

쌍굴터널의 거동에 관한 3차원 유한요소해석

Three Dimensional Finite Element Analysis on Twin Tunnel Behavior

유충식¹⁾ Chung-Sik Yoo, 이 호²⁾ Ho Lee, 윤효석³⁾ Hyu-Suk Yoon,

¹⁾성균관대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.

²⁾성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.

³⁾성균관대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, SKK Univ.

개요(Synopsis) :

Tunnels for transportation systems are often constructed as twin tunnel. When two tunnels are excavated close to each other, close proximity between the two creates interference effects in stress-strain field around the tunnels. Therefore, a consideration on interference effects must be taken into account for a proper tunnel analysis and design. This paper presents the results of a parametric study on twin tunnel behavior using the three-dimensional elasto-plastic finite element analysis. In the analysis, the construction sequence was carefully modeled, and the mechanistic behavior of twin tunnel was investigated both qualitatively and quantitatively using the results of the analysis such as stress-strain field around tunnels, tunnel deformation, and stresses in the tunnel lining.

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

1. 서론

최근 들어 인구 증가로 인한 산업기반시설 확충의 필요성으로 도로, 철도, 지하철, 고속전철 등의 교통 시설에 필요한 많은 터널이 시공되고 있으며, 이러한 터널들은 교통 흐름의 특성상 쌍굴터널로 계획·시공되고 있다. 일반적으로 쌍굴 터널은 일정한 수평 이격 거리와 막장간의 거리를 두고 시공되는데, 터널 라이닝 및 주변 지반의 응력-변형 상태는 두 터널의 상호 간섭효과로 인해 전술한 시공 조건에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 이러한 맥락에서 쌍굴 터널의 설계 및 시공 단계에서는 이러한 상호 간섭효과를 적절히 고려하여 터널 지보 설계 및 주변 지반 거동 평가가 수행되어야 하나 이에 대한 정확한 이론 정립이 되어 있지 않고 있는 실정이어서 주로 경험에 의존하고 있는 형편이다.

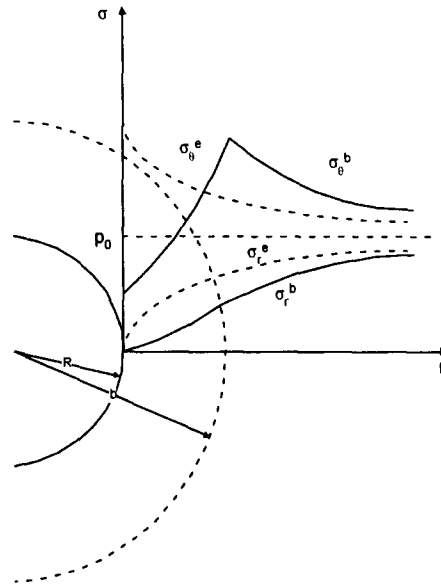
쌍굴 터널 시공에 따른 터널 및 주변 지반의 거동 메카니즘 고찰을 위해 국내·외에서 많은 연구가 수행되어 왔다.(Peck 등 1972, Ghaboussi 등 1977, Hong 1984, Soliman 등 1993, Kim 1996, 백 등 1993, 정 등 1996) 쌍굴터널의 상호간섭효과는 3차원적 거동 메카니즘을 포함하므로 쌍굴터널의 거동 메카니즘의 고찰을 위해서는 시공단계를 고려한 3차원적 연구가 필수적이라 하겠다. 그러나 소수의 연구를 제외하고는 대부분의 연구에서 쌍굴터널의 시공 단계를 2차원 평면 변형을 문제로 단순화 시켰기 때문에 이들의 연구 결과의 적용성은 제한적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 쌍굴 터널의 시공에 따른 3차원적 터널 및 주변 지반의 거동 메카니즘을 규명하고 설계 및 시공 단계에서 적용할 수 있는 지침을 제시하고자 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하여 터널의 필라 간격(pillar width) 및 막장간 거리(face distance)를 변수로 하는 매개변수 변환연구를 수행하였다.

2. 쌍굴터널의 상호간섭효과에 관한 이론적 고찰

터널 굴착시에는 막장을 포함한 굴착면에서의 응력 해방을 통해 변형이 발생하며, 이로 인해 3차원적 응력 재분배 현상이 발생한다. 따라서 터널 라이닝에 발생하는 응력의 크기는 굴착 후 타설 시기와 라이닝이 지보로서의 역할을 시작할 시점의 막장으로부터의 거리에 좌우된다. 따라서 본 연구에서 다루는 쌍굴 터널의 간섭 효과는 터널 사이의 이격 거리 뿐만 아니라 막장 사이의 거리에 영향을 받을 수 있으므로 실제 시공 과정을 반영할 수 있는 3차원 해석만이 터널 주변의 응력-변형률 거동을 제대로 묘사할 수 있다.

