

### 3차원 유한요소해석에 의한 터널 교차부 거동 해석 Three Dimensional Finite Element Analysis of Tunnel Intersection

유충식<sup>1)</sup> Chung-Sik Yoo, 윤효석<sup>2)</sup> Hyo-Seok Yoon, 서용철<sup>3)</sup> Yong-Cheol Seo

- 1) 성균관대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.
- 2) 성균관대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.
- 3) 쌍용엔지니어링(주) 지반공학부 대리, Geotechnical Eng. Dept. SsangYong Engineering Co.,Ltd

#### 개요(SYNOPSIS) :

During tunnel construction, auxiliary tunnels are often constructed across the main tunnel, creating an intersection. Such a tunnel intersection often lies on unfavorable state of stress-strain, giving rise to a stability problem for tunnel engineers. Therefore, the stability of a tunnel intersection must be evaluated in designing stage in order to ensure overall tunnel stability. This paper presents the results of stability analysis of a tunnel intersection using a nonlinear three-dimensional finite element analysis. In the analysis, the construction sequence and installation procedure for primary supports such as shotcrete lining and rock bolts are carefully modelled, and the stability of the tunnel intersection was evaluated both quantitatively and qualitatively based on the results of the analysis.

주요어(Key words) : finite element analysis, tunnel intersection, three dimensional analysis

#### 1. 서론

최근의 터널공사중, 기 굴착된 터널구간에 부속터널을 접속시켜 굴착하는 공사가 빈번히 일어나고 있고, 이로 인해 터널 교차부가 발생한다. 여기서, 교차부란 2개이상의 터널이 동일한 단면을 공유하고 있는 영역으로 정의할 수 있으며, 이러한 터널 교차부는 환기시설을 위한 집진터널과 피난연락터널 등과 같은 부속터널들이 본선터널과 연결되어 시공되면서 발생한다.

일반적으로 터널 교차부는 기 시공된 본선터널의 지보재를 제거한 후 시공되므로 매우 취약한 3차원적 응력 상태에 놓이게 되므로 부적절한 설계 및 시공은 그림 1과 같은 휨 또는 전단 파괴 메카니즘을 동반한 파괴를 보이게 된다. 따라서 터널 설계시 교차부의 3차원적 응력-변형 상태를 정확히 파악하여 적절한 시공계획을 세우는 과정이 필수적이다.

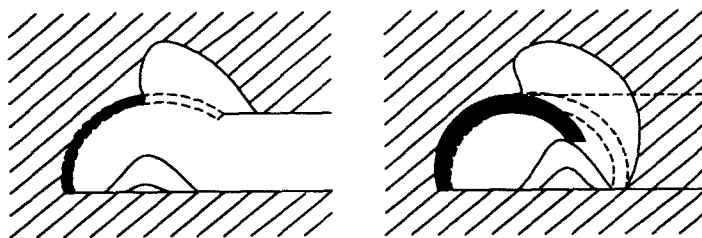


그림 1. 교차부의 파괴형태

따라서, 본 연구에서는 터널 굴착으로 인한 지반거동을 터널 굴진과정의 모사가 가능한 3차원 유한요소해석기법을 이용하여 초읍터널 구간중 과도한 응력 집중이 예상되는 비상주차대-집진터널 및 피난연락터널의 교차부의 응력-변형 거동을 파악하였다. 아울러서, 해석에서는 대심도 터널 거동의 주요 영향인자중의 하나인 측압계수에 대한 매개변수 연구를 수행하여,  $K_0$ 를 1.0과 2.0에 대한 해석을 수행하고 측압계수가 터널의 거동에 미치는 영향을 정성·정량적으로 분석하였다.

## 2. 초읍터널 개요

부산광역시 북구 만덕동에서 부산진구 초읍동까지 총 연장 1.5Km에 달하는 초읍터널은 1방향 2차선 쌍설터널로서 천공발파 및 NATM을 시공방식으로 채택하고 있고 상·하행 전구간은 피난연락터널 2개소와 집진터널 1개소 그리고 비상주차대 4개소를 포함한다. 그림 2는 초읍터널구간 중 해석영역의 위치를 나타낸다.

### 2.1 지반조건

초읍터널구간의 지반조건은 그림 3에 나타낸 것과 같이 봉적토층-풍화암층-연암층으로 이루어졌으며, 해석 단면에서는 봉적토층이 평균 G.L.-23m까지 분포하고 있으며, 풍화암층은 G.L.-35m, 연암층은 G.L.-41m, 그 이하는 경암층으로 구성되어 있으며, 토피고는 약 110m로 대심도 터널구간이다.

