

# 지반응답곡선을 이용한 터널의 지반거동 분석

## Ground Response Curve for Ground Movement Analysis of Tunnel

이 송<sup>1</sup>      안 성 학<sup>2</sup>      안 태 훈<sup>3</sup>      공 성 석<sup>4</sup>  
Song Lee      Sung-Hak Ahn      Tae-Hun Ahn      Sung-Suk Kong

**Keywords** : Ground Response Curve, Confinement Convergence Method, Support Reaction Curve, Load Distribution Ratio

### Abstract

We must notice ground movement by excavation for reasonable tunnel designs. The convergence confinement method is an attempt to evaluate tunnel stability conditions by means of a mathematical model and a ground response curve. In this study, the convergenceconfinement method by numerical model was examined. This method don't need the basic assumptions for a mathematical model of circular tunnel shape, and hydrostatic in situ stress. Also modified ground response curve that is calculated after installing the support, is suggested, which informs us the ground movement mechanism. The ground response curve and the support reaction curve are mutually dependent. Especially the support reaction curve depends upon the ground response curve. The mechanism of tunnel must be analyzed by the interaction between support and ground. Consequently the stability of tunnel must be qualitatively investigated by a ground response curve and quantitatively adjudged by a numerical analysis for the reasonable design of tunnel.

### 1. 서 론

터널굴착에 의하여 굴착면 부근 지반에 소성영역이 발생할 경우 가축성 지보재인 슛크리트와 록볼트를 주 지보재로 사용하여 소성영역을 제어하는 것이 NATM의 기본개념이다. 그러므로, 터널굴착에 의해 발생하는 지반의 소성영역 및 지보재와의 상호작용에 대한 이해와 분석은 매우 중요하다. 터널굴착에 의한 지반거동분석

은 매우 중요한 사항이나 국내 터널설계 시 이를 간과하고 있는 것이 현실이다.

터널안정성 검토를 위해 일반적으로 연속체모델에 의한 수치해석을 수행한다. 이때, 추정된 지반특성치와 현장조건을 고려한 지보재의 구조적 안정성 검토에 역점을 두고 있다. 이와 같은 터널해석으로는 지반거동특성에 대한 검토는 거의 불가능하다. 단순히 지보재의 안정성 검토만 수행된 것으로 터널전반에 걸친 안정성 해석이 아니라 지보재의 내적파괴에 대한 안정성 검토만 실시하는 것으로 볼 수 있다.

터널설계시 이러한 터널지보재의 안정성에만 관심을 두으로써 하중분담율, 슛크리트의 탄성계수 등이 중요한 설계요소로 부각되었다. 이 두가지 입력치는 정확한

1 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수  
2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사  
3 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정  
4 정회원, 서울시 시설계획과장

적용값을 선정하는 것이 매우 어려우므로 경험적인 값이 검증 없이 사용되고 있다. 그러나 실제적으로 중요한 것은 지반의 거동이므로 이에 대한 설계방법상의 접근이 필요하다.

터널의 중요 구성요소인 지반의 거동특성을 파악하기 위해서는 지반응답곡선에 대한 이해가 필수적이다. 지반응답곡선은 지보재를 설치하였을 경우에도 개념적으로 구할 수 있다. 이를 수렴제한곡선이라 하나 본 논문에서는 개념의 이해가 보다 용이하도록 수정지반응답곡선(Modified Ground Response Curve)이라 정의한다.

본 논문에서는 보다 합리적인 터널설계를 위하여 일반적인 터널조건에 대한 지반응답곡선을 구하여 지보재와 지반의 상호작용에 대한 특성을 분석해 보고자 한다. 기존 원형터널에 대한 연구결과와 일반터널의 지반응답곡선 차이점을 검토하고 이러한 분석을 통하여 궁극적으로 지반과 지보재의 복합구조체인 터널에 대한 합리적 설계방법을 모색하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 하중분담율

터널은 완공 후에는 평면변형상태이므로 2차원 해석이 가능하나 시공 중에는 막장에 의한 종방향아칭효과가 고려되어야 한다. 터널에 대한 2차원 해석을 실시할 때에는 종방향아칭효과와 슛크리트의 강성변화를 반영하기 위하여 하중분담율을 적용하고 있다. 일반적으로 적용되는 하중분담율은 40-30-30, 50-25-25으로 적용값에 대한 근거는 매우 취약하다. 이러한 하중분담율 적용은 단순히 경험적인 판단에서 결정된 것이나, 현재 국내에 선 절대적인 적용기준치로 사용되고 있다.

