

2-Arch 터널의 3차원 거동 특성 - 수치해석 연구

유충식^{1*}, 김주미², 김희철³

Numerical investigation on 3D behavior of 2-Arch tunnel

Chung-Sik Yoo, Joo-Mi Kim, Hee-Chul Kim

Abstract This paper concerns the behavior of 2-Arch tunnel constructed under various conditions. A 2-Arch tunnel section adopted in a subway tunnel construction site is considered in this study. A calibrated 3D finite element model was adopted to conduct parametric studies on a variety of construction scenarios including lagged distance between left and right tunnels, overburden, and geological condition. The results of analyses were examined in terms of crown settlement, shotcrete lining stress, and load on center column in relation to the lagged distance, cover depth, and the ground condition. The results indicate that the shotcrete lining stress and the center pillar load are more influenced by the second tunnel excavation than the tunnel deformation. Also shown is that a greater lagged distance is required to minimize the interaction between two tunnels when the ground condition becomes weaker. Fundamental mechanisms of 2-arch tunnel were also discussed based on the results.

Keywords: 2-arch tunnel, finite element analysis, lagged distance

요 지 본 연구에서는 2-Arch 터널의 3차원 거동 메카니즘에 관한 내용을 다루었다. 이를 위해 도심지 지하철에 적용된 2-Arch 터널을 고려하였으며 3차원 유한요소해석을 수행하여 좌우 터널의 이격거리, 지반조건, 토피고 등에 대한 매개변수 연구를 실시하였다. 해석결과 토대로 다양한 조건에 대한 터널 천단침하 및 쇼크리트 응력, 중앙기둥 작용하중 등을 중심으로 분석하였으며, 그 결과를 토대로 좌우 터널 이격거리, 지반조건, 토피고에 따른 2-Arch 터널의 거동 메카니즘을 고찰하였다. 그 결과 쇼크리트 라이닝 응력 및 중앙 기둥 작용하중은 후행터널 시공에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 터널관통 지층이 취약할 경우 후행터널이 선행터널의 거동에 영향을 미치는 영향거리가 증가하는 것으로 분석되었다. 본 논문에서는 해석 결과를 토대로 2-Arch 터널의 시공중 변위 및 쇼크리트 라이닝 응력 변화 경향에 대한 구체적인 내용을 기술하였다.

주요어: 2-Arch 터널, 유한요소해석, 이격거리

1. 서 론

오늘날 산업화 및 도시화가 가속되면서 토지공급은 점점 한계에 이르고 있으며, 지가상승 및 도시의 평면적 확산, 그에 따른 녹지의 잠식등과 같은 건설 공간 부족 및 환경문제가 야기되고 있다. 이에 따라 점차적으로 도시재생의 요구가 확산되고 있는 실정이며 그 방안으로 지상의 토지가 아닌 해상이나 지하공간 등이 대안으로 대두되고 있다. 특히 도시재생의 개념이 정착되어 있는 선진국에서는 기 건설되어 사용하고 있는 도심지 고가도로 및 주차장 등 사회기반시설을 지하화해 가고 있으며 우리나라도 대심도 급행 전철 및 도심순환도로 건설 등 지하공간 활용을 다각적으로 고려하여 지하공간 건

설 계획이 다각화 하고 있는 추세이다. 미국 보스턴에서 진행된 도심재생사업 Big-Dig 프로젝트는 이러한 지하공간 활용의 좋은 사례라고 할 수 있다.

불량한 지반조건에서 계획되는 터널의 단면이 커질 경우 시공적 측면에서의 안정성 확보를 위해 대단면의 단일 터널 보다는 터널 사이에 중앙기둥을 두는 2-Arch 혹은 3-Arch 형태의 단면을 적용한다. 이러한 이중 혹은 삼중 아치 형태의 터널의 거동은 단일 아치를 형성하는 일반 터널의 거동과는 차이가 있을 뿐 아니라 병렬터널의 개념으로 중앙터널 굴착 및 중앙기둥 시공, 그리고 좌우측 선-후행터널이 굴착된다는 점을 감안할 때 거동 메카니즘이 매우 복잡함에도 불구하고 이에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 이와 관련된 연구로서 국내에서는 김상균과 박동욱(2003)이 2-Arch 터널의 거동특성을 파악하기 위해 중앙터널 단면축소, 상부지지조건, 굴착순서에 의한 영향 그리고 지층조건에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중에 대

¹정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

²비희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 졸업

³정희원, (주)대우건설, 동홍천-양양 고속도로 현장, 현장대리인

*교신저자: 유충식 (E-mail: csyoo@skku.edu)

한 수치해석적 연구를 수행한 결과에 의하면 중앙터널 굴착단면을 작게 할수록 안정성 확보에 유리한 것으로 보고한 바 있다. 한편, 김도형과 박준경(2003)은 시공사례조사 및 수치해석적인 접근방법으로 실제 국내 도심지구간에 시공계획중인 대단면 근접병설터널에 대한 안정성 검토사례를 고찰하여 중앙기둥 및 콘크리트 라이닝의 구조적 안정성, 인접구조물에 의한 영향 등을 검토하였다. 최근에는 김주미(2005)가 수치해석적 연구를 통해 2-Arch 터널의 거동 메카니즘에 관한 연구를 수행한 바 있다. 한편 국외에서는 Matsuda (1998)가 2-Arch 터널 시공시 중앙기둥 작용하중에 관한 제한적인 연구를 수행한 바 있다. 또한 최근에 들어 Xia 등(2006)은 2-Arch 터널의 3차원 수치해석 연구를 수행하여 현장 시공조건에 대한 해석을 통해 2-Arch 터널의 거동 메카니즘에 대한 예비 연구를 수행

