

## 근접한 수직구 건설에 따른 기존 터널의 역학적 거동 분석

### Analysis of Mechanical Behavior of Existing Tunnel by the Construction of Shaft Nearby

이 석 원\*<sup>1</sup> Lee, Seok-Won  
조 만 섭\*<sup>2</sup> Cho, Man-Sup  
이 성 원\*<sup>3</sup> Lee, Sung-Won

#### Abstract

In order to release the pressure fluctuations and micro-pressure wave induced by the entering of train into the small cross sectional tunnel, it has been reported that the construction of air shaft has more advantages with respect to economy and constructability than the enlargement of cross section of existing tunnel. The field monitorings and analytical studies were conducted simultaneously in this study to analyze the mechanical behavior of existing railway tunnel, new cross tunnel and new shaft by the construction of new shaft nearby. The results showed that the minimum distance from existing tunnel to new shaft which secures the stability of existing tunnel was found to be half diameter of existing tunnel. On the three dimensional mechanical behavior of existing tunnel by the construction of new shaft, the results from the analytical study and field monitoring had a similar trend. The analytical study and field monitoring results, however, produced somewhat different results on the mechanical behavior of new shaft itself. These conclusions induce that the analytical method which has been applied on the analysis of horizontal tunnel could not be applied in the same way on the analysis of vertical shaft.

#### 요 지

기존 철도터널의 운행속도 향상시 문제가 되는 터널내 공기의 압축과 문제를 해결하기 위해서는 단면의 확대보다는 통풍공 수직구의 건설이 경제성 및 시공성 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 장기재령의 운영 중인 철도터널에 통풍공 수직구를 건설함에 따라 발생될 수 있는 본선터널, 하부갱도 그리고 수직구의 역학적 거동들을 파악하기 위한 목적으로 3개의 독립적인 요소기술들에 대하여 실험적, 해석적 연구를 수행하였다. 연구결과, 먼저 장기재령과 콘크리트 라이닝의 강도관계는 재령이 증가함에 따라 강도가 저하하는 경향을 확인할 수 있었으며, 본선 터널과 수직구의 최소 적정거리 거리를 해석적으로 추정한 결과는 본선터널 직경(D)의 약 0.5D 이상이 적합한 것으로 도출되었다. 다음으로 수직구 굴착에 따른 하부갱도의 3차원적 거동은 시험시공의 계측결과와 탄소성 유한요소해석 결과가 유사한 경향을 나타내었으나, 수직구 굴착시 수직구 자체의 거동파악을 위한 분석결과에서는 수직구의 심도별 지반거동 계측결과와 3차원 유한요소해석 결과가 상이한 거동을 보였다. 따라서 이상의 연구결과로부터 수평터널에 대한 해석결과와 계측결과와의 경향은 유사하지만 변위, 응력 등의 정량적 비교에서는 지반물성치의 선정방법에 따라 다소 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다. 또한 수직방향에 대한 거동을 해석적인 방법으로 검증하기 위해서는 지표면에서의 수평방향 응력, 변위성분을 표현할 수 있는 적정기법 연구가 요구된다.

**Keywords :** Concrete lining, Railway tunnel, Shaft, TPMS

\*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KICT, slee@kict.re.kr)

\*2 정희원, (주)유니백 제1사업본부 터널팀 차장 (Member, Manager, Univec Corp.)

\*3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KICT)

## 1. 서론

현재 국내에서 운행 중인 일반철도의 속도 향상을 위해서는 레일의 직선화와 함께 열차가 소단면 철도터널을 통과할 때 발생하는 공기의 압축파에 의한 문제점을 해결해야 한다(Burri and Zumsteg, 1997; Wolf and Demmenie, 1997; 한국건설기술연구원, 2001). 국내외 문헌조사를 통해 나타난 일반적인 해결방법으로는 터널의 단면확대보다는 통풍공 수직구(장은식과 오인석, 2000; 한국건설기술연구원, 1999)의 건설이 경제성 및 시공성 측면에서 유리한 것으로 조사되었다. 그러나 국내뿐만 아니라 국외에서도 장기재령을 갖는 운영 중인 철도터널에서의 통풍공 수직구 시공에 대한 연구 결과나 시공 사례가 제시된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 장기재령의 운영 중인 철도터널에 통풍공 수직구를 건설함에 따라 발생할 수 있는 역학적 거동들을 파악하고, 다음으로 수직구의 상향굴착에 따른 하부궤도의 거동을 파악하기 위한 목적으로 다음과 같은 요소기술 연구들을 수행하였다.

본 연구에서 수행한 요소기술 연구들은 3개의 독립적인 분야로 구분할 수 있는데, 먼저, 30~90년 이상 경과된 재래식 철도 터널의 콘크리트 라이닝에 대한 강도저하 특성을 파악하기 위하여 국내 철도터널들의 정밀안전진단 결과로부터 준공 후 재령에 따른 라이닝의 강도저하 정도를 조사하였다. 이 결과를 이용하여 3차원 유한요소해석의 입력변수로서 콘크리트 라이닝의 저하된 물성치들을 추정하였고, 현재 운행 중인 재래식 철도터널(이하 본선터널이라 칭함)을 대상으로 통풍공 수직구의 굴착 단계별 본선터널의 역학적 거동을 분석하였다. 이와 함께 통풍공 수직구와 본선터널과의 이격거리 별 매개변수 해석을 수행하여 수직구 굴착을 위한 최소 적정이격거리를 제안하였으며, 참고로 본선터널 콘크리트 라이닝의 거동을 실제와 가능한 한 유사하게 모델링 하기 위하여 라이닝의 요소들에 대한 예비해석을 수행하여 보았다.

다음으로, 본 연구에서는 철도터널을 대상으로 수직구의 시험시공을 계획하였으나 운행 중인 열차의 안전을 위하여 강원도 S광업소에서 RBM(Raise Boring Machine)을 이용한 수직구의 시험시공을 수행하였다. 이 시험시공으로부터 수직구의 하부궤도(본선터널에서 수직구 위치까지의 접속횡갱(이하 하부궤도로 칭함)과 같은 개념임)에 대한 계측을 수행하여 변위거동 및 지보재의 응력

을 측정하였고, 3차원 유한요소해석 결과와 계측결과를 상호 비교하여 보았다.

마지막으로, 본 시험시공에서는 계측할 수 없었던 수직구의 심도별 지보재 응력 및 내공변위 거동은 국내 D도로터널 수직구 시공에서 계측한 자료들을 이용하여 분석하였고, D터널의 수직구 시공과정을 3차원 유한요소해석으로 모사하여 계측결과와 해석결과를 상호 비교하여 보았다.

## 2. 터널 라이닝의 재령에 따른 강도저하 특성

터널의 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 강도가 저하되는 경향에 대한 국내 연구는 건설교통부와 국립건설시험소(1998)에서 수행한 연구결과가 있으며, 이는 제작된 시료를 옥외에서 노출하여 재령에 따라 실험하였다. 본 연구에서는 매연, 지하수 등에 노출된 도로 및 철도현장 상태로부터 터널 재령에 따른 콘크리트 라이닝의 정량적인 강도저하 경향을 분석하기 위하여 국내 안전진단 전문기관에서 수행하였던 터널정밀안전진단 결과 중 코어강도 시험에 대한 자료들을 수집하여 재분석하였다. 대상 터널은 재령이 약 5년(1,762일)에서 59년(21,535일) 경과한 도로 및 철도터널로서 분석대상은 20개 터널이며, 강도시험 수는 총 100개의 자료를 분석하였고 재령에 따른 강도변화의 경향을 조사하였다.