적절한 하중분담율 적용값에 대한 연구가 있었으나, 설계시 다양한 설계요소들을 고려하여 하중분담율을 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 그 동안의 연구성과(1,2)에도 불구하고 최근까지 40-30-30, 50-25-25 의 보편적인 값들을 일률적으로 적용하고 있다.

### 2.2 수렴-제한법

수렴-제한법은 지반응답곡선과 지보반응곡선을 구하

고 이들의 상호관계를 해석하여 터널을 설계하는 방법으로 특징적인 사항은 수학적 모델을 사용하여 터널의 안정성을 평가하는 것이다. 지반거동과 지보재거동에 대한 전반적인 파악이 선행되어 이루어지는 설계방법으로 터널역학 이론에 근거한 해석방법이다.

그러나 마체형이나 난형과 같은 터널에 대한 적용사례는 미흡하며, 보조공법이 적용되는 연약지반터널에 있어서 적용이 곤란하다. 또한 다양한 터널단면에 대하여 지보재 특성곡선을 수학적 모델로 산정하는 것은 어려운 문제이다.

## 3. 지반응답곡선 선정 및 분석

### 3.1 지반응답곡선 선정

일반적인 터널조건에 대한 지반응답곡선을 구하기 위해 수학적 모델 대신 수치해석적 방법을 사용하였다. 하중분담율을 10%씩 감소시킬때 발생하는 천단침하량을 구하여 지반응답곡선을 선정하였다. 본 연구에서 지반응답곡선을 구하기 위한 터널조건은 다음과 같다.

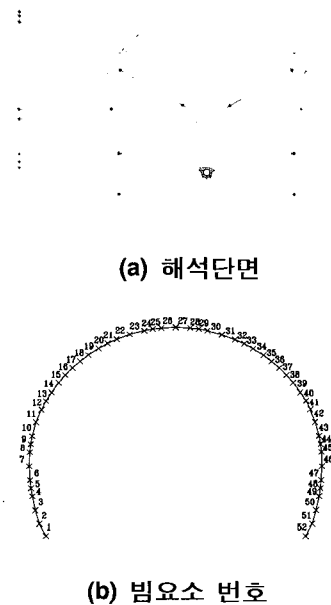


Fig. 1. 터널단면 (지하철 복선터널)

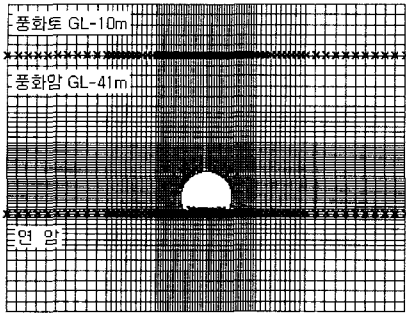


Fig. 2. 수치해석 모델링

수치해석을 위해 사용된 지반특성치는 적용값의 공정성을 위하여 기 설계된 용담, 부용 등 20개의 철도터널과 둔내, 육십령 등 13개의 도로터널의 해석시 물성치들의 평균값을 적용하였다. 수치해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC ver.3.30으로 터널수치해석시 많이 사용되는 범용프로그램이며 해석을 위한 모델링 메쉬는 Fig. 2와 같이 작성하였다. 지보재의 경우 Fig 1. (a), (b)와 같이 빔(beam)요소의 슛크리트와 케이블 요소의 록볼트를 모델링에 사용하였다.

Table. 1. 해석에 적용된 물성치

	풍화토	풍화암	연암
내부마찰각 (°)	26	33	40
점착력 (tf/m <sup>2</sup> )	5.5	20.1	58.1
포아송비	0.34	0.3	0.27
탄성계수 (tf/m <sup>2</sup> )	2,187	27,799	163,137
단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	1.9	2.2	2.4

지반응답곡선을 통한 터널거동 및 지보재와의 상관관계를 분석하기 위하여 다음 4가지 조건에 대하여 지반응답곡선을 구하였다.

- CASE. I : 지반 점착력 변화
- CASE. II : 지보재 설치 형식
- CASE. III : 슛크리트 강성변화
- CASE. IV : 슛크리트 설치시기 변화

터널에서의 지반응답곡선은 터널 내부위치별 즉, 천단, 어깨부, 측벽, 하단 등 다양한 위치에서 구할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 터널거동을 대표할 수 있는 천단침하의 지반응답곡선으로 한정하였다.

