

## 지반안정성 및 사회환경성을 고려한 터널 위험도 분석 및 평가

김도형, 김영근, 소충섭, 오세준 ((주)삼보기술단)

김갑부 (에이스올)

박준경 (Texas A&M)

### 1. 서 론

최근 터널공사가 증가함에 따라 터널자체의 안정성뿐만 아니라 터널굴착으로 인한 환경영향문제가 사회적으로 대두되고 있다. 터널과 같은 지하구조물의 경우에는 지반의 다양한 변동성과 불확실성으로 인한 설계 및 시공단계에서의 위험성(Risk)이 항상 존재하기 때문에 터널공사에 영향을 주는 위험요소에 대한 위험도 평가 및 관리가 매우 중요하다. 터널에서의 위험요소는 크게 지반 안정성 요소와 사회환경성 요소로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 터널공사로 인한 지반안정성에 대한 위험도 분석을 지반자체의 지보능력, 지반침하에 의한 인접구조물 손상, 막장내 지하수 유입량, 지진영향 등의 요소로 구분하여 평가하였다. 또한 사회환경성에 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, 각 위험도에 대한 파괴확률 및 사회적인 비용을 다양한 확률론적 분석기법과 통계자료를 사용하여 분석함으로써 위험도가 터널공사에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 위험도 평가기법을 터널설계에 적용하여 기존의 암반등급이 중심이 되는 설계방법을 보완하여 설계 및 시공단계의 위험도를 최소화할 수 있는 합리적인 터널설계를 도모하였다.

### 2. 터널에서의 위험도 분석 개요

일반적인 지하구조물의 설계에서는 허용응력설계법의 안전율 개념을 주로 이용하였다. 이러한 안전율은 저항(Resistance)과 하중(Load)의 비로 표현될 수 있다. 그러나, 안전율 개념은 지반구조물의 상대적인 신뢰성을 측정하는 데에는 한계를 가지고 있다. 가장 중요한 단점은 지반자체가 고유의 변동성 및 다양한 불확실성을 가지고 있음에도 불구하고 각 설계정수에 대한 대표값을 할당해야 한다는 점이다. 이와같이 대표값을 산정하여 해석하는 방법을 결정론적 방법이라 한다.

본 연구에서 언급하고 있는 위험도 분석은 평균적 의미의 지반거동 분석을 바탕으로 수행되어진

기존설계의 단점을 보완하고 지반조사결과 및 주변환경요소의 불확실성을 합리적으로 고려하기 위해서 다양한 확률론적인 기법과 통계자료를 활용하는 방법이다. 이를 위해서 지하구조물의 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.

$$RISK = \sum P_f \times C_f \quad (1)$$

$P_f$  : 구조물의 생애주기 동안의 파괴확률

$C_f$  : 파괴비용

위험도 분석에서 가장 중용한 것은 신뢰성 있는 파괴확률의 산정이며, 파괴확률을 산정하는 일련의 과정은 신뢰성 분석에 바탕을 두고 있다. 안전율이라는 이라는 것은 실제로 그 이면에 신뢰성 분석을 통하여 결정된 것임을 이해할 필요가 있다. 신뢰성 분석을 위한 분석기법에는 확정적 방법, 확률적 방법, 신뢰성 방법이 있으나, 본 연구에서는 신뢰도 분석이 필요한 부분에서는 변수들의 불확실성과, 하중 및 파괴모델의 불확실성을 확률론적인 방법을 이용하여 분석하였다. 비록, 터널 기술자의 판단에 의해 결정된 데이터라 할지라도 이 방법은 각 설계 변수들의 불확실성을 판단할 수 있는 정보를 제공해 주기 때문에 결정론적 방법보다는 훨씬 의미가 있다고 할 수 있다. 또한, 민원발생과 같은 사회환경적인 위험요소의 위험도 평가는 신뢰성 있는 통계자료의 획득과 함께 합리적인 자료의 적요이 매우 중요하다.

### 3. 터널에서의 위험도 분석 방안

여기에서는 주거 밀집지역을 통과하는 철도터널에 대한 위험도 분석사례를 들어 터널에서의 위험도 분석 및 평가 방안에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 터널의 설계 및 시공단계에서 발생할 수 있는 위험요소를 선정하고 그에 대한 각 위험요소의 위험도 분석을 위한 사전조사항목에 대하여 설명하였다.

#### 3.1 위험 요소의 선정

그림 1에서 보이는 바와 같이 복선단면의 철도터널로서 연장이 3,516m인 산악터널이다. 터널시점부와 저토포 통과부 및 종점부에 대규모의 주거지역이 있으며, 터널노선 상부에 도로터널이 교차한다. 또한, 공사용 사갱 1개소와 환기방재용 사갱 1개소가 계획되어 있다.

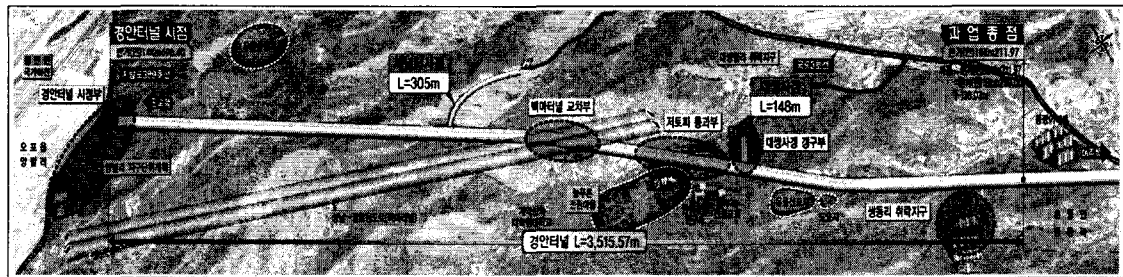


그림 1. 터널 개요도

본 터널의 설계단계에서 고려해야할 위험요소를 크게 안정성 위해요소와 환경성 위해요소로 구분하였다. 지반 안정성에 대한 위험요소는 터널굴착에 대한 지반자체의 지보능력, 지반침하에 의한 인접구조물 손상, 막장내 지하수 유입량, 지진영향의 요소로 구분하였다. 또한, 환경성에 대한 위험요소는 공사중 터널발파로 인한 소음과 진동, 운영중 열차운행으로 인한 소음과 진동, 지하수위 저하로 인한 주변 관정피해 영향의 요소로 구분하였다. 표 1은 본 연구에서 터널의 위험도 분석에 선정된 위험요소를 나타낸다.