터널의 재령에 따라 변화하는 콘크리트 라이닝의 강도시험 결과를 그림 1에 나타내었는데, 분석자료의 범위가 매우 분산되어 상관계수 값이  $|R| = 0.42$ 로 나타났

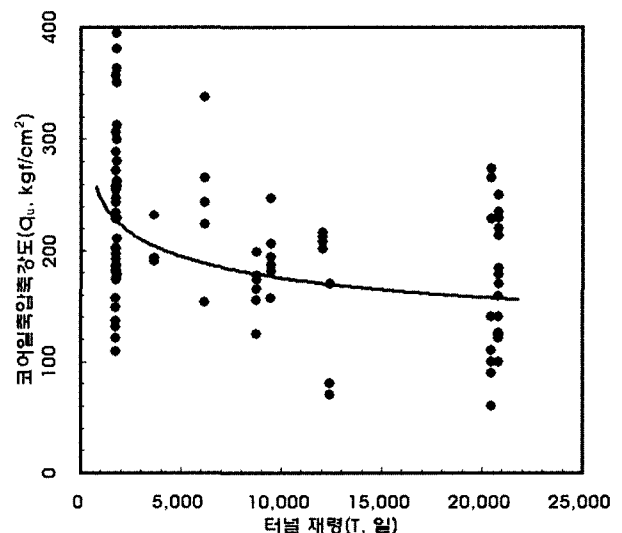


그림 1. 철도 및 도로터널 재령에 따른 콘크리트 라이닝의 강도저하 특성

으며 특히 자료의 수가 많았던 약 5년과 57년의 자료들에서 심한 분산을 보이고 있다. 그러나 대체적으로 터널의 재령이 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이때의 관계식은  $q_u=696.39 \times t^{0.1498}$ 으로서 이러한 경향과 관계식 등을 참조하여 본 연구의 유한요소해석에서 사용할 장기재령 터널의 콘크리트 라이닝 강도를 추정하여 보았다. 그리고 본 자료의 분석대상 터널 수 및 터널용도, 시공방법 등 추후 많은 자료의 수집과 세부적인 분석기법을 통하여 터널의 재령과 콘크리트 라이닝의 강도특성에 대해 보다 다양하게 연구할 계획이다.

### 3. 운영 중 철도터널의 라이닝 거동에 관한 예비 해석

일반적으로 스틱크리트 및 콘크리트 라이닝의 부재력을 평가하기 위한 해석적 검토는 3차원 셸요소(shell element)를 사용하고 있다. 그러나 현재 운행 중인 재래식 철도터널의 경우, 장기간에 걸친 지반의 수렴상태와 라이닝의 자중에 의한 응력분포를 고려한 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 임의의 두께를 가지는 라이닝의 요소를 직접 삽입한 연속체요소(continuum element)와 전술한 셸요소의 적용성을 평가하기 위한 예비해석을 수행하여 보았다.

본 해석에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 ASSM (American Steel Support Method)공법을 아래의 단계에

따라서 모사하였고, 셸요소와 연속체요소에 대한 적합성을 해석적으로 조사하여 보았다.

그림 2에는 하부갱도 굴착(4단계) 이후의 본선 터널 라이닝에 작용하는 y축 응력( $\sigma_y$ )을 나타내고 있다. (a)는 셸요소를 해석한 결과로서 본선 터널이 100% 수렴한 후에 설치되었기 때문에 라이닝 자중에 의한 응력분포는 전혀 나타나지 않았고, 응력수준이 거의 0에 가까운 경향을 나타내고 있다. 그리고 하부갱도의 굴착 이후에도 라이닝에 작용하는 응력의 변화가 적은 것으로 나타나고 있다. 하지만 (b)는 연속체 요소로 해석한 결과로서 자중에 의해 라이닝의 위치별 응력분포가 상이하게 분포하고 있으며, 굴착된 라이닝의 상단부분에서 (a)의 경우와 마찬가지로 응력재분배 경향이 나타나고 있다.

따라서 본 연구의 목적에 의거하여 하부갱도의 굴착으로 인한 운행 중인 철도터널 라이닝의 구조적 안정성을 평가할 경우, 셸요소로 해석하는 경우보다는 해석모델의 작성과정과 발생하는 요소 및 절점 수가 다소 증가하여도 연속체요소로 라이닝을 모델링하여 안정성을 파악하는 것이 효율적인 것으로 사료된다.

### 4. 본선터널 콘크리트 라이닝의 거동 및 적정 이격거리

#### 4.1 해석개요

재래식 철도터널의 통풍공 수직구 시공단계에 따른

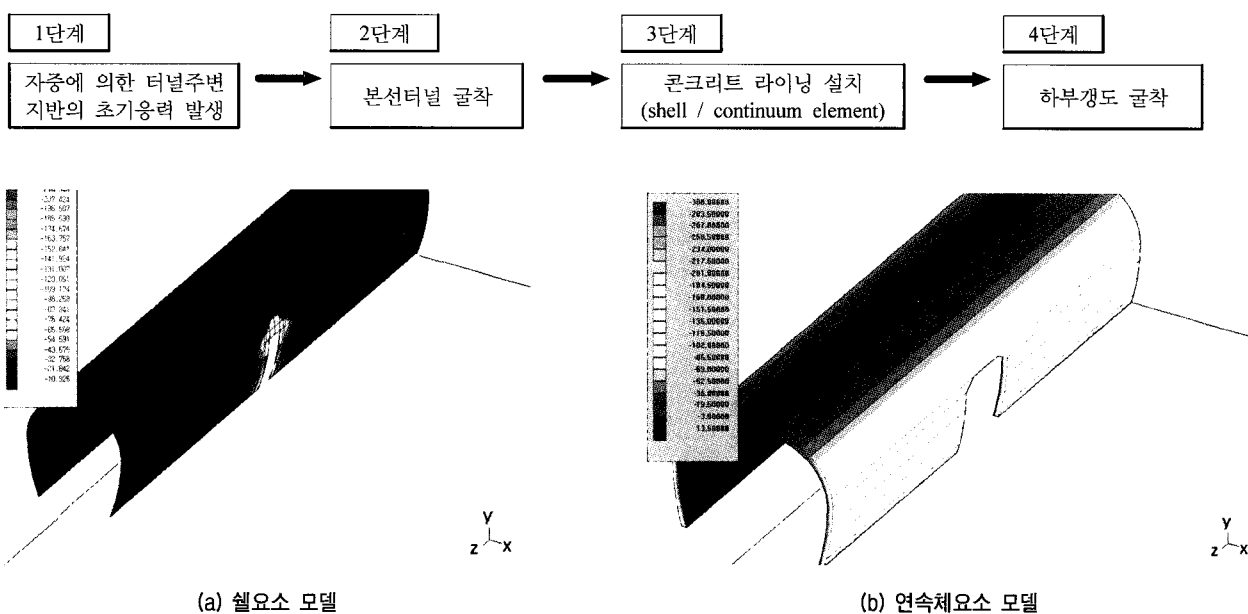


그림 2. 본선터널 라이닝의 하부갱도 굴착 후 요소별 y-축 응력분포 경향

콘크리트 라이닝 안정성 평가 및 수직구의 적정 이격 거리를 제안하고자 매개변수 해석을 수행하였고, 본선 터널과 수직구의 이격거리에 따른 매개변수 즉, 0.5D (약 4m) 및 1D(약 8m)의 거리에 대하여 각각 유한요소 해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 콘크리트 라이닝의 해석모델은 연속체요소를 사용하였으며, 본 해석에서는 유한요소해석 프로그램인 Sigma-3D를 사용하였다.

#### 4.2 해석조건 및 영역

해석에서의 가정사항과 경계조건으로서, 수직구의 단면은 직경 2m로 가정하였고, 하부갱도는 장비의 이동과 버력의 처리 등을 고려하여 [폭(W) × 높이(H) = 4m × 4.5m]의 마제형 단면으로 모델링하였다. 그림 3에는 해석영역 및 조건을 나타내었는데 y-축에는 전체 토피고를 모델링하였고, x-축과 z-축에 대한 해석영역은 기존의 연구결과, 해석요소 수, 수직구 설치방향 등을 고려하여 본선터널 폭(D)을 기준으로 최소 1D 이상을 설정하였다. 그리고 x, z-방향에 연직인 경계면들에서는 각

각 x와 z-방향으로의 변위를 0으로 하였고, y-방향에 연직인 하부의 경계면에서는 y-방향으로의 변위를 0으로 설정하였다.

