

## 합리적인 터널설계를 위한 정량화 지표(Multiple Index) 개발 및 적용에 관한 연구

위 용 곤, 박 준 경, 전 성 권, 김 영 근  
(주)삼보기술단 지반공학부

### 요 지

최근 지하철 터널은 사용자 편의성, 도심지 접근성 및 원활한 교통처리 등을 고려하여 지반조건이 불리한 상황에서도 터널로 계획되는 경우가 많아지고 있다. 따라서 시공중의 터널안정성확보, 굴착에 따른 인접구조물의 침하영향, 발파진동영향 등을 종합적으로 고려한 지보패턴 및 보조·보강공법의 결정이 매우 중요하나 정량적인 판단기준의 부재로 인하여 주로 경험적인 설계에 의존하는 경우가 많다.

본 연구에서는 도심지 지하철 터널의 복합적인 거동특성을 고려하기 위하여 여러 가지 예상위험요소의 정량화 방안을 제안하고, 다변량 통계분석기법을 활용하여 여러 가지 위험요소들의 특성을 함축적으로 나타내는 소수의 총합적인 지표(안정성인자, 환경성인자)로 대표화 할 수 있음을 검증하였다.

안정성 인자 및 환경성 인자를 이용한 서울시 지하철 00공구 설계사례를 통해 정량화지표(Multiple Index)의 터널설계에의 적용성을 평가하고 이의 설계시 활용방안을 제안하고자 하였다.

주요어 : 정량화 지표(Multiple Index), 터널설계, 지하철 터널, 다변량 통계분석

### 1. 서 론

최근 설계되고 있는 지하철은 시민이용편의를 위하여 정거장 깊이를 낮춤으로써 층적지반이나 풍화암 등과 같이 지반조건이 불리한 심도에 계획되는 경우가 많고 교통장애의 최소화, 개착공법 적용에 따른 인접건물의 영향최소화, 도심지 밀집지역통과 등의 이유로 개착구간을 최소화하고 터널공법을 적극적으로 검토 적용하고 있다.

도심지 근접지역에 계획되는 지하철 터널의 특성상 터널공법을 적용함에 있어서 발생할 수 있는 여러 가지 위험요소에 대하여 설계단계에서 적절한 방법을 사용하여 예측하고 평가하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있으며, 그 평가 결과는 전체 프로젝트의 성공적인 수행 여부에 상당한 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 소수 책임 기술자의 주관적인 판단에 근거하던 세부 설계방안을 개선하고자 시공중 및 운용중에 터널공사에 영향을 미치는 여러 가지 인자들을 수

치해석기법 및 여러 가지 경험식등을 이용하여 정량화 및 수치화하는 기법을 제안하고자 하였다. 또한 수치화된 각 인자의 값들을 통계학적 기법을 통해 인자간의 상호관계를 분석하여 소수의 대표인자(안정성인자, 환경성인자)로 대표화 할 수 있음을 검증하는 과정을 통해 제안된 방법의 객관성을 확보하고자 하였으며, 지하철 00공구의 실제 설계세부과정의 의사결정시 적용사례를 통하여 객관적인 지표로서의 활용성을 검토하였다.

## 2. 지하철 00공구 현황 개요

본 과업구간은 지하철 0호선 사업중 서초구 반포동~강남구 역삼동을 연결하는 노선으로 총연장 2,164.5m로 정거장 2개소가 계획되어 있다. 원안설계시 시점부 일정구간과 925정거장 이후 유치선구간을 제외한 나머지 구간은 개착으로 계획되었으나 대안설계시 개착부의 터널화가 적극적으로 검토되었다(그림 1. 참조).

1구간은 사유지 통과구간으로 상부에 반포주공 3단지 아파트 및 산성교회가 위치하고 있으며 매립층, 및 충전층이 약 20m의 층후로 발달하고 있다. 개착공법으로 계획된 사평로 통과구간중 2, 3구간은 정거장 분기구간으로 원설계시 개착구간으로 계획되었고, A구간은 반포육교하부통과 구간으로 원설계시 반포육교 직하부를 상습침수지역의 특성을 감안하여 비배수형터널로 통과하는 것으로 계획되어 있었다. 4구간은 매립층 및 충전층 층후가 두껍게 발달하고 있는 구간으로 노선주변에 건물들이 밀집해 있다. 5구간은 925정거장 분기구간으로 교보생명 사옥이 인접해 있으며, 봉은사로에 위치한 유치선 3선 터널 구간인 6구간은 주변에 병원 및 호텔등 진동예민구조물이 산재한 지역으로 터널계획심도가 비교적 깊은 구간이다.