쌍굴터널의 시공시 2차터널은 1차터널의 부분적 시공 혹은 완공후 시공 되므로 2차터널은 1차터널과는 상이한 응력 상태에서 굴착된다. 다시 말하자면 터널 굴착시 터널 및 주변 지반의 거동은 굴착 전의 응력 상태에 좌우 되는데 2차터널은 1차터널의 굴착으로 인해 이미 교란된 상태의 지반에 굴착되므로 2차터널의 거동은 1차터널의 그것과 상이하며, 2차터널 굴착 또한 1차터널과의 상호간섭효과를 야기 시켜 기존의 1차터널의 역학적 거동에 상당한 영향을 미치게 된다.

이러한 경향은 터널 굴착에 따른 지반의 응력 상태로 설명될 수 있다. 그림 1에는 정수압적 (hydrostatic, $p_0=p_h=p_z$)인 초기 응력 상태에 있는 균질하고 등방성인 지반에 원형 터널이 굴착되는 경우 터널 주변의 탄성 및 탄소성 상태의 응력을 도식적으로 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 굴착에 따라 터널 주변에는 접선응력이 증가하고 방사응력이 감소하여 전단응력이 증가하게 되며 응력 수준이 탄성 상태에 머무르는 경우는 터널 직경의 약 1.0배 정도 까지 굴착의 영향이 미치고, 이완영역이 발생하여 탄소성 상태의 경우에는 그 이상까지 굴착영향이 미치게 됨을 알 수 있다. 쌍굴터널 시공시 2차터널이 1차터널 굴착 영향영역 내에 굴착되면 상호간섭효과가 발생하여 두 터널은 외터널의 경우와 역학적으로 상인한 거동 형태를 보일 수 있다. 따라서 쌍굴터널 시공시 상호 간섭효과를 피하기 위해서는 두 터널중 더 큰 터널의 직경에 해당하는 거리로 유지하여야 하며, 특히 이완 영역이 발생하여 탄소성 상태의 응력이 유발된 경우에는 탄성상태의 경우보다 현저히 넓은 이격 거리를 유지하여야 한다.



$\sigma_{\theta}^e, \sigma_r^e$ = 탄성 상태에 있는 경우에서의 접선 및 방사응력
 $\sigma_{\theta}^b, \sigma_r^b$ = 탄소성 상태에 있는 경우에서의 접선 및 방사응력

그림 1. 터널주변응력 분포

3. 3차원 유한요소해석

앞서 언급한 바와 같이 쌍굴 터널의 간섭 효과는 터널 사이의 이격 거리 및 막장 사이의 거리에 영향을 받을 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 인자의 정성·정량적인 영향을 분석하기 위해서는 실제 시공 과정을 반영할 수 있는 3차원 해석이 필요하다. 본 연구에서는 시공과정의 모사가 가능한 3차원 탄소성 유한요소해석을 통해 쌍굴 터널의 거동에 관한 매개 변수 연구를 수행하였다.

3.1 사용 프로그램

본 연구에서는 네덜란드 TNO Building & Construction Research 社와 Delft Technical University에서 공동 개발한 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하였다. DIANA는 터널 해석, 구조해석, 열응력해석, 동적해석, 침투해석 등이 가능한 범용 프로그램으로서 다양한 재료 구성 모델을 제공하고 shell 및 reinforcement 요소 등을 통해 슛크리트와 록 볼트의 효율적인 모델링 가능하다. 또한 터널 해석시 Phased 해석을 통해 단계별 시공 과정을 효율적인 모델링이 가능하며, 압밀, 크리프, 침투등의 연계해석(coupled analysis)이 가능하다.

한편, 3차원 유한요소망의 작성 과정은 2차원 유한요소망의 작성 과정 보다 많은 시간과 경험이 요하며 수작업에 의존할 경우 시간적 기술적 어려움이 따르게 되므로 유한요소망의 작성 및 입력 자료의 자동 생성이 가능한 전처리 프로그램이 필수적이다. 해석 결과 또한 3차원 해석에서는 2차원 해석과는 달리 방대한 양의 해석결과가 출력되므로 분석에 많은 어려움이 따르므로 해석 결과의 효율적인 분석을 위해서는 해석 결과의 가시화가 가능한 후처리 프로그램의 이용이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 유한요소망 및 입력 자료의 자동 생성 기능, 그리고 해석 결과의 가시화 기능을 갖춘 전·후처리 프로그램인 FEMGEN/FEMVIEW를 이용하였다.

3.2 해석 조건 및 모델링

본 연구에서는 일반적인 도로 터널 단면을 해석 대상 단면으로 고려하였다. 그림 2는 본 연구에서 고려한 해석 단면의 개략도를 사용된 기호와 함께 나타 내고 있는데, 보이는 바와 같이 고려된 터널의 직경은 11 m 이며 토파(H)는 터널직경(D)의 3배인 경우를 고려하였다.