#### 4.3 지반 및 지보재 물성치

본 해석에서는 현재 운행 중인 철도터널 중 밀양터널 (복선, 1944년 준공)을 대상으로 선정하였으며, 주변 지반은 안산암(안산암질 응회암)이 분포하고 있다. 표 1에는 해석입력 물성치를 나타내었는데, 실제 터널의 모양에 대한 물성치를 구할 수 없었기 때문에 경암반으로 가정하고 대표 물성치를 적용하였다(한국건설기술연구원, 1998). 그리고 콘크리트 라이닝의 물성치는 실제 대구~부산간 철도터널의 90년 이상의 재령을 대표로 고려하였고, 그림 1의 (a)로부터 설계강도의 약 50% 내외로 압축강도가 감소할 것으로 추정하였다. 참고로 본 연구의 모든 탄소성해석에서는 Sigma-3D 프로그램에서 제공하는 반복계산의 수축설정 범위 중 최소값인 3%로 설정하였다. 또한 해석대상 암반의 항복 후 응력-변형을 곡선의 구배를 나타내는 경화파라미터(H)는 실험값 후

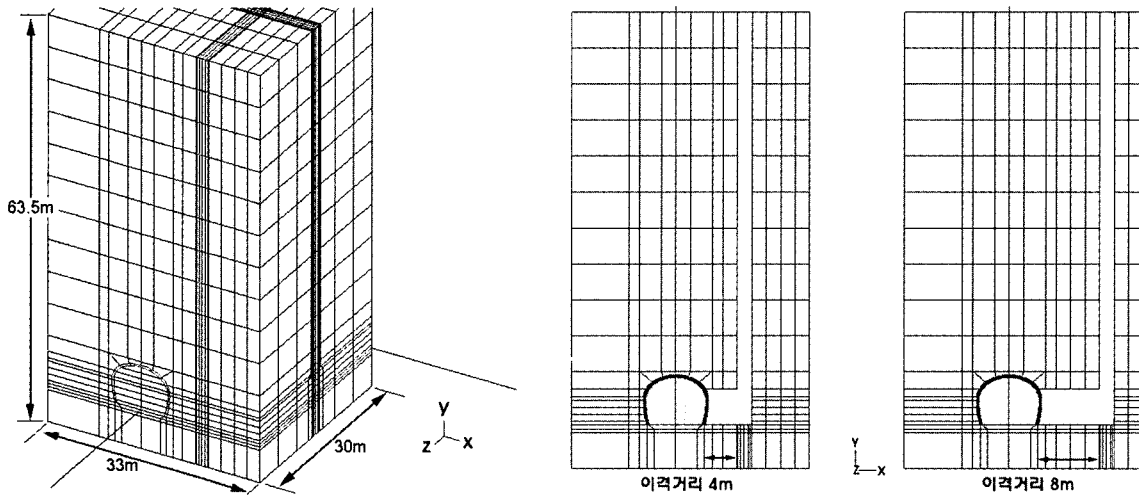


그림 3. FEM 해석에 사용된 경계조건 및 매개변수

표 1. 지반과 지보재의 입력값

	경 암	연암 및 보통암	콘크리트 라이닝	숏크리트(하부갱도)
탄성계수(tonf/m <sup>2</sup> )	1,900,000	500,000	1,060,000	150,000
단위중량(tonf/m <sup>3</sup> )	2.7	2.6	2.4	
포아송비( $\nu$ )	0.25	0.26	0.35	0.3
점착력(tonf/m <sup>2</sup> )	139	60	100	
내부마찰각(°)	42.6	40	35	
두께(m)			0.3	0.15

은 경험값들을 조사하지 못하였기 때문에, 본 해석이 항복점 이전의 탄성영역 내에서 완료되는 것을 가정하여  $H = 0$ 으로 설정하였다.

#### 4.4 해석결과

##### 4.4.1 응력분포 측정 위치

하부갱도의 굴착에 따른 각 단계별([라이닝 타설 : 3 단계] - [라이닝 철거 : 4단계] - [bench cut : 5단계] - [0.5m 굴착 : 6단계] - [4.0m(0.5D) 굴착 : 7단계] - [8.0m(1D) 굴착 : 8단계]) 라이닝의 안정성을 파악하고자, 그림 4에 나타난 바와 같이 해석 검토지점을 선정하였다. 여기서, D는 본선터널의 환산직경을 의미한다.

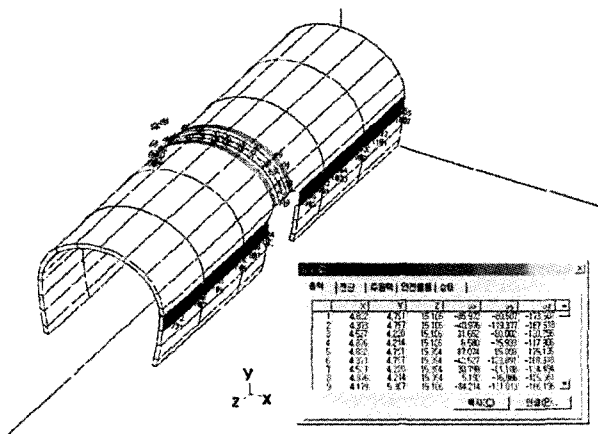


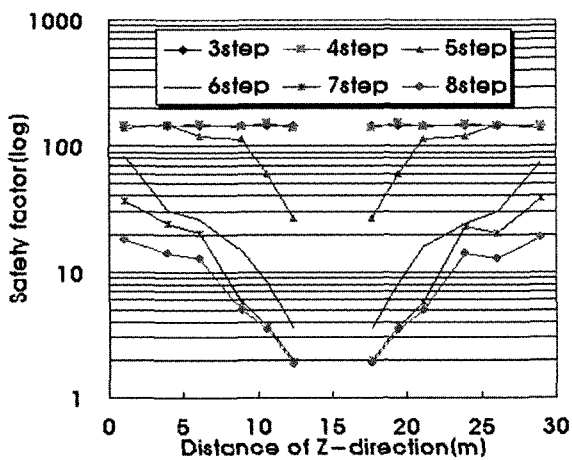
그림 4. 콘크리트 라이닝의 응력 및 안정성 평가를 위한 중횡방향 대상 위치

#### 4.4.2 안전율 및 소성영역

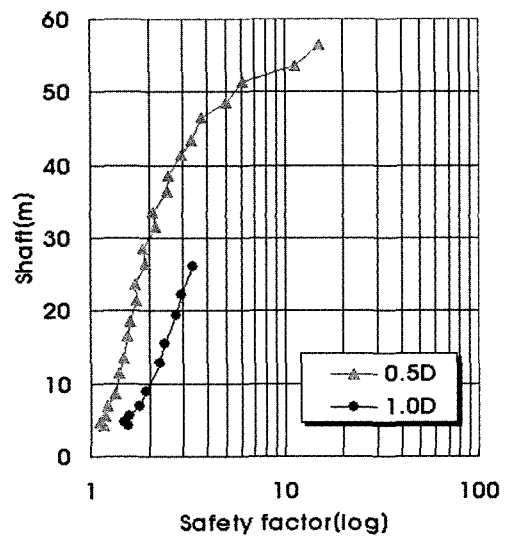
$\sigma - \tau$  평면상의 Mohr's circle에서 최대주응력과 최소주응력을 지름으로 하는 반원이 파괴면(failure envelope)에 접할 때 대상암반은 파괴에 이르게 되는데, 수치해석에서의 안전율(F)은 파괴상태의 반지름(R)과 안정상태의 반지름(r)의 비( $F = R/r$ )로서 표현할 수 있다(Itasca Consulting Group, 1999).

그림 5(a)에는 그림 4의 검토대상 지점에 대하여 해석 단계별 콘크리트 라이닝의 안전율을 나타내었고, (b)에는 본선과 수직구의 이격 거리별 매개변수에 따른 수직구의 벽면에 작용하는 안전율을 나타내었다. (a)에서 보는 바와 같이 라이닝 굴착 이후 단계 7(0.5D까지 굴착)을 경계로 점차 라이닝에 미치는 영향이 감소되고 있으며, 이격거리가 단계 8(1.0D까지 굴착) 이상인 경우 하부갱도의 굴착 및 수직구의 굴착에 의한 영향이 매우 적게 나타났다. 그리고 (b)의 수직구 벽면에서의 안전율은 0.5D의 경우가 1D에 비해 작게 나타났으며, 수직구의 하단에 가까울수록 이격거리에 의한 영향보다는 접촉부에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있었다. 참고로 그림 6(a), (b)에는 라이닝에 작용하는 주응력과 소성영역을 각각 나타내었고, 하부갱도의 천단부에서 인장방향의 최대주응력이 발생하여 라이닝에 소성영역이 발생하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 하부갱도의 지반굴착 시 본선터널 콘크리트 라이닝의 구조적 안정성이 저하될 가능성이 있으므로, 실제 시공 시 열차의 운영을 고려하여 소

