

## 시공 단계가 터널 교차부의 역학적 거동에 미치는 영향 Effect of Construction Sequence on Mechanistic Behavior of Tunnel Intersection

유충식<sup>1)</sup> Chung-Sik Yoo, 윤효석<sup>2)</sup> Hyo-Seok Yoon

<sup>1)</sup> 성균관대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.

<sup>2)</sup> 성균관대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.

**SYNOPSIS :** The rapid growth in urban development has resulted in an increased demand for new infrastructure such as water supplies, sewage disposals, electric lines, and transportations systems. The majority of the such facilities are constructed underground in the form of tunnels for technical and environmental reasons. When constructing transportation tunnels, auxiliary tunnels for ventilation and evacuation are often constructed across main tunnel, and therefore, the tunnel intersection is inevitably created. Since such tunnel intersection exhibits very complex stress-strain behavior, it is very important to predict the intersection behavior during design phase and to suggest mechanically favorable construction procedure. This study was undertaken to investigate the effect of construction procedure on the mechanical behavior of tunnel intersection using the three-dimensional finite element analysis. Based on the results, the construction guidelines are suggested.

**Key words :** Finite element analysis, Tunnel intersection, Construction sequence, Three dimensional analysis

### 1. 서론

국내의 급속한 경제성장으로 인한 도심지 인구 과밀화 현상은 정부로 하여금 좁은 국토를 효율적으로 활용할 수 있는 방안 및 대책 마련의 필요성을 인지하게 하였고, 이에 대한 노력의 결과로 전력구, 통신구, 지하철, 도로, 고속철도 등 사회기반시설의 건설이 증가하고 있다. 이러한 사회기반시설은 우리나라의 지형적·환경적 특성으로 인해 많은 구간이 지하에 건설되며, 이에 따라서 많은 터널이 시공되고 있다. 최근 들어 시공되는 지하철 터널이나 도로 터널, 그리고 고속철도 터널은 장대화되는 경향이 있으며, 따라서 환기터널 및 피난연락터널 등 부속터널이 본선터널에 접속되어 시공되는 경우가 빈번히 발생한다. 이러한 부속터널의 시공으로 인해 발생하는 본선터널-부속터널 교차부에서는 응력-변형 거동이 매우 복잡하므로 경제적이고 안전한 터널 시공을 위해서는 설계단계에서 터널 교차부의 거동을 예측하고 이에 대한 보강여부를 판단하는 과정이 매우 중요하다. 또한, 터널의 거동은 굴착방법이나 시공 단계에 따라 지대한 영향을 받으므로, 설계 단계에서 교차부의 시공단계가 터널의 전반적인 거동에 미치는 영향을 분석하고 역학적으로 유리한 시공단계를 제시할 필요성이 있다.

이러한 맥락에서 필자는 3차원 유한요소해석을 통해 터널 교차부의 거동에 관해 정성·정량적 연구(유충식과 윤효석 1997)를 수행한 바 있으며, 본 연구에서는 이에 관련된 후속 연구로서 부속터널의 시공단계가 교차부의 거동에 미치는 영향을 3차원 유한요소해석을 통해 정성·정량적으로 고찰하고 그 결과를 바탕으로 터널 교차부의 시공지침을 제시하였다.

## 2. 해석대상 터널 개요

### 2.1 터널의 기하조건 및 지반조건

해석대상 터널로는 토피가 약 40 m 정도이고 2차선 쌍설터널로 시공되는 일반적인 도로터널을 설정하였으며, 터널 교차부는 상·하행 구간에 피난연락터널과 집진터널이 동일한 위치에서 교차하도록 하여 역학적으로 매우 취약한 조건을 설정하였다. 또한 해석 대상 터널이 시공되는 지반은 불리한 지반 조건을 고려하기 위해 연암 내지 풍화암에 해당하는 지층으로 가정하여 해석에 적용하였다.

