2-Arch 터널의 최적 설계에 관한 연구
Investigation on Optimum Design of 2-Arch Tunnel

유충식[1], Chung-Sik Yoo, 김선빈[2], Sun-Bin Kim, 김주미[3], Joo-Mi Kim

[1] 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan Univ.
[2] 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan Univ.
[3] 성균관대학교 석사과정 졸업, M.S. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This paper concerns optimum design of 2-Arch tunnel. A 2-Arch tunnel adopted in a subway tunnel construction site is considered in this study. A calibrated 3D finite element model was adopted to conduct a parametric study on the lagged distance between left and right tunnel faces. The results of analysis were examined to determine optimum lagged distance for minimizing the interaction between the left and right tunnels. The results indicated 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 lagged distance of 20m is sufficient to minimize the interaction between two tunnels. Fundamental mechanism of 2-arch tunnel was also investigated based on the results.

Key words : 2-arch tunnel, finite element analysis, lagged distance

1. 서 론

오늘날 산업화 및 도시화가 가속되면서 도시의 토지공급은 점점 한계에 이르고 있으며, 지가상승 및 도시의 평면적 확산, 그에 따른 녹지의 잠식등과 같은 건설공간 및 환경문제가 야기되고 있다. 이에 따라 점차적으로 도시 재구축의 요구가 확산되어 그 방안으로 지상의 토지가 아닌 해상이나 해저, 지하공간 등이 대두되고 있다. 그 중 사회기반시설 확충의 방법으로 지하공간건설이 가장 현실성 있는 대안으로 평가되고 있으며, 그에 따라 터널 시공/계획도 증가하고 있는 추세이다. 이러한 터널 시공/계획은 일반적으로 도심지터널과 산악터널로 구분되어지는데 도심지터널의 경우 용지매입의 한계와 주변지장물 보호 및 공사중 발생하는 소음등의 문제로 인한 민원 발생 우려가 크고, 산악터널의 경우 자연환경훼손의 최소화를 요구하는 사회적 분위기로 인해 터널시공방법에 있어 제한이 따르게 된다. 이러한 사회적 분위기를 고려할 때, 1-Arch 형태의 대단면 터널건설에 따른 한계로 인하여 병설터널간 이격거리가 근접한 형태인 중앙벽체의 지지기능을 활용한 2-Arch 및 3-Arch와 같은 근접병설터널 시공/계획이 증가하고 있다.

2-Arch 터널 관련 연구는 주로 국내·외 시공사례를 분석한 연구가 대다수이며 2-arch 터널의 역학적 거동 특성을 분석한 연구는 소수에 불과한 실정이다. 김상균과 박동욱(2003)은 2-Arch 터널의 거동특성을 파악하기 위해 중앙터널 단면축소, 상부지지조건, 굴착순서에 의한 영향 그리고 지층조건에 따라 중앙벽체에 작용하는 하중을 수치해석을 통해 파악하였고 이를 계측사례와 비교하였다. 그 결과 중앙터널 굴착단면을 작게 할수록 안정성 확보에 유리한 것으로 보고한 바 있다. 한편, 시공사례조사 및 수치해석을 접목한 연구로서 김도형과 박준경(2003)은 근접병설터널의 거동에 대한 안정성 평가 방안에 대하여 실제 국내 도심지구간에 시공계획중인 대단면 근접병설터널에 대한 안정성 검토사례를 고찰하여 중앙기둥 및

콘크리트 라이닝의 구조적 안정성, 인접구조물에 의한 영향 등을 검토하였다. 한편 2-Arch 터널 관련 국외연구로는 Matsuda (1998)이 2-Arch 터널 시공시 중앙기둥 작용하중에 관한 제한적인 연구를 수행한 바 있다. 이렇듯 2-Arch 터널의 경제적 설계/시공을 위한 근본적인 거동 메카니즘에 관한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 이러한 근접병설터널의 설계 및 시공방법의 체계화를 위해 우선적으로 중앙벽체의 지지기능을 활용한 2-Arch(1 Pilot)터널의 역학적 거동 연구를 수행하였다(김주미 2005). 이를 위해 도심지 지하철 OOO정거장 2-Arch 터널을 대상으로 유한요소법에 근거한 상용프로그램 ABAQUS(ABAQUS 2006)를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과는 중앙벽체의 지지기능을 활용하는 2-Arch터널 특성을 고려하여 본선 좌·우측 터널 시공 순서에 따른 상호터널의 영향 및 중앙벽체 거동을 중점으로 분석하였으며, 향후 2-Arch터널 설계/시공 적용을 위한 시공조건에 따른 체계화를 위해 토피고와 지반조건에 따라 해석조건을 변화하여 해석을 수행하였다.