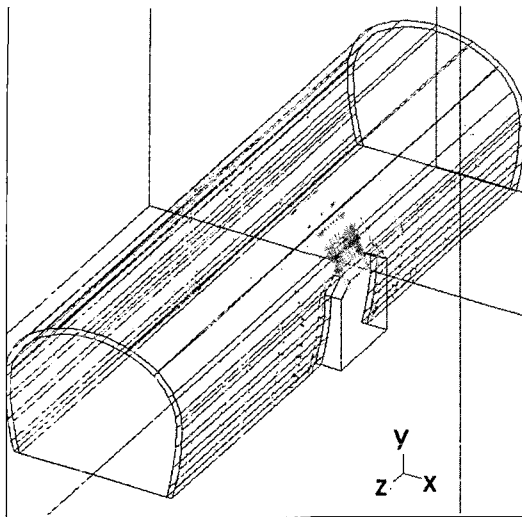


(a) 본선터널 라이닝의 안전율(그림 4 참조)

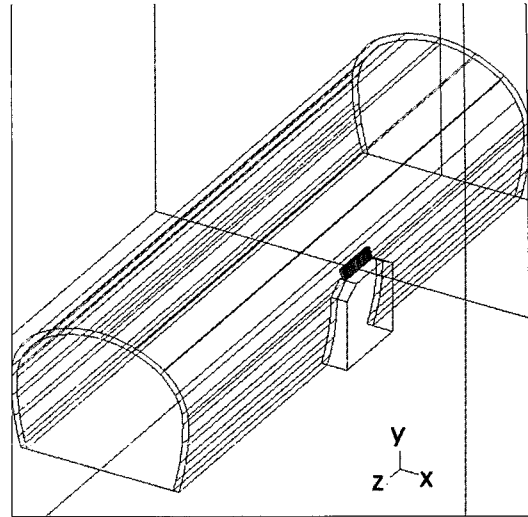


(b) 매개변수 별 수직구 벽면의 안전율

그림 5. 이격거리 0.5D와 1D에 따른 안전율 검토 결과



(a) 주응력도



(b) 소성영역

그림 6. 7단계(0.5D까지 굴착)에서의 콘크리트 라이닝의 역학적 거동

단면의 라이닝 철거시 적절한 보강이 필요할 것으로 사료된다. 그리고 7단계 및 8단계인 하부갱도의 0.5D 이후 1D까지 이격거리가 증가한 경우에도 0.5D의 응력거동과 거의 유사한 경향을 보이고 있으므로 1D까지의 굴착에 의한 영향은 매우 미소한 것으로 판단된다. 따라서 수직구 규모가 작기 때문에 수직구의 굴착 여부보다는 하부갱도의 굴착거리가 주요 검토대상이 될 수 있으며, 본 연구의 검토대상 조건에 한정된 결과이지만, 굴착 초기단계에서의 안전한 보강이 선행된다면 본 터널과 수직구의 설치간격을 최소 0.5D까지 근접시킬 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 검토하고 있는 RBM공법은 버력 반출 페이로터의 작업반경, 하부갱도 내 버력적재, 리머 헤드 조립공간 등을 위하여 수직구 벽면과 본선 벽면까지의 거리가 최소 10m 이상을 유지해야 하므로 실제 시공 상에서도 안전한 시공이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 시험시공을 통한 하부갱도 3차원 계측 및 해석적 검토

### 5.1 시험시공 개요

진술한 내용까지는 통풍공 수직구 굴착을 위한 하부갱도의 굴착시 본선터널의 안정성을 파악하기 위한 것이라면, 본 절에서는 시공절차에 따라 수직구 시공에 따른 하부갱도의 안정성을 시험시공 및 계측결과를 이용하여 파악하고자 한다. 시험시공은 강원도 삼척시 도

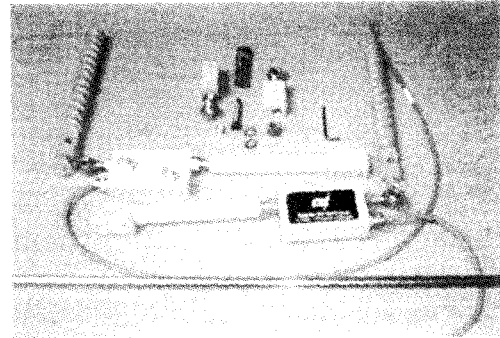
계읍 상덕리에 위치한 (주)경동의 S 광업소에서 수행하였다. 수직구의 길이는 약 100m이며, 순 RBM(Raise Boring Machine)굴착 거리는 상부 작업갱과 하부 작업갱의 높이를 제외한 약 90m이며, 직경 3.05m의 수직구 단면을 굴착하였다. S 광업소 지역의 지질은 주라백악기 신라통의 도계동층과 제4기 충적층(지질자원연구소, 1998)으로 구성되어 있으며, 도계동층은 경상계지층들 중에서 최상위에 속하는 지층으로서 도계동을 중심으로 서남부 일대에 폭넓게 분포하고 있다. 본 시험시공 구간간의 암종은 역암으로서 역암의 기질은 알코스질 또는 응탄질로 갈색 내지 담홍색으로 역(礫)의 입도가 높고 크기가 5cm이내의 것들이다.

#### 5.1.1 하부갱도 3차원 현장계측

본 시험시공에서는 이미 안정화된 하부갱도의 지보재에 수직구를 굴착함에 따라 발생하는 지보재의 응력수준을 측정하기 위하여 그림 7과 같이 슛크리트 응력계와 내공변위계(TPMS, Tunnel Profile Monitoring System)를 설치하였다. 접선방향과 반경방향의 슛크리트 응력계를 좌·우측벽 및 천단부에 3set을 설치하였고, 수직구 굴착에 따른 하부갱도의 내공변위량과 변형거동을 정량적으로 도출하기 위하여 내공변위계를 좌측벽 하단에서 우측벽 하단까지 총 8 set을 설치하였다. 또한, 하부갱도의 축방향 변형거동을 측정하기 위하여 내공측정과 연결하여 천단부에 축방향으로 약 1.5m거리에 1 set의 TPMS(그림 7의 (c) No. 9)를 추가로 설치하였다. 계측기기의 설치 위치는 RBM굴착에 따른 버력의 적재범



(a) 슛크리트 응력계



(b) 내공변위계(TPMS)



(c) 하부갱도에 설치된 내공변위계(TPMS)

그림 7. 하부갱도 거동측정을 위한 계측기 및 설치 전경

위와 반출장비의 작업반경 등을 고려하여 결정하였고, 가능한 수직구와 인접하여 수직구 벽면으로부터 4m 이내 모든 계측기기를 설치하였다.

### 5.1.2 계측결과 및 분석

본 시험시공 현장에 설치된 전단면 내공변위계 및 슛크리트 응력계에 대하여 2001년 9월 27일~11월 22일까지 실시한 결과, 1차 지보재인 슛크리트에 작용한 대표적인 접선방향 및 반경방향 응력은 그림 8(a)에 나타난 천단부의 예와 같다. 그림 8(b)에는 내공변위계 No. 4 센서의 최대 길이 변형량과 최대 기울 정도를 예로서 나타내었고, 각각의 시간에 따른 변위 및 각도의 변화로 표시하였다. 수직구의 굴착을 개시한 10월 4~9일(3m 굴착) 사이에는 응력은 서서히 증가하고 변위는 미세한 변화를 보여주고 있으며, 본격적인 수직구 굴착이 시작된 10월 9일(일일 3m 굴착)부터는 응력과 변위가 비교적 크게 변화하였다가 9.72m(10월 13일)~21.88m(10월 20일)로 수직구 굴착이 진행될수록 수렴하는 양상을 나타내고 있

다. 본 시험시공에서 수행한 하부갱도에서의 슛크리트 응력과 내공변위 최종 계측결과를 그림 9에 종합적으로 표시하였고, 세부적인 분석결과는 다음과 같다.

#### (1) 슛크리트 응력의 분석결과

스�크리트 응력계의 모든 경우에서 반경방향으로는 인장력(-)이 작용하고 있으며, 접선방향으로는 압축력(+)이 발생하는 것으로 측정되었고, 각 부위별 응력의 크기는 천단부와 우측벽부에서 비교적 크게 나타났다. 접선방향의 최대응력은 약  $54.0\text{kgf/cm}^2$  정도로 나타나, 일반적인 슛크리트 응력의 관리기준치인 항복응력( $0.4\sigma_{ck}$ )의 80%를 적용할 때  $0.4 \times 210\text{kgf/cm}^2 \times 0.8 = 67.2\text{kgf/cm}^2$ 으로써 관리기준치 내에 분포하고 있음을 알 수 있다.