### 3.2 지반응답곡선 결과 및 분석

#### 3.2.1 CASE. I

지반강도정수 중 점착력을 변화시켜 굴착면 부근 지반의 소성영역발생 범위를 변화시켰다. 이때 나타나는 경향을 살펴보기 위하여 수치해석을 수행하고 결과를 정리하였다. Fig. 3.은 Table 1.에서 제시된 지반특성치 중 풍화암의 점착력을 변화시켜 구한 천단침하에 관한 지반응답곡선이다.

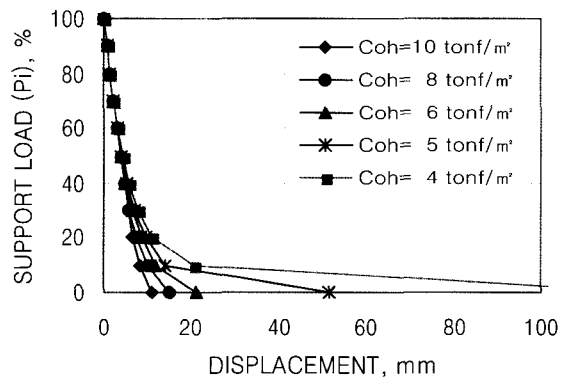


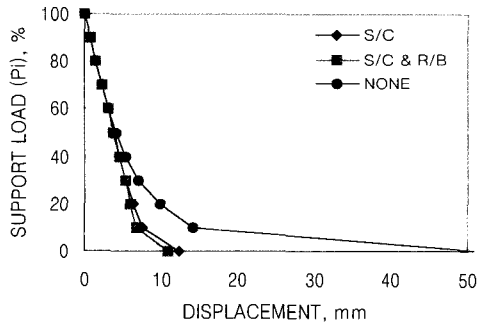
Fig. 3. CASE. I 지반응답곡선(풍화암)

점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가되는 경향을 보여주며 점착력=5tf/m<sup>2</sup> 이하일 때, 천단침하가 급격히 증가함을 보이고 있다. 침하의 급격한 증가 원인은 지반강도정수인 점착력 감소에 따라 굴착면 주변 지반에 소성영역이 발생되었기 때문이다.

#### 3.2.2 CASE. II

Fig. 4.는 슛크리트 설치, 록볼트와 슛크리트 설치, 무지보 조건에 대하여 지반응답곡선을 구한 것이다. 지반응답곡선은 무지보시의 지반자체의 특성곡선으로, 지보재가 설치된 후에도 개념적으로 구할 수가 있는데, 이들

을 구분짓기 위하여  $P_i=60\%$ 에서 지보재를 설치한 후의 지반응답곡선을 수정지반응답곡선으로 명명하였다.



(s/c ; 슛크리트, R/B ; 록볼트, NONE ; 무지보)

Fig. 4. CASE.II 수정지반응답곡선

Fig. 4.는 1개의 지반응답곡선(NONE)과 2개의 수정지반응답곡선(S/C, S/C & R/B)에 대한 그래프이다. 그래프에서 슛크리트를 타설할 경우 침하량이 상당 부분 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 록볼트를 추가로 설치할 경우 침하량의 감소는 미흡한 것을 볼 수 있다.

특정터널조건에 대하여 수정지반응답곡선과 지반응답곡선을 알게 되면 정성적으로 수정지반응답곡선에 설치된 지보재의 하중분담량을 알 수 있다. 즉 동일한 변형량을 나타내는 지반응답곡선과 수정지반응답곡선의 지지하중의 차이가 설치된 지보재가 부담하는 지지력이다.

수정지반응답곡선이  $P_i=10\%$ 에서 급격한 침하가 발생하는 것으로 나타나며 지보재의 변형은 증가되었으므로 응력이 증가하고 지보재가 부담하는 하중도 증가한 것이 분명하다. 그러나 지보재의 하중 분담량은 침하량이 급격히 증가함에 의하여 일정한 수준을 유지하고 있다.

이러한 현상은 지반응답곡선과 지보재특성곡선을 따로 구하여 침하량을 분석하는 방법으로는 확인되지 않는 현상이다.

일반적인 지보반응곡선은 지반과의 분담관계를 고려하지 못하는 반면 수정지반응답곡선에서 구하는 지보재의 지지력은 지반과의 상호작용에 의하여 결정된 지지력이다. 따라서, 기존의 해석방법보다 수정지반응답곡선을 통한 지보재의 지지력 검토가 더 합리적인 방법이라 할 수 있다.