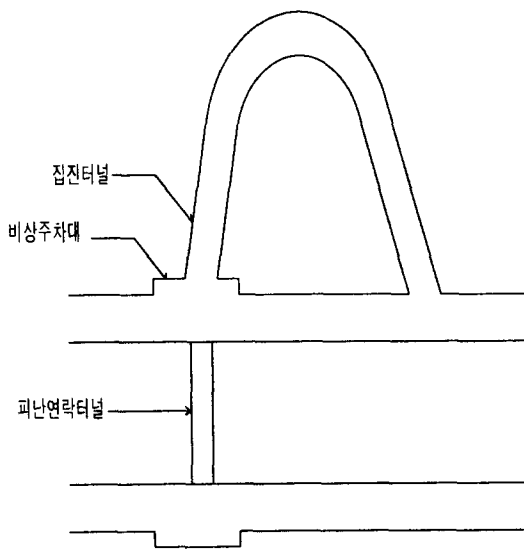


그림 2. 종평면도

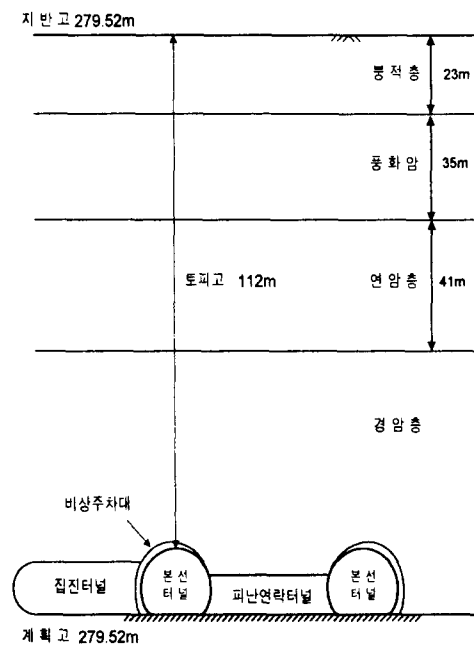
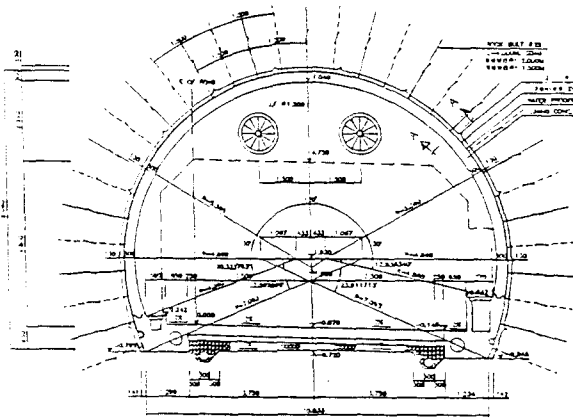


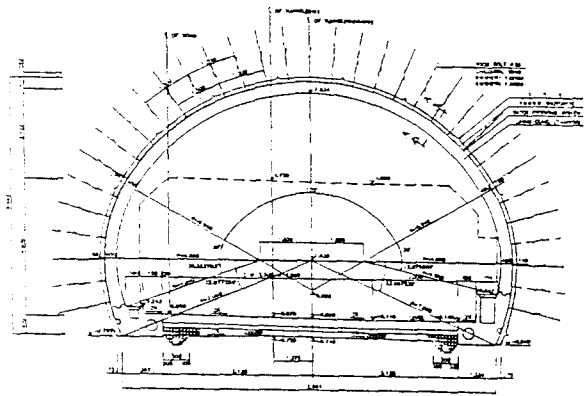
그림 3. 지반조건

## 2.2 터널설계

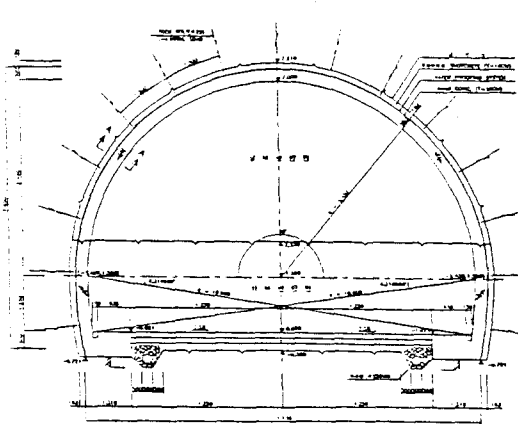
초읍터널은 그림 4에 나타낸 바와 같이 일반적인 도로터널의 형상으로 시공되며 본선터널의 경우 높이와 폭은 각각 약 8.0 m 및 약 11.5 m이며 비상주차대 터널단면의 경우 높이 약 9.0 m, 최대폭 약 14.0m이고 피난연락터널 및 집진터널 터널단면은 각각 높이 약 7.0 m, 7.7 m, 최대폭 약 7.3 m, 12m로 각각 상·하 반단면으로 굴착된다. 또한 터널 굴착시 일일 굴진장은 1.0 m이며, 1차 지보재로서 숏크리트와 록볼트가 타설되는데 본선 및 비상주차대는 16.0 cm, 피난연락터널 및 집진터널구간은 각각 13.0 cm와 16.0 cm의 숏크리트가 타설되고, 전구간에 걸쳐 횡방향 1.5 m, 종방향 1.0 m 간격으로 록볼트가 타설 되도록 설계되어 있다.



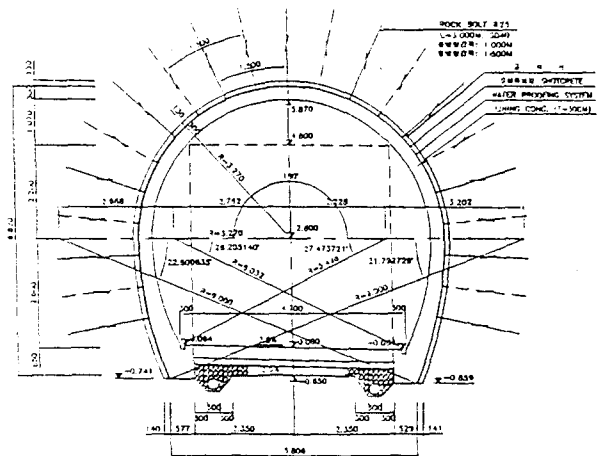
(a) 본선터널



(b) 비상주차대



(c) 집진터널



(d) 피난연락터널

그림 4. 터널 해석단면의 형상

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 사용 프로그램

본 해석에서는 네덜란드 TNO Building & Construction Research 社와 Delft Technical University에서 공동 개발된 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하였다. DIANA는 터널 해석, 구조해석, 열응력해석, 동적해석, 침투해석 등이 가능한 범용 프로그램으로서 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 다양한 구성 모델 제공  
Von-Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Egg Cam-Clay
- 적합(associated) 및 비적합(non-associated) 소성 이론 적용 가능
- 소성 경화(hardening) 모델 적용 가능
- Shell 및 reinforce element를 이용하여 슛크리트 및 록 볼트의 효율적인 모델링 가능
- Phased 해석을 통해 단계별 굴착의 효율적인 모델링 가능
- Coupled 해석 가능(압밀, 크리프, 침투 등등)

한편, 3차원 유한요소망 작성에 있어서, 본 해석과 같이 터널 교차부의 입력자료 작성은 많은 시간과 경험이 요하며 수작업으로는 매우 어려운 관계로 유한요소망 작성에 필요한 전처리 프로그램인 FEMGEN을 사용하여 작성하였다. 한편, 3차원 해석결과의 분석에 있어서는 2차원 해석결과와는 달리 방대한 양의 해석결과가 출력되므로 분석에 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 해석에서는 해석결과의 효율적인 분석을 위하여 후처리 프로그램인 FEMVIEW를 이용하여 가시화 한 후에 굴착에 따른 변위 및 응력을 정성·정량적으로 분석하였다.