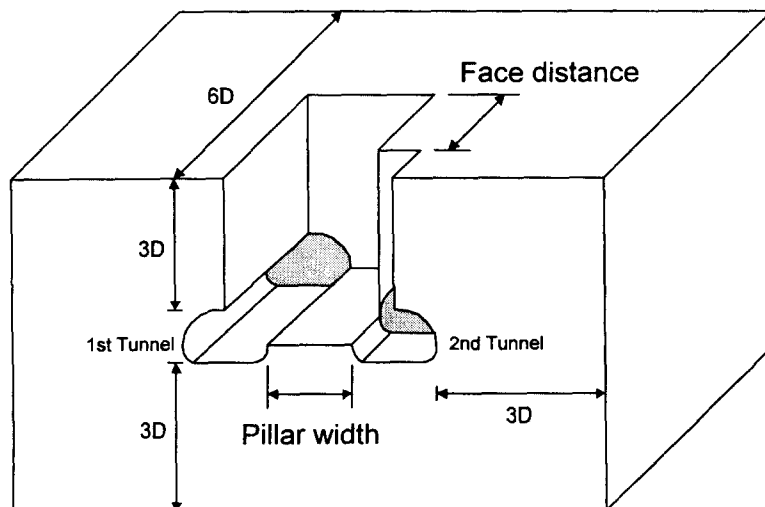


그림 2. 해석 단면의 개략도

본 연구에서는 두 터널의 상호간섭효과에대한 정확한 분석을 위해 다소 불리한 시공 조건을 고려하여 풍화도 정도의 역학적 특성을 갖는 지반에 시공되는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 또한 시공 과정을 단순화 시키기 위해 전단면 굴착이 수행되고 굴착 후 두께 10 cm의 슛크리트가 타설되는 것으로 간주하였다. 표 1은 해석에 적용된 지반과 슛크리트의 역학적 특성치를 보여 주고 있다.

그림 3은 본 연구에서 사용된 일반적인 유한요소망을 보여 주고 있다. 경계면 설정에 있어서 좌·우측 경계 및 하부 경계는 터널에서 3.0D 떨어진 지역에 각각 수직 및 수평 롤러를 설치하여 모사하였으며, 해석영역을 이산화하는데 있어 지반은 6절점 및 8절점 isoparametric solid 요소를 이용하여 슛크리트는 4절점 isoparametric shell요소로 모델링하였다. 해석 모델에 사용된 총절점 및 요소의 수는 각각 약 4433개 및 4,080개이며, 그 중 shell요소는 384개, solid요소는 3,696개로 구성되었다. 한편 지반은 Drucker-Prager 항복규준을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며, 슛크리트는 탄성 재료로 간주하였다.

표 1. 해석대상 지반 및 지보재 물성치

구 분	탄성계수 (kPa)	포아송비 (ν)	내부마찰각 (ϕ)	점착력 (kPa)	단위중량 (kN/m ³)
지 반	1.0×10^9	0.3	30	30	23
스틉크리트	1.5×10^7	0.2	N/A	N/A	24

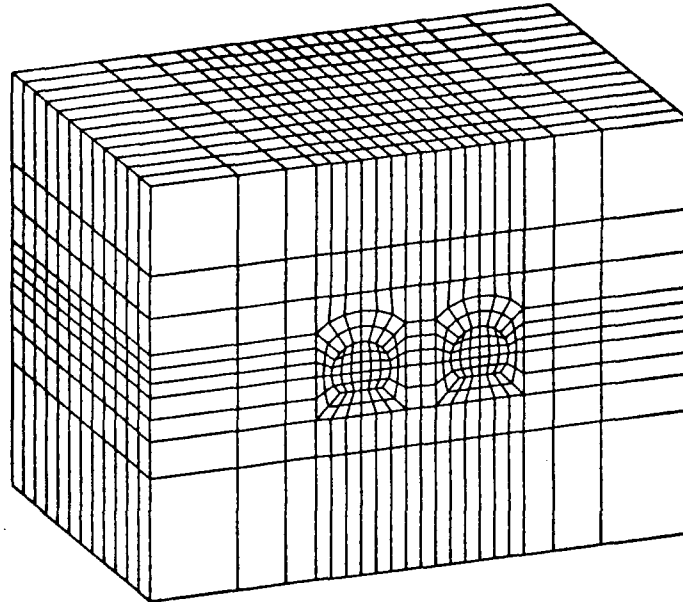


그림 3. 해석에 적용된 유한요소망

쌍굴 터널의 거동은 많은 인자에 의해 영향을 받으나 본 연구에서는 주된 영향 인자라고 할 수 있는 터널간 이격거리(PW)와 막장간 거리(FD)를 주 영향 인자로 하여 매개변수 연구를 수행하였다. 표 2는 본 연구에서 해석된 조건을 나열하고 있다.

표 2. 해석에 사용된 조건

CASE	PW	FD	CASE	PW	FD
1	0.5D	0.0D	7	2.0D	0.0D
2		1.0D	8		1.0D
3		2.0D	9		2.0D
4	1.0D	0.0D	10	3.0D	0.0D
5		1.0D	11		1.0D
6		2.0D	12		2.0D

4. 결과 분석

4.1 터널 및 주변 지반의 응력 분포

그림 4는 외터널과 $PW=0.5D$, $FD=1.0D$ 의 조건을 갖는 쌍굴터널에 대해 변위가 수렴된 평면변형단면에서의 최대전단응력 분포를 응력 등고선의 형식으로 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 외터널의 경우 터널 중심축에 대해 대칭의 분포 형태를 나타내고 있으나 쌍굴터널의 경우 상호간섭효과로 인해 비대칭의 분포 형태를 나타내고 있으며, 필라에서의 응력 집중 현상을 관찰할 수 있다.