표 1. 터널에서의 위험 요소

구분	위험 요소	비고
안정성 위험요소	① 지반자체 지보능력	무지보상태의 터널굴착시 파괴확률
	② 지반침하	지반침하로 발생하는 인접구조물 손상
	③ 지하수 유입량	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

### 3.2 위험도 분석을 위한 사전조사 및 활용

터널에서의 위험요소를 선정한 후 각 위험요소에 대한 위험도 분석과 평가를 위해서는 상세한 사전조사 및 분석의 과정이 선행되어야 한다. 상세한 지반조사를 통해 터널과 주변 지반의 안정성에 직접적인 영향을 주게 되는 암반의 강도 특성의 불확실성에 대한 확률론적인 파악과 함께 현장조사를 통하여 터널노선 부근의 인접구조물의 현황과 주거가구(주거인원)에 대한 조사가 수행되어야 한다. 또한, 전단강도기법을 통한 무지보 상태의 터널안전율, 터널노선 주변의 지표침하량의 산정, 터널구간별 막장내 유입수량 및 지진가속도에 대한 충분한 양의 데이터를 수치해석과 경험적인 방법에 의해 획득해야 한다. 또한, 민원발생을 인한 피해보상액의 과거 판례사례 및 관련기준들에 대한 조사가 수행되어야 한다.

표 2와 표 3은 안정성 위해요소와 환경성 위해요소에 대한 사전조사항목에 대하여 나타내었다.

표 2. 안정성 위해요소에 대한 사전조사 및 활용

위험 요소	위험도 분석을 위한 자료	조사 자료의 분석 및 활용
① 지반 지보능력	강도정수 $c$ (점착력), $\phi$ (마찰각)값의 확률분포	전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction)을 통한 지반안전율 산정
② 지반침하	연속체 수치해석 물성치 / 인접구조물 현황 및 보상기준	지반침하로 인한 인접구조물의 손상도 평가
③ 지하수 유입	암반등급별 투수계수 / 초기상태의 지하수위	터널내 유입수량 산정을 통한 RMR암반분류의 불확정성 반영
④ 지진영향	동적해석 물성치 / 지진계수	지반증폭현상 파악에 의한 지진가속도 산정

표 3. 환경성 위험요소에 대한 사전조사 및 활용

위험 요소	위험도 분석을 위한 자료	조사 자료의 분석 및 활용
① 발파 소음	민원예상 현황 및 피해보상액 기준 소음·진동 규제기준 / 소음·진동 추정식	소음·진동 영향평가를 통한 규제 기준초과로 인한 사회적 비용산출
② 발파 진동		
③ 열차 소음·진동		
④ 지진수위 저하	수리학적 물성 / 시추공 초기 지하수위	지하수 거동분석을 통한 지하수위 저하 영향권 평가

## 4. 지반안정성 위험도 분석

### 4.1 지반 지보능력

지반 지보능력에 대한 위험도 분석은 지반정수들의 불확실성에 의한 리스크량에 대한 사회적 비용을 산정한다. 지반공학의 특성상 지반의 특성을 완벽하게 파악할 수 있을 정도의 충분한 지반 조사를 수행한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 지반조사 결과로 도출된 강도 정수는 불확실성을 포함하게 된다. 이러한 강도정수들의 불확실성을 표현하는 변동계수와 지반자체의 안전율과의 관계를 통하여 파괴확률을 산출한다.

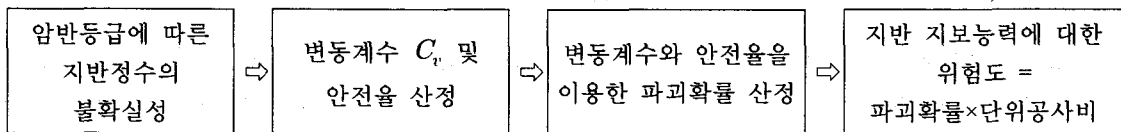


그림 2. 지반 지보능력 위험도 분석 절차

가장 보편적으로 변동계수  $C_v$ (coefficient of variation)를 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 상관없는 데이터의 분산정도를 백분율(%)로 표현함으로써 각 데이터들간의 절대적인 비교를 할 수 있다. 지반자체가 가지는 지보능력을 나타내는 지반안전율은 지반의 전단강도( $c, \phi$ )를 터널이 파괴상태에 도달할 때 까지 감소시켜가며 반복적인 수치해석을 수행하여 터널의 파괴라인과 안전율을 산정하는 전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction Method, SSR)를 사용하여 산정할 수 있다.(유광호 등, 2000) 그림 3은 전단강도감소기법에 의한 안전율 산정의 개요도를 나타낸다.

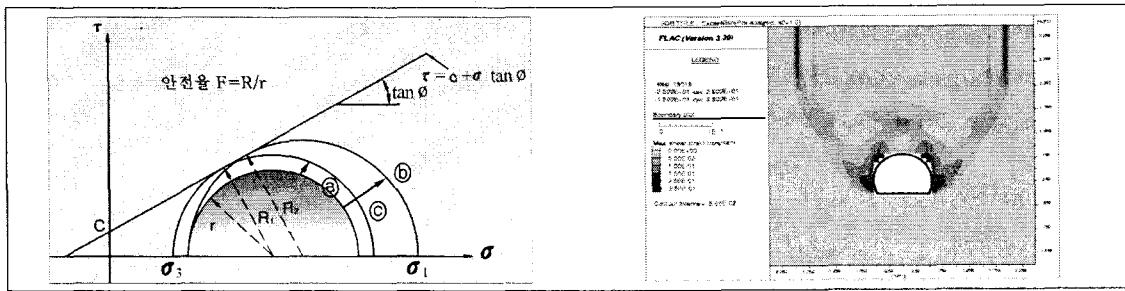


그림 3. 전단강도 감소기법(SSR)에 의한 안전율 산정

위에서 구해진 지반 강도정수의 변동계수와 지반안전율을 가지고 파괴확률을 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 구해진 파괴확률과 단위구간의 터널공사비를 곱하여 파괴비용을 산출한다.