#### 3.2 해석 모델링

본 연구에서는 그림 6에서 보이는 바와 같이 본선터널 굴착 후, 비상주차대-피난연락터널 및 집진터널의 교차부가 굴착되는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델링에서는 초읍터널이 상·하반 굴착방식으로 시공되거나 해석의 편의상 터널시공과정을 단순화하여 약 2.0 m의 굴진장으로 전단면 굴착이 이루어지며 굴착후 한 막장 후방에서 슛크리트와 록볼트가 타설되는 과정을 반복적으로 모델링 하였다. 이러한 모델링 방법은 약 1.0 m의 굴진장으로 상·하반 굴착이 이루어지는 실제의 시공 방법과 비교하여 안전측의 결과를 도출시킬 것으로 판단된다.

해석 대상 구간의 설정에 있어서 그림 6에 나타난 바와 같이 상하·좌우 대칭성을 최대한 살려 상·하행선 전 구간에 대한 모델링을 하기 보다는 상행 본선에 피난연락터널 및 집진터널이 시공되는 구간에 대한 구간을 해석 구간으로 채택하였다. 해석 모델링에 포함시킬 영역의 설정에 있어서 상·하부영역의 경우 터널 중심으로부터 터널직경의 약 4.0배 정도를 채택하였으며, 특히 상부영역의 모델링에 있어서 나머지 상부 토피는 상재압을 작용시키는 방법으로 모델링하였다. 한편, 좌·우측영역은 그림 7에 나타난 것과 같이 집진터널 및 피난연락터널의 일부(본선 터널의 중심으로부터 굴착경의 약 2배)를 해석 영역에 포함시켰다. 또한 경계조건으로는 터널 단면에 대하여 좌·우측의 경우 X방향 변위를 구속하였고 하부는 Y방향 변위를 구속하였으며, 전·후면은 Z방향 변위를 구속하는 구속조건을 부여 하였다.

해석영역을 이산화하는데 있어 지반은 6절점 및 8절점 isoparametric solid 요소로 슛크리트는 4절점 isoparametric shell요소로 모델링하였다. 한편 일반적으로 록볼트는 트리스 요소를 이용하여 모델링 하

는데, 이러한 경우에는 록볼트의 길이 및 배치 간격 등을 고려하여야 하기 때문에 요소망의 작성에 많은 어려움이 있으며 불필요한 절점이 발생하는 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 DIANA가 보유하는 embedded reinforcement를 이용하여 록볼트를 모델링하였다. Embedded reinforcement는 트러스 요소와 동일한 효과를 보유하며 자체 자유도를 가지고 있지 않으면서 다른 고체 요소와 같이 사용될 경우 둘러쌓여있는 요소의 변형영역으로부터 응력 및 변형률이 계산되는 장점이 있다.

해석 모델에 사용된 총절점 및 요소의 수는 각각 약 3000개 및 2,800개이며, 그 중 shell요소는 200개, solid요소는 2,600개로 구성되고 140개의 embedded reinforcement가 사용되었다. 한편 지반은 Drucker-Prager 항복규준을 따르는 탄소성 재료로, 슛크리트와 록볼트는 탄성재료로 모델링 하였다. 표 1은 해석에 사용된 지반 및 지보재의 공학적 특성치를 보여주고 있는데, 본 초읍 터널이 대심도 경암지역에서 굴착되지만 암반의 공학적 특성에 관한 자료가 정확히 주어지지 않은 관계로 각종 절리등의 효과를 고려하여 보통암의 특성치를 사용하였다.

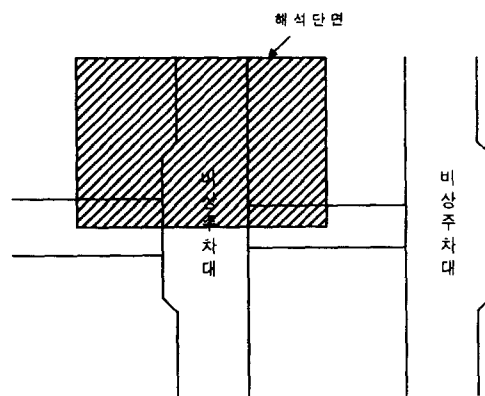


그림 6. 해석 영역

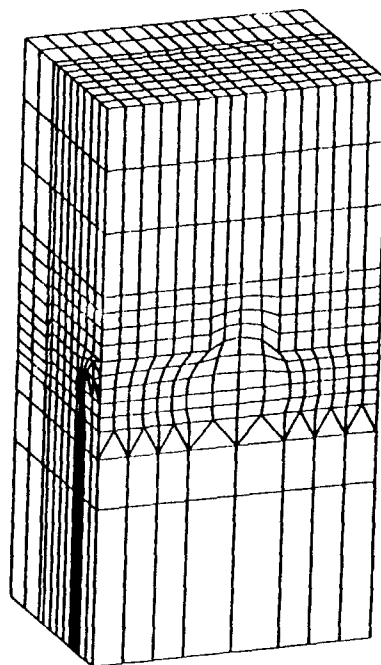


그림 7. 유한요소망

표 1. 해석대상 지반 및 지보재 물성치

구 분	층두께 (m)	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비 ( $\nu$ )	내부마찰각 ( $\phi$ )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )
붕적토	23.0	$2.0 \times 10^3$	0.35	30	3	1.80
풍화암	35.0	$1.0 \times 10^3$	0.30	35	30	2.30
연 암	41.0	$5.0 \times 10^3$	0.25	40	50	2.68
경 암	-	$1.0 \times 10^6$	0.20	45	100	2.68
숏크리트		$1.5 \times 10^6$	0.2			2.30
록볼트		$2.1 \times 10^4$				

