

## 인천도시철도 213공구 터널 일방향 관통 시공사례



**장석부**  
삼성물산(주)  
토목엔지니어링센터  
지하토목팀 부장



**류주열**  
삼성물산(주)  
토목엔지니어링센터  
지하토목팀 과장



**최고니**  
삼성물산(주)  
토목엔지니어링센터  
지하토목팀 주임



**이승복**  
삼성물산(주)  
토목엔지니어링센터  
지하토목팀 부장



**조경래**  
삼성물산(주)  
인천도시철도  
213공구 현장소장



**추영수**  
삼성물산(주)  
인천도시철도  
213공구 공사팀장

### 1. 개요

인천광역시에는 주변 대규모 개발사업 및 2014년 아시안 게임 개최에 따른 교통수요 증가로 도시내 뿐만 아니라 도시간 교통문제가 대두되고 있다. 인천도시철도 2호선은 이러한 교통난 해소와 시 외곽지역개발을 통한 도시균형발전 등을 도모하기 위해 계획되어 현재 시공중인 노선으로 당 현장인 213공구는 인천광역시 남동구 구월동, 만수동 일원을 통과하는 약 1,730m 구간이다.

당 구간은 본선개착(14m), 본선터널(1,585.6m), 본선 환기구 2개소(38.6m), 정거장(91.8m, 환기구2개소 포함)으로 구성되어 있으며(그림 1 참조), 본선환기구 2개소를 작업구로 활용하도록 계획되었다. 본 공구에 포함된 223 정거장에서는 일반적인 터널 관통 방법인 양방향 관통으로 굴착하였으나, 공구경계인 당 현장 시점부는 타사 공구로써 당사 터널갱구 공사가 곤란하여 불가피하게 일방향 관통을 계획하였다. 따라서 본 고에서는 적용사례가 적은 복선터널 일방향 관통에 대한 안정성 검토와 실제 시공결과에 대하여 소개하고자 한다.

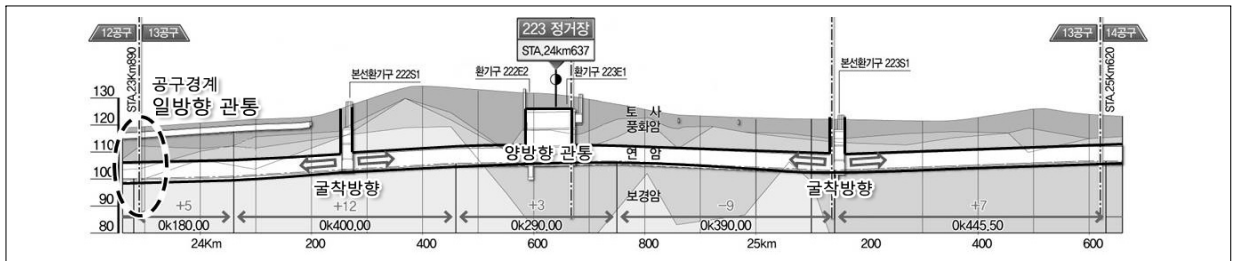


그림 1. 과업현황 종단면도

## 2. 일방향 관통구간 현황

### 2.1 지반조건

본선환기구 222S1에서 공구 시점부로 굴착되는 구간인 일방향 관통구간은 BH-1, BH-2 시추공 사이에 위치하며, 토사층, 풍화암, 연암, 보통암으로 이루어진 4개의 층이 약 8~9°사이로 경사져 있으며 각 지층별 물성치는 표 1과 같다.

일방향 관통구간 부근의 종단 지층구조를 살펴보면 터

널 상부 토피는 약 12.9m로 주로 토사층과 연암으로 이루어져 있으며 터널 굴착방향을 따라 풍화암층이 점점 두꺼워지는 경향을 나타내며, 갱구부에서 약 20m 이격된 구간에서는 터널이 풍화암과 연암의 경계면을 통과한다. 일방향 관통구간의 종방향 상부 지반 분포도는 그림 2와 같다.