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

여기서,  $p_f$  : 파괴확률  
 $\nu_c$  : 안전율  
 $C_{vR}$  : 저항력의 변동계수  
 $C_{vQ}$  : 하중의 변동계수

$$\Phi(\cdot) : \text{정규분포 함수} \quad \psi(h) = \frac{1}{2\pi} \int_0^h \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx$$

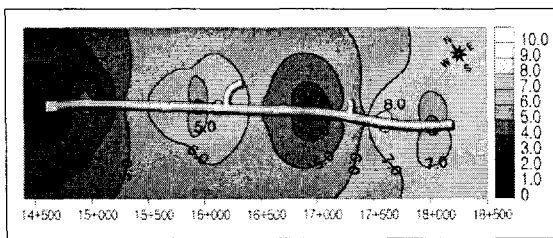


그림 4. 지반안전율 분포도

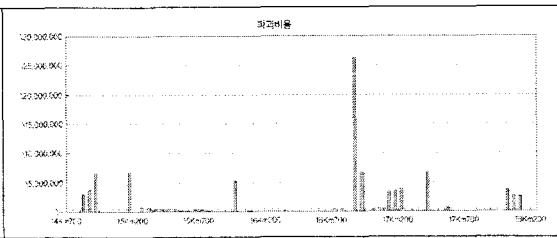


그림 5. 지반지보능력 위험도분석 결과

#### 4.2 지반침하로 인한 인접구조물 손상

터널굴착으로 인한 지반침하로 발생하는 인접구조물의 손상에 대한 위험도 분석에 대하여 설명하고자 한다. 수치해석과 경험식을 바탕으로 지표침하거동 분석으로부터 인접구조물의 부등침하량 및 기울기를 산정하여 각 구조물의 손상정도를 평가하여 위험도 분석을 실시한다. 그림 6은 지반침하에 대한 위험도 분석 절차를 나타낸다.

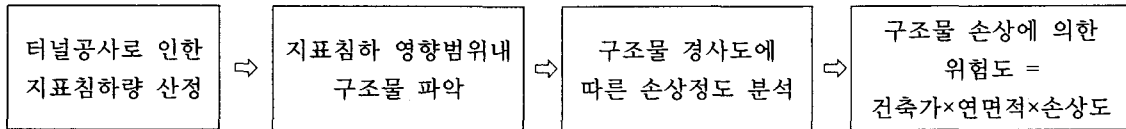
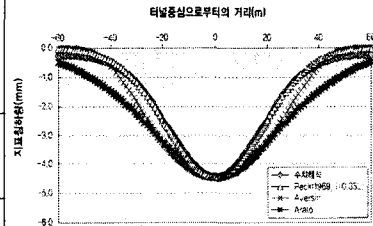


그림 6. 지반침하 위험도 분석 절차

표 4. 지표침하곡선 산정의 경험식

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



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

표 5. 기울기 및 침하부분 평가기준

등급	상 태	조 치	손상정도(%)
A	건물 기울기나 기초(지반)에 문제점이 없는 건전하고 양호한 상태	일상적 유지관리	0
B	건물 기울기나 기초(지반)에 큰문제는 없으나, 부분적으로 경미한 손상이 발생하여 필요시 간단한 보수가 요구되는 상태	지속적인 주의관찰 필요 시 간단한 보수 후 일상적인 유지관리	5~10
C	건물 기울기나 기초(지반)의 침하가 허용치를 초과한 상태	부분적인 보수,보강 지속적인 감시	20~40
D	건물 기울기나 기초(지반)의 침하가 과다하게 발생하였거나 진행성으로 인하여 사용성 또는 안전성에 문제가 되는 상태	사용제한 여부 판단 전반적인 대규모 보강	40~60
E	건물 기울기나 기초(지반)의 침하가 극한상태에 근접하여 안전성이 극히 우려되는 상태	사용금지 긴급보강조치 철거 또는 재건축	60~100

표 6. 건물기울기 평가기준(주택재건축 사업 추천)

구분 \ 등급	A	B	C	D	E
건물기울기	1/750 이하	1/750 초과 1/500 이하	1/500 초과 1/300 이하	1/300 초과 1/200 이하	1/200 초과

표 7. 단위 면적당 건축단가

	아파트	주차장	공장	일반주택
건축단가	₩ 550,000	₩ 3,000,000	₩ 3,780,000	₩ 981,000

표 4에 나타난 경험식과 수치해석 결과를 분석하여 지표침하에 대한 영향범위를 산정하며, 영향 범위내에 존재하는 구조물의 최소 손상정도를 기준으로 하여 리스크량을 산출한다(표 5~표 7 참조). 그림 6은 터널노선을 따른 구조물 경사도의 분포도를 나타내며 그림 7은 지표침하에 대한 위험도 분석결과를 나타낸다.

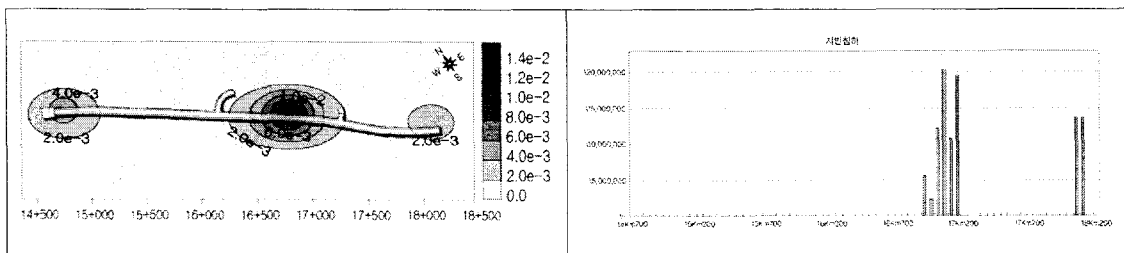


그림 6. 구조물 경사도 분포도

그림 7. 지표침하 위험도 분석 결과

### 4.3 지하수 유입량 위험도 분석

RMR 암반분류 자체의 불확실성을 구하여 위험도 설계에 반영하며, 터널공사중에 막장내의 지하수 유입량으로 인한 RMR저감점수에 따른 파괴확률 및 파괴비용을 산정한다. 그림 8은 지하수 유입량에 대한 위험도 분석의 절차를 나타내며, 표 8은 RMR 암반분류 기준을 나타낸다.

