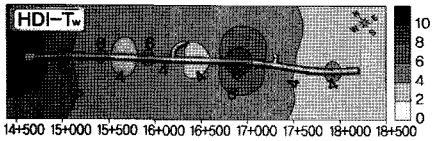
위험 요소		위험 등급	I	II	III	IV	V
			매우위험	위험	보통	안정	매우안정
안정성 (100)	지반 상태 (30)	지반안전율(FS)	1.5미만	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0이상
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	지반 침하 (30)	최대인장변형률	0.1이상	0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	지하수 유입 (20)	지하수 유입량 (m ³ /min/km)	3.0이상	3.0~2.5	2.5~2.0	2.0~1.5	1.5미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	지진 영향 (20)	가속도(g)	0.3이상	0.3~0.25	0.25~0.2	0.2~0.15	0.15미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
환경성 (100)	발파 진동 (30)	발파진동(kine)	0.4이상	0.4~0.3	0.3~0.2	0.2~0.1	0.1미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	발파 소음 (20)	발파소음(dB)	70이상	70~60	60~50	50~40	40미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	열차 진동·소음 (30)	운영중소음(dB)	40이상	40~35	35~30	30~25	25미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2
	지하수위 저하 (20)	지하수위(m)	2.0이상	1.0~2.0	0.5~1.0	0.1~0.5	0.1미만
		범위점수(2~10)	10	8	6	4	2



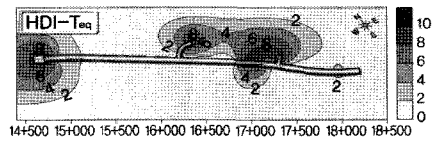
(a) 지반상태 위험등급도



(b) 지반침하 위험등급도

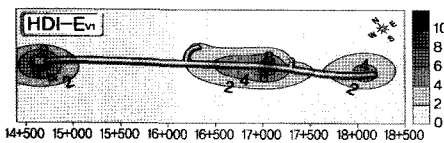


(c) 지하수유입 위험등급도

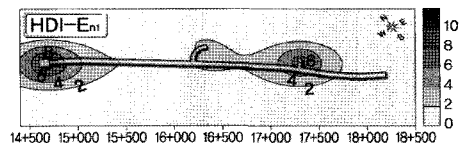


(d) 지진영향 위험등급도

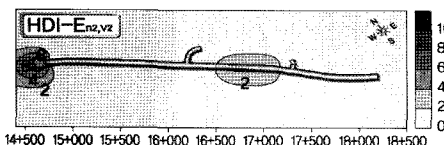
그림 28. 안정성에 관한 위험요소별 위험등급도



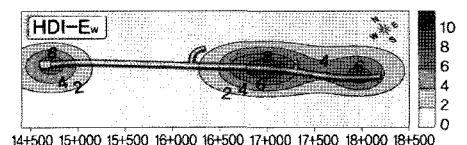
(a) 발파진동 위험등급도



(b) 발파소음 위험등급도



(c) 열차 진동소음 위험등급도



(d) 지하수위 저하 위험등급도

그림 29. 환경성에 관한 위험요소별 위험등급도

각각의 위험요소에 대한 등급의 범위점수는 2~10으로 할당하였고, 이 값을 기본으로 하여 그림 28 및 그림 29에서 보는 바와 같이 터널 전구간에 걸쳐 위험등급도를 작성하였다. 그림에서 보는 각각의 위험요소에 대한 위험정도를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

또한 각각의 위험요소에 대한 가중치를 부여하여 안정성 위험점수는 0~100, 환경성 위험점수는 0~100 이 되도록 하였으며, 표 7에 나타난 바와 같이 5단계의 위험등급으로 구분하였다.