### 2.2 터널단면 및 지보패턴

본 해석에 사용된 터널단면은 본선터널의 경우 높이와 폭이 각각 8.0 m 및 11.5 m, 비상주차대 터널 단면의 경우 높이 9.0 m, 폭 14.0m이며, 피난연락터널 및 집진터널의 터널단면은 각각 높이 7.0 m, 7.7 m, 폭 7.3 m, 12 m 이다. 한편 터널 굴착방식은 해석의 편의상 전단면 굴착이 이루어지는 것으로 가정하였으며, 굴착 후 20 cm의 슛크리트가 타설되고 전구간에 걸쳐 횡방향 1.5 m, 종방향 1.0 m 간격의 록볼트가 타설 되는 것으로 간주하였다.

## 4. 유한요소 해석

### 4.1 사용 프로그램 및 해석 모델링

본 해석에서는 네덜란드 TNO Building & Construction Research 社와 Delft Technical University에 서 공동 개발된 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하였으며, 유한요소망의 작성 및 해석 결과의 분석에서는 전·후처리 프로그램인 FEMGEN/FEMVIEW를 이용하였다. DIANA 및 FEMGEN/FEMVIEW에 대한 자세한 내용은 유충식과 윤효석(1997)의 논문에 제시되어있다.

해석 대상 구간의 설정에 있어서 그림 2에 나타난 바와 같이 상하·좌우 대칭성을 최대한 살려 상·하행선 전 구간에 대한 모델링을 하기보다는 하행 본선에 피난연락터널 및 집진터널이 시공되는 구간을 해석 구간으로 채택하였다. 한편, 해석 모델링에 포함시킬 영역의 설정에 있어서 상·하부영역의 경우 터널 중심으로부터 터널직경의 약 4.0배 정도를 고려하였으며, 좌·우측영역도 집진터널 및 피난연락터널의 일부(본선 터널의 중심으로부터 약 2.0D)를 해석 영역에 포함시켰다. 경계조건으로는 터널 단면에 대하여 좌·우측 경계의 경우 X방향 변위를 구속하였고 하부 경계는 Y방향 변위를 구속하였으며, 전·후면 경계는 Z방향 변위를 구속하는 구속조건을 부여하였다.

해석영역을 이산화 하는데 있어 지반은 6절점 및 8절점 isoparametric solid 요소로 슛크리트는 4절점 isoparametric shell요소로 모델링하였고, 록볼트는 DIANA가 보유하고 있는 embedded reinforcement를 이용하여 모델링하였다. Embedded reinforcement는 트러스 요소와 동일한 효과를 보유하며 자체 자유도를 가지고 있지 않으면서 다른 고체 요소와 같이 사용될 경우 둘러싸여 있는 요소의 변형영역으로부터 응력 및 변형률이 계산되는 장점이 있다.