한 바 있다. 이와 같이 2-Arch 터널의 경제적 설계/시공에 필수적인 다양한 시공조건에 따른 시공중 변위 및 슛크리트 라이닝 응력 변화 경향 등에 관한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 다양한 시공조건에서의 2-Arch 터널의 거동 메카니즘에 대한 이해를 증진하고 나아가 설계 및 시공방법의 체계화를 위한 맥락에서 도심지 지하철 정거장구간 적용 2-Arch 터널을 대상으로 3차원 수치해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다. 즉, 도심지 지하철 정거장구간의 2-Arch 터널의 시공과정에 대한 3차원 유한요소해석 모델링을 수행하여 선·후행 터널 시공 과정에 따른 상호터널의 영향 및 중앙벽체 거동을 중심으로 고찰하였으며 다양한 토피고 및 지반조건을 고려하여 이에 따른 시공중 거동 변화 경향을 분석하였다.

2. 매개변수 연구

2.1 현장조건

그림 1에서는 본 연구에서 채적한 000지하철 정거장 구간에 2-Arch 터널 시공단면을 보여주고 있다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 지반은 매립층, 충적층, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 형성되어 있으며 터널은 연암을 관통하는 조건으로 대체적으로 양호한 지반에서 시공되는 조건이라고 할 수 있다.

그림 2에서는 2-Arch 터널의 중앙터널과 본선터널의

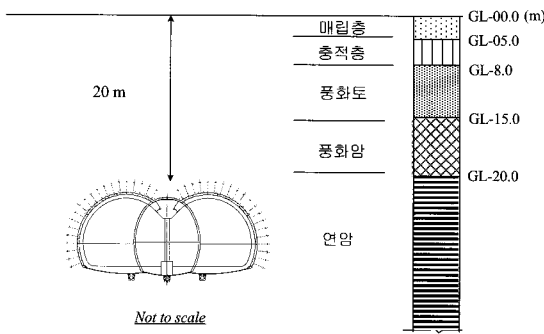


그림 1. 2-Arch 터널 단면도

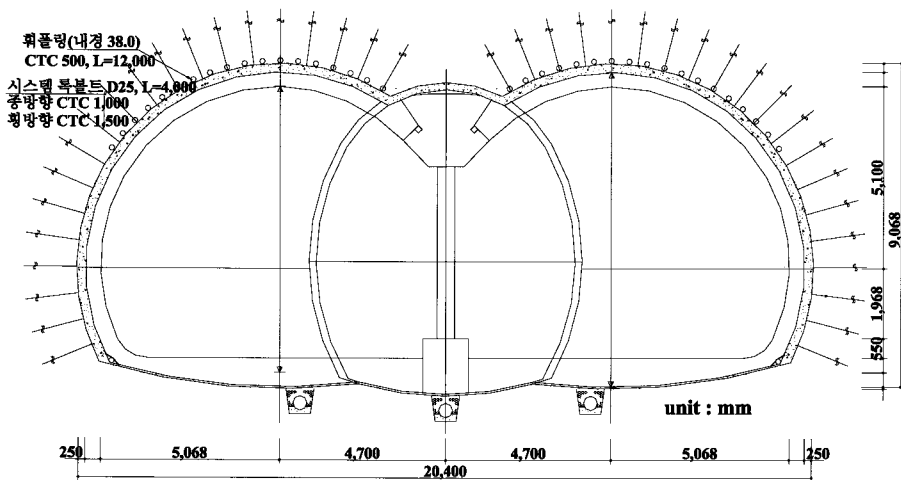


그림 2. 터널 상세도

터널 상세도를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 고려 대상 2-Arch 터널의 전체 직경(D)은 20.9 m, 좌우측 터널의 직경(D_R)은 10.45 m, 높이(H)는 8.75 m로서 굴착 단면적은 169 m², 그리고 편평율(H/D_R)은 0.87이다.

표 1과 그림 3에서는 각각 적용된 지보패턴과 시공순서를 상세히 정리하고 있다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 먼저 중앙터널이 상·하 반단면 굴착으로 굴착된 후 좌측 선형 및 우측 후행터널을 20 m의 이격거리로 두고 상·하 반단면 굴착으로 시공하도록 되어 있다.

2.2 유한요소해석

3차원 유한요소해석에서는 범용 유한요소해석 프로그

램인 Abaqus 6.4(Abaqus 2006)를 사용하였다. Abaqus는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 터널시공과정과 같이 지반굴착 및 지보재 설치 등의 단계별 시공과정의 모사가 효율적이다. 한편, 재료의 항복 후 소성거동에 관한 효율적인 알고리즘을 제공하고 있어 지반구조물의 항복 후 거동 평가를 정확히 수행할 수 있는 것으로 평가되고 있다.

그림 4에서는 해석 도메인과 해석에 적용된 유한요소망을 보여주고 있다. 먼저 그림 4(a)에서 보이는 바와 같이 좌·우측 경계면은 터널중심으로부터 3D(D=20.9 m) 정도의 위치에, 그리고 하부 경계면은 1D 정도에 설치하였으며 굴진방향으로는 6D(약 120 m) 정도를 모델링에 포함하여 시·종점 경계의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다. 이때 변위 경계조건으로서 수직 경계면의 경우 해당 면의 수직방향의 변위를 구속하였으며 바닥 경계면은 힌지를 설치하였다.