### 3.2.3 CASE.III

스�크리트 강성변화가 지보재 응력에 어느 정도의 영향을 미치는지 확인하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 슛크리트 강성은 일반적으로 사용되는 연성스�크리트 탄성계수  $E=500,000\text{tf/m}^2$ 에서 콘크리트 탄성계수  $E=2,000,000\text{tf/m}^2$  까지 변화시켰다. Fig. 5.는 슛크리트 탄성계수를 변화시켜 적용하였을 때 수정지반응답곡선을 구한 것이다. 슛크리트의 강성을 4배로 증가시켜도 천단침하에 있어서 억제효과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

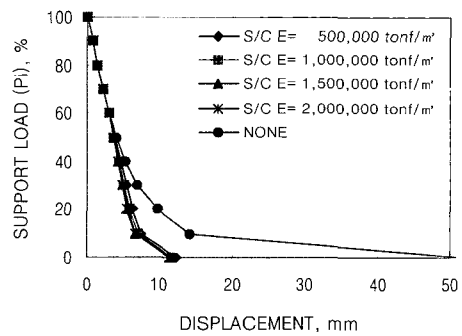


Fig. 5. CASE.III 지반응답곡선

스�크리트의 강성을 증가시킨다 하더라도 0.2m 두께의 구조물로는 터널거동에 영향을 미치기에는 미흡하다고 볼 수 있다. 슛크리트는 지지보조재의 역할을 할 뿐이며 터널변형은 지반특성치에 의하여 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 터널조건에서 슛크리트의 강성은 터널굴착에 의한 변형제어의 중요한 요소는 아니었으며, 지지력도 본 해석조건에서는 지보재의 강성에 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다.

### 3.2.4 CASE.IV

Fig. 6.은 슛크리트의 타설시기를 조정하여 구한 수정지반응답곡선이다. 이때 슛크리트의 탄성계수는 일반적으로 적용하는 연성스�크리트 탄성계수  $E=500,000\text{tf/m}^2$ 를 동일하게 적용하였다.

스�크리트 설치시기가  $P_i=90\%$ (막장하중분담율=10%)에서  $P_i=20\%$ (막장하중분담율=80%)까지 변화되었지만, 최종침하량은 유사한 값을 보여주고 있다. 이는  $P_i=10\%$ 에서  $P_i=0\%$  사이에서 급격한 침하가 발생하여 최종단

계에서 지반응답곡선과 수정응답곡선간의 차이가 일정하게 유지되고 있음을 보이고 있다. 이는 쏿크리트 지보재가 부담하는 지지력이 일정하게 수렴된다는 것으로 Fig. 5.과 유사한 경향을 보여주고 있다.

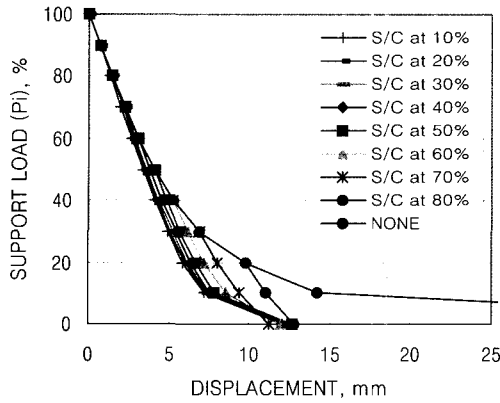


Fig. 6. CASE.IV 수정지반응답곡선

#### 4. Roc Support 해석을 통한 하중분담율 고찰

#### 4.1 3차원 해석을 통한 터널 종방향 변위 양상평가

##### 4.1.1 3차원 해석 모델링

해석조건은 2차원 해석과 동일하게 설정하였으며, 종단방향 길이 100m로 막장전방 40m, 막장후방 굴착구간 60m를 설정하여 3차원해석시 종방향아칭효과를 고려하였다. 본 해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC 3D ver2.0 이다. 종방향아칭효과를 검토하기 위한 해석이므로 지보재 설치는 생략하였다.

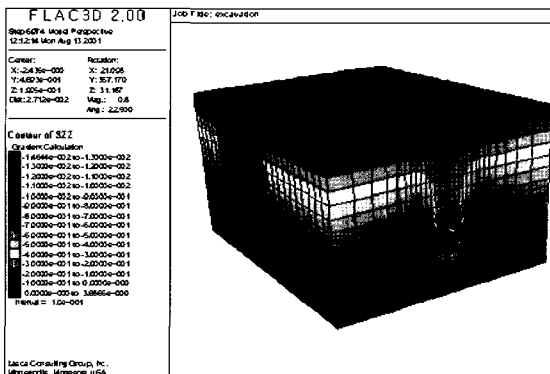


Fig. 7. 3차원 해석 모델링

#### 4.1.2 3차원 수치해석 결과 검토

Fig. 8.은 풍화암의 점착력을 변화시켜 구한 천단침하량을 종단방향에 대하여 나타낸 것이다. 거리는 막장을 기준으로 전방은 (-)로, 후방은 (+)로 나타내었다.