4.2 위험도에 의한 비용분석

본 연구에서는 위험요소를 크게 안정성과 환경성 요소로 구분하고, 각각의 위험요소 평가결과를 합하여 평가점수로부터 표 7에서 보는 바와 같은 위험등급산정기준을 바탕으로 안정성 및 환경성에 대한 위험등급을 산

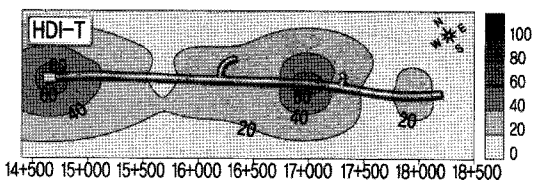
정하였다. 위험등급 산정결과는 그림 30과 같으며, 터널 전구간에 걸쳐 위험등급을 정량적으로 파악할 수 있음을 알 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 안정성에 대한 위험도는 터널 시점부 갱구 및 저토피 구간에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 환경성에 대한 위험도는 역시 터널 시점부와 저토피 구간에서 높게 나타남을 볼 수 있다.

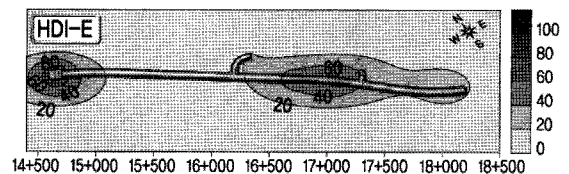
또한 안정성 및 환경성 위험도 평가결과를 바탕으로 터널 전구간에 걸쳐 위험도에 의해 발생할 수 있는 제반 사회적 비용을 분석하였다. 그림 31에서 보는 바와 같이 안정성 위험도에 의한 비용은 갱부구 및 저토피 구간에 대한 보강공사로 인해 가장 높게 나타났으며, 환경성 위험도에 의한 비용은 터널 시점부와 종점부에서 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 환경성에 의한 비용이 안정성에 대한 비용보다는 적음을 볼 수 있다.

표 7. 위험 요소에 대한 위험 등급

구 분	안정성 등급		환경성 등급	
	등급	범위점수	등급	범위점수
매우 안정	T1	20 이하	E1	20 이하
안 정	T2	40 ~ 21	E2	40 ~ 21
보 통	T3	60 ~ 41	E3	60 ~ 41
위 험	T4	80 ~ 61	E4	80 ~ 61
매우 위험	T5	81 이상	E5	81 이상

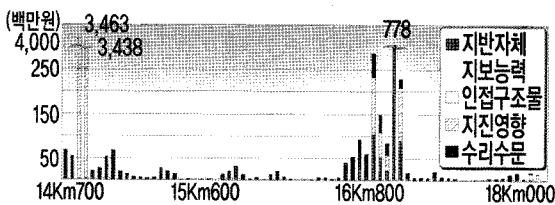


(a) 안전성에 대한 위험도

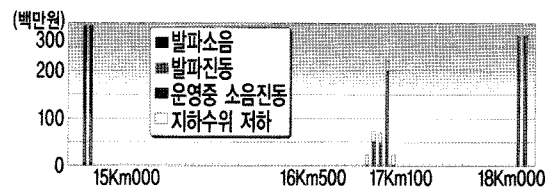


(b) 환경성에 대한 위험도

그림 30. 터널 전구간에서의 위험도 평가



(a) 안전성 위험도에 대한 비용



(b) 환경성 위험도에 의한 비용

그림 31. 터널 구간에서의 위험도에 따른 비용 분석

4.3 터널 설계에의 적용

일반적으로 터널설계에서 지반조사결과를 바탕으로 터널 전구간에 대한 암반등급산정결과를 근거로 표준지보패턴을 산정하며, 추가적인 굴착공법 및 보강공법의 선정은 지반조건 및 주변현황에 대한 자료로부터 주로 경험적으로 판단하게 된다.

본 연구에서는 위에서 분석된 안정성 및 환경성 위험등급 결과를 굴착공법 및 보강공법 선정에 반영하도록 하여, 터널설계에서 있어서 위험도 분석기법의 적용성을 평가하였다. 그림 32는 본 연구대상인 터널 전구간에 걸쳐 안정성 위험등급과 환경성 위험등급을 산정하여, 이를 암반등급과 함께 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 전구간에 대하여 안정성 및 환경성 위험도에 대한

정량적인 값(등급)을 쉽게 파악할 수 있음을 알 수 있다.