한편, 지반 및 지보재의 이산화에 있어 지반과 슛크리트 라이닝 모두 8절점 가감 적분 고체요소(C3D8R)를 적용하였다. 일반적으로 고려 대상 시공조건에서는 슛크리트와 록볼트가 지보재로 사용되나 해석의 편의상 록볼트는 모델링하지 않았다. 재료모델링에 있어 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Davis(1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 적용하였으며 슛크리트는 타설후 경화되는 과정을 고려하여 10 GPa의 탄성계수를 갖는 탄성재료로 모델링하였다. 그림 4(b)는 해석에 적용된 유

표 1. 2-Arch 터널 지보패턴 개요

구분		지보패턴 상세
적용지반		연암, 보통암
굴착공법	중앙터널	상·하분할
	본선터널	상·하분할
굴진장(m)		1.0/1.0
스프리트(mm)	중앙터널	200
	본선터널	250
록볼트(m)	길이 (좌·우/중앙측벽)	5/3
	중/횡간격	0.8/1.0
강지보재		H-125
보조공법		휘폴링

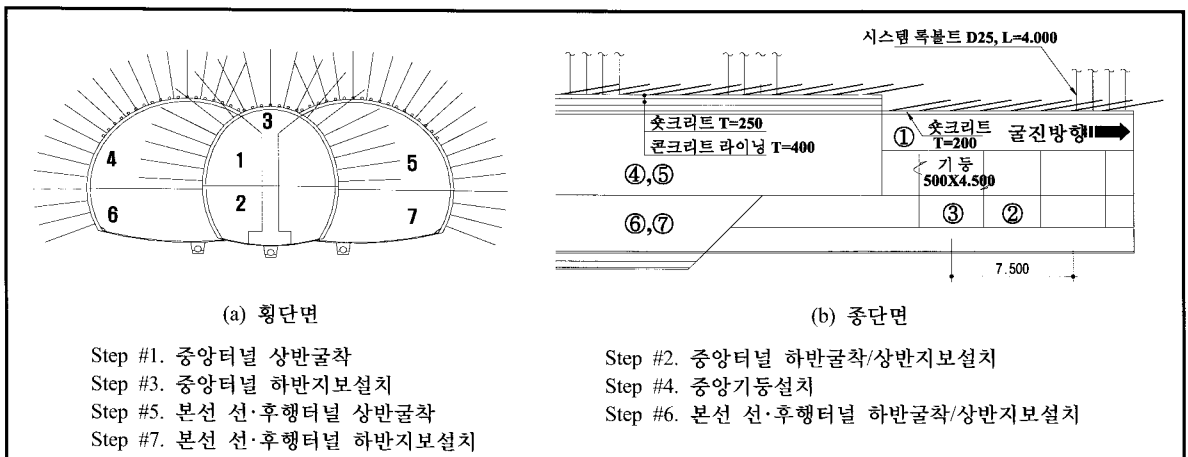
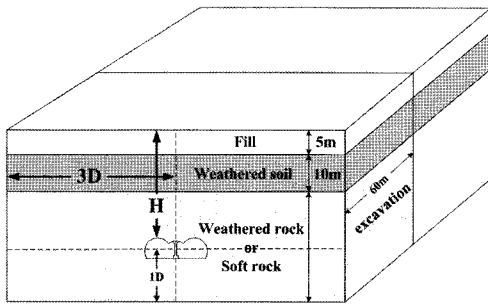


그림 3. 횡·종방향 시공순서

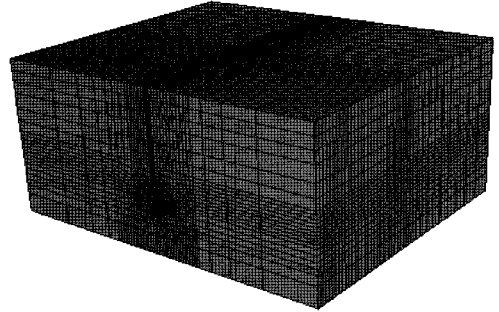
한요소모델을 보여주고 있으며 표 2에서는 해석에 적용된 암반의 역학적 특성을 요약하고 있다.

시공과정의 모델링에서는 본 연구가 중앙 터널 시공 완료 후 본선터널 굴진에 따른 거동 메카니즘 분석에

주 목적을 두었으므로 해석의 편의상 중앙터널은 전단면 굴착과 동시에 지보재가 설치되는 것으로 모델링하였으며 그 외 본선터널은 상·하 반단면 굴착 시공과정에 대한 모델링을 수행하였다. 한편, 중앙기둥은 중앙터널



(a) 해석단면

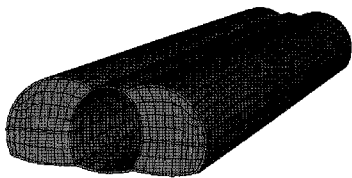


(b) 3차원 유한요소망

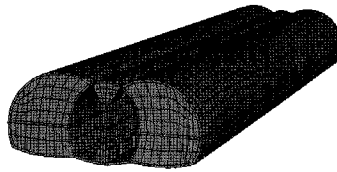
그림 4. 해석적용 단면의 유한요소망

표 2. 적용현장 암반등급별 지반 특성치

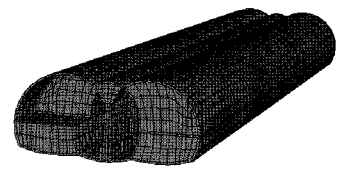
Class	γ (kN/m ³) 단위중량	c (kPa) 점착력	ϕ (deg) 내부마찰각	E (MPa) 변형계수	ν 포아송비	비고
I	26	600	38	12,000	0.22	경암
II	25	450	35	7,500	0.25	보통암
III	23	250	33	2,500	0.27	연암
IV	21	30	33	150	0.30	풍화암
V	18	-	33	17	0.35	충적층
VI	18	-	30	13	0.35	매립층