2. 매개변수 연구

2.1 현장조건

본 연구는 지하철 OOO정거장에 적용된 2-Arch 터널 시공조건을 고려하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 상부지층은 충적층이며 터널은 기반암 내를 통과하여 막장내 지반이 양호한 현장으로 일부구간에서는 엽리 및 석영암맥이 분포하는 시공조건이다. 그림 2는 대상현장의 종단면도를 보이고 있다.

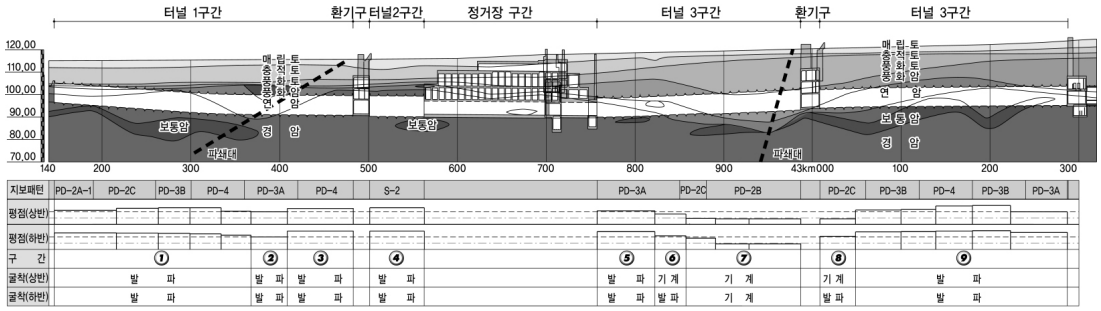
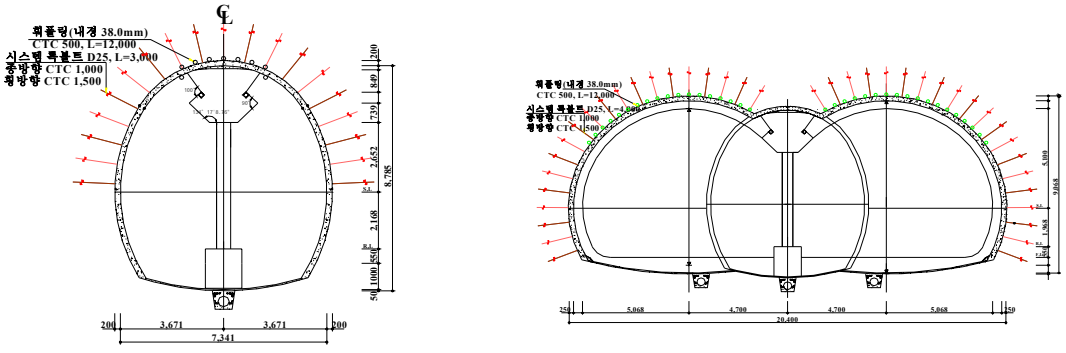


그림 1. 대상현장 종단면도(2-Arch 터널구간 – 터널2구간)

그림 2는 각각 중앙터널과 본선터널의 터널개요를 나타내고 있으며, 2-Arch 터널의 전체 직경(D)은 20.9m이며 굴착단면적은 169 m^2, 편평율(H/B)은 0.87이다.