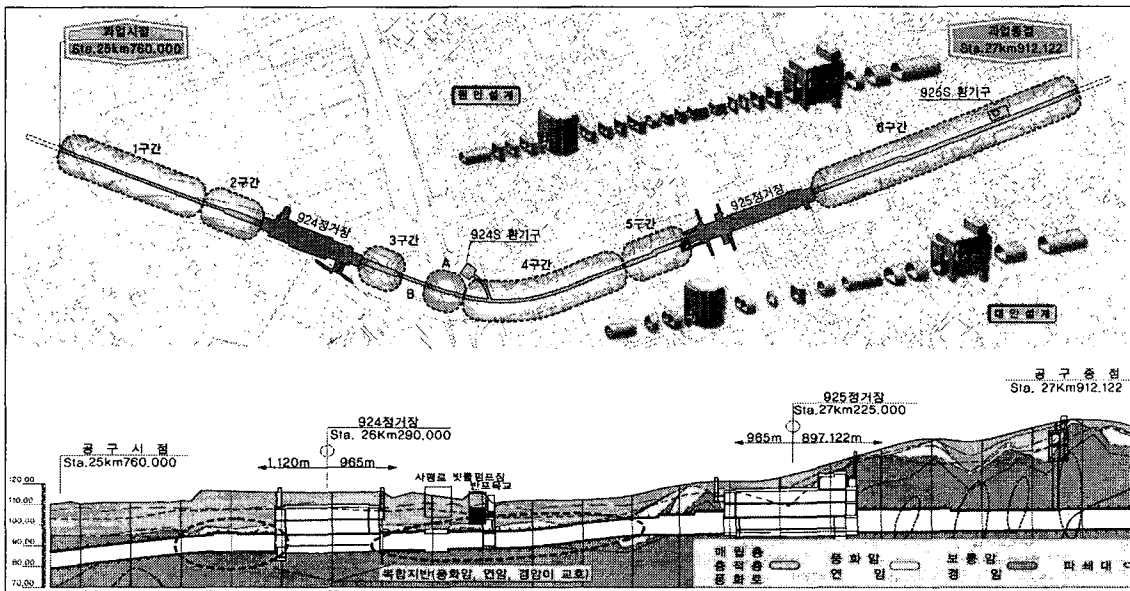


그림 1. 지하철 00공구 현황도

### 3. 지하철 터널 시공에 따른 예상 위험요소의 정량화

일반 도로터널등과는 다르게 지하철 터널의 설계단계에 있어서는 세부설계방안의 선정에 있어 터널건설로 인해 예상되는 여러 가지 영향요소(터널자체의 안정성, 인접건물 침하 영향, 지하수유입영향, 발파진동·소음영향, 운영중 진동·소음 영향 등)를 종합적으로 고려하여 판단을 내리기 힘든 경우가 많이 있으며, 실제로 정량적 설계기법의 부재등의 원인으로 인해 주로 경험적 설계에 의존하는 경향이 있다.

지하철 터널시공에 따른 모든 영향을 고려할 수 있는 설계기법을 개발한다는 것은 현실적으로 불가하지만, 그러나 천층에 건설되는 지하철 터널의 특성상 설계시 필수적으로 고려해야할 중요한 인자는 대체로 다음과 같다.

지하철 터널 시공에 따른 예상 위험요소를 ① 지반자체가 지니는 지보능력 평가인자( $M_F$ ), ② 인접구조물의 위험도를 고려한 침하량 평가인자( $M_S$ ), ③ 지하수조건 및 예상유입량에 따른 평가인자( $M_W$ ), ④ 발파진동에 따른 평가인자( $M_{V①}$ ), ⑤ 발파소음에 따른 평가인자( $M_{V②}$ ), ⑥ 운영중 차량진동에 대한 평가인자( $M_{V③}$ ), ⑦ 운영중 차량소음에 대한 평가인자( $M_{V④}$ )의 7가지의 인자로 구분하여 각 인자들의 정량화기법을 통한 설계활용방안을 모색하고자 한다.

#### 3.1 전단강도 감소기법(SSR)을 이용한 지반의 지보능력 평가( $M_F$ )

일반적으로 터널해석시에는 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법 등으로는 안전율을 산정하기 곤란하며, 주로 정량적인 안전율 산정보다 정성적 안정성을 평가하는데만 제한적으로 수치해석을 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 터널안정성의 정량적 평가를 위하여 지반의 강도( $c, \phi$ )를 터널의 파괴가 발생할 때까지 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 터널의 파괴라인과 안전율을 산정하는 전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction Method, SSR)을 적용하였다.(유광호등, 2000)

탄성-완전소성 구성방정식과 연상유동법칙이 적용될 경우, 전단강도 감소기법으로 구해진 안전율은 분할법(slice method)에 의해 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 지닌다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 응력경로 등과 무관(Dawson 등, 1999)하며 본 연구에서는 유광호(2000)등이 제안한 Incremental Search법에 의해 점진적으로 전단강도를 낮추어 가며 한계상태를 찾는 방법으로 SSR에 의한 터널의 안전율 계산하여 지반의 지보능력, 보조공법 및 임시지보재 등에 의한 지보능력 향상효과 검토 등에 활용하였다.

|  |      |                       |
|--|------|-----------------------|
|  | 해석위치 | 입의 단면                 |
|  | 굴착공법 | 전단면 굴착                |
|  | 보강조건 | 무보강                   |
|  | 보조공법 | 적용안함                  |
|  | 대상지반 | 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암, 경암 |
|  | 프로그램 | FLAC 2D               |
|  | 파괴조건 | Mohr-Coulomb          |

그림 2. 전단강도 감소기법 해석조건

지하철 00공구 터널구간의 지층분포현황 및 터널계획 현황을 고려하여 그림 2와 같이 지층조건을 변화시켜가며 36가지 경우를 고려하였으며 해석 결과는 그림 3과 같다. 해석결과 풍화토 및 풍화암이 깊게 발달된 2구간과 4구간에서 안전율이 작게 나타나는 경향을 보이며 상대적으로 타구간에 비하여 위험도가 크게 나타났다. 3선 대단면인 유치선 구간은 비록 터널단면이 커지기는 하지만 심도가 깊고 분포 암질이 양호하여 상대적으로 위험도가 작은 것으로 평가되었다. 전체 과업구간의 지반지반능력 분포와 구간별 지보패턴 선정, 굴착공법의 선정, 굴진장의 변화, 영구지보재 및 임시지보재의 적용유무 결정시의 자료로 활용하기 위하여 전단강도 감소기법을 적용하여 얻어진 안전율을 구간별로 중단상의 지층상태와 유사한 조건별로 구분하여 전체과업구간상에 도시하였다. (그림 3., 그림 4.)

해석결과 풍화암 이하의 지반에서는 안전율 1.5이하로 굴착직후 별도의 보조공법이나 임시지보재가 없이는 터널의 안정성을 확보하기 어려울 것으로 판단되며, 대체적으로 연암 이상의 암반지반에서는 안전율 1.5이상이 확보되는 것으로 나타났다.