### 2.2 갱구부 보강 현황

현장 시점부인 갱구부에는 갱문구조물과 갱구부 보강

표 1. 지층별 물성치

구분	토사	풍화암	연암	보통암
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	20	20	23	24
점착력(kPa)	0	33	200	600
내부마찰각(°)	32	32	34	37
변형계수(MPa)	20	300	800	3,500
포아송비( $\nu$ )	0.35	0.30	0.27	0.25

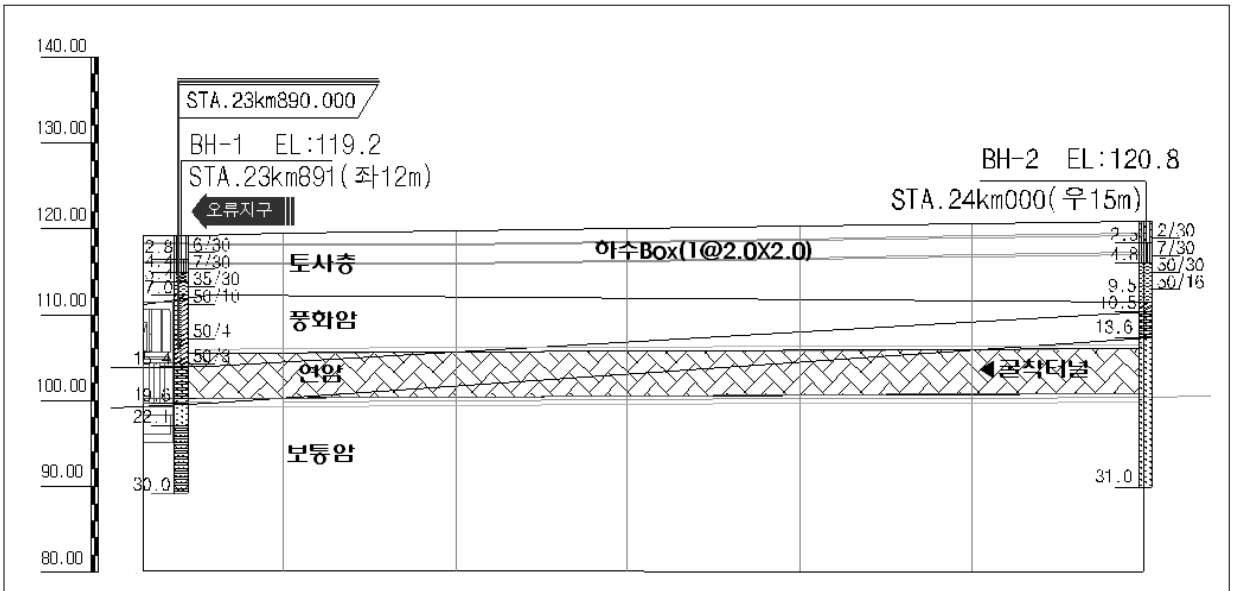


그림 2. 일방향 관통구간 종단면도

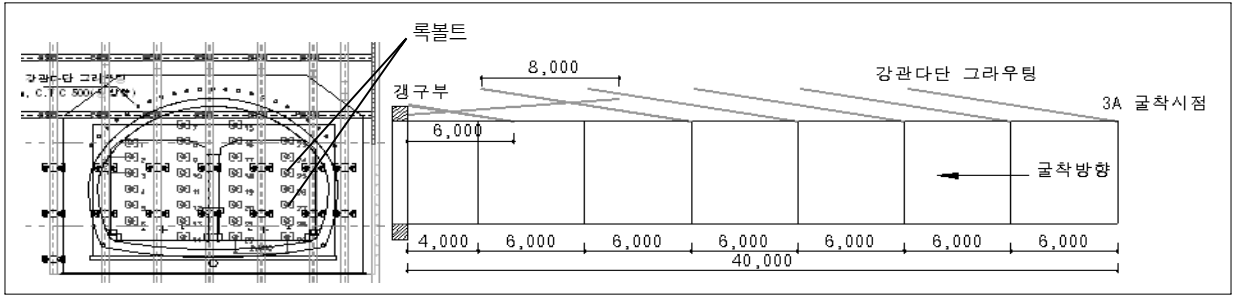


그림 3. 갱구부 보강 현황

### 강관다단 그라우팅

∅ 60.5, L=12m, C.T.C 500(횡방향)