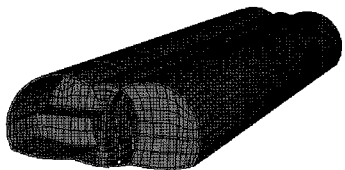
(a) 중앙터널굴착(60 m)



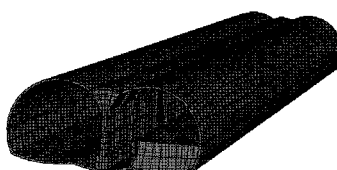
(b) 중앙기둥설치(60 m)



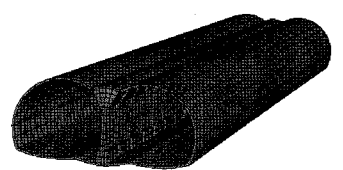
(c) 선행터널 상반굴착



(d) 선행터널 하반굴착



(e) 후행터널 상반굴착



(f) 후행터널 하반굴착

그림 5. 시공과정 모델링

의 시공 후 설치되며 이후 본선 선행 터널이 벤치컷 굴착공법으로 시공되고 이어 후행 터널이 시공되는 것으로 모델링하였다. 선·후행 터널 굴진면 사이의 이격거리(LD)는 20 m와 60 m의 두 가지를 고려하여 이격거리에 따른 거동 메카니즘을 고찰할 수 있도록 하였다. 그림 5는 시공과정 모델링을 보여주고 있다.

3. 시공중 거동 특성

3.1 관통지층 연암에서의 거동 특성

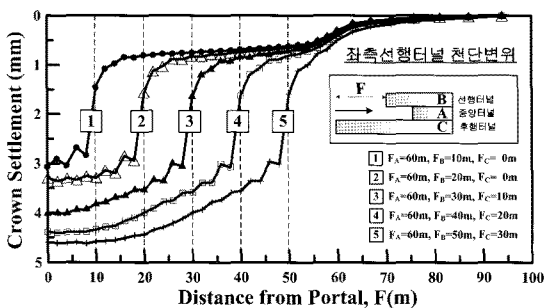
본 장에서는 기본조건(토괴고=2D, 굴진면 관통지층=연암, 선·후행터널 이격거리 $LD=1.0D$)에 대한 해석 결과를 토대로 본선터널 시공에 따른 터널변위 및 지보재 응력, 그리고 중앙지중 작용하중 발생 경향에 대한 고찰 내용을 기술하였다.

3.1.1 변위거동 특성

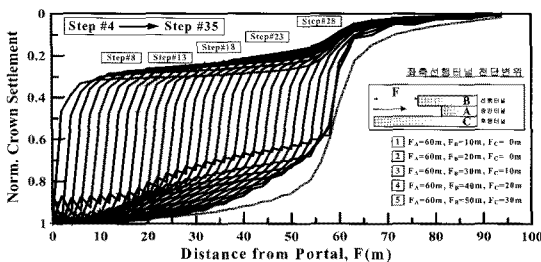
그림 6(a)는 좌측 선행 터널의 천단부 종방향 침하 ($\delta_{CR,L}$)곡선, 그림 6(b)는 각 단계에서의 최대 침하량으

로 정규화하여 나타낸 정규화 곡선을 보여주고 있다. 한편, 그림 6(b)는 정규화 곡선으로서 “Step”은 해석 단계를 의미하며 그림 6(a)의 침하곡선을 각각의 최대치로 정규화 결과를 나타낸다. 이 두 그림을 관찰하면 2-Arch 터널시공시 중앙터널 시공으로 인해 발생한 초기변위가 발생한 후 본선 선·후행 터널굴진이 진행됨에 따라 선행 터널의 천단부 종방향 침하가 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 그림 6(a)에서 곡선 [5]를 관찰하면 선행터널 굴진면으로부터 약 40 m 후방에서 변위가 수렴되는 경향을 보여주고 있다. 선·후행 터널의 굴진면 이격거리가 $LD=20m$ 임을 감안 할 때 후행터널 굴진이 선행터널의 변위에 미치는 영향거리는 후행터널의 직경(D_R) 대비 약 $1D_R$ 정도로 나타났다. 이러한 경향으로부터 선·후행 터널의 상호작용은 $1D_R$ 범위 이내에서 완료되는 것을 의미한다고 할 수 있다.