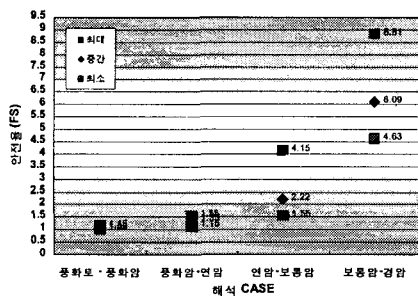


그림 3. 지층조건별 안전율 분포현황

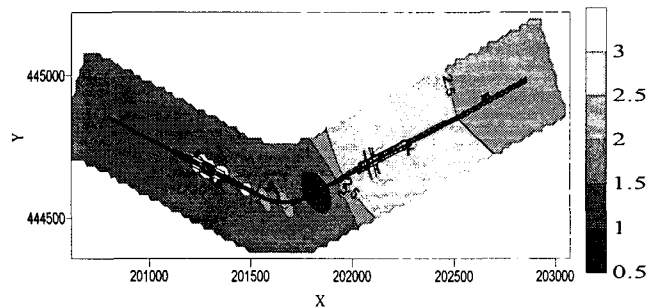


그림 4. 전체구간 안전율 분포도

### 3.2 인접구조물의 위험도를 고려한 인자( $M_s$ )

터널굴착으로 인해 예상되는 구조물 기초지반의 침하에는 균등침하, 전도 및 부등침하 등이 있으며, 인접구조물 손상평가를 위한 3가지 인자로서 아래의 식(1)과 같은 뒤튕각, 처짐비, 수평변형율(Attewell & Woodman(1982), Attewell & Taylor(1984)) 및 최대침하량이 주요인자로 사용되어진다.

$$\text{뒤튐각} = \frac{W_a - W_b}{L_{ab}}, \quad \text{처짐비} = \frac{W_0}{L_{ab}}, \quad \text{수평변형률} = \frac{H_a - H_b}{L_{ab}} \quad (1)$$

여기서,  $W_a, W_b$  : A, B 지점의 침하량,  $L_{ab}$  : A지점과 B지점의 수평거리,

$W_0$  : 관심있는 두 지점과 그 구간에서 발생한 침하곡선간의 최대수직간격,

$H_a, H_b$  : A, B 지점의 수평변위

본 연구에서는 터널구간의 지층분포현황과 터널계획심도 및 터널 최대 굴착폭 등을 고려하여 다음 그림 5와 같은 총 14경우에 대하여 수치해석을 수행하고 터널 횡단방향으로의 침하트라프 및 최대침하량을 계산하였다. 지반조건이 불리한 경우에는 별도의 보조·보강공법을 적용하는 것이 일반적이나 무보강시의 순수하게 터널굴착에 의한 영향정도를 파악하기 위하여 보강공법등의 모델링은 생략하였다.

해석 결과 풍화암 및 풍화암 발달구간에서는 침하량이 증가하는 경향을 보여, 2구간과 3,4 구간에서 상대적으로 침하에 대한 위험도가 큰 것으로 나타났다. 유치선 구간의 경우 터널 최대 굴착폭은 커지나 지반조건이 양호하여 지반안전율 산정시와 비슷한 양상으로 상대적으로 위험도가 덜한 것으로 평가되었다.

그러나 사유지 통과구간(1구간)과 곡선부(4구간)의 경우 과업구간 중 침하위험도가 가장 크고 구조물이 인접되는 등의 특성을 고려 3차원 정밀해석(그림 7.)을 수행하여 인접구조물 위험도 인자 산정시 활용하였다.

|           |  |      |                        |
|-----------|--|------|------------------------|
| • 1,2 구간  |  | 해석위치 | 임의 단면                  |
|           |  | 굴착공법 | 전단면 굴착                 |
| • 3, 4 구간 |  | 보강조건 | 무보강                    |
|           |  | 보조공법 | 적용안함                   |
| • 5, 6 구간 |  | 대상지반 | 매립층, 충적층, 풍화암, 보통암, 경암 |
|           |  | 프로그램 | FLAC 2D                |
|           |  | 파괴조건 | Mohr-Coulomb           |

그림 5. 인접구조물 위험도 평가를 위한 해석조건

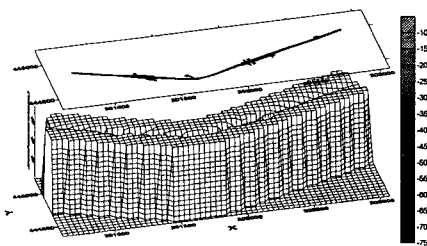


그림 6. 무보강시의 최대침하량

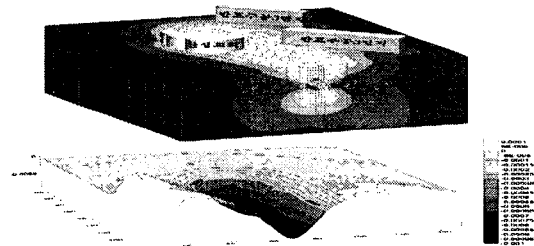


그림 7. 3차원 침하트라프 검토에

### 3.3 지하수조건 및 예상 유입량에 따른 평가( $M_w$ )

지하수 유입량은 시공시 차수그라우팅 적용여부 및 폭원의 결정등에 중요한 요인으로 시공시 적극적으로 대처를 해야 하며, 특히 도심지 구간에서는 지하수위의 저하에 따른 추가 침하발생으로 인접한 구조물에 손상을 끼칠 가능성이 있으므로 계획단계에서의 차수 보강계획은 매우 중요하다고 할 수 있다. 터널굴착에 따른 지하수 예상유입량의 평가와 지반 조건별 차수그라우팅 적용구간 및 주입범위의 합리적 선정을 위해 지층조건과 구간별 단면을 고려한 2차원 침투류 해석 및 전체과업구간 3차원 지하수 유동분석을 수행하였다.