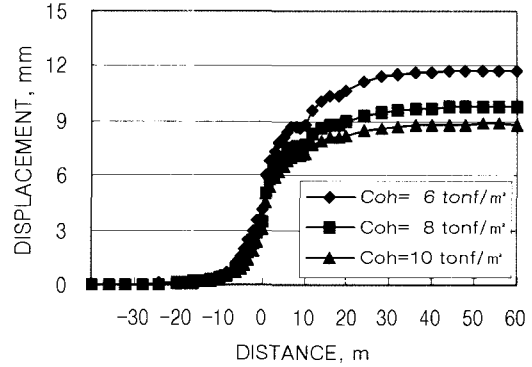


Fig. 8. 종방향 천단침하(풍화암)

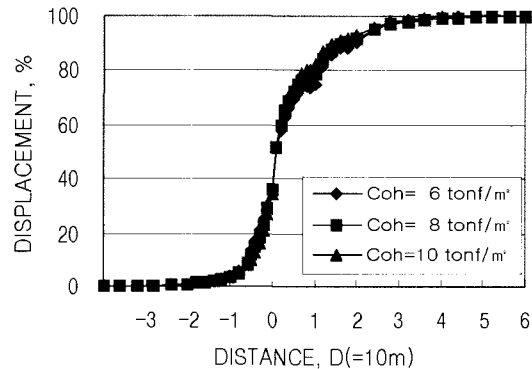


Fig. 9. 정규화된 종방향 천단침하(풍화암)

3차원해석 결과에서도 점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가하는 것으로 나타나며, 이는 소성영역 증가와 관련이 있다. 종방향에 대한 천단침하는 점착력 감소에 따라 증가하나 침하형태는 거의 동일하다. Fig. 9.는 각 해석조건에 대한 최종침하량으로 정규화 시킨 것으로 침하곡선이 거의 동일함을 보이고 있다.

이는 Chern(6)의 터널 종방향 변위특성연구에서 밝혀진 바 있는 막장전방 1.5D에서 변위가 시작되고 막장에서 최종변위의 약30%가 발생하며, 막장후방 3D 지점에서 변위가 수렴한다는 내용과 매우 유사한 결과라 할 수 있으므로 이것을 통해 지보와 막장의 이격거리에 따른

변위를 알아볼 수 있게 된다.

이로부터 종방향아칭효과는 일정한 터널조건에 있어서 막장이격거리와 관련되는 것임을 알 수 있다.

## 4.2 Roc Support 해석

### 4.2.1 개요

Roc Support 프로그램은 굴착시 지반의 거동을 알아보기 위한 프로그램으로 지반의 응력상태가 정수압장이고 단면형상이 원형단면인 경우에 대하여 Ladanyi(3)의 수학적 해석방법에 따라 지반응답곡선과 지보반응곡선, 그리고 지반의 소성영역 분포를 파악할 수 있는 프로그램이다.

### 4.2.2 지보반응곡선

지보반응곡선은 지반응답곡선과 마찬가지로 굴착과정에서 발생하는 종방향 아칭효과의 감소에 따른 지보의 변위를 나타낸다.

터널에서는 굴착 후 어느 정도 단면수축이 생긴 후에 설치되는 것이 보통이다. 지보반응곡선은 굴착후 지반에 발생한 변위(ui0)와 탄성특성을 나타내는 강성정수 k로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i = k(u_i - u_{i0})/r_i$$

지보와 막장의 이격거리를 알면 3차원 종방향 변위분포에서 최종변위에 대한 변위의 비율을 알게 되고, 무지보시의 지반응답을 통해 ui0를 구할 수 있다.

### 4.2.3 Roc Support 해석 타당성 검토

Fig. 10.은 해석조건을 2차원 FDM해석의 경우와 유사한 조건 즉, 심도 약 60m의 초기지압 1.35MPa과 직경 10m인 원형터널인 경우에 대하여 풍화암의 점착력을 변화시켜 구한 지반응답곡선과 지보반응곡선으로써 앞서 나온 CASE 1과 유사한 조건으로 만들어 보고자 하였다. 해석결과로서 지반응답곡선의 경우 최종변위가 큰것부터, 지보반응곡선의 경우 오른쪽부터 차례로 점착력이 4, 5, 6, 8, 10 tonf/m2 인 결과이다.