#### (2) 내공변위 분석결과

RBM의 상향굴착이 시작된 10월 4일 경에서부터 하부갱도의 변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 변위량은 전체 형상에 비하여 극히 미소하지만 상대적으로 좌측벽보

다 우측 어깨부에서 큰 변위량이 발생되었다. 이러한 경향은 슛크리트 응력의 분석결과에서도 동일한 경향으로 나타났는데 즉, 좌측벽과 천단부의 경우 내부로 축소되는 변형

을 보이며, 우측 어깨부에서는 외부로 밀려 나가는 변형을 보이고 있으나 매우 미미한 정도인 것으로 판단할 수 있다. 그리고 그림 8(c), (d)와 그림 9에서 보는 바와 같이

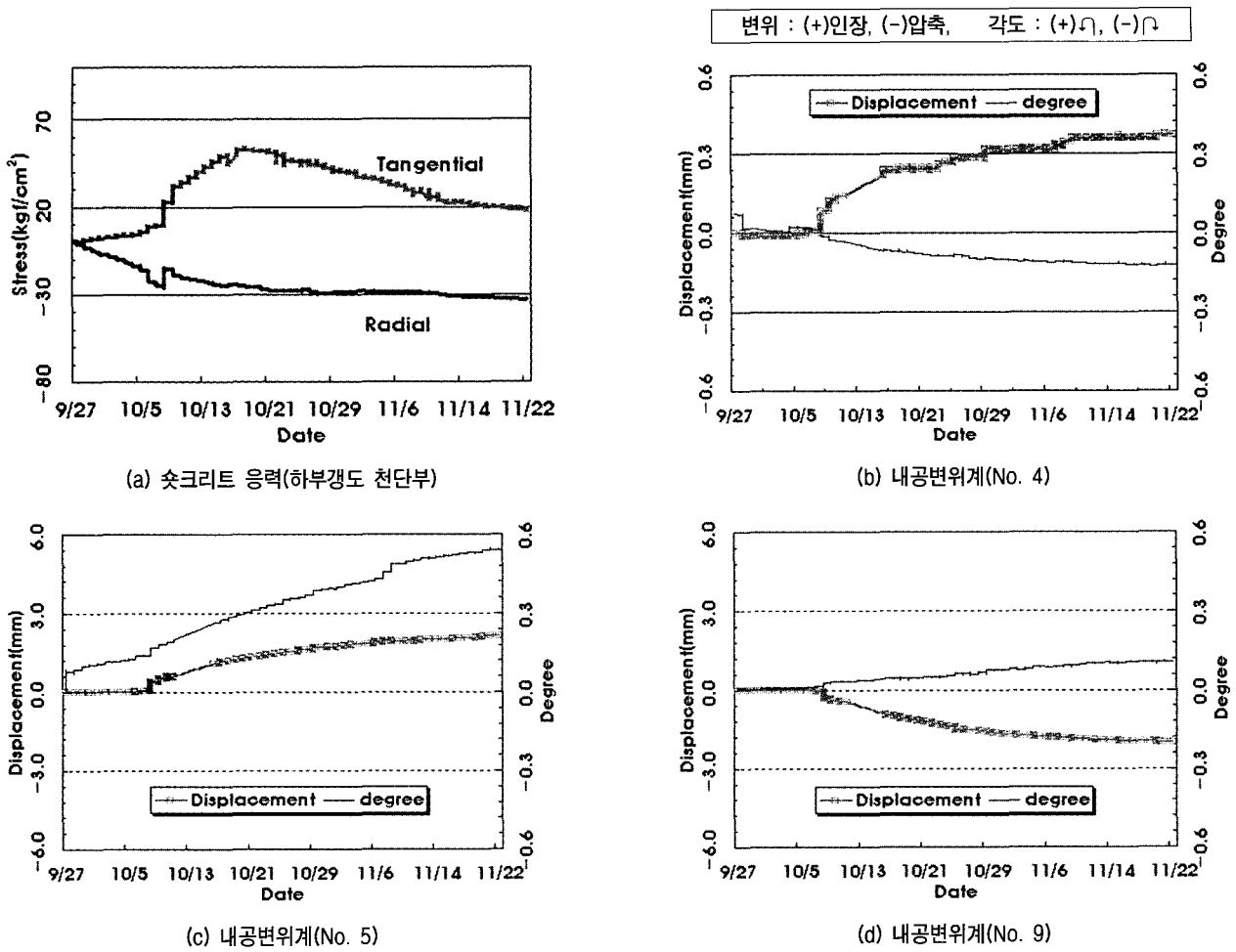


그림 8. 하부갱도에서 측정된 대표적인 슛크리트 응력과 내공변위계 변형량

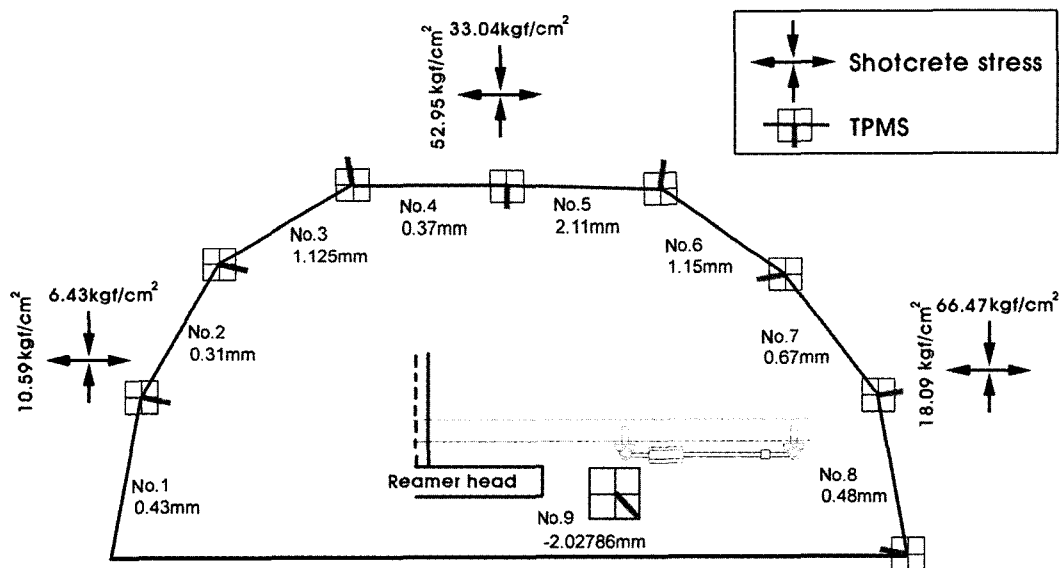


그림 9. 하부갱도에서 측정된 슛크리트 응력 및 내공변위계 계측결과



내공변위계의 최대 신축량은 우측 어깨부에 설치된 No. 5에서 2.11mm로 수축하였으나 시간이 경과할수록 수렴되는 경향을 보이고 있다. 또한 축방향으로 설치된 No. 9의 경우에는 수직구 쪽에서 천단침하의 경향을 나타내고 있으나 변위량이 적고 시간이 경과할수록 수렴되는 경향을 보이고 있다.

## 5.2 시험시공 구간의 3차원 탄소성 유한요소해석

### 5.2.1 해석개요

본 연구에서는 전술한 바와 같이 수직구의 RBM 굴착에 따른 하부갱도의 역학적 거동을 파악하기 위하여 슛크리트 응력 및 내공변위 계측을 수행하였고, 수직구의 굴착에 따른 1차 지보재의 응력이 증가하며 천단부의 침하경향을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실측에 의한 거동과 수치해석적인 거동을 상호 비교하고자 본 절에서는 3D-sigma FEM program을 이용하여 수직구의 3차

원 해석을 수행하였다.

### 5.2.2 해석조건 및 영역

본 해석에서는 그림 10과 같이 수직구의 전체 심도(약 90m)를 모델링하였고, 대상 수직구는 지표로부터 약 200m 하부에 위치하므로 모델의 상부에 상재하중을 540tonf/m<sup>2</sup>로 가하였으며, 수직구의 RBM 굴착 시 RBM의 굴착특성 상 필요한 bit force(thrust)는 수직구 진행방향 막장에 작용시켰고, 그 크기는 Robbins Company에서 1992년에 발행한 “The Raise Boring Handbook”을 참조하여 약 10ton으로 가하였다. 본 현장의 측압계수(Ko)를 파악할 수 없었으므로 Ko = 1.0으로 가정하였고, 아래와 같이 총 20개의 해석단계로 수직구의 굴착을 모델링하였다.