### 3.3 해석 조건

일반적으로 터널의 거동은 초기응력상태에서 많은 영향을 받으므로 지반의 측압계수  $K_0$ 의 정확한 선정이 무엇보다도 중요하다. 토사의 경우는  $K_0$ 값 선정이 크게 문제시 되지 않으나 암반의 경우  $K_0$ 값의 정확한 측정이 매우 어려울 뿐만 아니라 잘 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 해석에 있어서, 대심도 터널의 주요 영향인자중의 하나인 측압계수  $K_0$ 에 대한 매개 변수 연구의 일환으로  $K_0=1.0$ 과 2.0에 대한 해석을 수행하여 측압계수가 터널의 거동에 미치는 영향을 검토하고 이를 바탕으로 터널의 거동에 불리한 영향을 주는 경우에 대해 안정성을 검토하였다.

## 4. 결과 분석

### 4.1 변위발생 경향

그림 8은 굴착완료상태에서의 변위 contour를 보여주고 있으며, 예상한 바와 같이 비상주차대 천단부를 중심으로 하였을 때, 집진터널 쪽으로 치우친 지점에서 약 4.0mm 정도의 최대변위가 발생하였다. 또한, 그림 9는 굴착완료상태의 최대 전단변형률 contour를 보여주고 있는데, 비상주차대와 집진터널 교차부 부근에서 최대전단변형이 집중됨을 알 수 있어 이 부근에서의 정밀시공이 요구된다고 하겠다.

본 연구에서는 단계별 굴착에 따른 터널과 지보재의 응력-변형 거동을 알아보기 위해서 그림 10에서 보이는 바와 같이 기 선정된 계측지점에서의 변위, 숏크리트 및 록볼트의 응력이력을 알아보았다. 계측 지점으로는 천단부와 좌우 spring line을 선택하였고 굴착단계는 총 13단계로 이루어져 있다. 주요 굴착단계로는 7단계, 10단계, 13단계로 본선 및 비상주차대 굴착완료상태가 7단계이고 피난연락터널 및 집진터널 굴착완료상태가 각각 10단계와 13단계이다.

그림 11은 천단부 수직변위 이력곡선을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 굴착이 진행되면서 각 지점의 천단변위가 증가하는 경향을 관찰할 수 있는데, 특기할 만한 사항은 A지점이 피난연락터널 및 집진터널과 약 2.5D 떨어져 있음에도 불구하고 피난연락터널 및 집진터널 굴착시 천단변위가 증가하는 경향을 보이고 있어, 영향영역내에 위치함을 알 수 있었다. 또한 교차부와 인접한 E 및 F지점의 경우, 집진터널 굴착시 천단변위가 가속화되어 약 1.0mm의 추가변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 한편  $K_0$ 에 따라 거의 유사한 천단변위 발생 경향을 보이고 있으나  $K_0=1.0$ 의 경우가 2.0의 경우보다 더 큰 천단변위를 나타내고 있다.