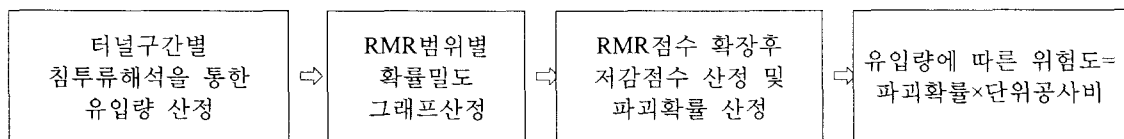


그림 8. 지하수 유입량 위험도 분석 절차

표 8. RMR 암반분류 기준

구분	분류 파라미터		값 의 범 위						
1	암 석 강 도	점하중강도 (MPa)	>8	4~8	2~4	1~2	이 범위는 일축압축 시험이 적당		
		일축압축강도 (MPa)	>200	100~200	50~100	25~50	10~25	3~10	1~3
	평 점	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD(%)		90~100	75~90	50~75	25~50	<25		
	평 점	20	17	13	8	3			
3	절 리 의 간 격		>2m	0.6~2m	200~600mm	60~200m	<60mm		
	평 점	20	15	10	8	5			
4	절 리 의 상 태		거치름 불연속 밀착신선	조금거칠다 간극<1mm 신선	조금거칠다 간극<1mm 연질화	박리또는 gouge<5mm 간극1~5mm	부드러운 gouge >5mm 또는 간극>5mm		
	평 점	30	25	20	10	0			
5	지 하 수	터널10m길이당 용수(湧水) (ℓ/分)	없 음	<10	10~25	25~125	>125		
		응력비= 간급수압 최대주응력	0	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		일반적상태	완전 건조	축축함	젖은 상태	물방울 떨어짐	흘러내림		
	평 점	15	10	7	4	0			

암반분류를 위한 방법 중에 하나인 RMR방법은 5가지 파라미터로 구성된 할당점수의 합으로 산정된다. 할당된 점수는 파라미터의 일정범위의 경우에 대해서 단일 점수로 표현되므로 연속적인 점수의 할당이 불가능하여 특정 파라미터에 대해서는 과대·과소평가된다.

표 8의 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 그림 9와 같이 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.

$$\text{RMR 저감점수} = -8 \times (\text{유입유량} - 0.125) \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 유입유량에 따른 RMR 저감 점수를 계산하며, RMR 등급이 저감됨에 따라 나타나는 파괴확률의 변화를 고려하면 터널굴착으로 인한 터널내 유입유량에 따른 위험도를 정량적으로 산출할 수 있다. 또한 그림 9에 연속적 RMR점수에서 각 구간의 확률밀도를 표 9와 같이 구할 수 있으며, 그림 10과 같이 RMR의 점수를 정규분포로 표현할 수 있다.



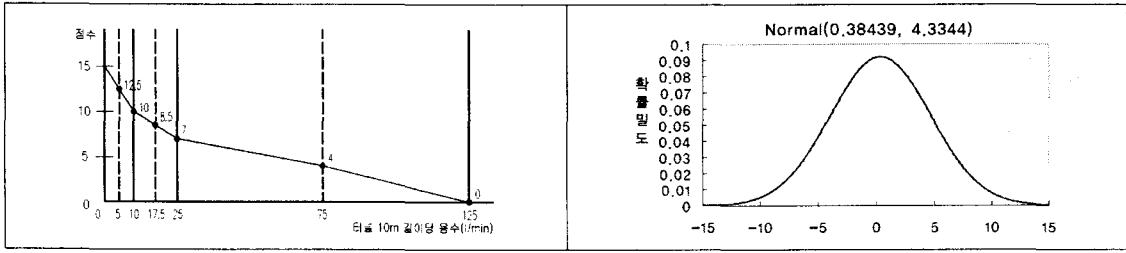


그림 9. 연속적 RMR

그림 10. 확률밀도 그래프

표 9. RMR값의 확률

용수량	0~10	10~25	25~125
평 점	15~10	10~7	0~7
확률밀도 그래프			

표 10은 RMR저감점수에 따른 파괴확률을 나타내며, 그림 11과 그림 12는 각각 수치해석으로 산정된 지하수 유입량의 분포도와 위험도 분석 결과를 나타낸다.

표 10. RMR저감점수에 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%

RMR값의 확률(12점)

RMR값의 확률(6점)

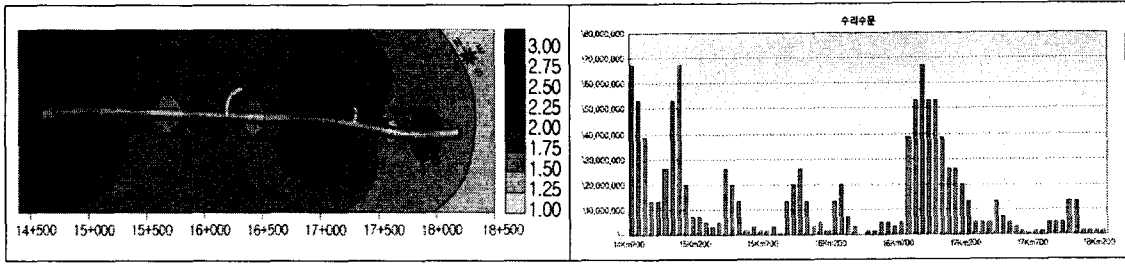


그림 11. 지하수 유입량 분포도

그림 12. 지하수 유입량 위험도 분석 결과

#### 4.4 지진영향 위험도 분석

터널구조물은 중요한 기반시설물로서 지진피해 발생시 많은 인명과 재산피해를 야기하므로 상위 개념의 내진설계를 통한 구조물 구축이 필요하다. 지상구조물은 지표면에서의 자유장 응답이 중요하지만 터널과 같은 지하구조물에서는 구조물이 위치하는 지층에서의 지진 응답이 중요하므로 터널구간의 암반특성을 고려한 지반증폭현상을 파악하여 지진에 대한 상대적인 영향정도를 검토할 수 있다. 그림 13은 지진영향에 대한 위험도 분석절차를 나타내며 그림 14는 지반증폭현상을 파악하기 위한 평가방법 및 절차를 나타낸다.