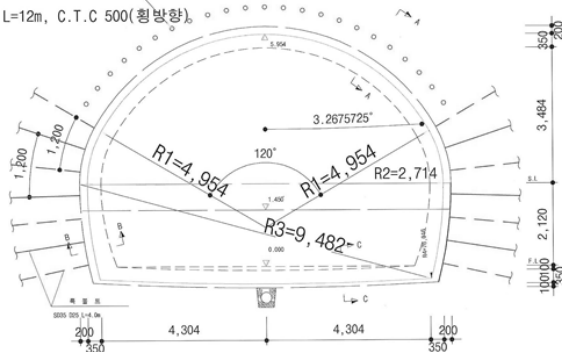


그림 4. 일방향 관통구간 지보패턴(PD-3A)

굴착방법	상·하 반단면 굴착	
굴진장	1.0m	
숏크리트	20cm(강섬유)	
목볼트	길이	4.0m
	횡간격	1.2m
	종간격	1.0m
보조공법	강관다단 그라우팅 (상부 120°)	
콘크리트 라이닝	35cm(철근보강)	

용 강관다단 그라우팅을 계획하여 시공하였으며, 강관의 단부는 갱문구조물에 근입되어 확실하게 고정될 수 있도록 하였다. 강관 직경은 60.5mm, 길이는 12m, C.T.C 500mm이며 또한 막장 보강용 목볼트(29본)를 타설하였다. 갱구부 보강 현황은 그림 3과 같다.

## 2.3 지보패턴 현황

일방향 관통구간의 지보패턴은 PD-3A로 굴착방법은 상·하반 분할 굴착, 굴진장은 1.0m이며, 천단부 120°에 강관다단 그라우팅을 계획한 패턴이다. 그림 4에 상세한 지보패턴을 나타냈다.

## 3. 일방향 관통 갱구부 안정성 검토

### 3.1 해석개요

터널 관통부에 대한 해석적 검토를 수행함에 있어 2차원 해석으로는 한계가 있으므로 복선터널 일방향 관통에 대한 안정성을 검토하기 위하여 범용 3차원 해석 프로그램인 Flac 3D를 이용하여 해석을 실시하였다. 해석모델은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 모델을 이용하였으며 숏크리트는 Shell요소, 목볼트는 Cable요소, 강관은 Beam요소로 각각 모델링을 실시하였다. 해석에 사용된 물성치는 표2와 같다. 해석요소 및 모델영역, 축점

표 2. 지보재 물성치

구분	요소유형	탄성계수(GPa)	단면적(m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트(m <sup>2</sup> )
연성 슛크리트	Shell	15	0.2	-
강성 슛크리트	Shell	50	0.2	-
강관	Beam	200	$7.1 \times 10^{-4}$	$2.85 \times 10^{-7}$
록볼트	Cable	200	$5.0 \times 10^{-4}$	-