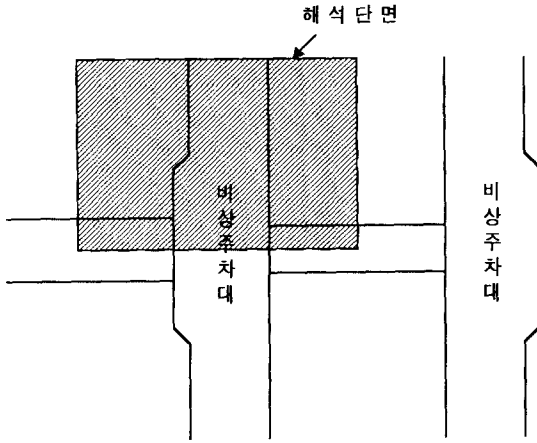


그림 1. 해석 영역

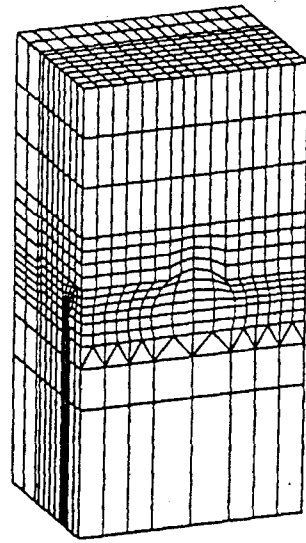


그림 2. 해석에 적용된 유한요소망

해석 모델에 사용된 총 절점 및 요소의 수는 각각 5,144개 및 3,052개이며, 그 중 shell요소는 268개, solid요소는 2,784개로 구성되고 1,536개의 embedded reinforcement가 사용되었다. 한편 지반은 Drucker-Prager 항복기준을 따르는 탄소성 재료로, 숏크리트와 록볼트는 탄성재료로 모델링 하였다. 그림 3은 해석에 적용된 유한요소망을 보여주고 있으며, 표 1은 해석에 사용된 지반 및 지보재의 역학적 특성치를 보여주고 있다.

표 1. 해석대상 지반 및 지보재 물성치

구 분	탄성계수 ( $t/m^2$ )	포아송비 ( $\nu$ )	내부마찰각 ( $\phi$ )	점착력 ( $t/m^2$ )	단위중량 ( $t/m^3$ )	측압계수 ( $K_0$ )
지반	$1.0 \times 10^9$	0.30	35	30	2.30	1.0
숏크리트	$1.5 \times 10^9$	0.2	N/A	N/A	2.30	N/A
록볼트	$2.1 \times 10^7$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

### 4.3 해석 조건

본 연구에서는 본선터널 및 비상주차대로 이루어지는 주터널 굴착 후, 부속터널인 피난연락터널과 집진터널이 굴착되는 교차부에 대하여 그림 3과 같은 두 가지 시공단계에 대한 해석을 수행하고 시공단계가 교차부의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 부속터널의 굴착이 본선터널로부터 분기되어 진행될 경우를 CASE-1, 반대로 본선터널로 접속 시공될 경우를 CASE-2로 설정하고, 이에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

해석단계는 총 21단계로 구성하였는데, 1단계에서는 초기응력 상태를 재현하였으며, 2~9단계에 걸쳐 본선터널이 굴착되고 10~21단계에서 집진터널과 피난연락터널이 각각 6단계에 걸쳐 굴착되도록 구성하였다.