2차원 해석시 지하수위는 지하철 구조물의 중요도를 감안하여 지하수위가 지표면에 있는 조건을 가정하여 해석을 수행하였으며, 해석결과 총적층 및 매립층의 심도가 깊은 4구간에서 별도의 차수공법 미적용시 터널내로 최대  $19(m^3/min/km)$ 이상의 유입이 예상되어, 지하수위 및 지반조건별 유입량(또는 수압) 평가결과 지반조건에 따라 차수그라우팅 폭원 3~5m 확보가 필요한 것으로 판단되었다. 지하수 유입량이 최대로 나타난 4구간에서 차수폭원을 변화시켜가며 침투류해석을 실시한 결과 그라우팅(폭 5m)을 적용한 경우 유입량을  $2(m^3/min/km)$ 내외로 줄일 수 있는 것으로 검토되었다. 1구간에는 무보강시  $2\sim 2.5(m^3/min/km)$ 의 지하수가 유입될 것으로 예상되어 필요시 차수그라우팅(폭 3m)을 적용하는 것으로 설계에 반영하였다.

지하수 영향 평가인자( $M_w$ )를 차수그라우팅 미적용시 지하수 유입량을 지층조건을 고려하여 평면상에 도시하고 유입량에 따라 표 1.에 의해 등급을 구분하여(그림 8.) 방수 및 배수공 중점관리구간 선정에 근거자료로 활용하였다.

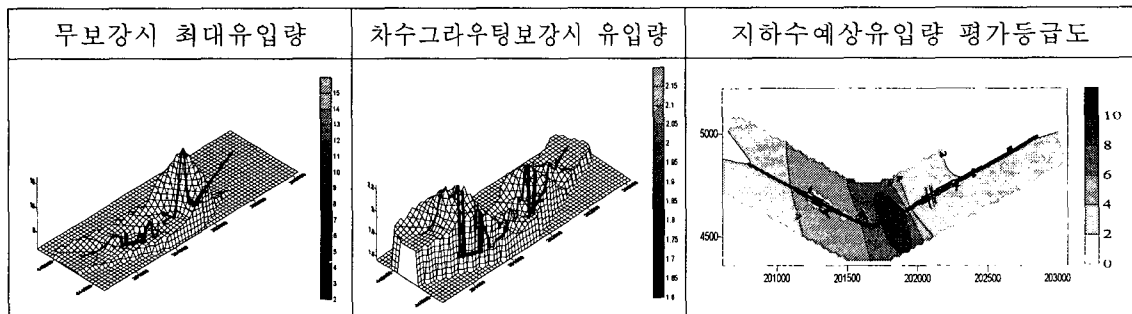


그림 8. 지하수 유입량 평가결과

### 3.4 시공중 및 운영중 진동·소음에 따른 영향인자( $M_v$ )

시공중 및 운영중에 주요 민원요인으로 발생 가능한 인자들 중 발파진동, 발파소음, 지하철주행에 따른 진동, 소음 등에 대하여 중요 위험도 구간을 선정하기 위해 기존의 여러 학자에 의해 제안된 경험식 및 시험발파 결과 등을 이용하여 검토하였다.

시공중 굴착으로 인한 발파진동( $M_{v①}$ )은 시험발파를 통해 산정된 진동식(식(2))에 근거하여 지발당최대장약량  $0.5kg$ 을 기준으로 예상되는 진동치를 산정하였고 발파소음( $M_{v②}$ )은 중앙환경분쟁 조정위원회(1996)에서 제안식(식(3))과 생활소음규제규준을 이용하여 검토하였다.

$$V = 173(D/W^{0.5})^{-1.78} \quad (2)$$

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

운영중 진동(Mv<sub>3</sub>) 및 소음(Mv<sub>4</sub>) 영향평가를 통한 환경적 특성에 대한 사전검토를 위하여 지하철 운영중 진동은 Tokita 식을 이용하여 진동레벨보정, 진동파의 전달특성, 구조물과의 상호작용에 의한 보정 등을 이용하여 계산하였고 지하철 운용중 소음은 Tokita 식(4) 및 Lange 식(5)을 이용하여 진동원의 특성과 인접구조물 이격 거리에 따른 예상소음치를 산정하였다.

$$L_v = L_0 - \left[ A_1 \log\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) + A_2 \gamma \right] \quad (4)$$

$$L_a = 59 - 20 \log d \text{ [dB(A)]} \quad (5)$$

분석 결과 전반적으로 환경적인 특성과 관계가 있는 발파 및 운영중의 열차로 인한 진동·소음 항목에서는 지장물과의 이격 거리가 주된 영향요소로 1, 2구간과 4, 5구간에서 주로 영향이 클 것으로 예상되었다.

과업구간에서 발생가능한 최대진동치를 기준으로 시험발파식, 지장물과의 이격거리 및 중요도를 종합적으로 고려하여 발파진동 허용치는 0.2~0.5kine으로 기준치 설정하였고 발파 소음은 발생가능한 최대소음치를 기준으로 70dB로 기준치 설정하여 등급화를 수행하였다. 운영중 진동은 소음·진동 규제법의 기준치를 이용하여 65dB로 기준치를 설정하고 운영중 소음은 40dB로 기준치 설정하여 등급화를 수행하였다.