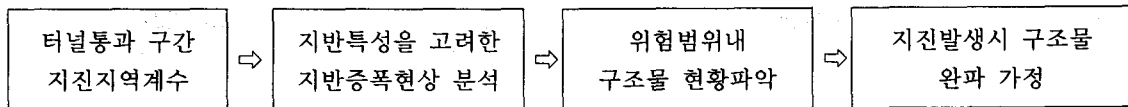


그림 13. 지진영향 위험도 분석 절차

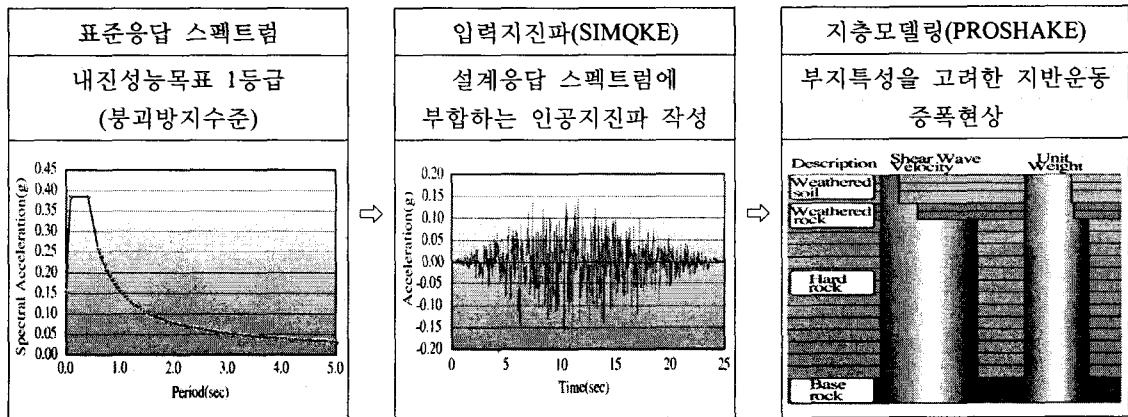


그림 14. 지진영향 평가방법

분석지역의 지역계수를 기준으로 산정된 지진가속도를 초과하는 구간에서는 지진발생시 위험범위 내의 구조물은 완파된다고 가정하고 구조물의 건축단가를 기준으로 파괴비용을 산출하였다. 그림 15는 수치해석으로 구해진 과업구간의 지진가속도 계수의 분포도를 나타내며, 그림 16은 지진영향에 대한 위험도 분석의 결과를 나타낸다.

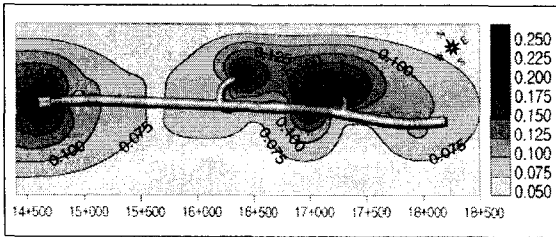


그림 15. 지진가속도 계수 분포도

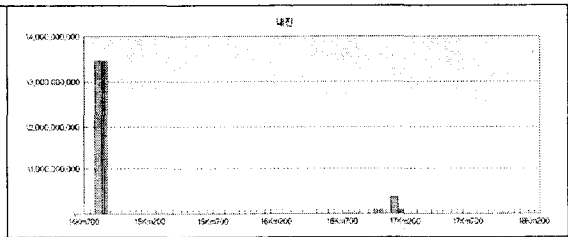


그림 16. 지진영향 위험도 분석 결과

## 5. 사회환경성 위험도 분석

### 5.1 발파소음에 대한 위험도 분석

발파소음에 의한 정신적 피해의 리스크량을 산출하며 피해보상의 사례별 피해량과 피해액을 기존 판례의 자료를 근거로 하여 회귀분석을 통한 추정식과 피해량 환산표를 이용하여 산정한다.

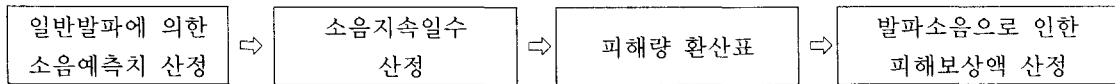


그림 17. 발파소음 위험도 분석 절차

시공중 터널발파로 인한 발파소음은 중앙환경분쟁 조정위원회(1996)의 제안식으로 예측할 수 있다.

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

소음 피해량은 소음도(측정 소음도와 기준 소음도)와 피해소음의 지속시간과의 관계로 나타난다. 소음도에 따라서 인체의 경우 일시적인 난청 증세를 나타내며 청력은 본래의 상태로 복귀하지만 지속시간이 길 경우 청력 손실의 피해를 입을 수 있고, 가축의 경우 성장지연, 번식효율저하, 유사산 및 폐사에 이르기까지 한다.

발파소음에 의한 피해는 갱구부에서 발생하며 피해량 산정식은 식 (6)과 같다

$$M = 12.5D - 102.5 \quad (6)$$

(D : 피해량 환산표)

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.

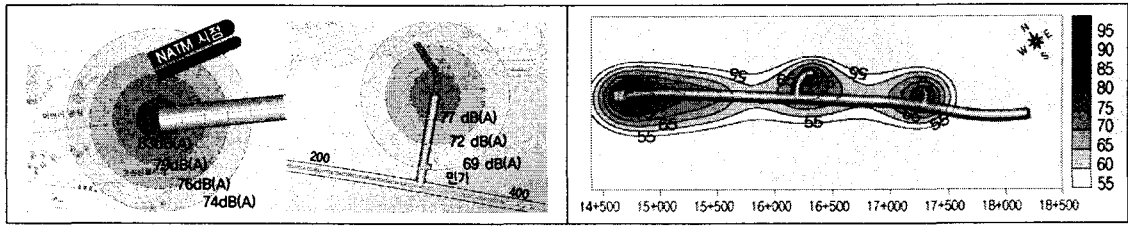


그림 18. 발파소음 영향검토

그림 19. 발파소음 분포도

표 11. 발파소음에 대한 위험도 분석결과

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

### 5.2 발파진동에 대한 위험도 분석

진동에 의한 사회적 비용은 정신적인 피해와 재산적인 피해로 구분되며, 중앙환경분쟁 조정위원회에서 발간한 『진동으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구』를 바탕으로 산출할 수 있다.

#### 1) 정신적인 피해

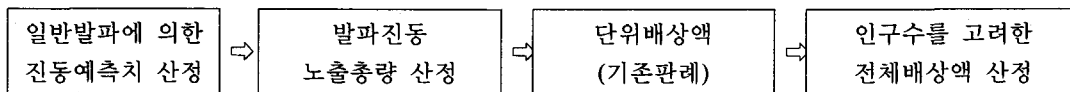


그림 20. 발파진동 위험도 분석 절차

진동초과 노출총량은 식 (7)을 사용하여 산정할 수 있다.

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

$E_{vt}$  : 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.

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

$D$  : 배상액(damage, 원)

$E_{vt}$  : 진동 초과노출 총량

$P$  : 단위 배상액, 단위노출량당 배상금액 (원/dB·일) 350원

## 2) 재산적인 피해

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.