표 8은 암반등급, 안정성 등급 그리고 환경성 등급에 따른 굴착공법의 선정을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 위험등급이 T4 및 E4인 구간은 제어발파 또는 기계굴착을 적용하였으며, 풍화암 및 단층파쇄대구간에는 기계굴착을 적용하였다. 또한 위험등급이 T4 및 E5인 구간에는 암파쇄공법을 적용하였다.

이와 같이 터널설계에서 각 구간별 암반등급을 바탕으로 위험도 등급에 따른 적용등급을 고려하여 굴착공법을 선정하여 설계에 반영하도록 하였다. 따라서 터널의 설계 및 시공과정에서 발생하는 위험요소에 대한 정량화된 위험도 분석결과를 이용하여 굴착공법선정 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

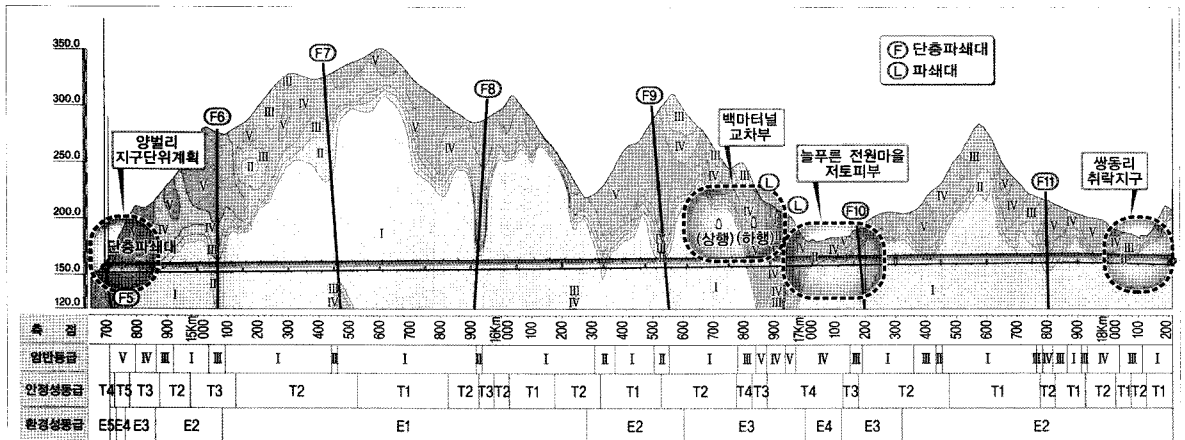


그림 32. 위험도 평가결과의 터널설계 적용

표 8. 위험등급을 고려한 굴착공법 적용

구분	일반발파 굴착	제어발파 굴착	암파쇄 굴착	기계굴착
개요도				
적용조건	안정성 등급 : T1 ~ T3 환경성 등급 : E1 ~ E3	안정성 등급 : T4 환경성 등급 : E4	안정성 등급 : T4 환경성 등급 : E5	안정성 등급 : T4 환경성 등급 : E4
지반조건	암반등급 I ~ IV 구간	암반등급 IV 이하 구간	암반등급 IV 이하 구간	암반등급 IV 이하 구간
적용방법	일반 발파 가능구간	발파 진동 영향구간	발파불가 구간	풍화암, 단층파쇄대 구간
적용구간	일반구간	저토피(늘푸른마을) Sta.17+000-120	시점 갱구부 Sta.14+710-730	단층파쇄대 Sta.14+730-760