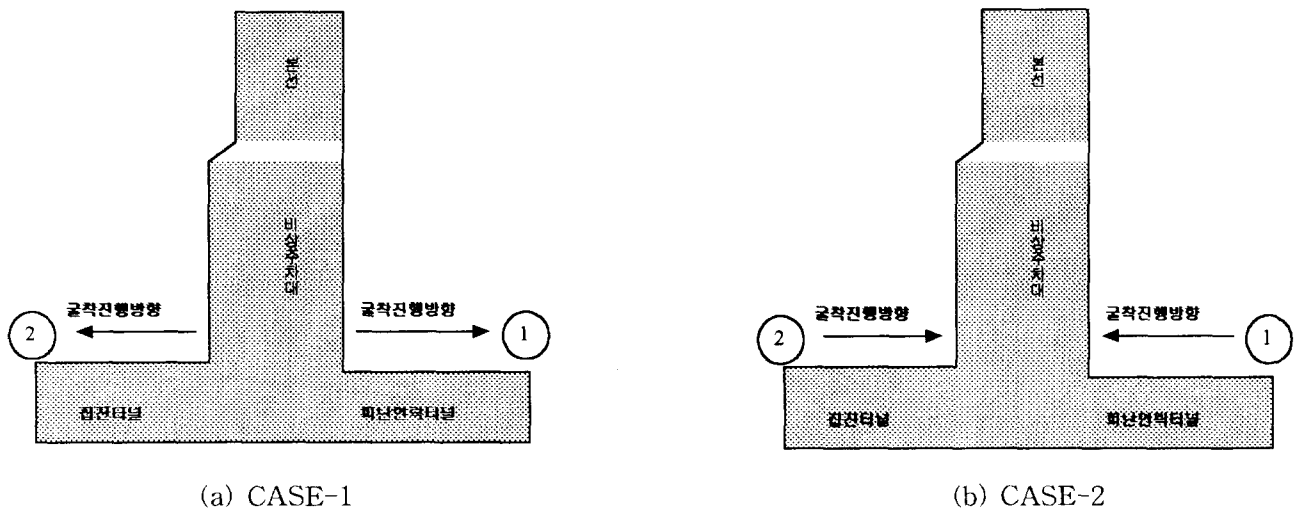


그림 3. 해석에 적용된 시공 단계

## 5. 결과 분석

부속터널의 시공 단계에 따른 터널 및 지보재의 응력-변형 거동을 분석하기 위해 그림 4에서 보이는 바와 같이 기 선정된 계측지점에서의 변위, 슛크리트 및 록볼트의 응력이력을 알아보았다.

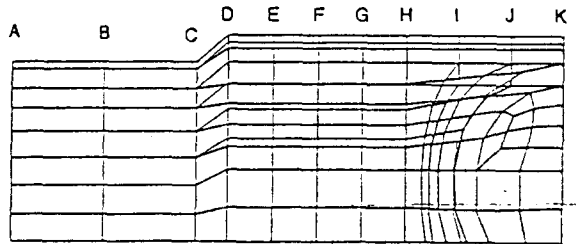


그림 4. 계측지점 위치도

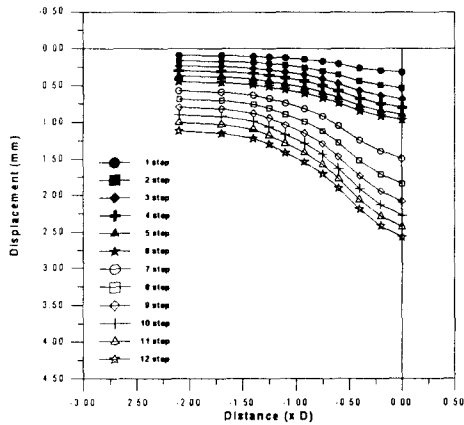
### 5.1 굴착단계에 따른 변위발생 경향

그림 5는 시공 단계에 따른 본선 터널의 천단부 변위 이력곡선을 나타내고 있는데 보이는 바와 같이 CASE-1 및 CASE-2 공히 부속터널의 굴착에 따라 본선 터널의 천단변위가 지속적으로 증가하여 부속터널 시공완료 시점에서 최대 약 2.5 mm의 추가 변위가 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 한편, CASE-1의 경우 교차부 후방 1.0D에서 그리고 CASE-2의 경우에는 교차부 후방 1.5D에서부터 천단부의 변위가 급격히 증가하는 경향을 관찰할 수 있어 교차부 굴착의 영향 영역은 교차부 후방 1.0D~1.5D 정도로 간주할 수 있으며, CASE-2의 시공단계를 채택할 경우 CASE-1 보다 다소 넓은 구간을 보강영역으로 채택하여야 함을 알 수 있다. 한편, 두 경우 모두 최종 천단변위에서는 큰 차이를 보이지 않고 있으나, CASE-2에서는 좌측 집진터널 굴착시 천단변위가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있어, CASE-2와 같은 시공단계를 채택할 경우에는 부속터널과 본선터널이 연결되는 시점에서의 시공관리가 매우 중요함을 알 수 있다.