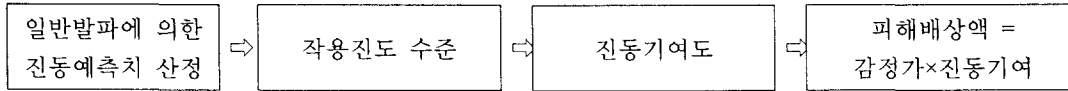


그림 21. 발파진동 위험도 분석 절차

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

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

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

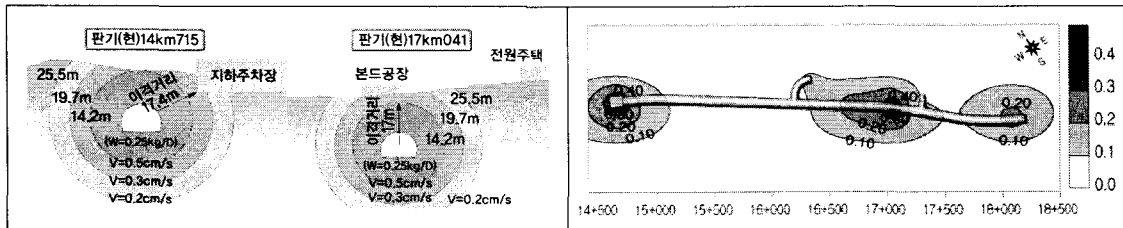


그림 22. 발파진동 영향검토

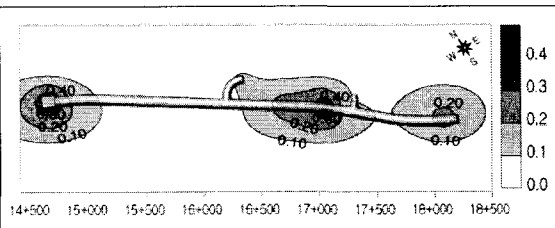


그림 23. 발파진동 분포도

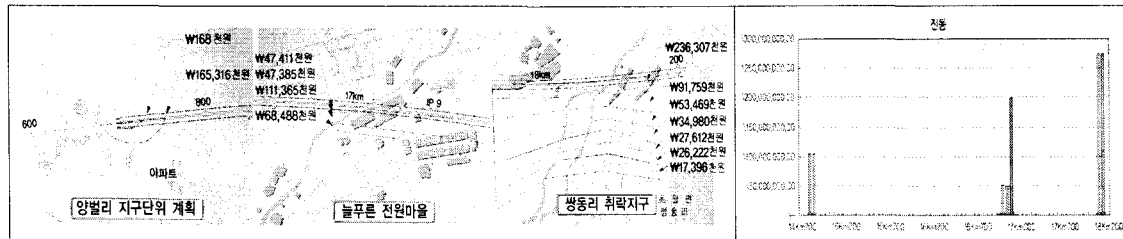


그림 24. 발파진동에 의한 피해배상액 산정

그림 25. 발파진동 위험도 분석

## 5.3 운영중 열차 소음 및 진동에 대한 위험도 분석

운영중의 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 Lange식(식(10))을 이용하여 산정할 수 있으며, 열차의 진동은 Tokita식(식(11))을 이용하여 진동레벨보정, 진동파의 전달특성, 구조물과의 상호작용에 의한 보정 등의 과정을 통해 산정할 수 있다.

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

$d$  : 터널 구조물로부터 건물까지의 거리

$$L_v = L_0 - \left[ A_1 \log \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right) + A_2 \gamma \right] \quad (11)$$

$r_0 = 3m$  일 때  $L_0 = 82dB$  ( $r_c = 10^{-5} m/s^2$ )

중앙환경분쟁 위원회에서는 소음 발생기간이 증가할수록 사람이 느끼는 소음은 본래의 소음보다 식 (12)와 같이 증가한다고 가정하였다.

$$\Delta L = \frac{5}{\log 3} \times \log T \quad [dB] \quad (12)$$

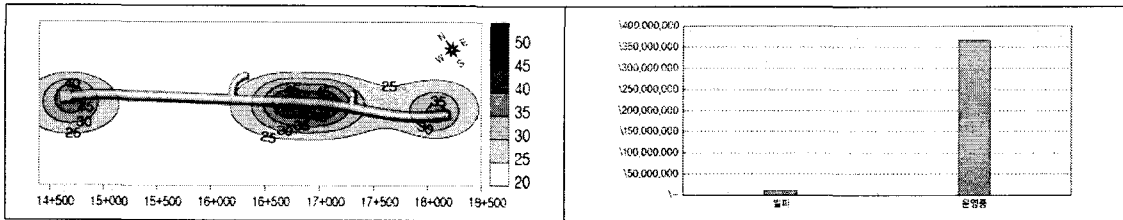


그림 26. 열차 운행중 소음 영향검토

그림 27. 발파소음과 열차소음 피해액 비교

운영중 열차운행으로 인한 소음에 의한 피해량은 소음 예측치와 소음 지속일에 영향을 받으므로 예측치가 기준치보다 조금 초과할지라도 지속일수가 상대적으로 많으므로 피해액이 발파소음을 인한 피해액보다 매우 큰 값을 가지게 된다.

#### 5.4 지하수위 저하에 대한 위험도 분석

터널 굴착으로 인한 지하수 저하로 인근 지역의 관정에 대한 피해비용을 산출한다. 시추공별 초기 지하수위와 지하수 유동해석을 통하여 산정된 터널굴착후의 지하수위로부터 지하수위의 저하가 발생하는 영향범위를 산정한다. 또한, 영향범위내의 관정개수를 파악하여 피해배상액을 산정한다. 그림 28은 지하수위 저하에 대한 위험도 분석 절차를 나타낸다.

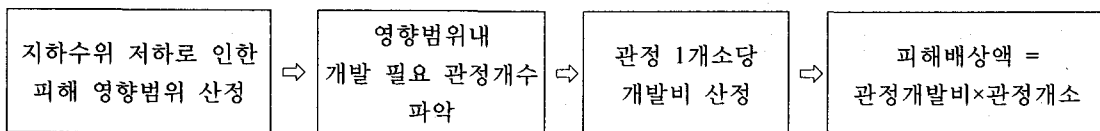


그림 28. 지하수위 저하 위험도 분석 절차



그림 29. 3차원 지하수 유동해석

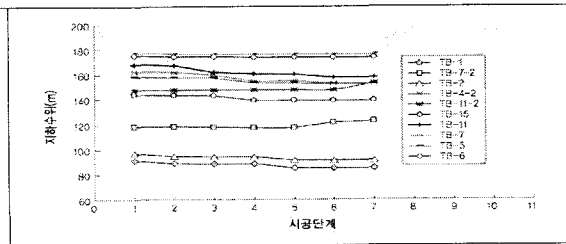


그림 30. 시추공별 지하수위 저하 분석

표 12. 지하수 관정 개발 비용

구 분	비 용
지하수층이 높은 경우	200 ~ 400 만원
지하수층이 낮은 경우	700 ~ 1,500 만원

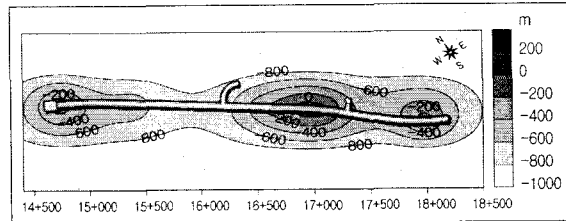


그림 31. 지하수위 저하 영향 범위

실제 판례(국도 37호선 확포장 공사 소음진동 및 지하수 배상판결)에서 가정용 소형 관정 개발비를 3,146만원으로 책정하였으며, 본 연구에서는 지하수층의 불확실성을 고려하여 관정 1개당 1,500만원의 개발비가 소요된다고 가정하였다.