그림 7에서는 본선 좌측 선행터널의 천단부에 설정된 계측지점에서의 침하를 굴진과정에 따라서 나타낸 천단 침하 이력곡선을 보여주고 있다. 침하이력을 굴진과정과 연계시켜 고찰할 경우 다음과 같은 경향을 관찰할 수 있다. 먼저 중앙터널 굴착 후 선행터널이 계측지점(굴착시점으로부터 10 m 지점)을 관통하면서 총 변위 4.7 mm의 30%에 해당하는 1.5 mm 정도가 발생한 후 인접 후행터널 굴착 이전까지 3.5 mm가 발생한후 후행 터널 시공으로 나머지 1.2 mm가 발생하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 선행터널 천단부 총 침하량의 26%가 후행터널 시공에 의한 영향으로 발생한다는 것을 의미하는 것으로써 터널의 변위 관리 측면에서 후행 터널 시공시 선행터널에 대해 중점적인 계측관리가 필



(a) 천단침하



(b) 천단침하 정규화 곡선

그림 6. 선행터널 종방향 천단침하곡선

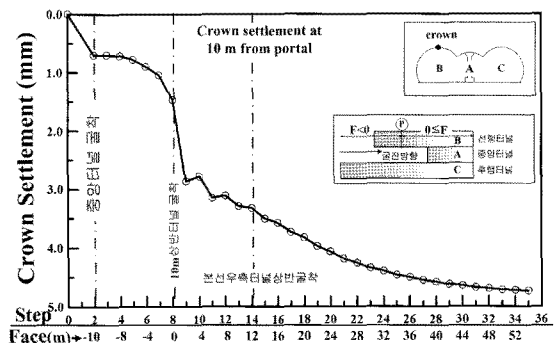


그림 7. 선행터널 종방향 천단 이력곡선(LD=20m)

요함을 의미한다고 하겠다.

한편, 그림 8에서는 중앙터널 시공완료 후 본선 좌측 선행터널만 시공할 경우(①)와 $LD=20m$ (②) 및 $60m$ (③)의 이격거리로 선·후행터널을 시공할 경우에 있어서 좌측 선행터널의 천단침하 이력곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서는 $LD=20m$ 및 $LD=60m$ 의 경우를 좌측 선행터널만 굴착한 경우와 비교하면 우측 후행터널 굴진이 좌측 선행터널에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 보이는 바와 같이 이격거리 $LD=60m$ 와 $LD=20m$ 두 경우에 있어 천단침하량이 거의 동일하게 나타나고 있는데 이는 연암이상의 양호한 지반조건에서 선·후행터널의 이격거리가 20 m 이상일 경우 선·후행터널의 상호작용이 선행터널의 변위거동에 미치는 영향은 미미하다는 것을 의미하는 것으로서 시공적 관점에서 선·후행터널의 최소 이격거리는 20 m($2D_B$) 정도로 유지하여도 선·후행터널의 상호작용이 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

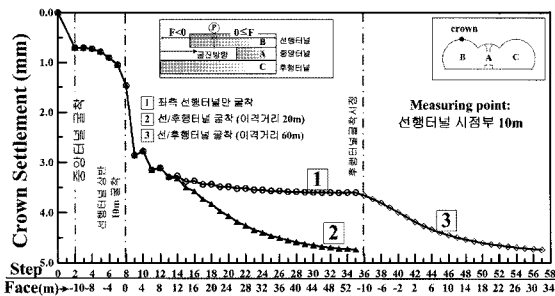


그림 8. 이격거리에 따른 천단침하 이력곡선

3.1.2 슛크리트 라이닝 응력 및 중앙기둥 하중

그림 9는 선·후행 터널의 이격거리 $LD=20m$ 의 조건에 있어 선행터널의 계측단면에서의 스프링라인부 슛크리트 라이닝 응력($\sigma_{shot,L}$) 경시변화를 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 $\sigma_{shot,L}$ 는 슛크리트 타설 후 선행터널 10 m 굴진 시 약 4.6 MPa까지 증가한 후 다시 후행터널 굴진으로 약 0.85 MPa 정도가 증가하여 굴진완료시 $\sigma_{shot,L}$ 는 최대 5.4 MPa가 발생한 것으로 나타났다. 즉, 후행터널 굴진은 최대 슛크리트 응력 대비 약 16%의 응력 증가를 발생시킨 것으로서 앞절의 천단침하에 비해 후행터널이 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 나타낸다고 하겠다.

한편, 그림 10(a)에서는 선·후행 터널 이격거리별 선행터널 스프링라인부 슛크리트 응력을 도시하였는데 보이는 바와 같이 이격거리에 따른 차이가 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 앞서 기술한 천단침하의 경우와 마찬가지로 본 연구에서 고려한 시공

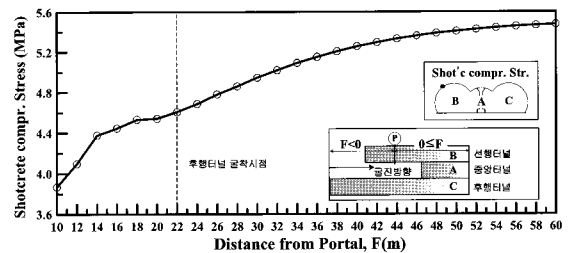
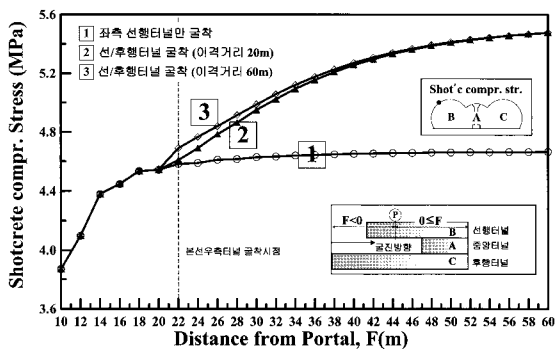
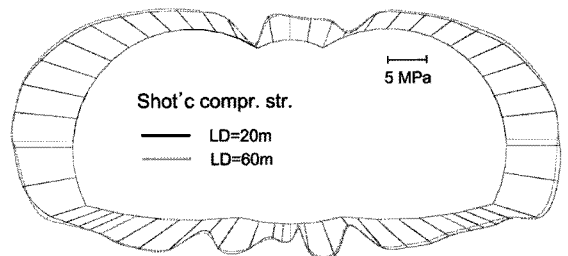