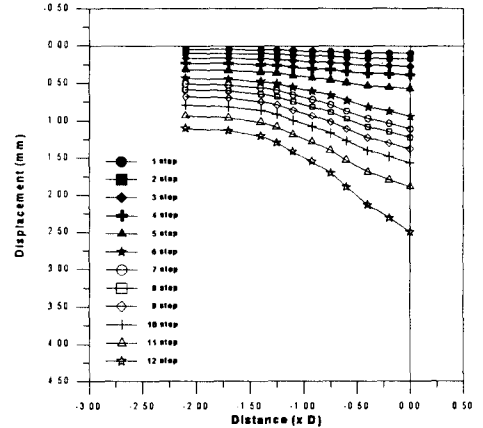
본선터널 좌·우측 측벽부의 내공변위 발생 추이를 나타내고 있는 그림 6에서도 CASE-1과 CASE-2

의 경우는 거의 유사한 크기의 추가 내공변위를 나타내고 있으나 두 경우 모두 내공변위가 “-” 값을 나타내고 있어 부속터널의 굴착으로 인해 내공변위가 회복되는 경향(약 35%)이 있음을 알 수 있으며, 두 경우 공히 부속 터널의 굴착은 교차부 후방 1.0D 이내 영역에 주된 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 한편, 굴착방향과 동일한 측벽부 내공변위 발생 추이를 관찰하면, CASE-1의 경우 굴착이 진행됨에 따라 변위 증가율이 둔화되는 반면, CASE-2의 경우 가속화되는 경향을 관찰할 수 있어 CASE-2가 다소 불리한 응력 상태를 야기시킴을 알 수 있어 CASE-2의 시공단계를 채택할 경우 보다 엄격한 시공관리가 요구된다고 할 수 있다.

전술한 경향은 그림 4에 제시된 계측 지점에서의 천단부 변위 발생 추이를 나타내고 있는 그림 7에서도 관찰할 수 있다. 즉 보이는 바와 같이 CASE-1의 경우에는 부속터널의 굴착에 따라 각 계측 지점의 변위가 수렴되는 경향을 관찰할 수 있으나, CASE-2의 경우 부속터널의 막장이 본선터널에 근접할수록 본선터널의 변위 증가가 가속되는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 아칭현상으로 설명되어질 수 있다. 즉 CASE-1의 경우 부속터널의 막장은 본선터널과 반대방향에 놓이므로 종방향 아칭 효과가 굴착이 진행됨에 따라 소멸되나 CASE-2의 경우 부속터널의 막장은 굴착이 진행됨에 따라 본선터널에 근접하므로 종방향 아칭효과로 인한 응력전이 현상이 굴착이 진행됨에 따라 심화되기 때문으로 판단된다.

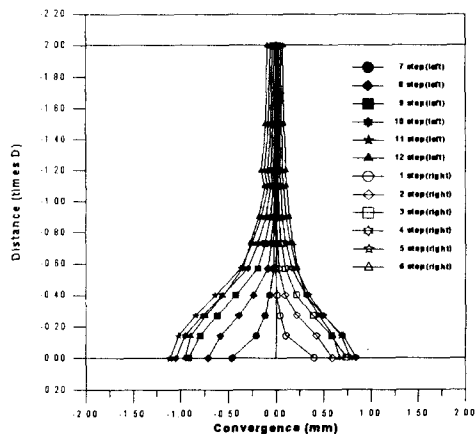


(a) 천단부 (CASE-1)

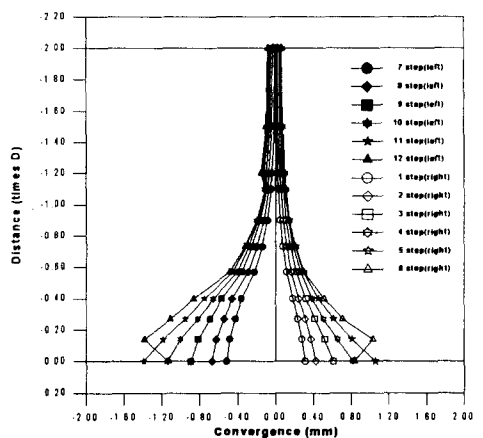


(b) 천단부 (CASE-2)