한편, 그림 5에 제시되어 있는 $PW=1.0D$ 및 $2.0D$ 의 경우에 대한 최대전단응력 분포에서는 PW 가 증가하면서 간섭효과가 경감하는 경향을 관찰할 수 있으며, $PW=2.0D$ 의 경우 간섭효과가 거의 발생하지 않아 두 터널은 거의 독립적으로 거동하는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서, 본 해석에 적용된 시공조건에서 간섭효과를 피하기 위해서는 두 터널 간의 이격거리를 $2.0D$ 이상으로 유지하여야 함을 알 수 있다.

그림 6은 $PW=2.0$, $FD=1.0D$ 의 시공조건에서 2차터널 막장 전방에 위치한 단면에서의 최대전단응력 분포 경향을 보여 주고 있다. 이 그림에서는 보이는 바와 같이 1차터널의 굴진으로 인해 2차터널 막장 주변에는 전단응력 집중영역이 발생하고 있어 2차터널 굴진시 초기응력 상태는 외터널의 경우와 매우 상이함을 알 수 있다.

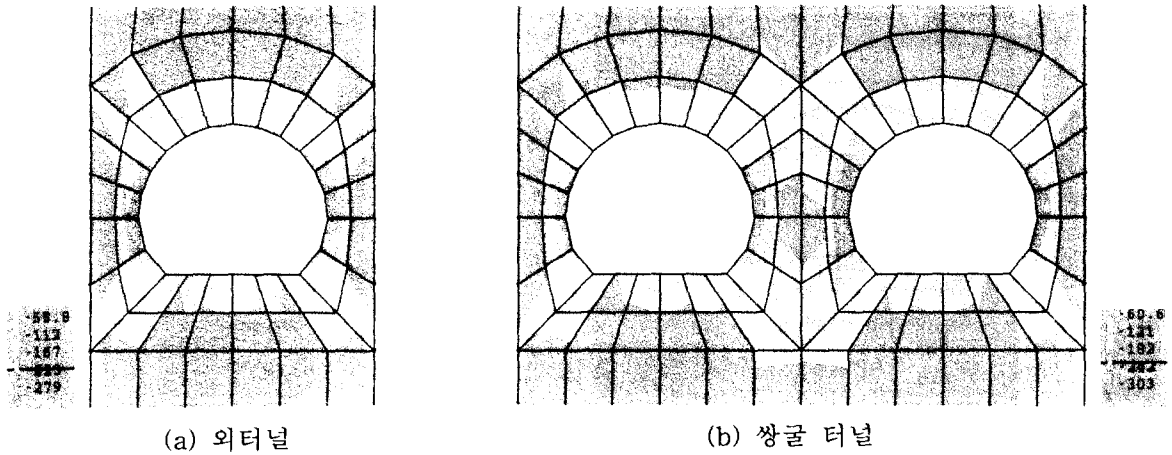


그림 4. 평면변형 단면에서의 최대전단응력 등고선

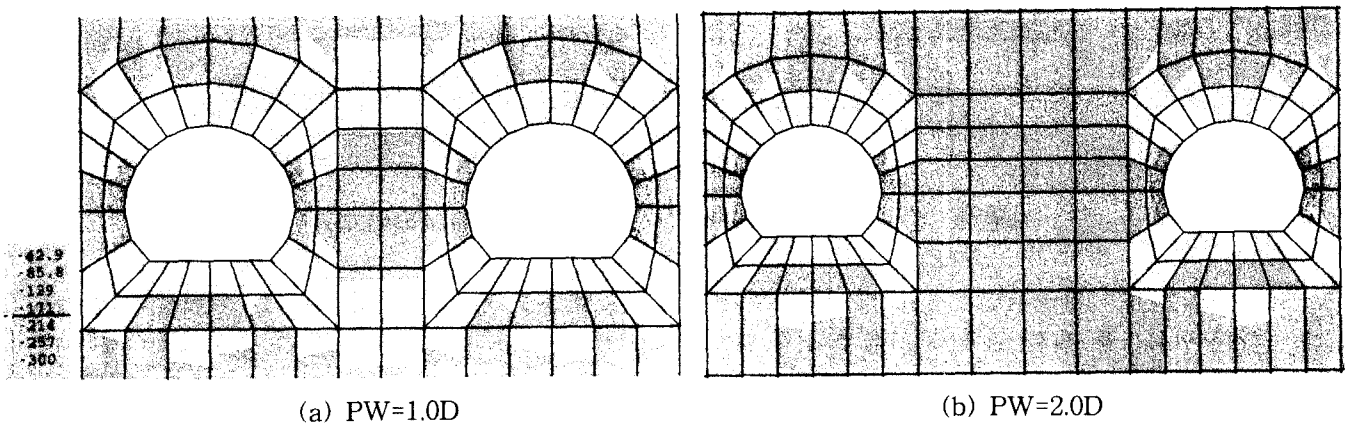


그림 5. 쌍굴 터널의 평면변형 단면에서의 최대전단응력 등고선

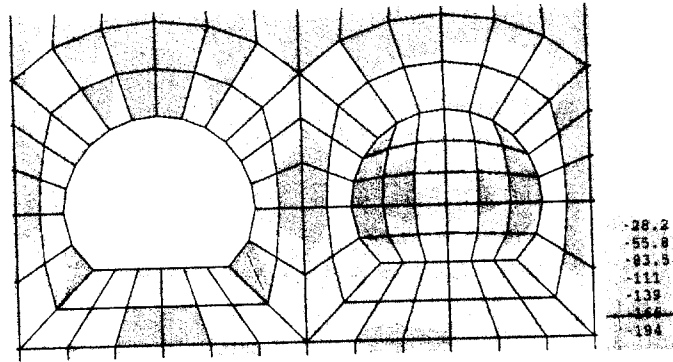


그림 6. 2차터널 막장 전방 단면의 최대전단응력 등고선

4.2 변위 발생 경향

그림 7은 $PW=0.5D$, $FD=1.0D$ 의 조건을 갖는 쌍굴터널의 평면변형단면에서의 변형 형상을 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 상호 간섭효과로 인해 비대칭적인 변형 형상을 보이고 있는데 일반적으로 1·2차터널 공회 필라쪽에서의 내공변위가 작게 발생하고 그 반대쪽에서의 내공변위가 크게 발생하는 경향을 관찰할 수 있어 두 터널의 상호작용은 필라 반대방향으로의 터널 거동을 유발시킴을 알 수 있다. 