## 6. 위험도 분석의 터널설계에의 활용

앞에서 설명된 각 위험요소들에 대한 위험도 분석결과로부터 그림 32와 그림 33과 같이 터널구간의 상대적인 위해영향 등급도를 산정할 수 있다. 또한, 지반안정성과 사회환경성에 관계된 위험요소들의 상대적인 위해점수와 위험도 분석결과를 합산하여 그림 34와 그림 35와 같이 나타낼 수 있다.

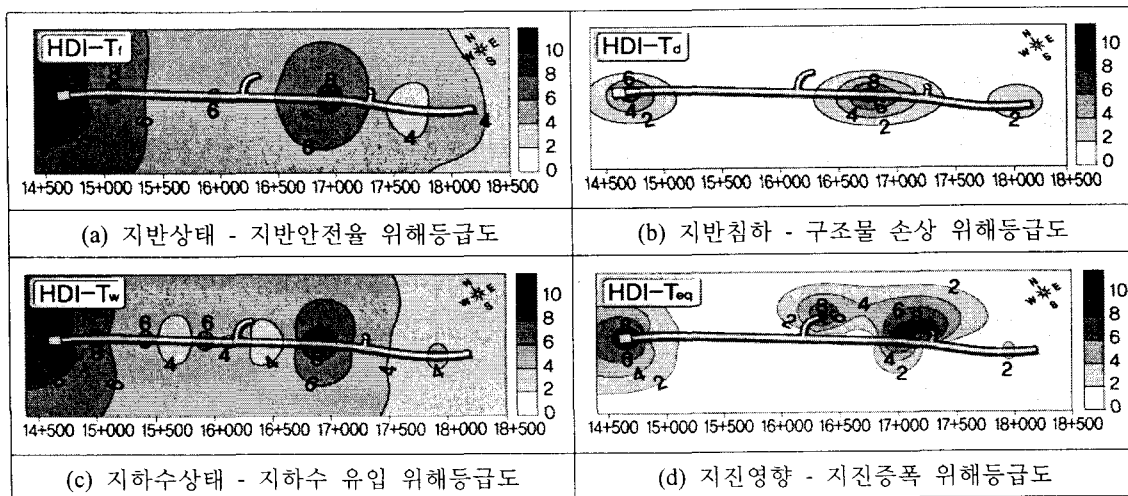


그림 32. 지반 안정성에 관한 위험요소별 위해등급도

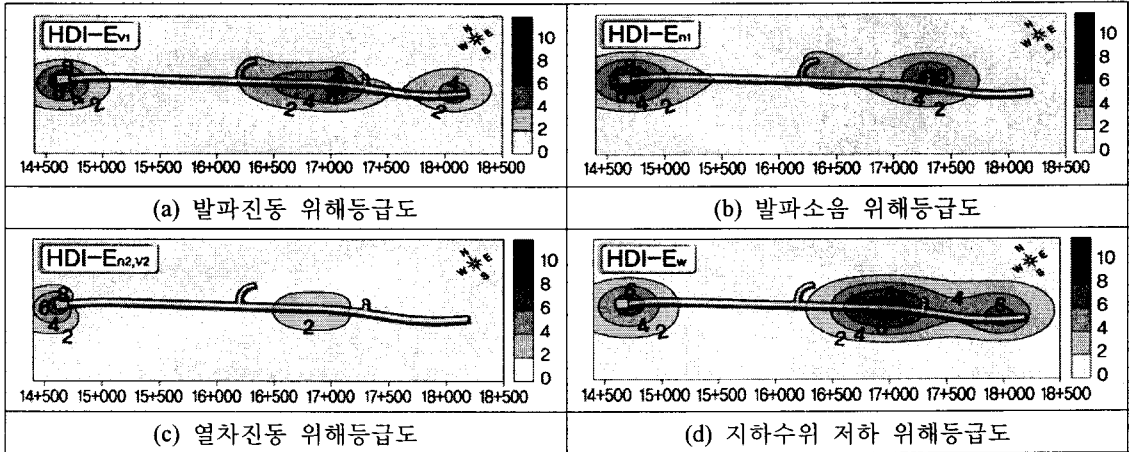


그림 33. 사회환경성에 관한 위험요소별 위해등급도

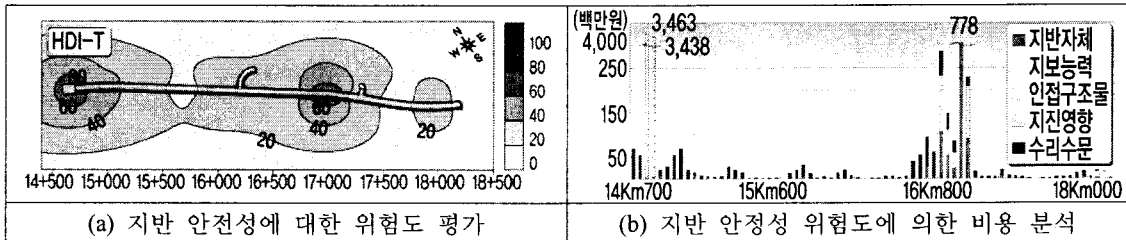


그림 34. 지반안정성 위험도 분석 및 결과

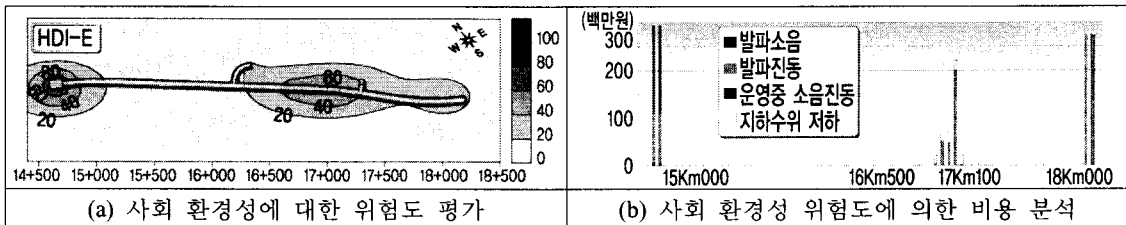


그림 35. 사회환경성 위험도 분석 및 결과

표 13. 통합설계 평가등급

구분	매우위험	위험	보통	안정	매우안정
안정성 등급	T5	T4	T3	T2	T1
HDI-T	100~81	80~61	60~41	40~21	20~0
환경성 등급	E5	E4	E3	E2	E1
HDI-E	100~81	80~61	60~41	40~21	20~0

표 13과 같은 5단계의 평가등급의 가정을 통해 통합설계 지표(Holistic Design Index)인 안정성 설계지표(HDI-T)와 환경성 설계지표(HDI-E)를 산정하였다. 산정된 두가지의 지표를 암반등급과 함께 그림 36에 표현하였다.