### 5.2.3 입력 물성치 및 경계조건

본 시험시공의 시추조사 결과를 토대로 수직구 전구간의 암반상태를 평가한 결과, 대부분 연암으로 조사되

- 1단계 : 자중에 의한 지중응력발생
- 2단계 : 하부갱도 굴착
- 3단계 : 하부갱도 슛크리트 타설
- 4단계 : 수직갱 reaming 1.4m씩
- 5단계 : 수직갱 reaming 4.0m씩
- .....
- 16단계 : 수직갱 reaming 8.0m씩
- .....
- 20단계 : total 89.6m

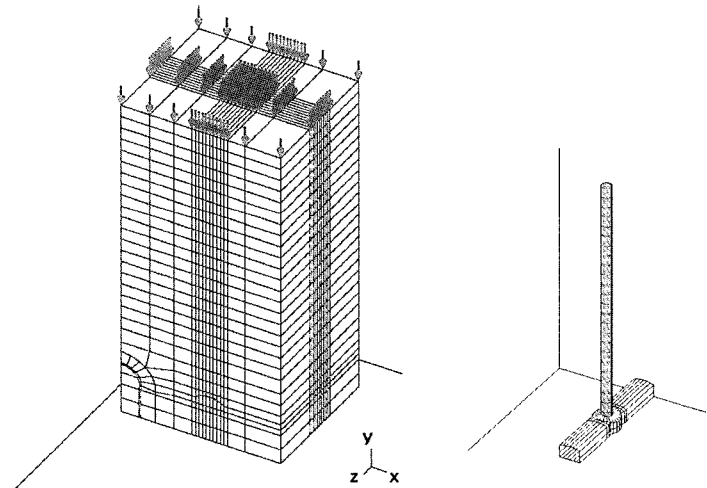


그림 10. 시험시공의 모델링을 위한 3차원 해석모델

표 2. 시험시공 현장의 유한요소해석을 위한 입력 물성치

심도 (m)	수직구 직경 (m)	강섬유보강스프트		
		두께	탄성계수	포아송비
0 - 90	3.05			
하부갱도	4.8(W)×3.5(H)	0.1m	680,000 tonf/m <sup>2</sup>	0.28

심도(m)	지반 종류	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	일축압축강도 (tonf/m <sup>2</sup> )	인장강도 (tonf/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (tonf/m <sup>2</sup> )	포아송 비	점착력 (tonf/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각	측압 계수
0-25	연암	2.70	4,240	619.0	4,820,000	0.2	924	42.4	1.0
25-37	풍화암	2.74	1,768	498.4	1,355,910	0.22	678	15.7	1.0
37-73	연암	2.70	4,240	619.0	4,820,000	0.2	924	42.4	1.0
73-82	풍화암	2.74	1,768	498.4	1,355,910	0.22	678	15.7	1.0
82-90	연암	2.70	4,240	619.0	4,820,000	0.2	924	42.4	1.0

었으나 부분적으로 25~37m, 73~82m 구간에서 풍화암으로 조사되었다. 따라서 본 해석에서는 대표시료에 대한 물리특성시험, 삼축압축시험 결과와 함께 전구간 1.5m 간격으로 실시한 일축 및 인장강도시험결과 등을 이용하여 수치해석에 필요한 입력물성치를 구하였고, 표 2에 나타내었다.

### 5.2.4 해석결과 및 계측결과의 비교 분석

#### (1) 해석결과의 분석

수직구의 RBM굴착에 따른 하부갱도의 역학적 거동을 파악하기 위하여 숏크리트 응력 및 내공변위 계측을 수행한 결과와 수치해석 결과를 상호 비교하여 보았다. 그림 11(a)에는 수직구로부터 하부갱도의 측방향으로 3m 정도 이격된 지점에서의 y방향 숏크리트 응력( $\sigma_y$ )을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 천단에서 우측벽까지를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 터널의 측벽부에서  $\sigma_y$ 가 압축응력으로 작용하고 있으며, 최대값은 우측벽에서 약 5.3tonf/m<sup>2</sup>로 나타났다. 또한 수직구가 상향 굴착된 4단계에서  $\sigma_y$ 는 크게 증가하였고, 이후 6단계(천단에서부터 9.4m)까지 굴착하는 동안 응력이 증가하다가 약 13m 이후부터는 응력이 수렴하는 경향을 보이고 있다. 그림 11(b)에는 동일 지점에서의 y-방향 변위를 나타낸 것이며, 대칭성을 고려하여 좌측벽에서 천단까지를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 y-방향 변위는 하반에서 (+)방향의 용기가 발생되었고, 천단부로 이동할수록 (-)방향의 내공축소 경향을 보이고 있다.

#### (2) 계측결과와의 비교

이상과 같이 수치해석에 의한 거동과 계측에 의한 거

동을 상호 비교하면, 해석으로부터 구한 측벽부의 y방향 숏크리트응력은 동일지점의 계측결과인 최대 접선방향응력 540tonf/m<sup>2</sup>의 1/100로서 매우 낮은 응력수준을 보이고 있다. 하지만 전체적인 경향을 분석하면 5.1.2절 및 그림 11에 나타난 바와 같이 응력변화에 대한 해석결과로부터 수직구 굴착거리가 약 10~15m 범위에서 숏크리트에 작용하는 응력이 수렴하고 있고, 계측결과에서는 약 10~20m 범위에서 수렴하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과로부터 지반상태, 수직구 및 하부갱도의 규모 등에 따라 차이를 보이겠지만, 본 시험시공현장과 같이 일반적인 수직구 및 하부갱도의 규모에서는 수직 상향굴착에 따른 하부갱도의 변형거동은 수직구 굴착거리가 최대 20m 정도에서 수렴하는 것으로 추정할 수 있다. 그리고 해석결과와 계측결과가 절대적인 변위량에서도 차이를 보이고 있으나, 해석결과로부터 수직구 굴착에 따라서 인근의 하부갱도 천단부가 침하현상을 보이고 있으며, 이는 실제 내공변위를 측정한 결과와 일치하는 경향임을 알 수 있었다.

### 6. 수직구의 확대굴착 시 심도별 계측결과 및 해석적 비교

지금까지는 재래식 철도의 통풍공 수직구 굴착시 본 선터널과 하부갱도에 대한 안정성 및 거동특성을 해석적 방법과 계측결과로부터 검증하였다. 본 절에서는 수직구 굴착시 수직구 자체의 안정성 및 심도별 거동을 파악하고자 한다. 그러나 본 시험시공에서는 RBM 굴착 특성상 수직구 내부에 계측기를 설치할 수 없는 등의 어려움으로 RBM으로 pilot을 굴착후 하향발파공법으로 확공한 D터널 수직구를 모델로 하여 다음과 같은 연구

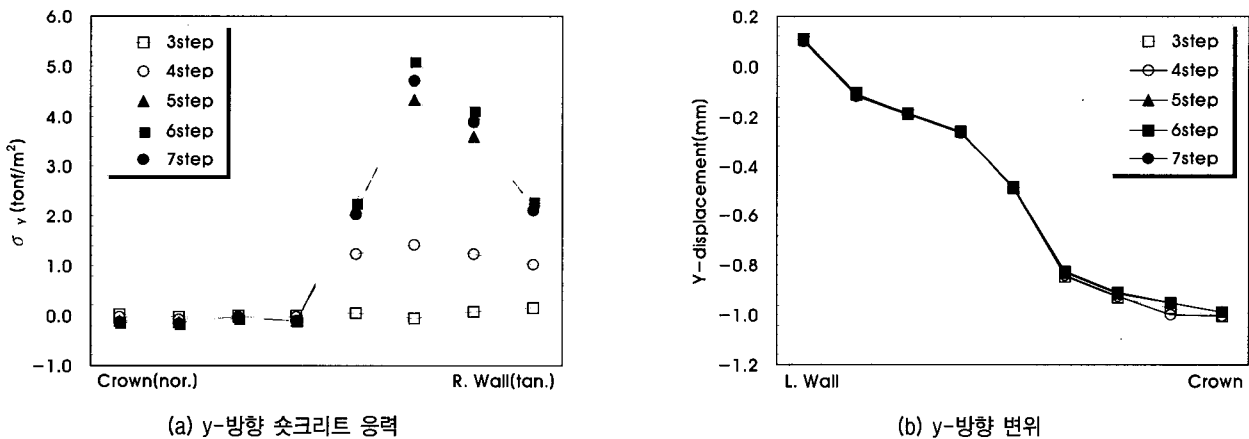


그림 11. 하부갱도의 FEM 해석결과

를 수행하였다. 먼저, 국내 D터널 환기용 수직구의 하향 굴착시 측정된 일상계측 결과(한국도로공사, 1999)를 심도별로 정리하였고, D터널의 관련자료를 토대로 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 그러나 D터널의 수직구 주변지반에 대한 자료의 한계로 인하여, 본 연구에서는 계측 및 해석결과에 대한 정성적 분석을 위주로 수직구의 심도별 거동특성을 분석하였다.