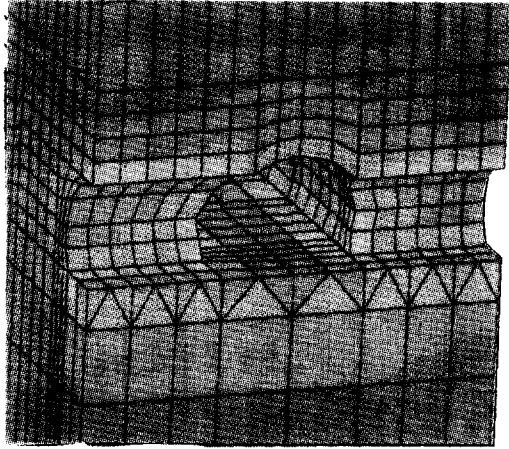


그림 8. 굴착완료상태의 변위 contour

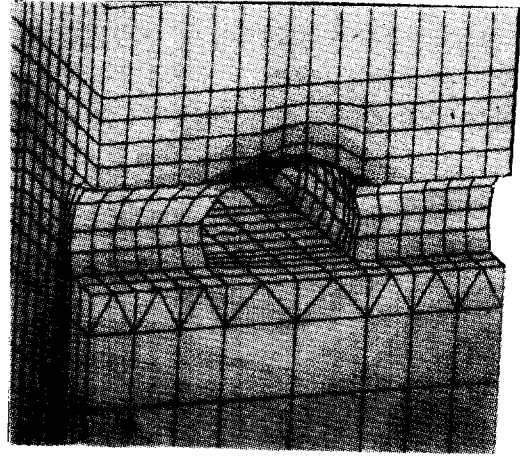


그림 9. 굴착완료상태의 max shear strain도

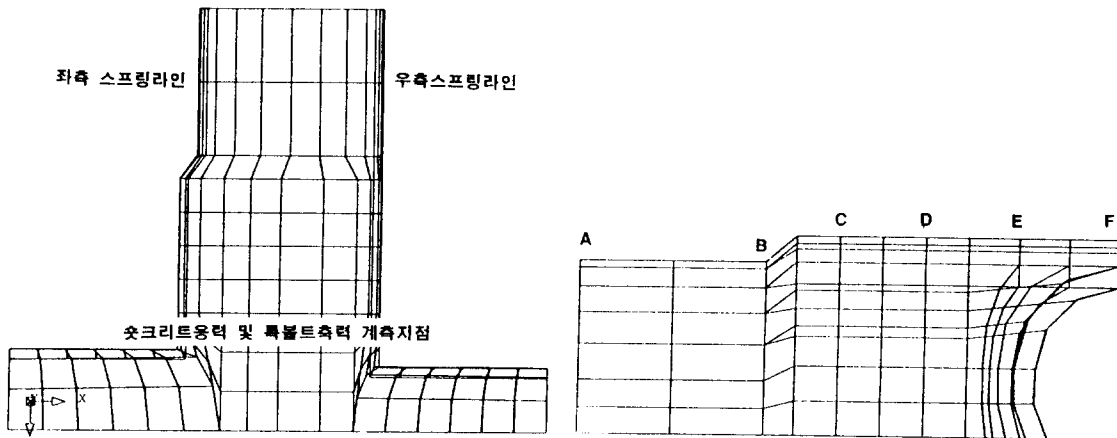


그림 10. 변위, 숏크리트응력 및 록볼트축력의 계측지점

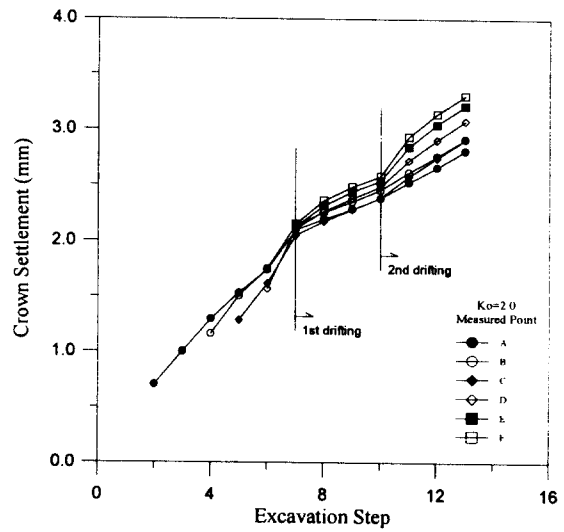
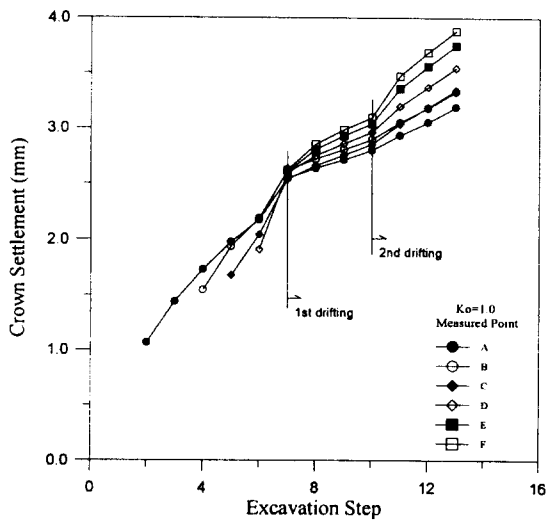


그림 11. 계측지점별 천단부변위 ( $K_o=1.0, 2.0$ )

$K_0=1.0$  및  $2.0$ 의 경우에 대하여 굴착에 따른 내공변위 발생경향이 그림 12에 나타나 있는데 보이는 바와 같이 부속터널 굴착시 본선터널의 내공변위 변화가 그다지 크지 않은 경향을 관찰할 수 있어, 부속터널의 굴착은 내공변위보다는 천단변위에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 한편, 일반적으로  $K_0$ 에 따른 내공변위 발생경향은 거의 유사하다고 할 수 있으나  $K_0=2.0$ 의 경우  $1.0$ 의 경우에 비하여 약 2.5배 이상의 내공변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이러한 경향은 해석 입력치 설정시  $K_0$  설정에 많은 주의가 요구됨을 단적으로 보여주고 있다.

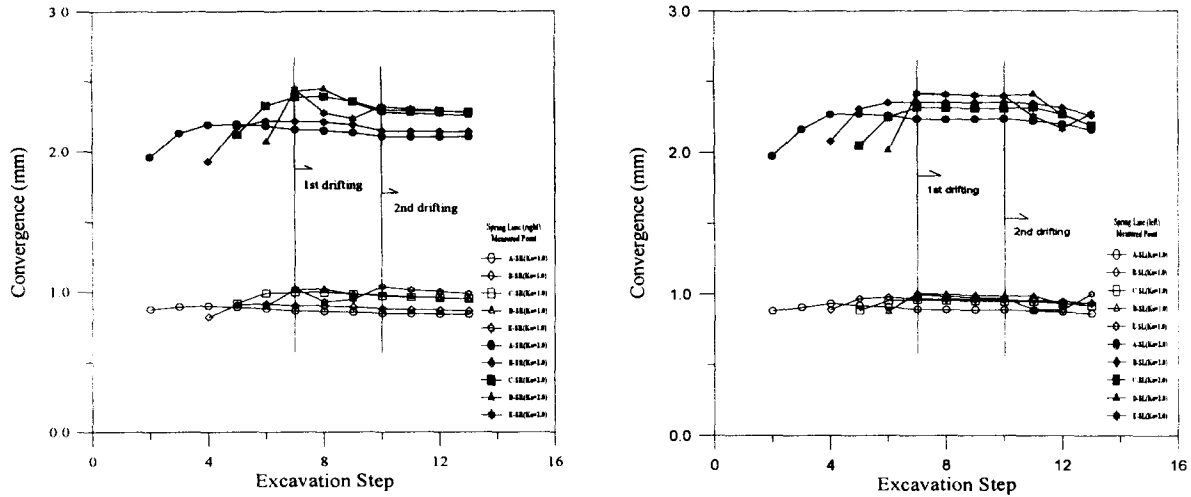


그림 12. 계측지점별 내공변위 (우측, 좌측)