이러한 경향은 x-방향의 변위를 등고선 형식으로 나타내는 그림 8에서 보다 뚜렷이 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 2차터널 굴착으로 인한 간섭효과는 필라 반대쪽으로의 x-방향 변형을 가중 시킴을 알 수 있다.



(a) 1차터널 (b) 2차터널
그림 7. 쌍굴의 터널 변형 형상($PW=0.5D$, $FD=1.0D$)

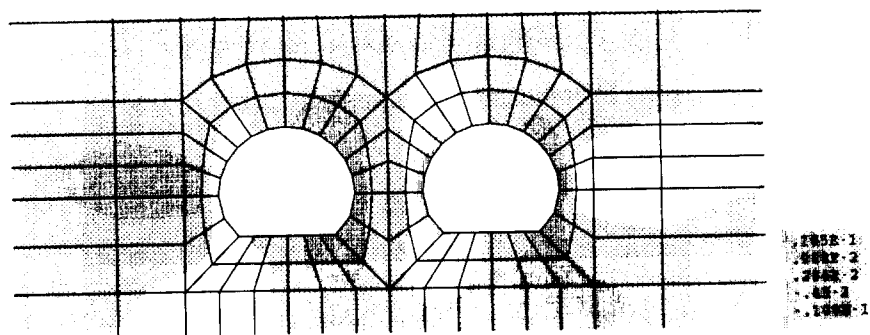


그림 8. 쌍굴 터널의 내공변위 등고선($PW=0.5D$, $FD=1.0D$)

그림 9는 쌍굴터널의 1차 및 2차터널의 천단 및 좌·우 측벽부 내공 변위를 외터널의 변위로 정규화한 변위비를 필라 간격에 대해 도시하고 있다. 보이는 바와 같이 $PW=0.5D$ 의 경우 1차터널의 천단침하량은 변위비가 거의 1.0의 값을 나타내고 있어 외터널과 비교하여 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 좌·우 측벽부의 내공변위는 외터널의 경우에 비해 각각 약 50% 증가 및 30% 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한 2차터널의 경우 천단 및 우측 스프링라인의 변위비는 1차터널과 유사하게 나타

났으나 좌측 스프링라인의 경우 현저히 작은값을 보이고 있으며, 1·2차터널 공히 $PW \geq 2.0D$ 에서는 변위비가 1.0의 값에 수렴하는 경향을 나타내고 있어 두 터널은 독립적인 터널로 거동함을 알 수 있다. 한편, $PW=2.0D$ 의 경우에 대해 FD에 따른 변위비 변화경향을 보이고 있는 그림 10에서는 FD에 따라 별다른 차이를 보이지 않고 있어 막장간 거리는 쌍굴터널의 거동에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