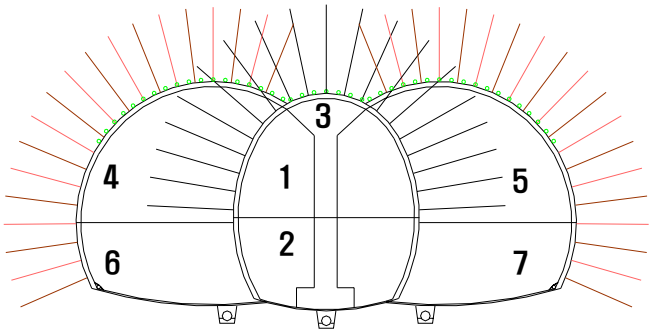
(a) 중앙터널 (b) 본선터널

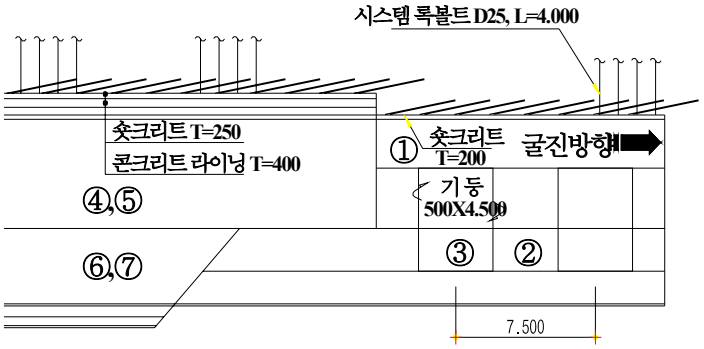
그림 2. 터널개요

표 1에서는 2-Arch 터널의 지보패턴을 정리하고 있으며, 그림 3은 시공과정으로서 중앙터널 시공 완료 후 본선터널을 이격거리 20m로 시공하는 경우에 대한 시공 상세 내용을 정리하고 있다.

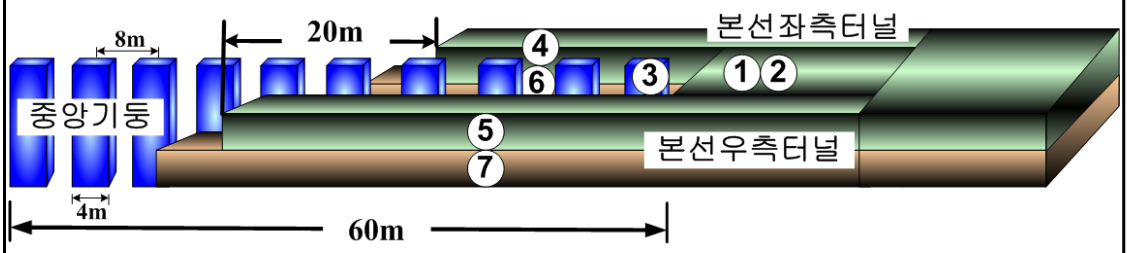
표 1. 2-Arch 터널 지보패턴 개요

구분		2-Arch 터널
적용지반		연암, 보통암
굴착공법	중앙터널	상·하분할
	본선터널	상·하분할
굴진장		1.0/1.0
숏크리트 (mm)	중앙터널	200
	본선터널	250
록볼트(m)	좌·우/중앙측벽	5/3
	종/횡간격	0.8/1.2
강지보재		H-125
보조공법		휘폴링