그림 5. 천단부 수직변위 이력곡선

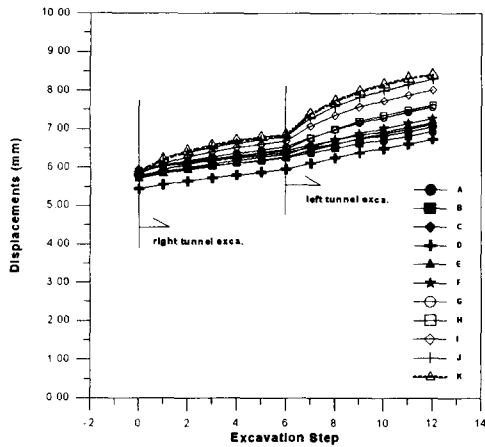


(a) 스프링라인 (CASE-1)

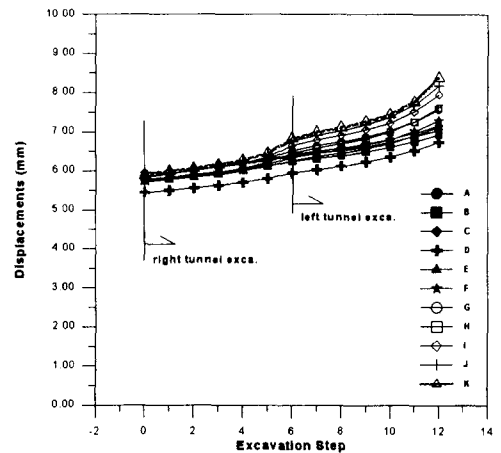


(b) 스프링라인 (CASE-2)

그림 6. 좌·우측 스프링라인 내공변위 이력곡선



(a) 천단부 (CASE-1)



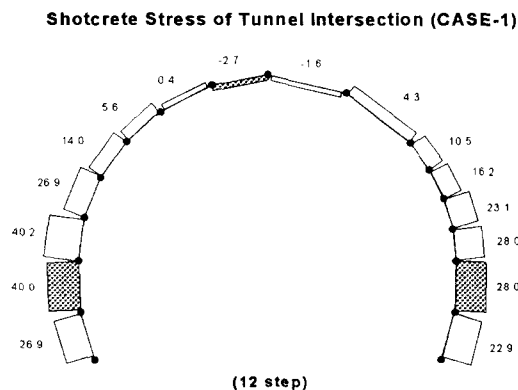
(b) 천단부 (CASE-2)

그림 7. 단계별 천단부 변위 이력곡선

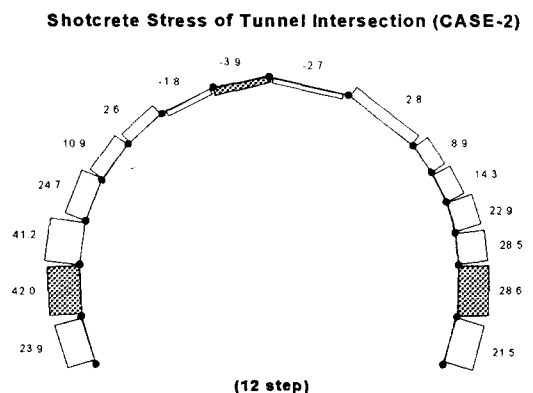
## 5.2 굴착단계에 따른 숏크리트 및 록볼트 응력 발생 경향

그림 8에서는 교차부 후방 0.6D에 위치한 본선터널 단면에서의 숏크리트 축응력 변화 경향을 부속터널의 굴착단계에 따라 도시하고 있다. 보이는 바와 같이 변위발생 경향에서 관찰한 바와 같이 최종단계에서의 응력은 CASE-1과 CASE-2 공히 부속터널 시공전 응력에 비하여 최대 약  $40\text{kg/cm}^2$ 의 추가 응력증가가 발생한 것으로 나타나 시공단계는 최종단계에서의 숏크리트 응력에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 한편, 대부분의 숏크리트 응력 증가는 스프링라인 부근에서 발생하고 있어, 시공 중에는 스프링라인에서의 숏크리트 응력을 집중적으로 관리하여야 함을 알 수 있다.