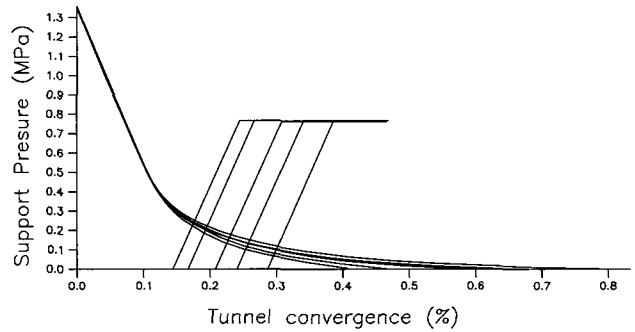


Fig. 10. 점착력 변화에 따른 지보반응곡선과 지반응답곡선이 해석에서도 점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가하는 것으로 나타나며, 이는 소성영역 증가와 관련이 있다.

Fig. 3. 의 결과와 비교했을 때 낮은 점착력 단계인 4, 5tonf/m2 일 때 변위가 다소 작게 평가되었지만 나머지 해석 결과는 유사한 분포를 얻을 수 있었다.

낮은 점착력 단계에서의 이러한 차이는 Roc Support 해석에서의 단면형상이 원형단면으로 국한되어 있고 정수압응력상태로 암반자중영향을 고려하지 못한다는 것으로부터 나온다고 보여지지만 굴착에 의한 지반과 지보의 거동에 대하여 대략적으로는 충분히 확인할 수 있는 근거가 될 수 있음이 명백하다 하겠다.

### 4.2.4 하중분담률 결정

일반적으로 사용되는 하중분담율은 막장부-1일강성 슛크리트부-변형수렴부로 구분되며, 지반응답곡선과 3차원해석 결과를 분석하여 하중분담율을 결정할 수 있다. 지반응답곡선에서 하중분담율과 이에 상응하는 침하량이 결정되며, 3차원해석 결과에서 막장이격거리와 침하량을 얻을 수 있다. 얻어진 자료를 종합하면 필요한 시공단계의 하중분담율을 결정할 수 있다.

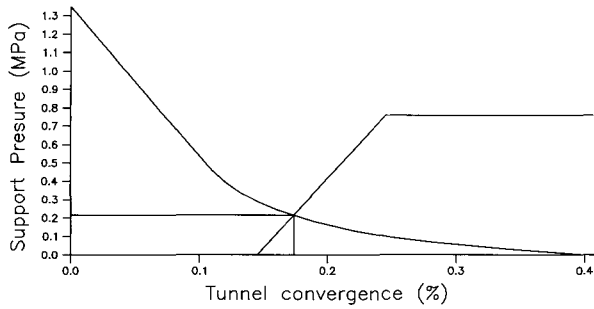


Fig. 11. 점착력=10tf/m<sup>2</sup>일 경우 지보반응곡선과 지반응답곡선

즉 예를 들면, Fig. 11. 은 점착력 10tf/m<sup>2</sup>인 경우의 지반응답곡선과 지보반응곡선인데, 두 곡선의 교점의 지보압력은 0.22MPa로서 초기지압 1.35 MPa의 약 16%에 해당하므로 막장에서 1m 떨어진 지점에서의 지반 자체가 받는 하중 분담률은 84%인 것이다.

위에서 설명한 방법대로 암반조건에 따라 지반응답곡선과 지보반응곡선을 이용하여 하중분담률을 결정하여 봄으로써 현재 일률적으로 사용되어지고 있는 하중분담률에 대한 고찰을 하여 보고자 하였다.

#### 4.2.5 해석방법 및 조건

해석조건은 심도 약 60m의 초기지압 1.35MPa을 적용시키고 원형단면에 대한 암질에 따른 지반응답곡선과 지보반응곡선을 구하여 보았다.

지보재는 150mm의 슛크리트를 막장과의 이격거리를 1m로 하여 나아가도록 모델링 하였으며, 여기서 사용된 물성치는 FDM해석에서의 동일하게 적용하였다.

#### 4.2.6 Roc Support 해석 결과 검토

##### 1) 풍화토 지반

풍화토인 경우 Fig. 12.에서 막장이격거리가 조건대로 1m에 불과하지만 반경에 대한 변위의 비율인 convergence가 24%를 초과하게 되고 그 때의 지반 자체의 하중분담률은 90.3%가 된다. 만일 이러한 지반의 2차원 해석시 하중분담률을 50-25-25로 적용한다는 것은 Fig. 12.에서 지반의 하중분담이 0.675MPa이고 지반응답곡선에서 그때의 변위는 250mm이고 이를 최종변위로

일반화한다면 약 7%인데 이 결과는 3차원 해석결과인 Fig. 9.에서 살펴보면 지보재 타설 위치가 오히려 막장 면보다 전방에 위치한 시공단계에서의 하중분담률이 되는 것이다. 그러므로 이러한 수치를 그대로 해석에 적용한다는 것은 상당한 오류를 범할 수 있다고 보여진다.