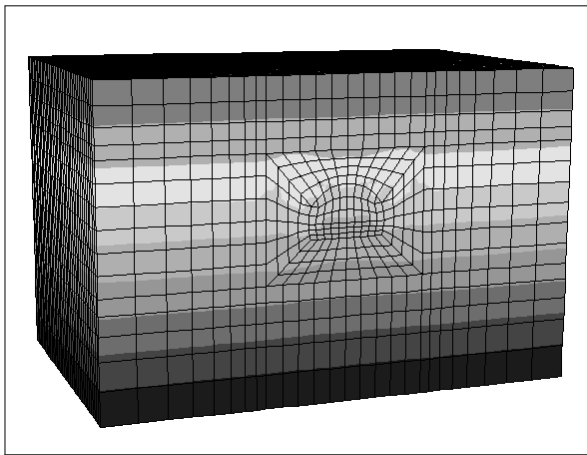


그림 5. 해석 모델링도

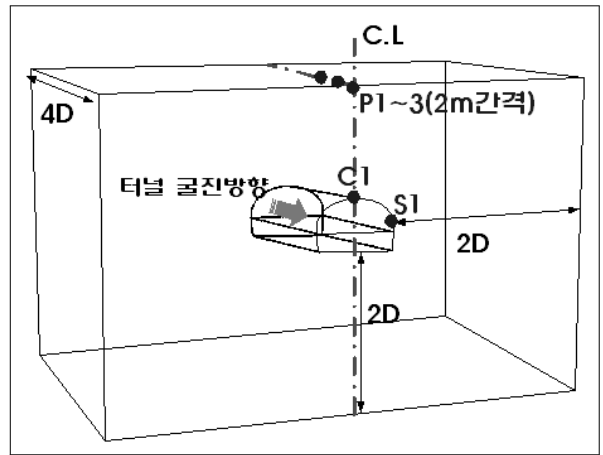


그림 6. 모델영역 및 측정위치

위치는 각각 그림 5 및 그림 6과 같다.

스�크리트의 경우 휨저항 부재로 허용 휨 압축응력은 설계기준강도의 40%를 적용하여 8.4MPa이며 록볼트 허용 축력은 극한강도의 50%를 적용하여 86kN, 강관의 경우 허용응력 210MPa를 적용하였다.

### 3.2 해석순서

해석순서는 우선 굴착이전 단계인 원지반 상태를 초기 응력을 발생시켜 구현하고 구간별 지보패턴 및 실제 시공 순서를 고려하여 벤치길이 10m 이상 확보하고 상반을 1m씩 굴착하여 먼저 관통한 후, 하반을 1m씩 굴착하여 관통을 하도록 해석을 실시하였다. 상세한 해석과정은 표 3과 같다.

### 3.3 해석결과

해석결과 천단·내공변위 및 지표침하 모두 터널상반 관통시 가장 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 최대 지보재 응력도 상반관통 이후에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 상반 관통 단계별 변위 및 지보재 응력 발생경향은 그림 7 및 그림 8과 같다.

- (1) 최대 천단변위는 9.97mm로 하반 굴착시(하반 FD-7m) 발생했으나 상반 관통 후 증가분은 약 0.16 mm 이내로 상반 관통 후 수렴하는 양상을 나타냈다.
- (2) 최대 지표침하는 3.55mm로 하반 관통시 발생했으나 상반 관통 후 증가분은 약 0.03mm 이내로 상반 관통 후 수렴하는 양상을 나타냈다.

표 3. 해석순서

해석단계	내용	비고
0	초기응력 발생	축압계수 = 1.0
1	공구 시점부(관통부) 강관다단 그라우팅 및 막장 록볼트 시공 (관통부 이외 강관다단은 시공단계를 고려하여 모델링)	
2	상반 1m 굴착	터널 상반 관통시까지 반복
3	다음 상반 1m 굴착 굴착된 1단계 1m 구간 연성숏크리트 + 록볼트 타설	
4	다음 상반 1m 굴착 지보가 설치된 1단계 1m 구간 강성숏크리트 굴착된 2단계 1m 구간 연성숏크리트 + 록볼트 타설	
5	하반 1m 굴착	
6	다음 하반 1m 굴착 굴착된 1단계 1m 구간 연성숏크리트 + 록볼트 타설	터널 하반 관통시까지 반복
7	다음 하반 1m 굴착 지보가 설치된 1단계 1m 구간 강성숏크리트 굴착된 2단계 1m 구간 연성숏크리트 + 록볼트 타설	