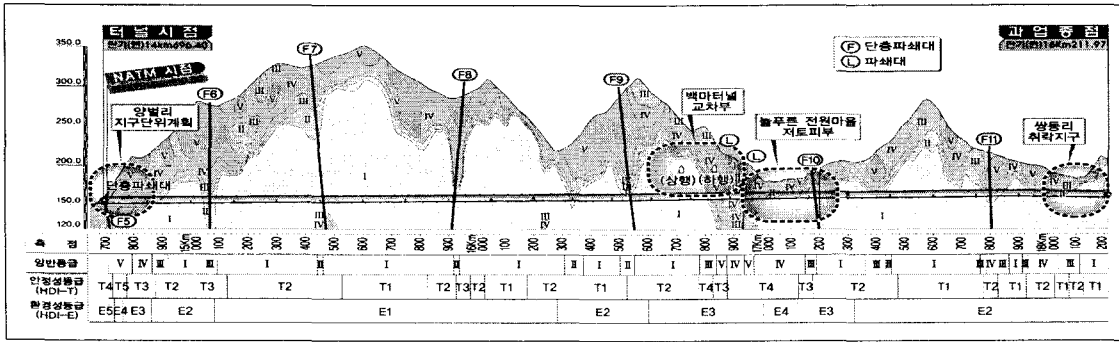


그림 36. 터널구간 안정성 등급 및 환경성 등급

표 14. 통합설계등급에 의한 굴착공법 선정

구분	일반발파 굴착	제어발파 굴착	암파쇄(GNR) 굴착	기계굴착(ITC)
개요도				
적용조건	안정성 등급 : T1~T4 환경성 등급 : E1~E4	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	암반등급 VI 이하 구간	암반등급 VI 이하 구간
적용방법	일반 발파 가능구간	발파 · 진동 영향구간	발파불가 구간	풍화암, 단층파쇄대 구간
적용구간	일반구간	저토포	시점갱구, 저토포	단층파쇄대, 암중경계부

표 14에 보이듯이, 굴착공법 선정시 위험도 분석결과를 바탕으로 일반발파 공법적용에 따른 민원 발생 피해보상액과 특수공법 적용시 발생하는 공사비의 비교를 통해 굴착공법과 적용구간을 선정 함으로서 합리적이며 경제적인 설계가 이뤄지도록 하였다. 또한, 주요구간에 대한 항목별 위험도 분석 결과는 설계자가 보강공법 적용 및 차수그라우팅 적용구간 선정에도 합리적인 판단을 내릴 수 있는 정략적인 데이터를 제공한다.(그림 37 참조)

다시 말해, 터널의 설계 및 시공과정에서 발생하는 위험요소에 대한 정량화된 위험도 분석결과를 활용하여 굴착공법, 지보패턴선정, 보조공법 적용구간 선정 등에 활용함으로써 보다 합리적인 터널설계를 도모하였다.

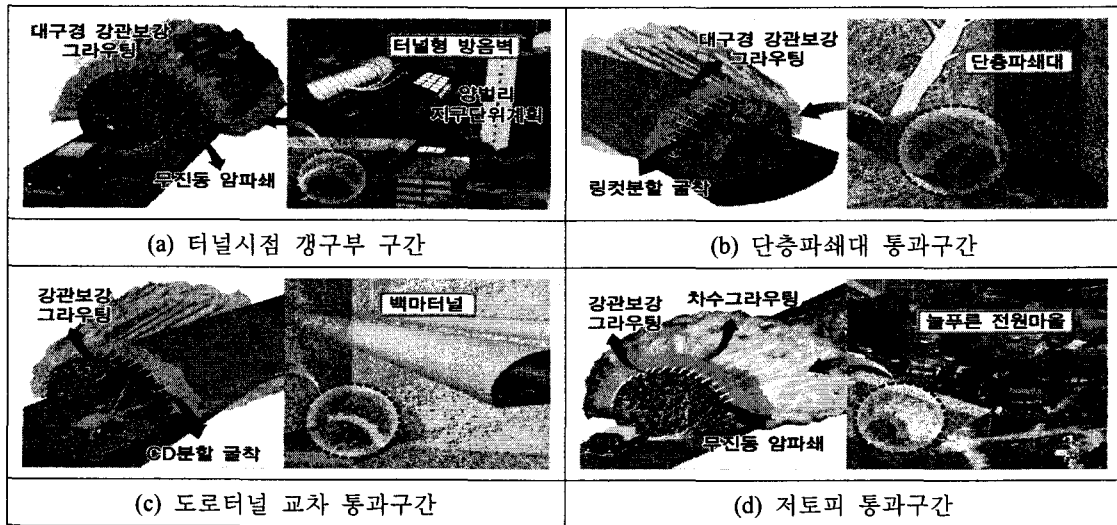


그림 37. 주요구간 굴착공법 및 보조공법 적용현황

## 7. 결 론

본 연구에서는 터널 위험요소를 지반 안정성 요소와 사회 환경성 요소로 구분하고, 각 위험요소에 대하여 위험도를 분석하고 이를 정량적으로 평가하였으며, 위험도에 대한 사회적 비용을 분석 하므로써 위험도가 터널공사에 미치는 영향을 평가하였다.

위험도 평가기법을 터널설계에 적용하여 기존의 암반등급을 반영한 설계방법을 보완하고 지반 안정성 및 사회 환경성을 고려하여 굴착방법의 선정, 제어발파의 적용, 보조보강공법의 선정 등에 활용하여 보다 정량적이고 합리적인 터널설계가 이루어지도록 하였다. 향후 시공단계에서의 위험도 관리를 통하여 이를 상호 보완할 필요가 있다고 판단된다.

### ■ 참고문헌 ■

1. 위용곤, 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. 성남-여주 복선전철 5공구 건설공사 설계보고서(2005), (주)삼보기술단.
4. 성남-여주 복선전철 5공구 건설공사 위험도 분석 보고서(2005), (주)삼보기술단, (주)에이스을.