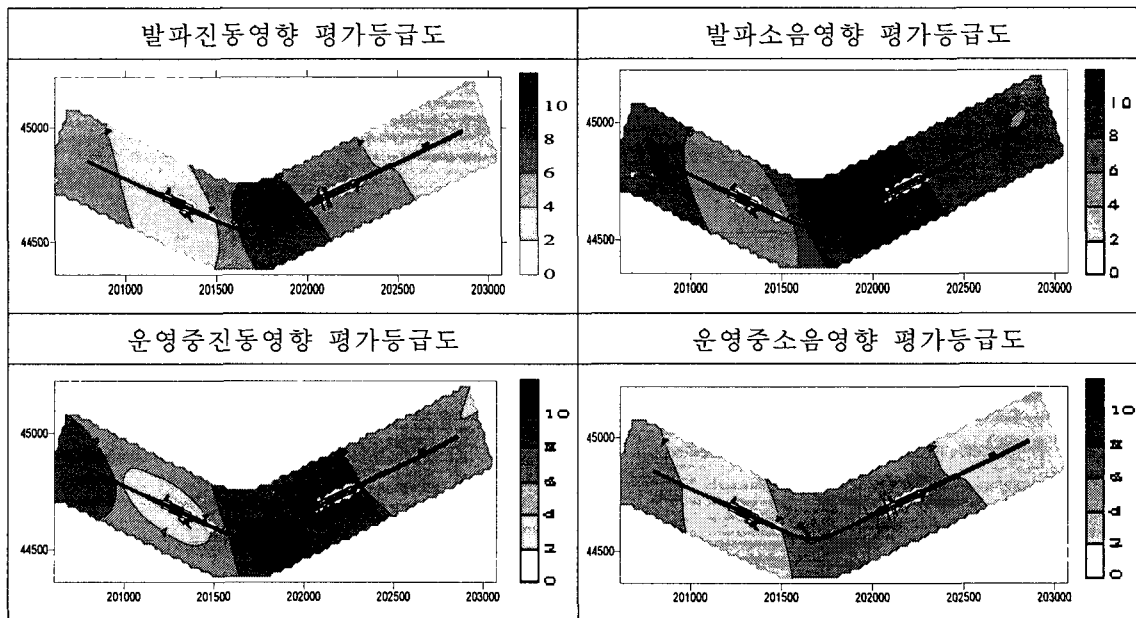


그림 9. 진동·소음 위험도Map

## 4. 통계학적인 기법을 이용한 인자의 정량화 및 압축기법 개요

### 4.1 개요

앞서 언급한 터널설계에 영향을 미치는 다양한 요소들을 종합적으로 고려한 정량화지표의 작성을 위하여 다변량 통계분석(수량화기법, 주성분 분석법 및 인자분석법)을 적용하였다.

다변량 통계분석이란, 두 개 이상의 변수(항목)들 간의 상호관련성을 통계적으로 분석하여 복잡한 현상을 요약하여 간결하게 표현하고, 복잡한 현상의 배후에 숨어있는 구조를 발견하고, 관심 있는 변수들을 다른 변수들로부터 예측하고자 하는데 그 분석의 의의와 목적이 있다. 다변량 분석에는 예측식(관계식)의 발견 및 양의 추정을 위한 다중회귀 분석, 표본을 분류하고 성질을 추정하는 판별분석, 여러 개의 변수를 정리하고 변수를 분류 및 대표변수 선정하는 주성분분석, 인자분석, 군집분석 등이 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 지반안전율, 지반침하량, 지하수유입량, 발파진동 및 소음, 운용중 진동·소음의 7가지 영향요소들간의 상호관계를 분석하고 지하철 터널의 설계시 중요사항 결정의 지표로 사용할 수 있도록, 정량화 되고 수치화 된 설계인자를 만들기 위하여 다변량 분석중 주성분분석, 인자분석을 이용하여 각 변수간의 관계를 이해하고 안정성인자, 환경성인자의 두 가지 대표인자로 압축하여 정리하였다.

### 4.2 정량화 지표(Multiple Index)의 점수 산정 및 등급화

상기의 터널시공에 따른 예상위험요소 모두를 고려하여 터널설계시 반영하기에는 어려운 점이 있으므로 사용하기 편리하도록 여러 개의 인자를 대표하는 정량적인 지표의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 대표인자의 작성을 위하여 각 인자별 정량화를 수행하고 정량화된 점수에 의해 통계분석을 실시하였다.

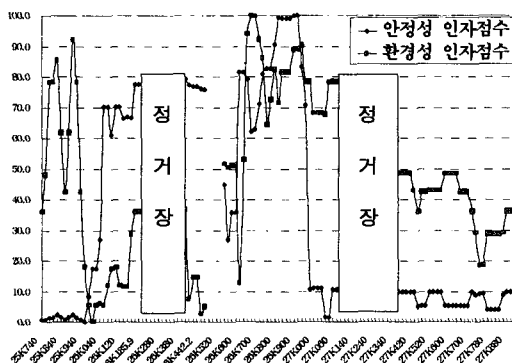


그림 10. 안정성 및 환경성 인자점수

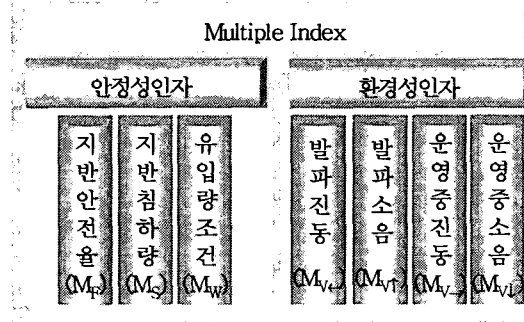


그림 11. 정량화 지표의 구성요소

정량화 지표(Multiple Index)를 구성하는 각 인자의 점수는 인자별 해석결과 및 분석결과를 바탕으로 하여 표 1.과 같이 설정하고 값의 범위에 따라 등급화를 수행하였으며, 각 등



급에 아래의 표에 해당하는 점수를 부여하여 상대적인 중요도를 설정하였다.