## 4.2 슛크리트 응력

그림 13은 천단부 슛크리트 응력(국부좌표계  $\sigma_{xx}$ ) 이력곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 천단부에서는  $K_0=1.0$ 과  $2.0$ 의 경우, 각각 약  $30\text{kg/cm}^2$ 와  $55\text{kg/cm}^2$ 의 최대치가 발생하고 있어  $K_0$ 값에 따라 많은 차이를 보이며, 부속터널 굴착시 그다지 큰 응력변화가 발생하지 않고 있어 부속터널의 굴착은 천단부 슛크리트 응력에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

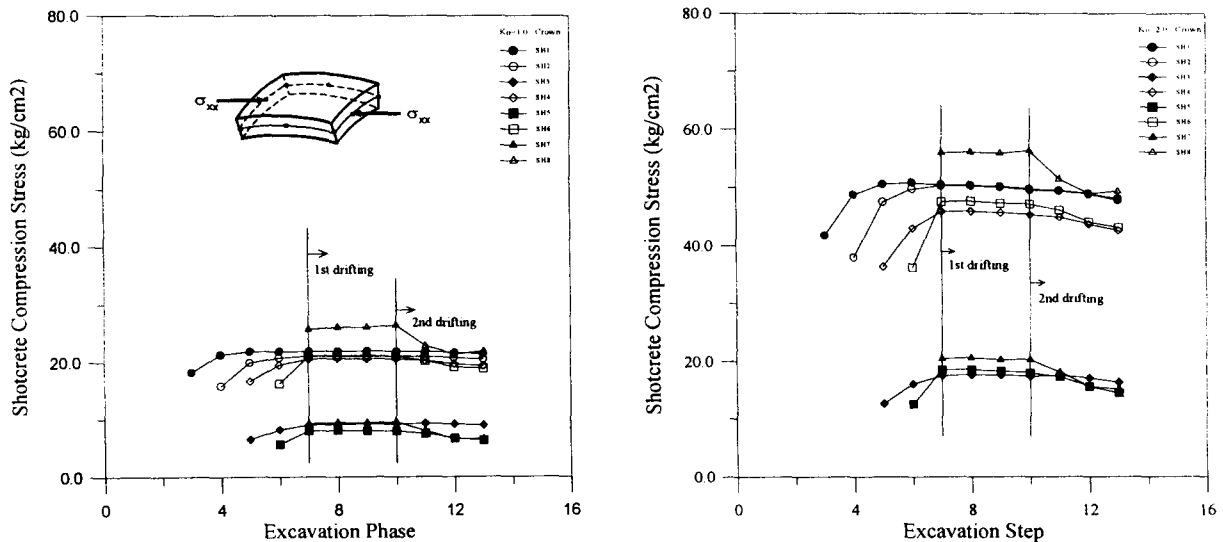


그림 13. 계측지점별 천단부 슛크리트응력( $K_0=1.0, 2.0$ )



$K_0=1.0$ 인 경우의 스프링 라인 좌·우측에서의 숏크리트 응력이력곡선이 그림 14에 나타나 있으며, 인접단면에서의 응력 분포도가 그림 15와 16에 나타나 있다. 보이는 바와 같이 천단부와는 달리 피난연락터널과 집진터널 굴착시 인접한 본선터널 단면의 우측과 좌측에서 크게 증가되는 경향을 관찰할 수 있으며 스프링라인에서  $K_0=1.0$ 의 경우가 2.0의 경우보다 다소 큰 최대응력이 발생하는 경향을 보여주고 있다. 한편 숏크리트 최대응력은  $K_0=1.0$  및 2.0 공히 허용응력( $84\text{kg/cm}^2$ ) 보다 작게 나타나고 있어, 숏크리트는 안전한 것으로 판단된다.

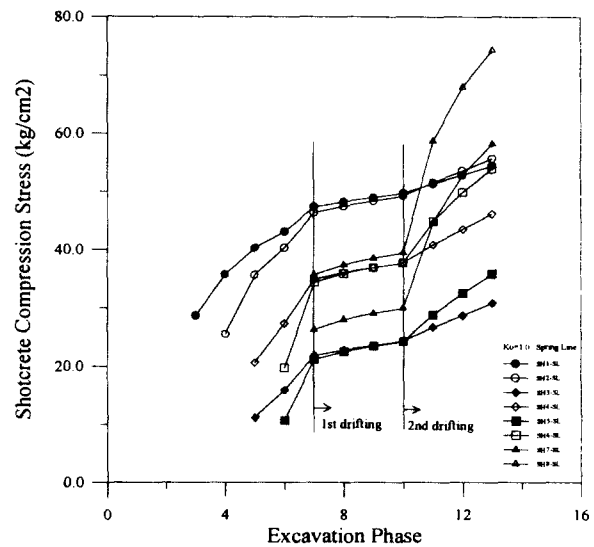
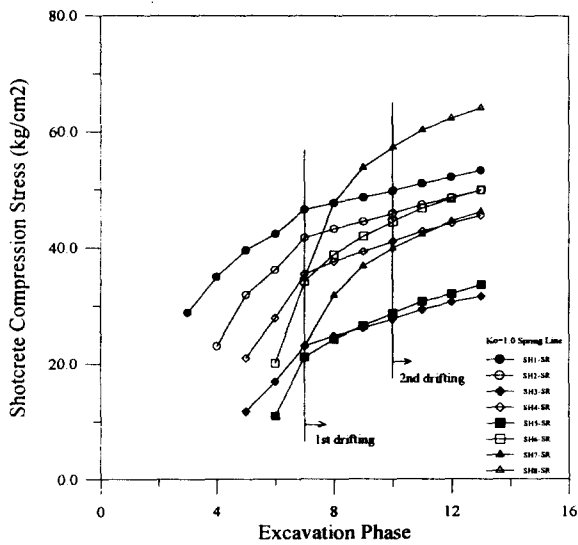


그림 14. 숏크리트 응력이력 곡선( $K_0=1.0$ 의 우측, 좌측)