그림 11은 $PW=0.5D$, $FD=2.0D$ 의 경우에 대해 천단 및 좌·우측 측벽부 내공 변위 변화 경향을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 천단 및 좌측 스프링라인의 경우 2차터널의 영향이 그다지 크지 않는 데 반해 우측 스프링라인의 경우 2차터널의 굴착에 따라 현저히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 외터널의 변위로 정규화한 변위비 경향을 보여주는 그림 12에서 보다 뚜렷이 관찰할 수 있다. 보이는 바와 같이 천단부의 경우 2차터널 통과 전·후의 차이가 거의 무시할만한데 반해 좌측 측벽부 내공변위는 다소 증가하다 수렴하는 경향을 나타내고 있으며, 우측 측벽부 내공변위의 경우 2차터널의 통과에 따라 급격한 상승후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 간섭효과로 인해 발생하는 터널의 찌그러짐(distortion) 현상에 기인한 것으로 판단되며, 2차터널의 막장이 계측 지점으로부터 약 $2.0D$ 전방에 위치하면서부터 변위가 수렴되는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향으로부터 쌍굴터널 시공시에는 터널의 천단 변위 보다는 내공변위를 바탕으로 터널 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

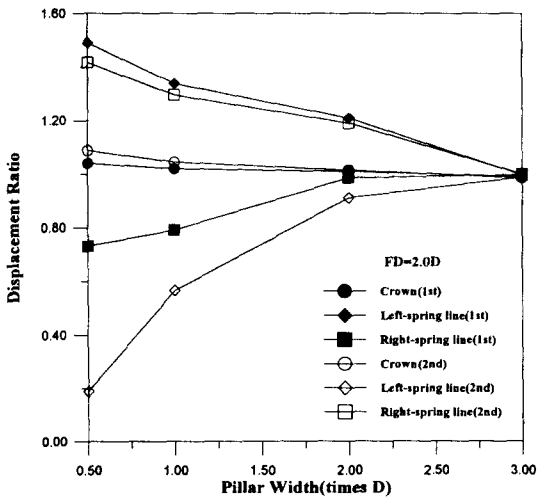


그림 9. PW에 따른 내공변위비 변화경향

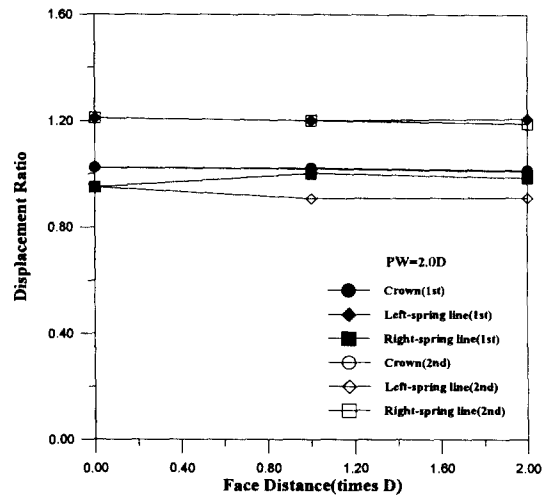


그림 10. FD에 따른 내공변위비 변화경향

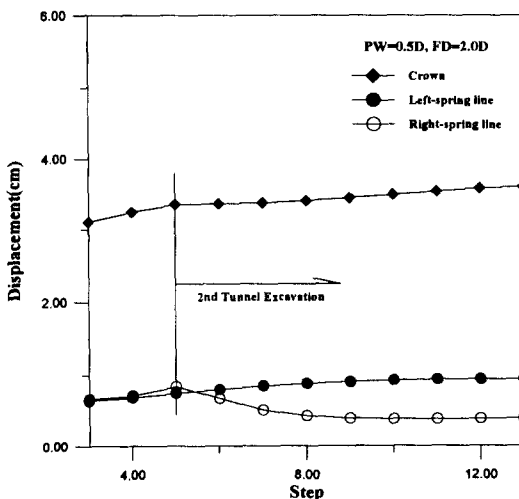


그림 11. 굴착단계에 따른 변위

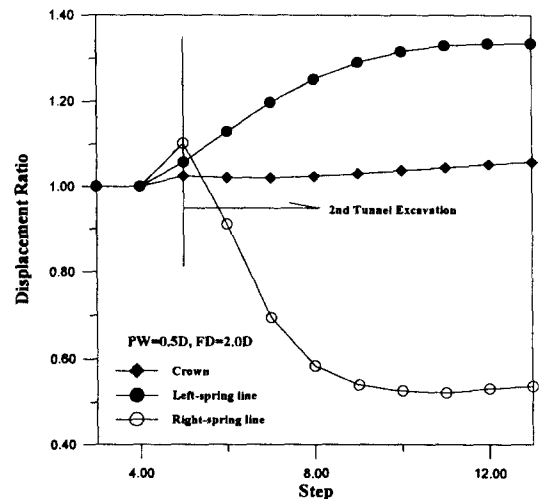


그림 12. 굴착단계에 따른 변위비

4.3 숏크리트 응력 발생 경향

그림 13은 PW=0.5, FD=2.0D의 쌍굴터널의 경우 평면변형 단면에서의 숏크리트 응력을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 쌍굴터널의 경우 간섭효과로 인해 외터널의 경우 보다 다소 큰 응력이 발생하는 경향을 볼 수 있으며 최대 숏크리트 응력은 1차터널 우측 측벽부에서 발생하는 경향을 관찰할 수 있다.