그림 9. 선행터널 슛크리트 최대 응력 이력곡선($LD=20m$)

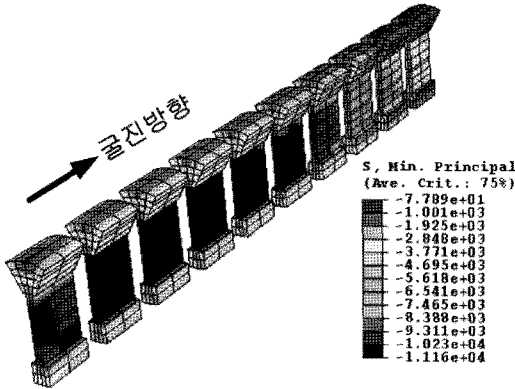


(a) 슛크리트 라이닝 응력 ($\sigma_{shot,L}$)

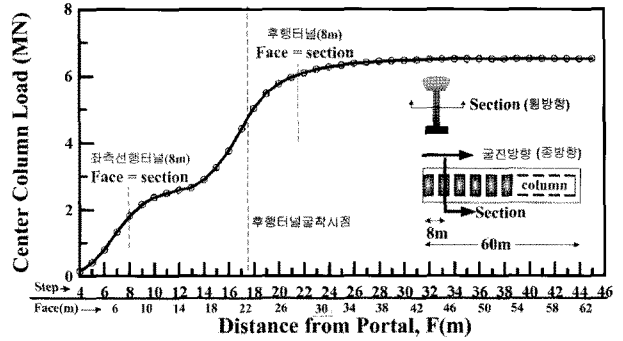


(b) 슛크리트 라이닝 응력 분포도(굴착완료)

그림 10. 이격거리 변화에 따른 슛크리트 라이닝($\sigma_{shot,L}$) 변화 경향



(a) 응력분포($LD=20m$)



(b) 하중 경시변화

그림 11. 중앙기둥 응력 분포 및 하중(P_{PL}) 경시 변화 특성

조건의 경우 20 m의 이격거리는 선·후행 터널의 상호작용이 발생하지 않는 것으로 나타나 선·후행터널 상호작용 감소를 위해서 이격 거리 20 m 이상 확보하는 것은 불필요한 것으로 판단된다. 이러한 경향은 터널굴진 완료시 슛크리트 라이닝 응력 분포도를 보여주는 그림 10(b)에서 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

2-Arch 터널에서 중앙기둥은 굴착하중을 지지하는 매우 중요한 구조요소라고 할 수 있다. 그림 11에서는 본선 굴진시 중앙기둥에 유발된 압축응력 분포도와 이를 하중으로 환산하여 도시한 터널굴진에 따른 중앙기둥 작용하중(P_{PL}) 이력곡선을 나타내고 있다. 먼저 그림 11(a)를 살펴보면 중앙기둥에서 가장 큰 응력이 발생하는 부분은 역시 기둥부로서 최대 약 11 MPa의 압축응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이를 하중으로 환산하여 이력곡선의 형태로 도시한 그림 11(b)를 관찰하면 선행 터널 시공으로 인해 약 4000 kN의 하중이 발생한 후 후행터널 시공으로 인해 11000 kN까지 증가하는 것으로 나타나 후행터널 굴진이 중앙기둥 하중을 두 배 이상으로 증가시키는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 앞서 분석한 선행터널의 천단침하 및 슛크리트 응력의 경우보다 후행터널 굴진의 영향이 지대함을 보여주는 것으로서 시공 중 수행되는 계측프로그램 운영시 중앙기둥 하중을 중점 계측항목으로 설정하여 집중관리를 해야 할 필요성이 있는 것으로 분석되었다. 한편, 그림 12에 제시된 바와 같이 천단침하 및 슛크리트 라이닝 응력과 마찬가지로 이격거리에 따라 중앙기둥 하중이 큰 차

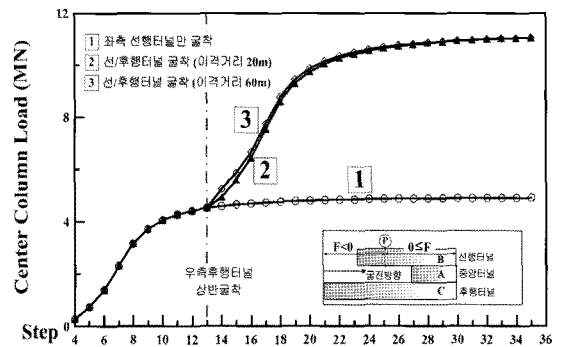


그림 12. 선·후행터널 이격거리에 따른 중앙기둥 하중(P_{PL}) 변화 경향

이를 보이지 않고 있어 이격거리의 영향은 미미한 것으로 분석되었다.