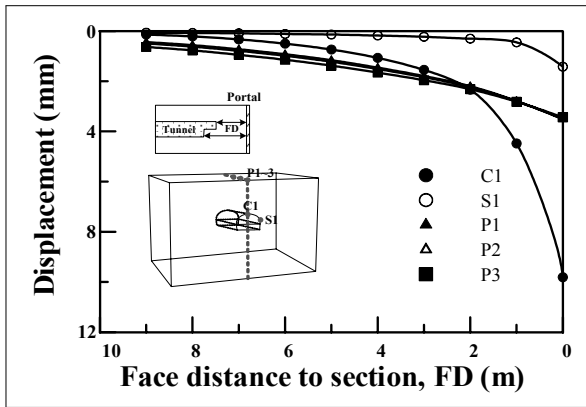


그림 7. 상반 관통 변위양상

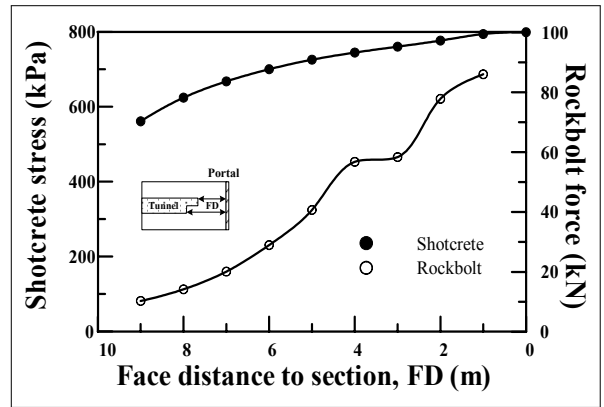


그림 8. 상반 관통 지보재 응력양상

(3) 최대 강관 모멘트는  $13.23 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{m}$ 로 상반 관통 3m 이전(상반 FD=3m)에 발생했으나 상반 관통 후에는 약  $7.02 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{m}$ 로 수렴하는 양상을 나타냈다.

(4) 최대 숏크리트 응력과 록볼트 축력은 각각 827.9 kPa, 86kN으로 숏크리트 최대응력은 하반 관통

시, 록볼트 최대축력은 상반 관통시 발생하였다. 상반관통 이후 하반에 설치된 록볼트의 경우 최대 28.85kN 이내로 상반 관통 후 5.1kN이 증가하였으며 상반 관통 후 숏크리트 응력 증가분은 28.8 kPa로 상반 관통 후 지보재 응력 변화는 미비한 것으로 판단하였다.

## 4. 해석결과 및 계측결과 비교

### 4.1 계측현황

인천지하철 213공구 일방향 관통 공사는 굴진장 1.0m, 1일 1막장 굴착을 진행하여 상반 관통 20일 후 하반이 관통되었다. 터널 및 지표 등 인접 구조물의 안정성 확인을 위한 계측이 계획되었으며, 각 계측은 상반 관통 이전부터 실시하여 계측치가 수렴시까지 실시되었다. 계측항목

은 터널내 변위(천단·내공) 및 지보재 응력(숏크리트 응력·록볼트 축력)과 터널의 지중 변위·경사 및 지표침하 등을 계획 및 실측하였다.

그림 9와 같이 해석 결과와 유사하게 상반 관통 이후에는 변위가 수렴하는 양상을 나타냈으며, 천단침하 최대 3mm, 내공변위 최대 5mm가 발생하여 모두 1차 관리기준 15mm 이내임을 확인할 수 있었다. 지표침하의 경우 해석결과보다 큰 최대 7mm의 변위가 발생하였으며, 이는 터널굴착에 의한 지하수위저하가 지표침하를 더 크게