한편, 그림 9는 굴착단계에 따른 각 계측단면의 좌측 숏크리트 응력 이력곡선을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 부속터널 굴착으로 인한 숏크리트 응력 증가는 교차부에서 약 0.5D 후방에 위치하는 SH7 단면에서부터 급격해지는 경향을 관찰할 수 있어 교차부 후방 0.5D 이내의 영역에서의 집중적인 보강이 요구됨을 알 수 있다. 한편, CASE-1의 경우에는 굴착이 진행됨에 따라 응력이 수렴되어 가고 있음을 알 수 있으나, CASE-2의 경우에는 부속터널의 막장이 본선터널에 근접함에 따라 급격한 응력증가 경향을 나타내고 있으며, 이러한 응력 증가는 약 두 막장 이전 즉, 0.3~0.5D에서 급격하게 발생하는 경향을 보이고 있어 부속터널의 막장이 본선터널로부터 두 막장 이전에서부터 막장전방의 보강 내지는 시공관리에 매우 세심한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

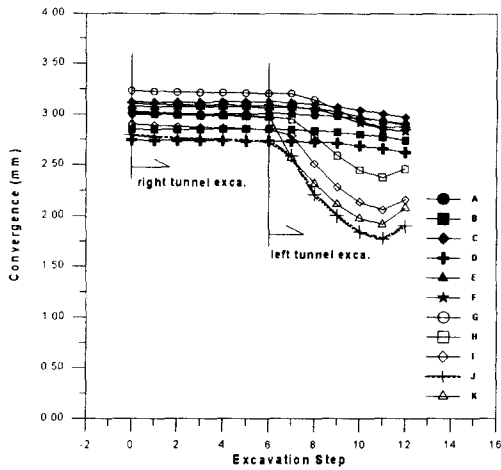


(c) 집진터널 굴착완료(CASE-1)

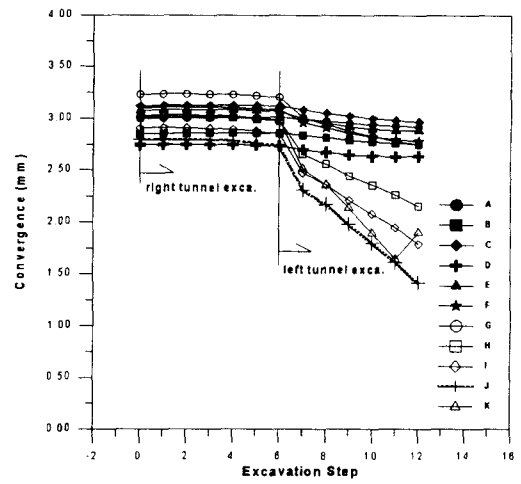


(d) 집진터널 굴착완료(CASE-2)

그림 8. 교차부 후방 0.6D 본선터널 단면에서의 숏크리트 응력 분포



(a) CASE-1



(b) CASE-2

그림 9. 좌측 스프링라인 숏크리트 응력 발생 추이

앞서 언급한 바와 같이, 유한요소해석에서는 truss 요소와 동일한 효과를 보이거나 보다 효율적인 적용이 가능한 embedded reinforcement 요소를 이용하여 그림 10과 같이 본선터널 및 부속터널에 시공되는 록볼트를 모델링하였다. 그림 11은 굴착단계에 따른 교차부 후방 0.6D에 위치한 본선터널 단면에서의 천단부 및 스프링라인에서의 록볼트 축력 변화 경향을 도시하고 있다. 보이는 바와 같이, 천단부의 경우 시공단계에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있어 부속터널 굴착의 영향은 거의 없으나, 좌우측 스프링라인의 경우에는 부속터널 굴착으로 인해 다소 감소(약 10%)하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 앞서 변위 발생 경향에서 관찰할 수 있었던 본선터널 굴착으로 발생한 내공변위가 부속터널 굴착으로 인해 다시 회복하는 경향과 잘 일치하고 있다.