기존설계에서는 암반등급을 고려하여 굴착공법, 지보 패턴 및 보조공법을 검토하고 주변 여건을 확인하여 이를 설계에 반영하게 되는데, 이러한 경우 시공시 터널 위험도에 대한 인식이 보다 구체적으로 이루어지지 못하는 경우가 발생하기 쉽다고 할 수 있다. 본 연구에서와 같이 터널설계시에 위험도 평가기법을 활용하는 경우 터널 안정성 및 환경성에 미치는 위험요소에 대하여 위험도를 터널 전 구간에 걸쳐 정량적으로 파악하므로써, 특정 위험구간에 대한 위험도를 우선적으로 고려하여 설계 및 시공시에 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 기법은 터널시공에 있어서 발생할 수 있는 다양한 위험요소중 일부 요소만을 반영하였으며, 아직은 평가과정에서의 객관적인 방법이 확립되어 있지 않으므로 터널 시공중에 위험성을 최소화하기 위한 하나의 평가 도구로서 활용가능할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널공사중 발생할 수 있는 위험도를 고려한 합리적인 터널설계를 수행하기 위하여 터널구간에서의 위험요소에 대한 위험도를 정량적으로 평가를 수행하였다. 이상의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 터널공사중 발생할 수 있는 대표적인 위험요소를 선정하고, 이를 정량적 회귀분석을 통하여 안정성 요소와 환경성 요소를 구분하였다.
2. 연구대상 터널에서의 각각의 위험요소에 대하여 해석기법과 통계기법을 통하여 위험도를 분석하고 위험등급을 5단계로 분류하였으며, 터널 시점부와 저토포 구간의 위험도가 높게 나타남을 확인하였다.
3. 연구대상 터널에 대한 안정성 및 환경성에 대한 비용을 분석한 결과, 터널 시점부, 종점부 그리고 저토포 구간에서의 위험도에 따른 비용이 증가하며, 환경성 보다는 안정성에 대한 비용이 높게 나타남을 확인하였다.
4. 위험도 평가기법을 터널설계에 적용하여 기존의 암반등급을 반영한 방법을 보완하고 안정성 및 환경성을 고려하여 굴착방법의 선정, 제어발파의 적용, 보조보강공법의 선정 등에 활용하였다.

그러나 본 평가기법은 해석결과 등을 바탕으로 이루

어진 것으로서 위험요소의 선정, 위험도 평가방법, 위험등급의 산정 등에 대한 보다 객관적이고 검증이 필요하다고 사료되며, 또한 터널 시공단계에서 현장자료를 바탕으로 정량적인 위험도 분석자료를 수집하여 이를 보완하여야 할 것이다.

참고문헌

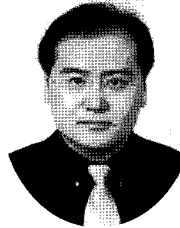
1. 위용근, 박준경, 전성권, 김영근(2002), 합리적인 터널설계를 위한 정량화 지표(Multiple Index) 개발 및 적용에 관한 연구, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 31-42.
2. 최창림, 박준경, 유동욱, 김영근, 이두화 (2003), 도심지 터널 특성을 고려한 MI 시스템 개발 및 적용, 한국터널공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 156-173.
3. 유광호, 박연준, 강웅 (2001), 절리암반 터널의 안전을 평가를 위한 수치 해석적 연구, 터널과 지하공간, 제11권 제3호, pp. 279-288.
4. 박종원, 박연준, 유광호, 이상돈 (2004), 터널의 안전을 평가 기법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제14권 제5호, pp. 327-338.
5. 김창용 (1998), 도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성 예측과 인접구조물 손상평가에 관한 연구, 한양대학교 대학원 박사학위 논문.
6. 중앙환경분쟁조정위원회 (1997), 소음으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구.
7. 중앙환경분쟁조정위원회 (2003), 진동으로 인한 건축물 피해에 관한 연구.
8. (주)삼보기술단 (2005), 성남-여주 복선전철 5공구 건설공사 설계보고서.
9. (주)삼보기술단 (2005), 성남-여주 복선전철 5공구 건설공사 위험도 분석 보고서.
10. Attewell, P.B., Woodman, J.P. (1982), "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", Ground Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 13-22.
11. Attewell, P.B., Taylor, R.K. (1984), "Ground movements and their effects on structures", Survey University Press, USA.
12. Arends, G., Bielecki, R., Castle, J., Drabek, S., Haack, A., Nedbal, F., Nordmark, A., Sterliag, R. (2004), Risk budget management in progressing underground works, ISTT and ITA Joint Working Group Report, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 29-33.
13. Eskesen, S.D., Tengborg, P., Kampmann, J., Veicherts, T.H. (2004), Guidelines for tunnelling risk management: ITA Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 217-238.



김 영 근

삼성건설(주)
토목ENG팀
부장

E-mail: babokyg@hanmail.net



김 도 형

(주)삼보기술단
지반부
과장

E-mail: shipdo@chol.com