(a) 종방향 시공순서_ 단면도



(b) 종방향 시공순서_ 3D 평면도

Step #1. 중앙터널 상반굴착　　Step #2. 중앙터널 하반굴착/상반지보설치

Step #3. 중앙터널 하반지보설치　　Step #4. 중앙기둥설치

Step #5. 본선좌·우측터널 상반굴착　　Step #6. 본선좌·우측터널 하반굴착/상반지보설치

Step #7. 본선좌·우측터널 하반지보설치

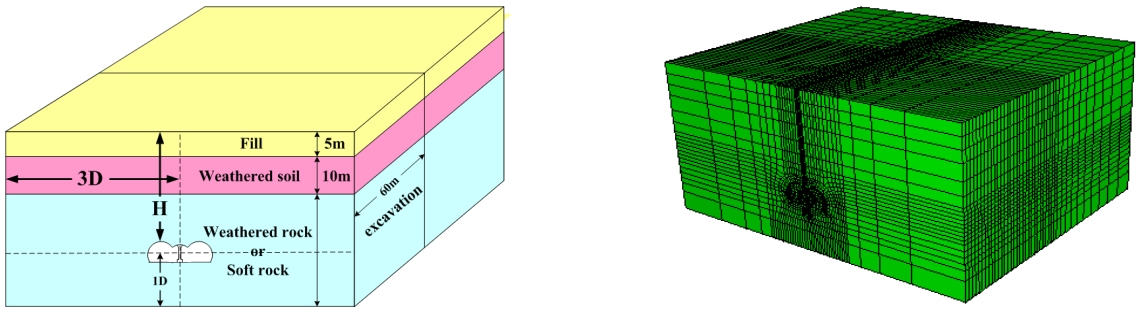
그림 3. 2-Arch 터널 시공순서도

2.2 유한요소해석

본 연구에서는 3차원 해석을 위해 유한요소법을 근거로한 범용 프로그램인 ABAQUS 6.4(ABAQUS 2006)를 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효율적이다.

해석 영역의 모델링에 있어서 터널은 지하철 OOO정거장의 시공순서 및 적용단면을 기본조건으로 하였으나, 터널 굴착방법의 경우 중앙 터널 시공완료 후 본선터널의 거동을 분석하는 것이 주목적이므로 해석모델링에 있어 편의상 중앙터널은 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 적용하였고, 그 외 본선터널은 상·하 반단면굴착으로 모델링하였다.

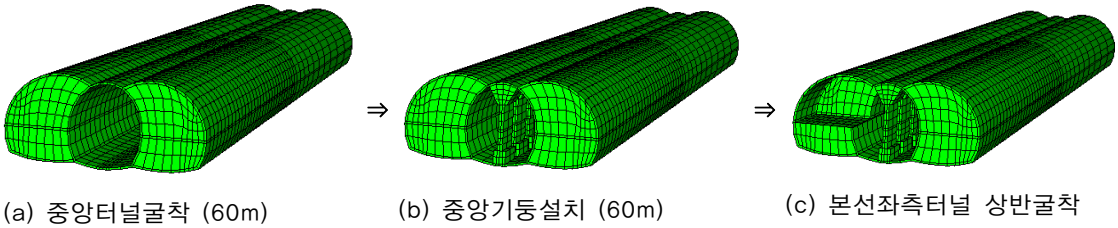
해석영역은 터널중심으로부터 폭 3D(D=터널직경)이상 높이 1D 이상으로 하였고 종방향 수직 경계면은 X방향 구속, 횡방향 수직 경계면은 Y방향 구속 및 바닥면 경계조건은 X,Y,Z방향 구속을 하였다. 지반 및 지보재의 이산화에 있어 지반과 숏크리트 라이닝 모두 8절점 가감 적분 고체요소(C3D8R)를 적용하였다. 한편, 시공조건에서는 숏크리트와 록볼트가 지보재로 사용되나 해석의 편의상 록볼트는 모델링하지 않았으며, 록볼트에 대한 지보력을 숏크리트 설치두께를 증가하는 것으로 대신하여 모사하였다. 재료모델링에 있어 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Davis (1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 적용하였고 지보재의 경우 탄성거동으로 적용하였다. 그림 4는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.



(a) 해석단면 (b) 3차원 유한요소망

그림 4. 해석적용 단면의 유한요소망

본 연구에서는 대상현장의 시공조건을 기반으로 2-Arch 터널의 시공과정을 상세히 모사하였다. 즉, 종방향 굴착 연장은 60m로 하여 중앙터널 굴착 후 본선 좌·우측 터널의 이격거리 20m에 따른 분석이 충분하도록 하였으며, 중앙 터널 시공완료 후 본선터널의 거동을 분석하는 데 주목적을 두었으므로 해석모델링에 있어 편의상 중앙터널은 전단면 굴착과 지보설치가 동시에 시공되는 것으로 모델링하였다. 중앙기둥은 중앙터널의 굴착 및 지보설치 완료 후 시공되며 중앙터널 60m 시공 완료 후 본선좌측 터널 시공이 시작되는 것으로 모델링하였다. 또한, 본선 좌·우측 터널의 시공 순서에 따른 상호터널의 영향을 분석하기 위해 시공과정을 본선 좌·우측 터널의 막장거리를 20m 와 60m의 두 가지 시공단계변화로 모사하였다. 그림 5는 시공과정 모델링을 보여주고 있다.