### 6.1 해석조건 및 영역

D터널 수직구는 RBM으로 pilot를 굴착한 이후에 하향발파공법으로 직경 8.4m를 확공한 사례이며, 본 해석에서는 그림 12에 나타난 바와 같이 모델링하여 하향굴착하는 굴착공정을 모사하였다(단, pilot 굴착은 생략). 본 해석의 상부(y-축) 영역은 수직구 연장 약 200m 중 100m를 모델로 작성하였고, 상부의 잔여구간은 심도와 단위중량을 고려하여 상재하중을 가하였다. x-축과 z-축에 대한 해석영역은 기존의 연구결과를 토대로 각각 해석에 영향을 미치지 않는 범위로 설정하였다. 그리고 측

압계수(Ko)는 지질조사보고서의 수압파쇄 시험결과와 국내외에서 적용하는 범위를 참조하여 1.5로 가정하였다. D터널의 수직구 시공공정을 고려한 해석 단계별 순서는 아래와 같다.

### 6.2 입력 물성치 및 경계조건

본 해석의 입력 물성치는 D터널 수직구 주변에서 수직 시추한 지질조사 자료를 토대로 입력하였고, 수직구 심도별로 연암, 경암1, 경암2의 3개 층으로 구분할 수 있다. 본 해석에서는 전술한 바와 같이 전체 수직구 심도 중에서 100~200m를 모델링 하였고, 이 구간의 대부분이 경암 1과 경암 2로 구성되어 있기 때문에 대상지반의 대표 물성치를 표 3의 경암 1로 선정하였다. 경암 1의 일축압축강도는  $1,980\text{kgf/cm}^2$ 으로서 극경암에 속하며, 지질조사보고서 상의 내부마찰각은  $59.3^\circ$ 로서 수치 해석 상 수렴이 불가하므로 국내외 해석자료를 참조하여  $45^\circ$ 로 입력하였다.

- 1 단계 : 자중
- 2 단계 : 환기통로굴착
- 3 단계 : 환기통로 슛크리트 타설
- 4 단계 : 수직구 하향 4m 굴착
- .....
- 8 단계 : 수직구 하향 굴착완료  
+ 슛크리트 타설
- 9 단계 : 잔여구간 슛크리트 타설

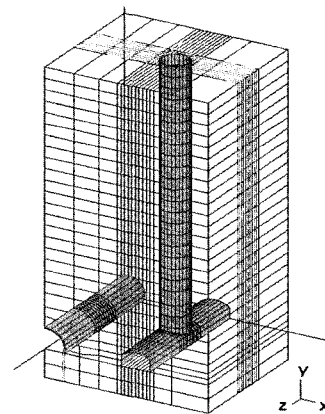


그림 12. 국내 D터널 수직구의 3차원 유한요소해석 모델

표 3. D터널 유한요소해석을 위한 입력 물성치

심도(m)	지반	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	일축압축강도 (tonf/m <sup>2</sup> )	탄성계수 (tonf/m <sup>2</sup> )	포아송비	점착력 (tonf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	축압 계수
15- 24	연암	2.10		2,580,000	0.30	10	30	
24-185	경암1	2.67	19,800	6,450,000	0.257	2,480	59.3	1.5
185-197	경암2	2.66	13,700	4,620,000	0.229	2,070	56.5	1.7

심도(m)	수직구 직경 (m)	강섬유보강스�크리트			목볼트		
		두께(m)	탄성계수 (tonf/m <sup>2</sup> )	포아송비	반경 (m)	길이(m)	탄성계수 (tonf/m <sup>2</sup> )
15- 24	8.4	0.12	680,000	0.28	0.0125	4	21,000,000
24-185		0.08				3	
185-197		0.12				4	

### 6.3 해석결과 및 계측결과와의 비교 분석

D터널 수직구의 계측기기 설치 위치와 계측값을 조사하여 표 4에 나타내었고, 수직구 심도별 내공변위 계측은 15단면에서 각 단면 당 2측선 그리고 쏫크리트 응력계는 4단면에 각각 2개씩 설치하였다. 계측결과에서 보는 바와 같이 최대 내공변위가 100m 심도 부근에서 -3.7mm로 나타났지만, 심도에 따른 내공변위의 증가나 혹은 감소 등의 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 또한 쏫크리트의 최대 반경방향 응력이 1.3kgf/cm<sup>2</sup>로서 쏫크리트의 허용응력(80kgf/cm<sup>2</sup>)에 비해 매우 적게 나타났으며, 마찬가지로 각 심도의 영향 및 축압계수의 영향이 전혀 나타나지 않았다.

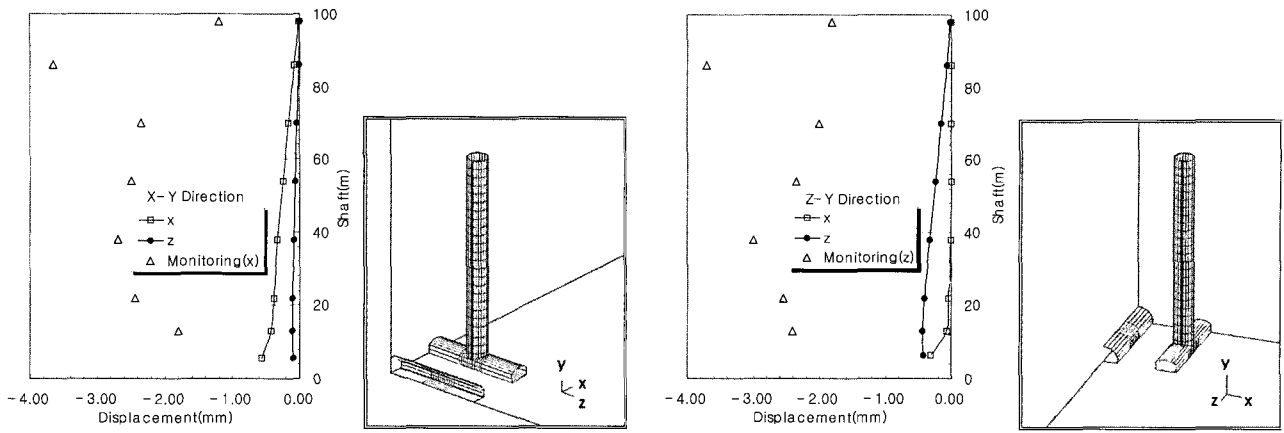
그림 13과 그림 14에는 D터널의 수치해석 결과와 표 4의 일상계측 결과를 같은 그래프에 도시하였다. 그림 13의 수치해석결과는 분석대상 지점에서의 반경방향 변위와 접선방향 변위의 경향을 나타내고 있으며, 계측

결과는 반경방향 변위를 의미하고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수치해석 상에서는 심도에 따라 내공변위가 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, 전술한 바와 같이 일상계측에서는 심도에 의한 경향이 나타나지 않았다. 그리고 그림 14에는 D터널 수직구의 수치해석 및 일상계측으로부터 구한 쏫크리트 접선방향응력을 각각 나타내었는데, 대표계측에서 5개 측점에 한하여 실시하였지만, 전반적으로 심도에 따른 경향이 나타나지 않았다. 그러나 수치해석 결과에서는 해석단계에 따른 쏫크리트 접합지점에서의 갑작스런 응력증가 경향을 제외하면, 접선방향응력이 미소하나마 심도에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같이 수평터널과는 상이하게 수직구의 3차원적 해석결과를 이용하여 설계 시의 지보재에 대한 안정성 평가를 수행하는 것은 다소 무리인 것으로 판단되며, 수직방향에 대한 거동을 해석적인 방법으로 검증하기 위해서는 지표면에서의 수평방향 응력, 변위성분을 표현