3.2 관통지층 변화에 따른 시공중 거동 특성 변화

그림 13과 14에서는 터널이 풍화암층에 시공되는 경우 기본조건과 동일한 시공조건에 대한 천단침하 및 슛크리트 응력을 제시하고 있다. 여기서의 결과를 앞서 제시한 연암에서 시공되는 조건에 대한 결과의 비교를 통해 지반 조건에 따른 터널 거동 특성의 변화에 대한 고찰이 가능하다. 먼저 좌측 선행터널 천단부 이력곡선을 도시하고 있는 그림 13을 관찰하면 전반적인 경향은 앞절에서 제시한 연암의 경우와 거의 유사하다. 그러나 선·후행터널 이격거리가 $LD=60m$ 의 경우 계측지점의 범위가 수렴단

계에 접어들고 있는 경향을 보지만 $LD=20m$ 의 경우 후행터널 굴진의 영향으로 변위가 지속적인 증가 추이를 보이고 있어 지반조건이 열악할 수록 선·후행터널 이격거리를 증가시켜야 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 슛크리트 응력을 도시하고 있는 그림 14에서도 관찰할 수 있다. 즉, 절대적인 응력의 크기를

고려할 때 $LD=20m$ 의 경우가 10% 정도 큰 값을 보이고 있는데 이는 선·후행터널의 상호작용에 기인한 것으로서 이격거리에 따른 차이를 거의 보이지 않았던 연암의 시공조건과는 대별되는 결과라고 하겠다. 이는 그림 15에서는 동일한 시공조건에 있어 토피고에 따른 변화할 경우의 좌측 선행터널 천단침하 이력곡선을 보여

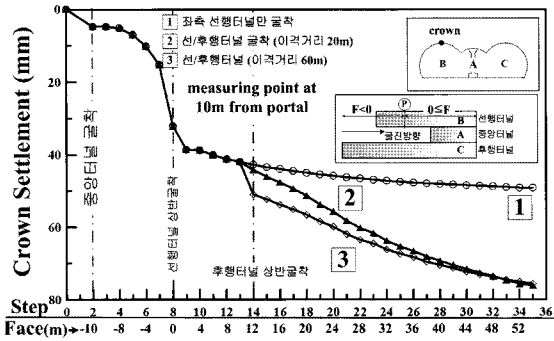


그림 13. 선행터널 천단침하 이력곡선 - 풍화암

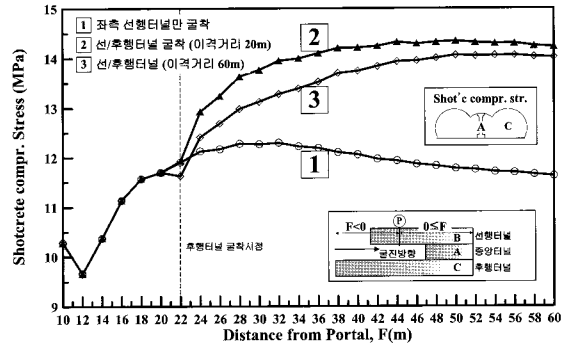
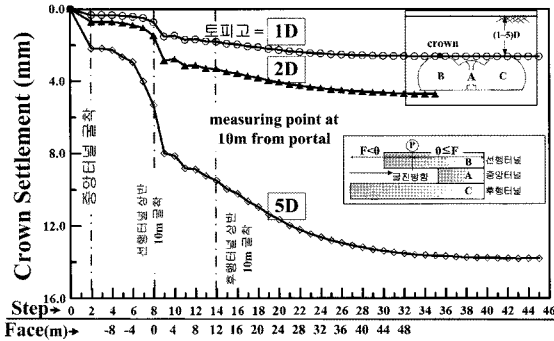
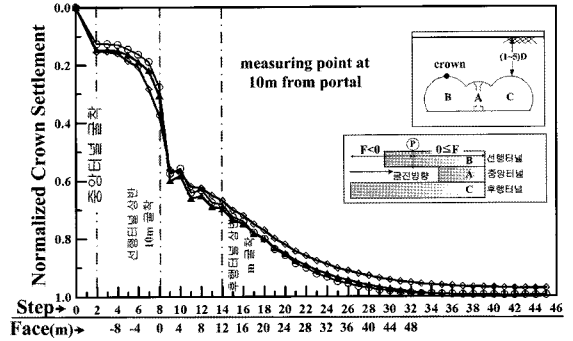