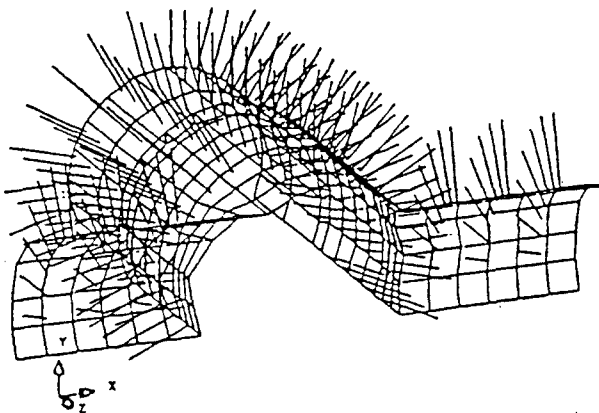


그림 10. 록볼트 지보패턴

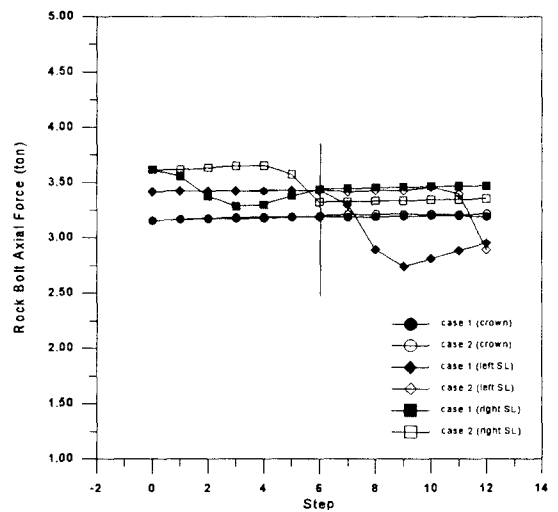


그림 11. 부속터널 굴착단계에 따른 록볼트 축력변화 곡선

## 6. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 기법을 이용하여 부속터널의 시공단계가 터널 교차부의 역학적 거동에 미치는 영향을 정성·정량적으로 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 부속터널의 시공단계는 최종변위에는 그다지 큰 영향을 미치지 않으나 부속터널에서 본선터널로 굴착이 진행되는 CASE-1의 경우가 반대의 경우인 CASE-2의 경우 부속터널 굴착 영향영역이 보다 넓은 나타나고 있어 CASE-2의 시공단계를 채택할 경우 CASE-1 보다 다소 넓은 구간을 보강영역으로 채택하여야 함을 알 수 있다.
2. CASE-2와 같은 시공단계를 채택할 경우에는 부속터널의 막장이 본선터널과 약 0.5D 거리에 위치하면서 본선터널의 변위 및 숏크리트 응력이 급격히 증가하므로 이 때부터의 시공관리가 매우 중요함을 알 수 있다.
3. 본선터널의 숏크리트 축응력의 경우 부속터널의 굴착은 천단부에는 그다지 큰 영향을 미치지 않으나 좌·우스프링 라인에 지대한 영향을 미치므로, 시공 중에는 스프링라인에서의 숏크리트 응력을 집중적으로 관리하여야 할 것으로 판단된다.
4. 부속터널의 굴착은 기 시공된 본선터널의 천단 록볼트 축력에는 그다지 큰 영향을 미치지 않으나, 좌우스프링라인에 타설된 록볼트의 경우에는 부속터널 굴착으로 인한 내공변위 회복현상으로 인해 축력이 다소 감소한다.

## 참고문헌

1. 유충식, 윤효석(1997), "3차원 유한요소해석에 의한 터널 교차부 거동 해석", 1997년도 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 133~142.
2. Takino, K., Kimura, H., Taked, 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.