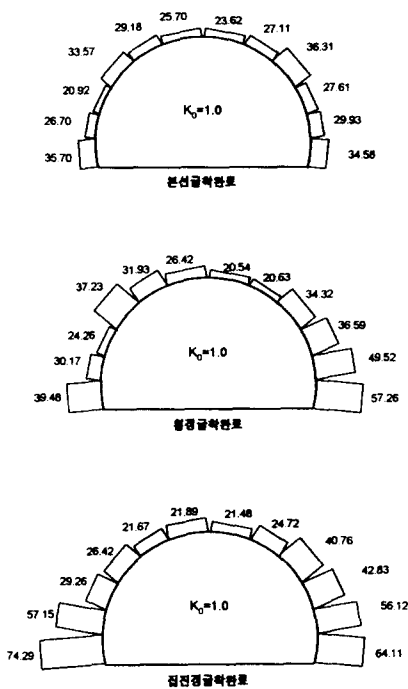


그림 15. 부속터널 굴착시, 교차부 인접단면의 숏크리트 응력분포도( $K_0=1.0$ )

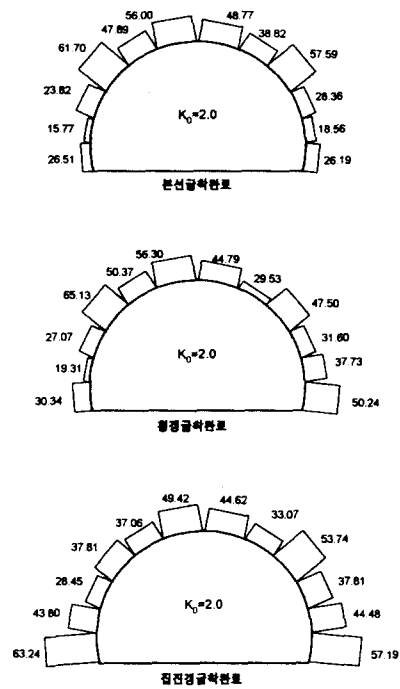


그림 16 부속터널 굴착시, 교차부 인접단면의 숏크리트 응력분포도( $K_0=2.0$ )

### 4.3 록볼트 축력

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 embedded reinforcement 개념을 이용하여 록볼트를 모델링 하였으며 그림 17은 본 해석에서 적용한 지보패턴을 보여주고 있다. 그림 18~20은 교차부 인접단면의 록볼트 축력 이력곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 록볼트에는 1.0ton 내외의 축력이 발생하는 경향을 관찰할 수 있고 특히, 부속터널 굴착시에는 미세하나마 오히려 다소 감소하는 경향을 관찰할 수 있는데 이러한 경향은 부속터널 굴착시 내공변위가 다소 감소하는 경향과 일치한다. 한편, 천단부에서는  $K_o=1.0$ 의 경우가 다소 큰 축력을 나타내나 스프링 라인부근에서는 반전되어  $K_o=2.0$ 의 경우가 더 큰 축력이 발생하는 경향을 관찰 할 수 있다. 한편 최대축력은 교차부에 가장 인접한 집진터널단면에서  $K_o=1.0$ 과 2.0의 경우, 각각 1.83ton과 3.60ton이 발생하고 있는데 이는 최종단계에서의 최대변위가 교차부 중앙점에서 집진터널측으로 치우쳐 발생한 점과 잘 일치하고 있으며, 허용축력 7.5ton보다 작게 나타나 안정한 것으로 판단된다.

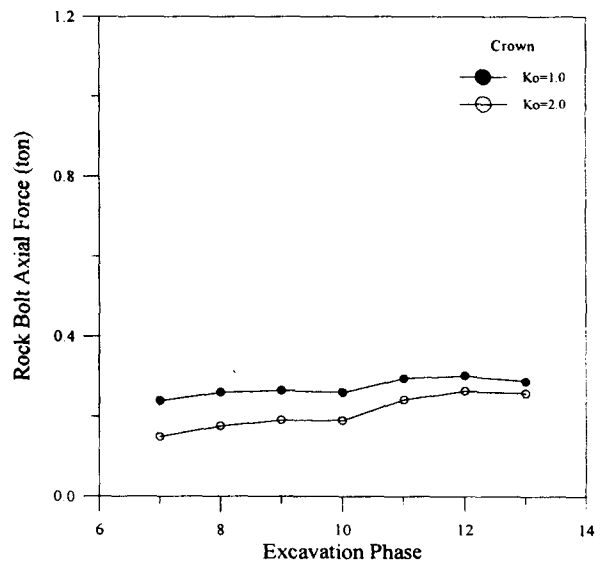
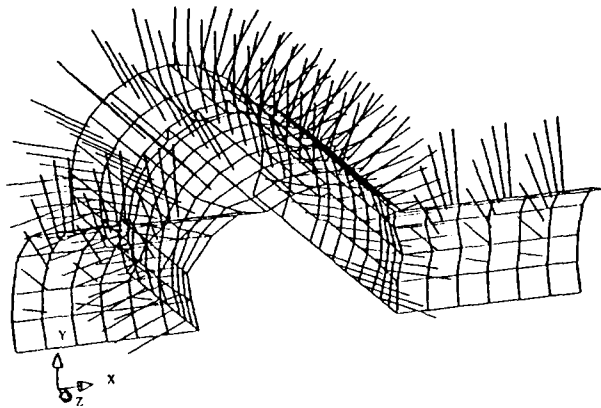