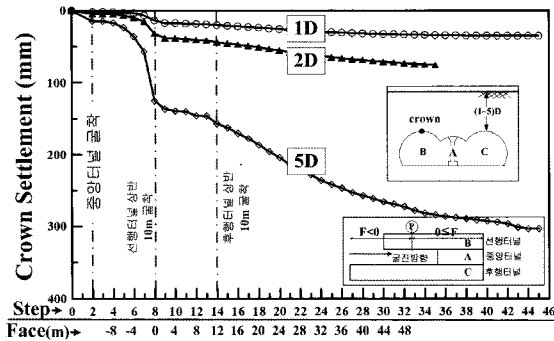
그림 14. 선행터널 슛크리트 이력곡선 - 풍화암



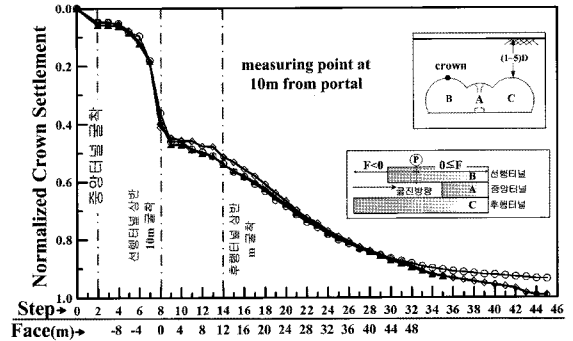
(a) 연암



(b) 연암-정규화 곡선



(c) 풍화암



(d) 풍화암-정규화 곡선

그림 15. 토피고에 따른 천단침하 이력곡선 변화 경향

주고 있다. 이러한 변위거동에 대한 이해는 향후 2-Arch 터널의 2차원 해석시 필요한 하중분담을 산정의 기본방향 설정에 중요한 정보를 제공한다. 그림 15(a)와 15(b)는 각각 좌측 상행터널 천단침하 이력곡선과 이를 최대침하로 정규화한 정규화 이력곡선을 지반조건별로 나타내고 있다. 여기서 관찰할 수 있는 경향은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저 지반조건에 관계없이 토피고 증가시 천단침하량이 증가하는 당연한 경향을 관찰할 수 있는데 흥미로운 경향은 정규화 이력곡선을 나타내고 있는 그림 15(b)에서 같이 지반조건별로 토피고에 관계없이 정규화 곡선이 일치하는 경향을 보이고 있다는 점이다. 이러한 경향은 2차원 해석을 이용한 2-Arch 터널 해석시 지반조건별로 토피고에 관계없이 동일한 하중분담을 적용할 수 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 2-Arch 터널의 거동 메카니즘에 대한 연구를 다루었다. 이를 위해 000지하철 현장 정거장에 적용된 2-Arch 터널 단면을 대상으로 다양한 조건에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 다양한 시공조건에서의 거동 특성을 분석하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

연암에 시공되는 2-Arch 터널에 있어 선·후행 터널의 이격거리를 20 m로 유지하여 시공할 경우 선행터널의 천단침하는 선행터널 굴진면으로부터 약 40 m 후방에서 수렴하는 경향을 보였는데 이격거리를 감안할 때 후행터널 굴진이 선행터널의 변위에 미치는 영향거리는 후행터널의 직경(D_R) 대비 약 $2.5D_R$, 2-Arch 터널 직경(D)대비 1.0D 정도로 분석되었다.

천단침하 이력곡선을 분석한 결과 중앙터널 굴착 후 선행터널이 계측지점을 관통하면서 총 변위의 65% 정도가 발생한 후 인접 후행터널 시공으로 나머지 35%가 발생하는 경향이 관찰되었으며 이러한 경향은 선행터널 총변위의 35%가 후행터널 시공에 의한 영향으로 발생한다는 것을 의미하는 것으로써 터널의 변위 관리 측면에서 후행터널 시공시 선행터널에 대해 충분한 계측관리가 필요함을 의미한다.

연암에서 시공되는 2-Arch 터널의 경우 선·후행 터널 이격거리별 천단침하 이력곡선 분석결과 이격거리가 증

가하면서 전반적인 경향은 크게 변하지 않는 것으로 나타났으며 최종 침하량 또한 거의 동일하게 발생하는 것으로 나타나고 있어 시공적 관점에서 이격거리는 20 m 정도로 유지하여도 선·후행터널의 상호작용을 최소화할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 숏크리트 라이닝 응력 및 중앙기둥 작용하중 결과에서도 관찰할 수 있었다.

중앙기둥 작용하중의 경우 후행터널 굴진이 중앙기둥 하중을 두 배 이상 증가시키는 것으로 분석되었는데 이러한 경향은 앞서 분석한 터널 천단침하 및 숏크리트 응력의 경우보다 후행터널 굴진의 영향이 매우 뚜렷하게 나타나는 것으로서 시공 중 수행되는 계측프로그램 운영시 중앙기둥 하중을 중점 계측항목으로 설정하여 집중관리를 해야 할 필요성이 있는 것으로 분석되었다.

풍화암에 시공되는 2-Arch 터널의 경우 본 연구에서 고려한 이격거리 $LD=60m$ 및 $LD=20m$ 에 대한 분석결과 $LD=60m$ 의 경우 계측지점의 변위가 수렴하는 경향을 보였으나 $LD=20m$ 의 경우 후행터널 굴진의 영향으로 변위가 계속 증가하는 경향을 보이고 있어 지반조건이 열악할 수록 선·후행터널 이격거리를 증가시켜야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 고려한 다양한 시공조건에 대한 좌측 상행터널의 천단침하 정규화 이력곡선을 분석한 결과 지반조건별로 토피고에 관계없이 정규화 곡선이 일치하는 경향을 보이고 있어 2차원 해석을 이용한 2-Arch 터널 해석시 지반조건별로 토피고에 관계없이 동일한 하중분담을 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2008년 건설교통부가 출현한 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호: C104A1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김도형, 박준경 (2003), “근접병설터널의 안정성 평가기법에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제

-
- 5권, 제2호. pp. 88-101.
2. 김상균, 박동욱 (2003), “수치해석적 접근을 통한 2-Arch 터널의 거동양상 고찰”, 2003 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 225-232.
 3. 김주미 (2005), ANN 기반의 터널 거동 및 주변지반 변위 예측, 석사학위 논문, 성균관대학교.
 4. Abaqus users manual, Version 6.7, (2006), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
 5. Davis, E.H. (1968), “Theories of plasticity and the failure of soil masses”, Soil mechanics: Selected topics, Butterworth's London, pp. 341-380.
 6. Matsuda, T. (1998), “Ground behavior and settlement control of twin tunnel in soil ground”, Proceedings of World Tunnel Congress '98-Tunnels and Metropolises, Sao Paulo, Brasil, pp. 1193-1198.
 7. Xia, C.C., Liu, H.J. and Zhu, H.H. (2006), “3D numerical simulation of a large span double-arch tunnel construction”, Proceedings of Computational Methods, Springer, pp. 1853-1858.

접수일(2009.6.4), 수정일(1차: 2009.7.1, 2차: 2009.7.9), 게재확정일(2009.7.17)