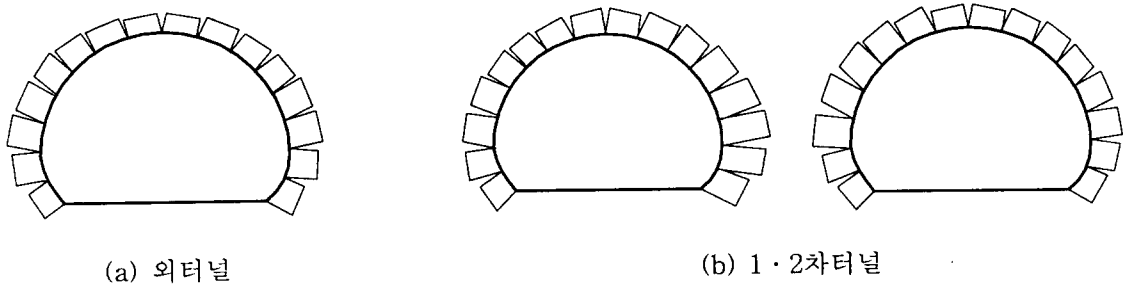


그림 13. 숏크리트 응력

한편, 굴착 단계에 따른 1차터널의 숏크리트 응력 변화 경향이 그림 14에 나타나 있는데 관찰할 수 있는 바와 같이 좌측 측벽부에서는 그다지 큰 응력 증가가 발생하지 않으나 천단부 및 우측 측벽부에서는 2차터널 굴착으로 인해 추가적 응력 증가 현상이 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 외터널의 응력으로 정규화한 응력비 변화 경향을 보여주는 그림 15에서 보다 뚜렷이 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 2차터널 굴진으로 인해 천단부 및 우측 측벽부의 응력이 급격히 증가하는 현상을 관찰할 수 있으며 우측 측벽부에서 최대 10%정도의 응력 증가가 발생함을 알 수 있다. 한편, 2차터널의 막장이 계측 지점으로부터 약 2.0D 전반에 위치하면서부터 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다.

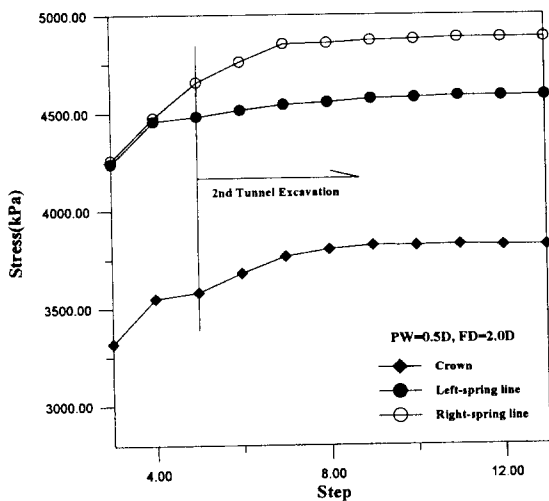


그림 14. 굴착단계에 따른 숏크리트 응력

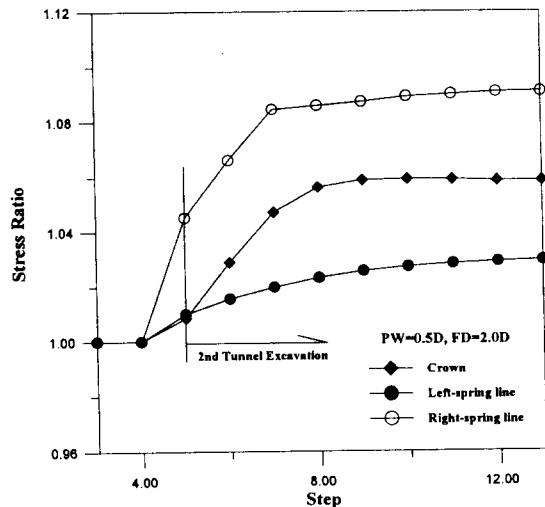


그림 15. 굴착단계에 따른 숏크리트 응력비

그림 16은 필라 간격에 따른 1·2차터널의 천단 및 좌·우 측벽부에서의 숏크리트 응력 분포 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 2차터널 보다는 1차터널에 다소 큰 응력이 발생하는 경향을 관찰할 수 있으며, 좌·우 측벽부 응력차가 1차터널에서 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있어 상호 간

섬효과는 1차터널에 더 크게 작용함을 알 수 있으며 안정성 평가시 1차터널을 기준으로함이 바람직한 것으로 판단된다. 한편, PW=2.0D 이상에서는 1·2차 터널에 거의 같은 값의 응력이 발생하는 경향을 나타내고 있어 필라의 간격을 터널직경의 2.0배 이상 유지할 경우 두 터널은 거의 독립적인 터널로 거동함을 알 수 있다.

한편, 그림 17은 막장간의 거리에 따른 1차 및 2차터널의 슛크리트 응력비 변화 경향을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 일반적으로 FD가 증가할수록 응력은 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 그 차이는 매우 미미함을 알 수 있다. 따라서 이러한 경향으로부터 쌍굴터널 시공시 두 터널의 막장간 거리는 터널의 안정성을 기준으로 결정하기 보다는 시공성을 바탕으로 결정하여도 무방함을 알 수 있다.