그림 17. 해석단면의 슛크리트와 록볼트 지보패턴

그림 18. 교차부 인접단면의 천단부 록볼트축력 비교

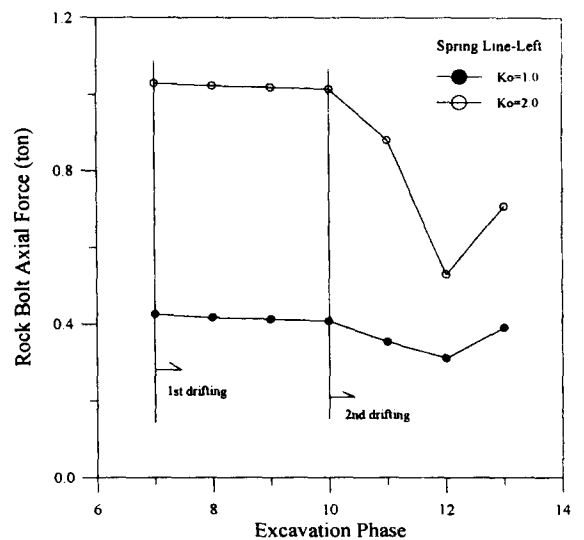
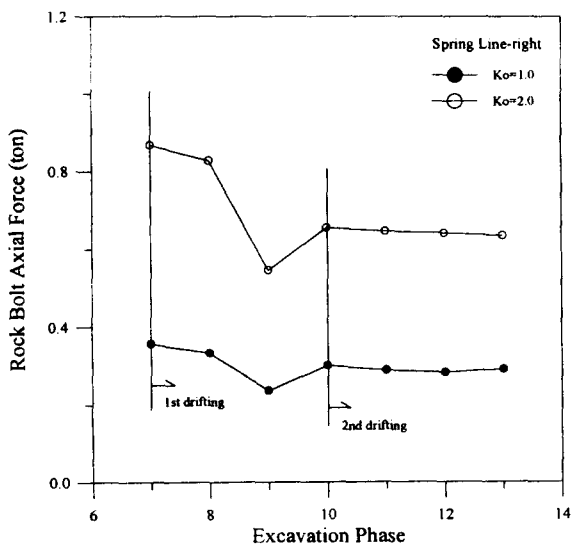


그림 19. 우측내공변위점의 록볼트축력 이력곡선

그림 20. 좌측 내공변위점의 록볼트축력 이력곡선

표 2는 본 해석결과를 요약하여 나타내고 있는데, 이러한 결과는 시공시 관리 기준치설정에 많은 도움을 줄 수 있으며, 한편 본 해석의 결과에서 알 수 있듯이 수치해석의 결과는 해석에 적용한  $K_0$ 와 같은 지반의 공학적 특성치에 좌우되는 경향을 알 수 있어, 지반조사를 통한 공학적 특성치의 정확한 평가가 매우 중요함을 알 수 있다.

표 2. 해석결과 요약

구 분	숫크리트 최대압축응력(kg/cm <sup>2</sup> )		록볼트 최대축력(ton)		천단변위 (mm)		내공변위 (mm)	
	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=1.0$	$K_0=2.0$
최종단계	74	63	1.8	3.6	3.9	3.3	1.0	2.5

## 5. 결 론

본 연구에서 수행한 초음터널 구간중 과도한 응력집중이 예상되는 비상주차대-집진터널 및 피난연락터널의 교차부 거동에 관한 3차원 유한요소해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 천단변위 발생경향은  $K_0=1.0$ 과  $K_0=2.0$ 의 경우, 거의 유사한 경향을 보이고 있으나  $K_0=1.0$ 의 경우가 2.0의 경우보다 더 큰 천단변위를 나타내며, 또한 교차부 굴착으로 인한 천단변위 발생영향이 약 2.5D 이상까지 미치고 있음을 알 수 있었다.
2. 부속터널 굴착시, 굴착에 따른 내공변위 발생경향은 그다지 크지 않은 경향을 관찰할 수 있었고  $K_0=1.0$  및 2.0의 경우에 대하여 거의 유사하나  $K_0=2.0$ 의 경우 1.0의 경우에 비하여 약 2.5배 이상의 내공변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있었다.
3. 천단부 숫크리트 응력(국부좌표계  $\sigma_{xx}$ )은  $K_0$ 값에 따라 많은 차이를 보이며, 부속터널 굴착시에는 그다지 큰 응력변화가 발생하지 않고 있어 부속터널의 굴착은 천단부 숫크리트 응력에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
4. 천단부와는 달리 스프링라인에서 피난연락터널과 집진터널 굴착시, 인접한 본선터널 단면의 우측과 좌측에서 크게 증가되는 경향을 관찰할 수 있으며  $K_0=1.0$ 의 경우가 2.0의 경우보다 다소 큰 응력이 발생한다.
5. 록볼트 최대축력은 교차부에 가장 인접한 집진터널단면에서 발생하고 있어, 이 부분에 대한 정밀시공이 요구된다.
6. 수치해석의 결과는 입력자료에 좌우되며 입력자료의 정확한 설정이 어려울 경우, 본 해석에서 채택한 방법과 같이 가능한 범위에 대한 매개변수 연구를 수행함으로써 시공관리 기준을 설정할 수 있다.

**\*참고문헌**

1. 초음터널 및 접속도로 축조공사 기본설계보고서, 1995.
2. Takino, K., Kimura, H., Takeda, N. and Ito, F.(1985), "Three-dimensional behavior of tunnel intersection", Fifth International Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, pp.1185~1193.
3. Eberhardsteiner, J., Mang, H. A. and Torzicky, P.(1991), "Elasto-plastic coupled BE-FE stress analysis of a tube of Vienna's underground line U3, considering sequences of driving and securing by shotcrete", Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, ISBN, pp.1461~1466
4. Tsuchiyama, S., Hayakawa, M., Shinokawa, T. and Konno, H.(1988), "Deformation behavior of the tunnel under the excavation of crossing tunnel", Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, ISBN, pp.1591~1596
5. Geisler, H., Wagner, H., Zieger, O., Mertz, W. and Swoboda, G.(1985), "Practical and theoretical aspects of the three-dimensional analysis of finally lined intersections", Fifth International Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, pp.1175~1183.
6. Thareja, D., Madhavan, K., Sharma, K. G. and Natarajan, R.(1985), "Three dimensional finite element analysis of branching tunnels", Fifth International Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, pp.1193~1199.
7. DIANA User's Manual, Release 6.1, TNO Building and Construction Research, 1996.