표 4. D터널 수직구의 심도에 따른 쏫크리트 응력 및 내공변위 계측 결과

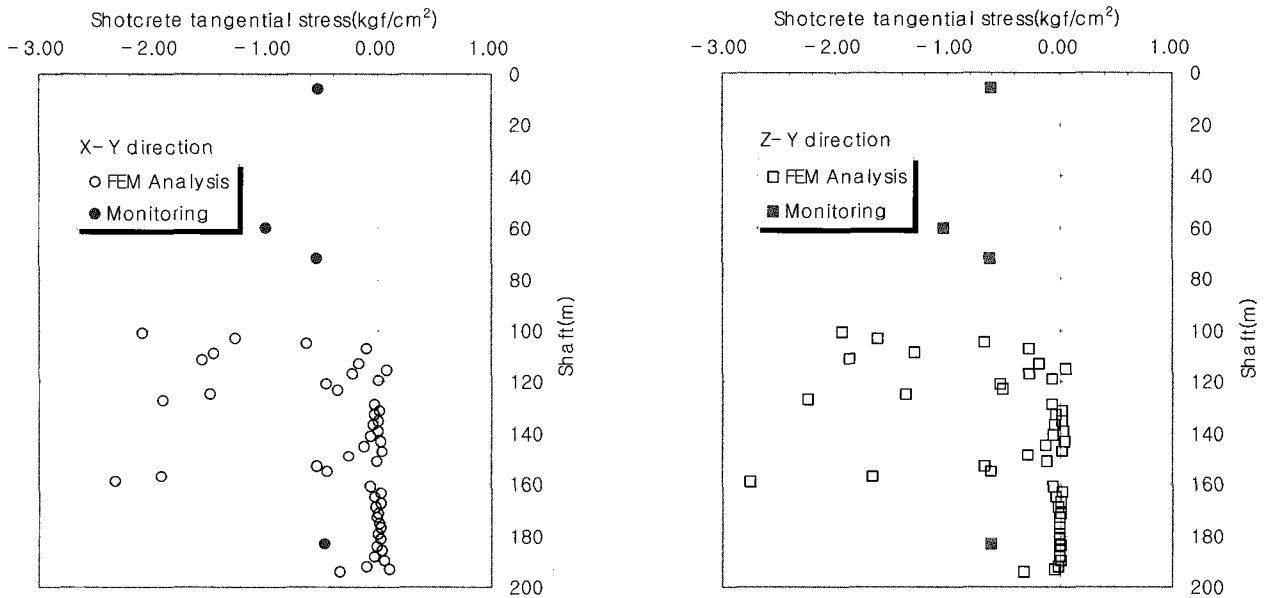
계측종류	심도(m)		최종변위(최대변위)		비 고
			H1	H2	
내공변위 (mm)	5		-3.1(-3.15)	-3.25	- ( )는 최대변위임. - 관리기준치 : 15~20mm
	12		-2.40	-2.05(-2.10)	
	17		-2.20	-2.50	
	18.1		-2.40(-2.45)	-2.40(-2.45)	
	34		-3.10	-2.45	
	50.1		-2.85(-2.90)	-0.85(-0.90)	
	66.1		-1.80(-1.85)	-1.55	
	82.1		-2.70	-3.65(-3.70)	
	98.1		-1.80(-1.85)	-1.20(-1.25)	
	114.1		-3.70	-3.65(-3.70)	
	130.1		-2.00	-2.35	
	146.1		-2.35	-2.50	
	162.1		-3.00	-2.70	
	178.1		-2.55(-2.60)	-2.45	
184.1		-2.40	-1.80		
	심도(m)		최종응력(최대응력)		비 고
			반경방향	접선방향	
쏫크리트 응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	6	S-1	0.69	0.56	$\sigma_{ca} = 0.4\sigma_{ck}(200\text{kgf/cm}^2)$ $= 80\text{kgf/cm}^2$
		S-2	0.63	0.52	
	60	S-1	0.74(0.83)	0.99	
		S-2	1.31	0.97(1.03)	
	72	S-1	0.52	0.54	
		S-2	0.41	0.63	
	184	S-1	0.31(0.61)	0.57	
		S-2	0.52	0.49	



(a) x-y 방향

(b) z-y 방향

그림 13. D터널 수직구의 실제계측 및 수치해석 결과에 의한 내공변위 비교



(a) x-y 방향

(b) z-y 방향

그림 14. D터널 수직구의 실제계측 및 수치해석 결과에 의한 슛크리트 응

할 수 있는 적정기법 연구가 요구된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 장기재령의 운영 중인 철도터널에 통풍공 수직구를 건설함에 따라 발생될 수 있는 역학적 거동들을 파악하기 위한 목적으로, 『1. 본선터널의 안정성 평가』, 『2. 하부궤도의 3차원적 거동분석』, 『3. 수직구의 심도에 따른 역학적 거동분석』 등 3개의 독립적인 요소기술들에 대하여 실험적, 해석적 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수직구 시공에 따른 본선터널의 안정성 파악을 위한 유한요소해석에서, 재래식 철도터널의 콘크리트 라이닝에 대한 강도특성을 파악한 결과는 터널의 재령이 증가함에 따라서 라이닝의 일축압축강도가  $q_u = 696.39 \times t^{-0.1498}$ 의 관계를 가지며 저하되는 경향을 나타내었다. 이러한 경향을 참조하여 탄소성 유한요소해석에 필요한 장기재령의 콘크리트 라이닝의 물성치를 추정하였고, 철도터널 본선과 수직구와의 거리를 파라메타로 하여 본선터널 콘크리트 라이닝 및 수직구 벽면에서의 안전율을 분석하여 보았다. 그 결과 본 연구의 검토대상 조건에 한정된 결과이지만, 본선터널에 영향을 미치는 최소 이격거리는

수직구 굴착보다는 하부갱도의 굴착에 큰 영향을 받았으며, 최소한 본선터널 직경의 0.5D까지로 볼 수 있었다. 그리고 1D에서는 하부갱도 및 수직구의 굴착에 의한 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

- (2) 수직구 굴착에 따른 하부 작업갱의 지보재 응력 및 내공변위를 현장계측 및 유한요소해석을 통하여 검토한 결과, 정량적인 비교에 있어서는 많은 차이를 보이고 있으나 변형거동은 상호 유사하게 나타났다. 또한 수직구의 상향 굴착거리가 약 15m 정도에 위치할 때 하부 작업갱의 응력 및 변형이 모두 수렴하는 경향을 보였다. 따라서 본 연구대상의 지반조건에 한정된 결과이지만, 수직구 굴착에 의한 하부 작업갱의 영향범위가 약 10~20m임을 알 수 있었다.
- (3) 수직구의 심도별 실측 지반거동과 3차원 유한요소 해석 결과는 매우 상이한 거동을 보였다. 특히, 일관성있는 심도별 변형거동이 나타난 해석결과에 비하여 예측치는 경향성을 파악할 수 없을 정도로 산발적인 변화를 나타냈다. 따라서 수직방향에 대한 거동을 해석적인 방법으로 검증하기 위해서는 지표면에서의 수평방향 응력, 변위성분을 표현할 수 있는 적정기법 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부, 국립건설시험소(1998), 콘크리트 내구성에 관한 조사 연구, 정부간행물 42000-58050-57-805, pp.26-38.
2. 장은식, 오인석(2000), "고속도로 터널의 수직갱, 사갱 설계 및 시공", 터널기술, Vol.2, No.1, pp.42-52.
3. 한국건설기술연구원(1998), 국내 터널 설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구, 연구보고서, pp.55-80.
4. 한국건설기술연구원(1999), 도로설계편람-터널편, 건설교통부.
5. 한국건설기술연구원(2001), 철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발, 99산학연연구개발사업 최종보고서.
6. 한국도로공사(1999), "둔내터널 설계와 시공", 터널기술, Vol.1, No.2, pp.134-148.
7. 한국자원연구소(1998), 1:250,000 삼척지질도폭 설명서, KR-98(S)-1, 과학기술.
8. Burri, J., and Zumsteg, F.(1997), "Airshafts for the alleviation of pressure waves in tunnels of the new Swiss Rail 2000", *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp.289-290.
9. Itasca Consulting Group, Inc.(1999), *FLAC manual* Ver. 3.4.
10. The Robbins Company(1992), *The Raise Boring Handbook*, Washington.
11. U.S. Army Corps(1997), *Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock*, Engineering Manual 1110-2-2901, pp.C-1~C-14.
12. Wolf, W. B., and Demmenie, E.(1997), "A New Test Facility for the Study of Interacting Pressure Waves and Their Reduction in Tunnels for High-speed Trains", *Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy: 6-8 October, pp.301-317.

(접수일자 2003. 3. 18, 심사완료일 2003. 10. 8)