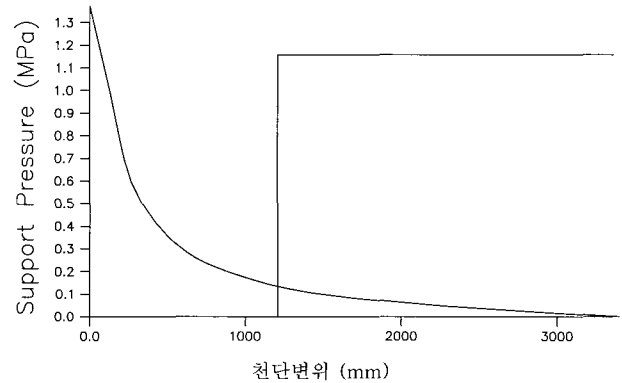


Fig. 12. 풍화토터널 지반응답곡선과 지보반응곡선

##### 2) 풍화암 지반

풍화암에서 무지보인 경우에 소성영역의 두께가 2.3m로 최종변위가 49mm로 계산되었으나 지보설치 후 소성영역이 없어지고 변위 또한 19.5mm로 수렴하게 된다.

이 경우에도 위와 같은 방법으로 하중분담률을 살펴 보면 Fig. 13. 에서 지반의 하중분담 50%일 때의 변위는 16mm이고 이는 최종변위의 약 35%정도가 된다. 이는 3차원 해석결과에 적용하면 막장에서 0.9m 떨어진 지점의 하중분담률로 막장 이격거리 1m와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

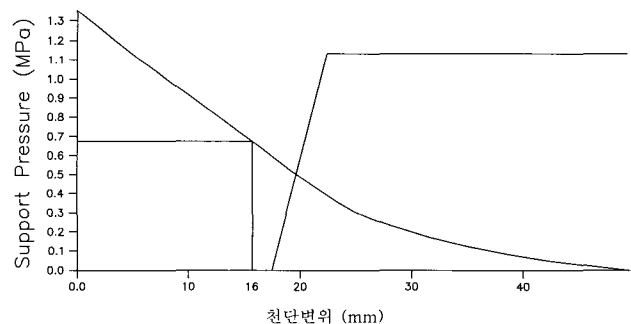


Fig. 13. 풍화암터널 지반응답곡선과 지보반응곡선

### 3) 연암 지반

연암에서는 Fig.14에서 지반의 하중분담률이 70.3%로 계산되고, 지반의 하중분담 50%일 때의 변위는 2.5mm이고 최종변위의 45%인데 이는 Fig.9에서 막장면으로부터 3m떨어진 지점에 지보가 설치되는 것을 나타낸다.

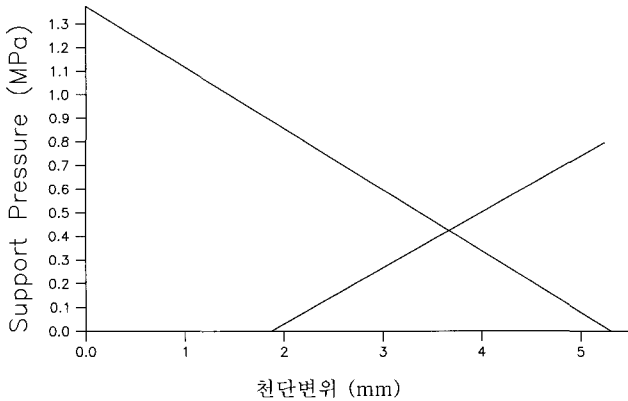


Fig. 14. 연암터널 지반응답곡선과 지보반응곡선

Table. 2 Roc Support 해석결과

	풍화토		풍화암		연암		
	무지보	지보	무지보	지보	무지보	지보	지보 보강
소성영역 두께(m)	12.6	5.8	2.3	0	0.1	0	0
지보압력(MPa)		0.13		0.496		0.401	0.553
convergence(%)	67.56	24.11	0.98	0.39	0.1	0.07	0.06
안전률		8.71		2.29		2.83	4.16
지반의 하중분담률(%)		90.3		63.3		70.3	59

해석의 결과를 표로 요약하면 Table 2와 같은데 풍화암, 풍화토, 연암에 대하여 각각 무지보시 암질이 좋아질수록 소성영역의 반경이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 기존의 하중분담률과는 상당한 차이를 보이고, 암질에 따라서도 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서, 일률적인 하중분담율을 이용한 수치해석은

적용값에 문제가 있을 것으로 판단된다.