(a) 중앙터널굴착 (60m) (b) 중앙기둥설치 (60m) (c) 본선좌측터널 상반굴착

(d) 본선좌측터널 하반굴착 (e) 본선우측터널 상반굴착 (f) 본선우측터널 하반굴착

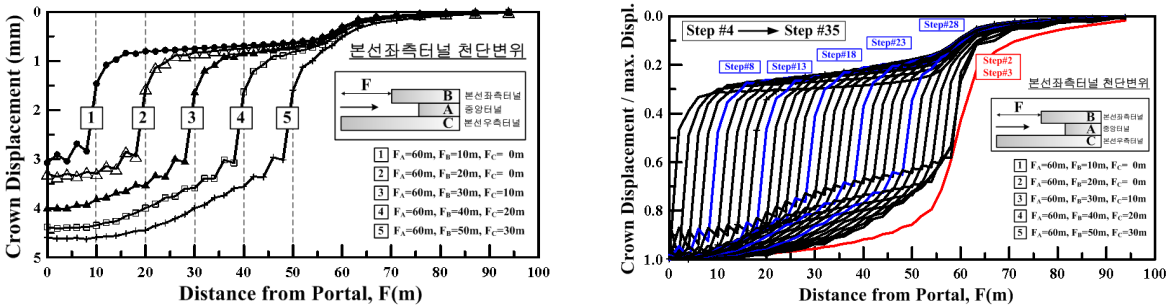
그림 5. 시공과정 모델링

3. 결과분석 및 고찰

3.1 변위 거동 특성

2-Arch 터널의 변위거동 특성을 분석을 위해 연구해석 조건 중 토피고 2D / 관통지층 연암 / 본선좌·우측터널 막장간거리 20m를 기본조건에 대한 결과를 분석하였다. 이를 위한 첫 번째 단계로 막장이 진전함에 따른 종방향 변위곡선을 통해 전반적인 변위거동특성을 파악하였다. 그림 6(a)와 6(b)는 본선좌측터널 종방향 천단변위($\delta_{CR.L}$) 곡선과 천단변위곡선을 시공완료 후 최대변위로 정규화한 결과를 보여주고 있다.

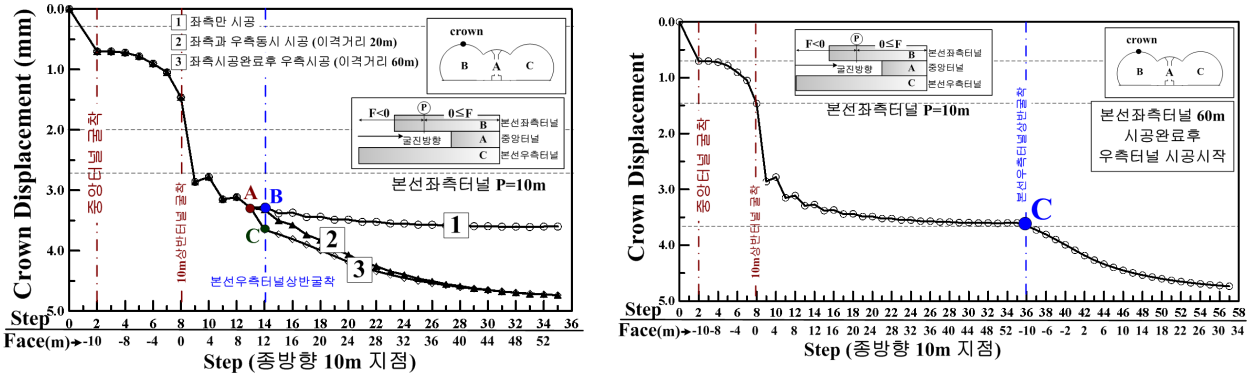
이 그림에서는 2-Arch 터널시공시 중앙터널 시공으로 인해 초기변위가 발생하며 발생된 초기변위 값부터 본선 좌·우측 터널시공에 따른 변위곡선이 시작되며 막장으로부터 멀어짐에 따라 변위가 수렴되는 것을 보이고 있다. 일반적으로 1-Arch터널직경을 기준으로 판단할 때 천단변위곡선은 일반적으로 막장으로부터 2D정도에서 수렴하는 것에 비하여 2-Arch터널의 경우 좌우측 터널의 상호작용으로 인해 본선좌측터널 직경의 4배인 4D지점에서 수렴되는 경향을 보여주고 있다.