안정성지표 : MI① (안정성인자) = Fn (M<sub>F</sub>, M<sub>S</sub>, M<sub>W</sub>)

환경성지표 : MI② (환경성인자) = Fn (M<sub>V①</sub>, M<sub>V②</sub>, M<sub>V③</sub>, M<sub>V④</sub>)

Multiple Index의 계산된 각각의 인자 값은 크면 클수록 터널건설시 위해요소가 더 많이 예상됨을 의미하며, 최종 계산된 결과 값이 0~100사이의 값을 가지도록 설정하여 상대적인 크기비교를 통해 중요 위험도 구간을 수치적인 형태로 표현하여 비교하고자 하였다.

| 등급 구분          |                           |                                  | I     | II      | III     | IV      | V     |
|----------------|---------------------------|----------------------------------|-------|---------|---------|---------|-------|
| M <sub>F</sub> | 지반의 지보능력평가                | 지반안전율(FS)                        | 1.5미만 | 1.5~2.0 | 2.0~2.5 | 2.5~3.0 | 3.0이상 |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
| M <sub>S</sub> | 인접구조물의 위험도를 고려한 인자        | 침하량                              | 8cm이상 | 8~6cm   | 6~4cm   | 4~2cm   | 2cm미만 |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
| M <sub>W</sub> | 지하수 예상 유입량에 따른 평가         | 지하수 유입량 (m <sup>3</sup> /min/km) | 9이상   | 9~7     | 7~5     | 5~3     | 3미만   |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
| M <sub>V</sub> | 발파진동 및 운영중 소음·진동에 따른 영향인자 | 발파진동(kine)                       | 0.5이상 | 0.5~0.3 | 0.3~0.2 | 0.2~0.1 | 0.1이하 |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
|                |                           | 발파소음(dB)                         | 70이상  | 70~68   | 68~66   | 66~64   | 64이하  |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
|                |                           | 운영중진동(dB)                        | 65이상  | 65~60   | 60~55   | 55~50   | 50이하  |
|                |                           | 범위점수                             | 10    | 8       | 6       | 4       | 2     |
| 운영중소음(dB)      | 40이상                      | 40~35                            | 35~30 | 30~25   | 25이하    |         |       |
| 범위점수           | 10                        | 8                                | 6     | 4       | 2       |         |       |

표 1. Multiple Index의 각 인자별 등급 및 점수

### 4.3 각 평가인자들의 다변량 분석결과 및 정량화지표(Multiple Index)의 작성

위에서 언급한 Multiple Index를 구성하는 7개의 인자들은 서로 독립적이라기 보다는 어느 정도의 상관관계를 가지고 있으며 각각의 인자들의 상관관계의 크기는 상관행렬을 구함으로써 파악할 수 있다.

각 인자들의 상관관계는 아래의 표 2.와 같은 상관행렬(표 2.)을 구하고 통계분석 Software 인 SPSS(Ver. 10.0)을 사용하여 주성분분석과 인자분석을 통해 계산이 가능하다. 각 인자의 성분행렬 검토결과 인자들은 크게 두 그룹으로 분류할 수 있으며 안정성인자로 명명된 MI①은 M<sub>F</sub>, M<sub>S</sub>, M<sub>W</sub> 인자들끼리 상관관계가 높고 환경성인자로 명명된 MI②는 M<sub>V①</sub>, M<sub>V②</sub>, M<sub>V③</sub>, M<sub>V④</sub>의 인자들끼리 상관관계가 높은 것으로 나타난다. 이는 회전공간에서의 성분 도표에서도 알 수 있듯이 7가지의 인자들은 안정성인자의 세 가지 구성요소와 환경성인자의 네 가지 구성요소로는 서로 독립적이며 두 개의 대표인자로 압축가능함을 알 수 있다(표 3. 참고).

각 인자들의 안정성인자와 환경성인자에 대한 기여도는 정규화 된 성분점수 계수행렬로부터 산정 할 수 있으며, 최종적인 안정성 인자와 환경성 인자는 각각의 등급에 따른 범위 점수에 성분점수 계수행렬의 값을 곱하여 계산한다.

그림 12.에는 최종 계산된 안정성 인자와 환경성 인자점수 및 등급을 도시하였으며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 안정성 인자로 판단되는 복선터널 곡선부의 연약층 심도가 깊은 구간은 터널 안정성 및 환경성 모두 취약구간으로 나타난다.

| Y               | M <sub>F</sub> | M <sub>S</sub> | M <sub>W</sub> | M <sub>V①</sub> | M <sub>V②</sub> | M <sub>V③</sub> | M <sub>V④</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| M <sub>F</sub>  | 1.0000         |                |                |                 |                 |                 |                 |
| M <sub>S</sub>  | 0.821          | 1.0000         |                |                 |                 |                 |                 |
| M <sub>W</sub>  | 0.567          | 0.550          | 1.0000         |                 |                 |                 |                 |
| M <sub>V①</sub> | 0.025          | 0.102          | -0.149         | 1.0000          |                 |                 |                 |
| M <sub>V②</sub> | -0.096         | 0.019          | -0.141         | 0.857           | 1.0000          |                 |                 |
| M <sub>V③</sub> | -0.081         | 0.023          | -0.161         | 0.915           | 0.928           | 1.0000          |                 |
| M <sub>V④</sub> | -0.093         | 0.029          | -0.223         | 0.863           | 0.875           | 0.856           | 1.0000          |