실제로 하중분담율이나 슛크리트 강성변화의 적용은 계측에 의한 역해석시 유용한 것으로 적용값은 계측값과 일치하도록 유연하게 적용하는 것이 필요하다.

### 5. 결론

수치해석에 의한 터널설계방법은 단편적인 결과만 확인하게 되어 해석결과에 대한 분석이 어렵다. 따라서, 합리적인 터널설계를 위하여 지반응답곡선과 수정지반응답곡선을 통한 전체적인 지반의 거동을 정성적으로 파악하고 수치해석을 통한 정량적인 안정성 검토를 수행하여야 한다. 수치해석을 통하여 나타난 결과가 단순히 지보재의 안정성 판단에 한정되는 것이 아니라 지반 상태에서 소성발생의 적정성까지 검토될 때 합리적인 터널설계가 가능하므로 지반자체로의 자립여부 판단, 지반변형허용범위 검토 및 이에 따른 지보재 및 보조공법 적용여부에 대한 검토가 필수적이다.

본 연구에서는 수학적 방법에 의한 지반응답곡선과 지보반응곡선을 구하는 기존의 방법을 탈피하고, 다양한 터널조건에 적용할 수 있도록 수치해석을 통한 지반응답곡선과 수정지반응답곡선 구하였다. 다양한 해석조건에 대하여 검토하였으며 이에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 수치해석을 통해 구한 천단침하 지반응답곡선도 터널거동을 충분히 반영한다. 따라서, 지반응답곡선을 통하여 지반자체로의 자립여부 판단, 지반변형허용범위 및 이에 따른 지보재 및 보조공법 적용여부에 대한 검토가 가능하다.
2. 지보재를 설치하여 얻은 수정지반응답곡선과 지반응답곡선을 함께 고려하면 지보재가 부담하는 지지력을 정성적으로 파악할 수 있다.
3. 동일한 터널조건에서 지보재에 작용하는 하중은 지보재의 탄성계수나 하중분담율보다 지반강도나 변형계수가 보다 큰 영향력을 미친다. 또한, 지보재에 발생하는 응력의 수렴성은 소성영역과 관련된 지반특성으로 분석된다.
4. 3차원해석결과와 지반응답곡선을 통하여 기존 하중분담율 적용성을 분석하였을 때 상당한 문제점을 보이고 있다. 수치해석시 적용되는 하중분담율과 슛크리



트 강성변화 등의 입력치도 일률적인 적용보다 역해석과 접목하여 보다 유연한 적용이 필요하다.

### 참고문헌

1. 이 송, 안태훈, "터널지반과 지보재의 상호작용에 대한 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1994, pp 735-738
2. 이현범, "터널굴진에 의한 3차원 지반거동의 2차원적 해석방법", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1992
3. Z.T.Bieniawski "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A.BALKEMA, 1984, pp 145-149
4. E.Hoek & E.T.Brown, "Underground Excavations in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, 1980, pp 248-252
5. K.W.Torpey, J.Hawley M.A. "Design, Excavation and lining of the Shing Mun tunnels, Hong Kong", Tunnelling'91, 1991, pp. 299-312
6. Chern, J. C., Shiao, F. Y. and Yu, C.W. "An empirical safety criterion for tunnel construction" Proc. Regional Symp. on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, Nov 20-22, 1998, pp. 222-227
7. Brown,E.T.,Bray,J.W.,Ladanyi,B. and E. Hoek "Ground Reponse Curves for Rock Tunnels", Journal of Geotechnical Engineering 109, 1983, pp15-39
8. X.D.Pan, J.A.Hudson, "Plane Strain Analysis in Modelling Three-Dimensional Tunnel Excavation", Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.25, No.5, 1988, pp.331-337
9. Alan M. Muir Wood, "Development of Tunnel Support Philosophy", Pergamon Vol.4, 1993, pp.349-368
10. Alan M. Muir Wood, "Ground behavior and support for mining and tunneling." Tunnels and tunneling, Vol. 11, No. 4, 1979, pp. 43-48
11. W.H.Ward, "Ground Supports for Tunnel in Weak Rocks", Geotechnique 28 No.2, 1978, pp. 133-171