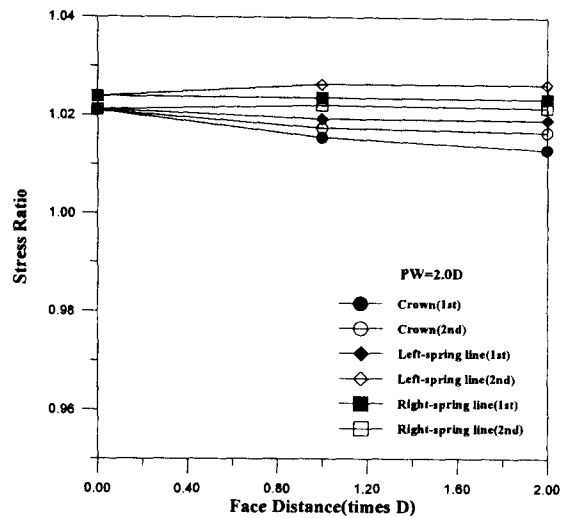
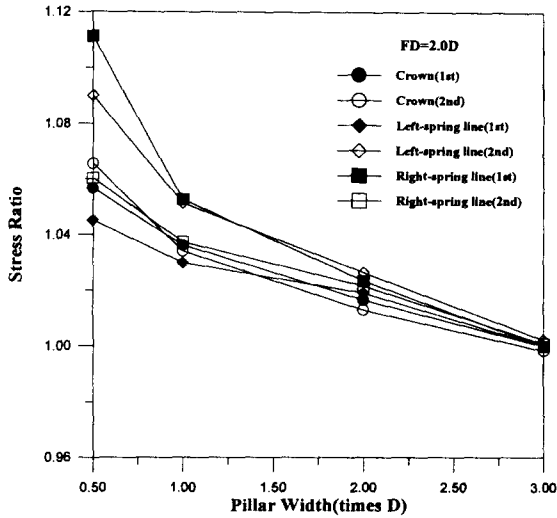


그림 16. PW에 따른 슛크리트 응력비 변화경향

그림 17. FD에 따른 슛크리트 응력비 변화경향

5. 결론

본 연구에서는 3차원 탄소성 유한요소해석을 통해 쌍굴터널의 역학적 거동 메카니즘을 정성·정량적으로 분석하기 위해 두 터널의 이격 거리 및 막장간 거리를 변수로 하는 매개변수 변환연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 쌍굴터널의 경우 두 터널의 간섭효과는 필라영역에서의 응력 집중을 야기 시키므로 불량한 지반조건에서의 터널 시공시 필라 영역의 집중적인 보강이 필요하다.
2. 쌍굴터널의 간섭작용은 두 터널의 x-방향 거동을 야기 시켜 필라 반대방향의 측벽부 변위는 증가시키고 필라 방향의 측벽부 변위는 감소 시키는 효과를 가져온다.
3. 2차터널의 영향은 기 시공된 1차터널의 천단부 변위 보다는 측벽부 내공 변위에 많은 영향을 미치므로 쌍굴터널 시공시에는 터널의 천단 변위 보다는 내공변위를 바탕으로 터널 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
4. 쌍굴터널에서 천단부 슛크리트 응력은 1·2차널에서 거의 유사하게 나타나며, 최대 슛크리트 응력은 1차터널 우측 측벽부에서 발생한다. 또한 2차터널 보다는 1차터널에서 좌·우 슛크리트 응력차가

더 큰 것으로 나타났다.

5. 필라 간격에 따는 터널의 변위 및 슛크리트 응력 분포 경향을 고찰해본 결과 일반적으로 필라의 간격을 터널 직경의 2.0배 이상으로 유지할 경우 두 터널은 거의 독립적으로 거동하는 것으로 나타났다. 한편, 두 터널의 막장간 거리는 쌍굴터널의 거동에 매우 미미한 영향을 미치는 것으로 나타나 쌍굴터널 시공시 두 터널의 막장간 거리는 터널의 안정성을 기준으로 결정하기 보다는 시공성을 바탕으로 결정하여도 무방할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 정재우, 이봉열, 김학문(1996) “쌍굴터널 굴진에 따른 간섭효과와 주변지반의 거동”, 한국지반공학회 '96 봄 학술발표회 논문집, pp 173-182
2. 백영식, 김홍택, 임수빈(1993) “산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰”, 한국지반공학회 '93 봄 학술발표회 논문집, pp 21-25
3. Soliman, E., Duddeck, H., and Ahrens, H.(1993) “Two- and Three-Dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 1, pp 13-18
4. Hong, S. W.(1984) “Ground movements around model tunnels in sand”, Ph.D Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA
5. Kim, S. H.(1996) “Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay, Ph.D Thesis, Oxford University, UK
6. Peck, R. B., Hendron, A. J., and Mohraz, B.(1972) “State of the art of soft ground” Proc. 1st Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, pp 259-286