표 2. 각 인자들 간의 상관행렬

| 성분행렬   |           |           | 회전공간의 성분도표 |    | 성분점수계수행렬 |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
|--|-----------|-----------|------------|----|----------|---|---|----|-------|------|----|-------|------|----|-----------|------|-----|------|------|-----|------|-----------|-----|------|-----------|-----|------|-----------|-------------|--|---|--|--|--|----|--|---|---|----|------|------|----|-------|------|----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|-------|
| <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">성분</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MF</td> <td>-.158</td> <td>.908</td> </tr> <tr> <td>MS</td> <td>-.278</td> <td>.746</td> </tr> <tr> <td>MW</td> <td>-4.43E-02</td> <td>.921</td> </tr> <tr> <td>MV1</td> <td>.939</td> <td>.171</td> </tr> <tr> <td>MV2</td> <td>.952</td> <td>8.782E-02</td> </tr> <tr> <td>MV3</td> <td>.963</td> <td>9.249E-02</td> </tr> <tr> <td>MV4</td> <td>.940</td> <td>6.224E-02</td> </tr> </tbody> </table> <p>요인추출 방법: 주성분 분석.<br/>a. 추출된 2 성분</p> |           |           |            | 성분 |          | 1 | 2 | MF | -.158 | .908 | MS | -.278 | .746 | MW | -4.43E-02 | .921 | MV1 | .939 | .171 | MV2 | .952 | 8.782E-02 | MV3 | .963 | 9.249E-02 | MV4 | .940 | 6.224E-02 | <p>성분 1</p> |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">성분</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MF</td> <td>.017</td> <td>.400</td> </tr> <tr> <td>MS</td> <td>-.026</td> <td>.335</td> </tr> <tr> <td>MW</td> <td>.048</td> <td>.402</td> </tr> <tr> <td>MV1</td> <td>.262</td> <td>.037</td> </tr> <tr> <td>MV2</td> <td>.260</td> <td>.000</td> </tr> <tr> <td>MV3</td> <td>.263</td> <td>.002</td> </tr> <tr> <td>MV4</td> <td>.255</td> <td>-.010</td> </tr> </tbody> </table> <p>요인추출 방법: 주성분 분석.<br/>회전 방법: Kaiser 정규화가 있는 베리맥스.<br/>요인 점수.</p> |  |  |  | 성분 |  | 1 | 2 | MF | .017 | .400 | MS | -.026 | .335 | MW | .048 | .402 | MV1 | .262 | .037 | MV2 | .260 | .000 | MV3 | .263 | .002 | MV4 | .255 | -.010 |
|  | 성분        |           |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
|  | 1         | 2         |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MF   | -.158     | .908      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MS   | -.278     | .746      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MW   | -4.43E-02 | .921      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV1  | .939      | .171      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV2  | .952      | 8.782E-02 |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV3  | .963      | 9.249E-02 |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV4  | .940      | 6.224E-02 |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
|  | 성분        |           |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
|  | 1         | 2         |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MF   | .017      | .400      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MS   | -.026     | .335      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MW   | .048      | .402      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV1  | .262      | .037      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV2  | .260      | .000      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV3  | .263      | .002      |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |
| MV4  | .255      | -.010     |            |    |          |   |   |    |       |      |    |       |      |    |           |      |     |      |      |     |      |           |     |      |           |     |      |           |             |  |   |  |  |  |    |  |   |   |    |      |      |    |       |      |    |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |      |     |      |       |

표 3. 인자분석 결과

### 5. 정량화지표(Multiple Index)의 설계 적용

주성분 분석을 통하여 얻어진 안정성 인자와 환경성 인자의 값은 대상구간의 터널의 안정성 및 환경성을 나타내는 지표라 할 수 있고 사용상의 편리성을 위하여 안정성 인자점수와 환경성 인자 점수를 100점으로 환산하여 등급화(표 4.) 하였으며 구간별 점수분포와 등급의 분포는 그림 12.과 같다.

| 등급  | 구분      | 안정성지수 | 환경성지수 | 비고  |
|-----|---------|-------|-------|---|
|     |         |       |       |   |
| I   | (매우 안정) | 20이하  | 20이하  | • 각각의 등급이내에서도 7가지 세부항목의 중요도에 따른 별도의 조치를 취할 수 있도록 하여 등급설정단계에서의 오류를 최소화 |
| II  | (안정)    | 40~21 | 40~21 |   |
| III | (보통)    | 60~41 | 60~41 |   |
| IV  | (위험)    | 80~61 | 80~61 |   |
| V   | (매우 위험) | 81이상  | 81이상  |   |