(a) 본선좌측터널 천단변위($\delta_{CR.L}$) (b) 본선좌측터널 천단변위($\delta_{CR.L}$)_Normalized

그림 6. 본선좌측터널 종방향 천단변위곡선($\delta_{CR.L}$)

그림 7(a)은 중앙터널 시공완료 후 본선 좌측터널만 시공할 경우와 20m 및 60m의 이격거리를 두고 좌·우측터널을 시공할 경우의 좌측터널 천단변위를 나타내고 있다. 여기서 이격거리 60m의 경우 20m의 결과와의 직접적인 비교를 위해 좌측으로 이동하여 도시한 결과로서 실제 변위곡선은 그림 7(b)에 다시 제시하였다. 이 그림을 살펴보면 먼저 본선 좌측터널만 시공할 경우 일반 측정지점에서 막장으로 부터의 거리가 증가할수록 변위가 수렴되는 경향을 보이나 본선우측터널이 시공되는 경우인 CASE 2와 3에서는 우측터널 시공이 시작되면서 수렴되던 변위가 다시 증가되며 점차 막장이 진전할수록 다시 수렴되는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 우측터널 시공으로 인한 좌측터널의 천단변위가 약 30% 정도 추가되는 경향을 보이고 있으며 본 연구에서 고려한 20m 및 60m의 경우 별다른 차이를 보이지 않고 있어 본 연구대상 시공조건에서는 좌우 터널 이격거리를 20m 정도를 유지할 때 변위 거동 측면에서 적절한 것으로 분석되었다.

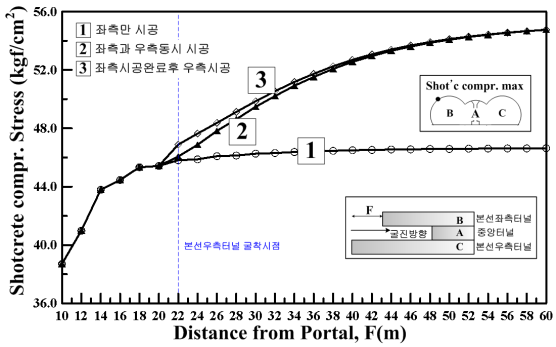


(a) 천단변위 곡선 비교 (b) 이격거리 60m

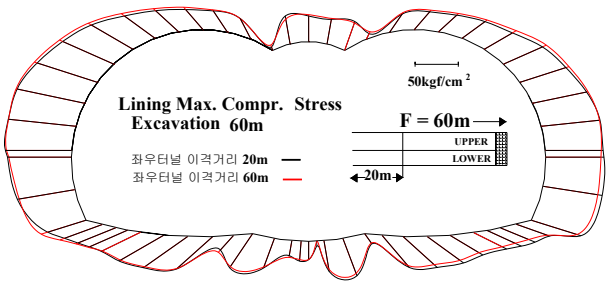
그림 7. 시공단계변화에 따른 본선좌측터널 천단변위($\delta_{CR.L}$)양상

3.2 숏크리트 라이닝 응력 및 중앙기둥 하중

그림 8(a)는 중앙터널 시공완료 후 앞서 언급한 시공조건에 따른 좌측 터널 숏크리트 라이닝 응력($\sigma_{shot,L}$) 경시변화를 나타내고 있으며 그림 8(b)는 최종굴착 후 숏크리트 응력도를 보이고 있다. 그림 8(a)에서도 좌우터널 이격거리 60m에 해당하는 CASE 3의 경우 CASE 2와의 직접적인 비교를 위해 좌향 수평이동을 하여 같이 도시하였다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 우측터널 시공이 좌측터널에 미치는 영향은 약 40% 추가 응력이 발생하는 것으로 나탄나 앞서 기술한 변위 거동보다 그 영향이 더 크게 발생하는 것으로 나타나 2-Arch 터널 시공시 시공중 중점 계측관리 항목으로서 숏크리트 응력이 매우 중요한 것으로 나타났다. 한편, 숏크리트 응력에서 이격거리별 차이가 그다지 크게 발생하지 않고 있어 앞서 기술한 바와 같이 좌우터널 상호작용 저감을 위해서 이격 거리 20m이상 확보는 불필요한 것으로 나타났다.