표 4. 정량화지표(Multiple Index) 등급표

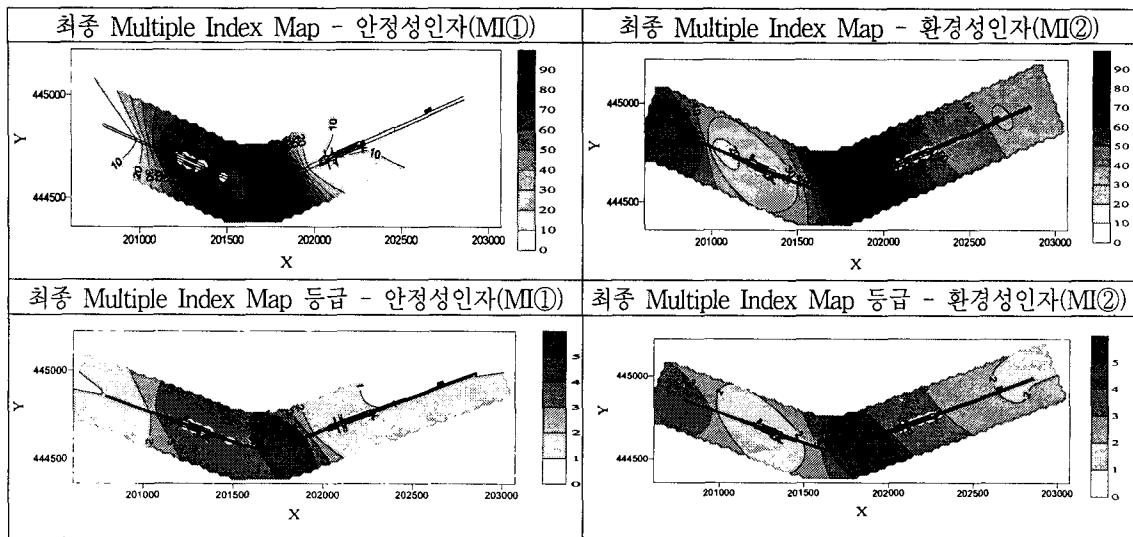


그림 12. 정량화 지표(Multiple Index) 분포도

상기의 분석과정을 통하여 얻어진 안정성인자 및 환경성인자 점수 및 등급을 지하철 00 공구 설계시 적용하였으며, 세부적으로 지보패턴 결정자료, 굴착 및 보조공법의 결정, 계층 계획의 수립, 방·배수 설계, 유지관리 지침, 발파설계, 해석구간 선정시 활용하였다.

1구간은 환경성지수 4등급 이하구간으로 발파굴착시는 반드시 현장시공시 발파분석을 통하여 인근 구조물에 대한 진동영향을 검토해야 할 것으로 판단되어 일정구간에 별도의 무진동 굴착을 계획하였다. 2, 3구간은 안정성지수 4등급이하구간으로 막장 및 천단의 붕락가능성에 대비하여 보강공법을 계획하여야 할 것으로 판단되었고, 막장면 슛크리트등의 임시 지보재 설치를 계획하였다. A구간(반포육교 하부통과구간)은 안정성지수 2~3등급구간으로 터널자체의 안정성 및 주변구조물에 대한 영향은 미소할 것으로 판단되나 상부구조물의 중요도를 감안한 적극적인 지반보강 공법 도입을 계획하고 장기적 안정성을 고려하여 라이닝 두께를 증가시키는 것으로 계획되었다. 4구간은 안정성지수 4등급이하, 환경성지수 5등급구간으로 지반조건도 불리하고 인접구조물에 대한 침하대책이 필요한 것으로 판단되어 지보패턴을 하향 조정하였으며 총적층 심도가 깊은 구간에서 차수 및 지반보강 목적의 그라우팅을 적용하였다. 5구간은 환경성지수 4등급이하구간으로 고층빌딩이 인접하고 있어 시공중·운영중 진동에 대한 검토가 이루어져야한다고 판단되었으며 대단면 터널 채용에 대한 안정성 확보방안이 필요한 것으로 판단되었다. 6구간은 안정성지수 1등급구간으로 터널심도가 상대적으로 깊으나 저비저항대 및 국부적인 파쇄대 발달예상, 소규모 붕락 및 낙반에 대한 대책이 필요할 것으로 판단되었다.

## 6. 결론 및 제언

본 논문에서는 수치해석기법 및 각종 경험식등을 이용하여 도심지 지하철터널 시공에 의한 다양한 위험요소를 정량화, 객관화하려는 의도에서 지반의 지보능력 평가인자, 인접구

조물의 영향평가인자, 지하수 유입량 평가인자, 발파진동·소음 및 운영중 차량에 의한 진동·소음등의 영향요소를 고려한 정량화 지표를 제안하였다.

정량화 시도에서 얻어진 수치를 다변량분석을 이용하여 각 인자들간의 상호관계에 대하여 분석하고 소수의 압축적인 형태인 안정성인자와 환경성인자로 수치화 될 수 있음을 보였으며, 인자점수의 등급화를 통하여 설계단계에서 과업구간 전체에 대한 이해를 도울 수 있는 지표로서의 활용도를 설계사례를 통하여 검토하였다.

본 연구는 설계단계에서의 설계 정량화 지표를 위한 기초적 연구로 일정과업구간에 한정된 데이터를 기반으로 하여 분석되었다. 따라서 본 연구에서 얻어진 결과는 과업구간의 상대적인 지표로서의 의미가 크다고 할 수 있다. 현재단계에서는 경험에 의존하던 많은 여러 가지 요소들을 합리적인 숫자로 표현하여 상대적인 중요도 구간을 설정하기 위한 일종의 방법제안으로 정량화 및 등급화를 위한 지속적인 연구노력 필요하다고 판단된다.

또한, 이러한 정량화 접근시도가 지속적으로 이루어져 데이터베이스화가 되고 경험적설계와의 연관성분석이 적극적으로 이루어진다면 설계 정량화지표로서의 의미를 갖출 수 있을 것이라 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. P. B. Attewell and J. P. Woodman (1982), "Predicting the Dynamics of Ground Settlement and Its Derivatives caused by Tunnelling in Soil", Ground Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 13~22
2. P. B. Attewell and R. K. Taylor (1984), "Ground Movements and Their Effects on Structures", Survey University Press, USA.
3. E. M. Dawson et al. (1999), "Slope Stability Analysis by Strength Reduction", Geotechnique Vol. 49, No. 6, pp. 835~840
4. 중앙환경분쟁조정위원회 (1996), "소음으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구"
5. 김창용 (1998), "도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성예측과 인접구조물 손상평가에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위 논문
6. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), "연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율평가", 터널공학회는 문집 제2권 제3호, pp. 47~58
7. 김관영, 이승수 (1995), "多變量統計解釋法", 자유아카데미, pp. 20~54
8. 강병서 (1997), "多變量統計分析", 學現社, pp. 255~311
9. 지하철 0호선 00공구 건설공사 대안설계보고서(2002), 서울특별시 지하철 건설본부
10. 지하철 0호선 00공구 건설공사 구조 및 수리계산서(2002), 서울특별시 지하철 건설본부