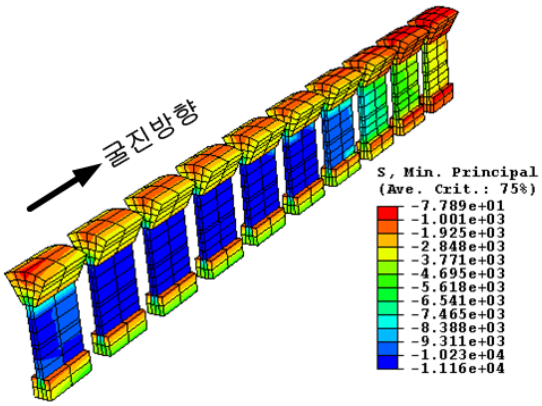
(a) 숏크리트 라이닝($\sigma_{shot,L}$)



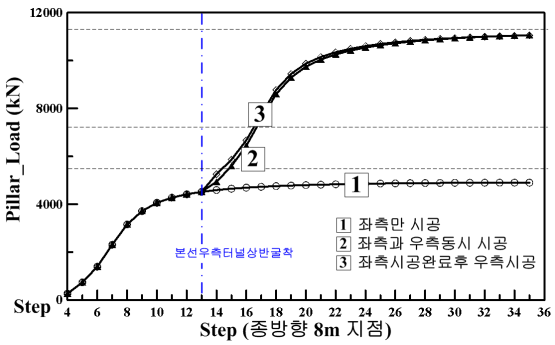
(b) 숏크리트 라이닝 응력 분포도(굴착완료)

그림 8. 이격거리 변화에 따른 숏크리트 라이닝($\sigma_{shot,L}$) 거동 특성

그림 9에서는 중앙기둥에 작용하는 응력 및 하중에 대한 결과를 보여주고 있다. 즉, 그림 9(a)는 중앙기둥의 응력 분포를 보여주고 있으며 그림 9(b)는 응력으로부터 산정한 중앙기둥 하중 경시변화를 보여주고 있다. 이 그림에서도 우측터널 시공으로 인해 중앙기둥 하중이 두 배 이상으로 증가하는 경향을 보여주고 있어 중앙기둥 하중 또한 중점 계측항목으로 활용되어야 할 것으로 판단된다. 한편, 천단변위 및 숏크리트 라이닝 응력과 마찬가지로 이격거리별로 큰 차이를 보이지 않고 있어 이격거리 20m이상 확보는 불필요한 것으로 나타났다.



(a) 중앙기둥 응력분포



(a) 중앙기둥 하중 경시변화

그림 9. 중앙기둥 하중(P_{PL}) 거동 특성

5. 결 론

본 연구에서는 2-Arch 터널의 최적 설계에 관한 연구를 다루었다. 이를 위해 실제 터널현장인 지하철 OOO정거장을 대상으로 유한요소법에 근거한 상용프로그램 ABAQUS를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 중앙벽체의 지지기능을 활용하는 2-Arch터널 특성을 고려하여 본선 좌·우측 터널 시공 순서에 따른 상호터널의 영향 및 중앙벽체 거동을 중점으로 분석하였으며, 향후 2-Arch터널 설계/시공 적

용을 위한 시공조건에 따른 체계화를 위해 좌우터널 이격거리에 따른 해석을 수행하였다.

그 결과 우측터널 시공이 좌측터널에 미치는 영향은 변위에 비해 숏크리트 응력 및 중앙기둥 하중에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되어 2-Arch 터널 시공시 시공중 중점 계측관리 항목으로서 숏크리트 응력 및 중앙기둥 하중이 매우 중요한 것으로 나타났다. 한편, 터널 변위, 숏크리트 응력, 그리고 중앙기둥 경시변화를 분석한 결과 이격 거리 20m 정도를 유지하며 시공할 경우 좌우측 터널의 상호작용을 최소하며 시공이 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2005년 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”, 터널공학회 학회지.
2. 김상균, 박동욱 (2003), “수치해석적 접근을 통한 2-Arch 터널의 거동양상 고찰”, 한국지반공학회 학회지 : 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”, Tunnels and Metropolises, 1193-1198.