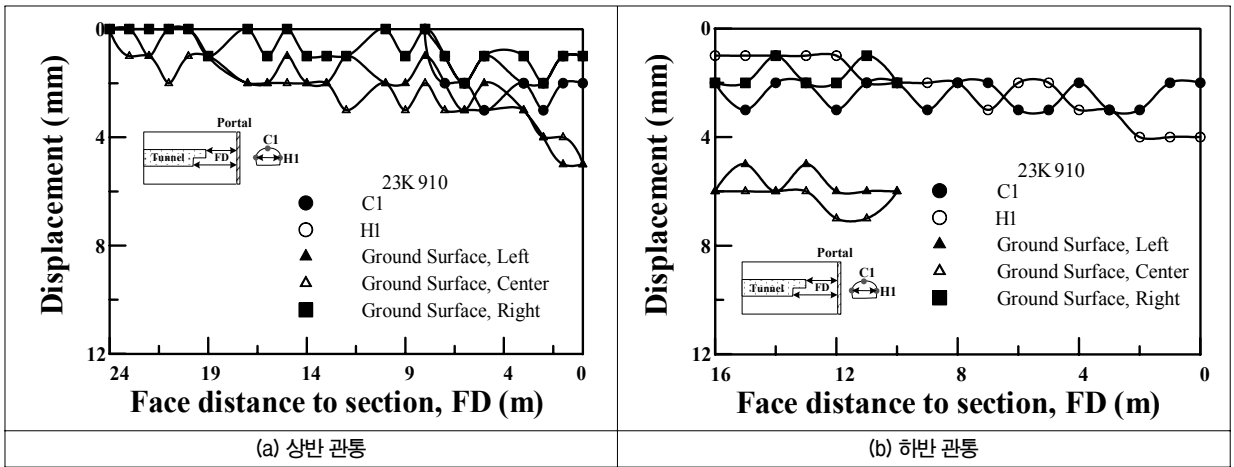


그림 9. 터널 천단침하, 내공변위 및 지표침하 계측결과

표 4. 지보재 응력 계측결과

구분		천 단	상반좌측	상반우측	하반좌측	하반우측
숏크리트 (kPa)	Radial	259	295	289	225	217
	Tangential	353	413	451	47	194
록볼트 (kN)		-	4.0	2.9	2.3	2.1

표 5. 해석결과 및 계측결과 비교

구분		해석 결과	계측 결과
최대변위 (mm)	천단침하	9.97	3
	내공변위	3.90	5
	지표침하	3.55	7
록볼트 최대축력(kN)		86	4

유발한 것으로 판단된다. 한편 지표침하도 1차 관리기준인 10mm 이내로 안정성을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

상반 관통 이전부터 하반 관통 약 20일 이후까지의 계측결과 최대 록볼트 축력은 4.0kN이며, 모든 위치에서 1차 계측 관리기준치인 55.0kN 이내로 안정성을 충분히 확보하는 것으로 나타났다. 슛크리트 응력의 경우 상반 우측에서 451kPa로 나타났으며, 모든 위치에서 1차 계측 관리기준치인 5.4MPa 이내로 안정성을 충분히 확보하는 것으로 나타났다. 굴착 단계별 지보재 응력 변화는 아주 미미한 것으로 판단되며 전 굴착단계 중 발생한 지보재의 최대 응력은 표 4와 같다.

## 4.2 해석 및 계측결과 비교

표 5와 같이 지표침하 및 내공변위 이외의 계측결과 모두 해석결과보다 작은 값을 나타냈으며, 모두 지보재 허용응력 및 관리기준치 이내의 값을 보였다. 이는 선보강한 강관다단 그라우팅 및 록볼트에 의하여 복선티널 일방향 관통에 대한 안정성이 충분히 확보되며, 보강계획이 적절함을 보여주는 것으로 판단된다.

실제 계측시 터널의 천단침하보다 내공변위가 더 크게 발생하였으며, 천단침하는 해석결과가 더 크고 내공변위는 계측결과가 더 큰 값을 보이는데 이는 지반 응력이 연직방향보다 수평방향으로 더 크게 작용하는( $K_0 > 1.0$ ) 지반조건인 것으로 판단된다. 해석의 경우 축압계수를 “1”로 가정하여 해석을 수행하였기 때문에 이러한 결과차이가

나타나며 또한 계측기 설치시 지연설치에 따른 선행침하량 및 초기침하량이 계측결과에 포함되지 못하므로 계측치 천단침하 값이 작게 평가된 것으로 판단된다.

지표침하의 결과가 실측치가 더 큰 이유는 상부 도로에서 발생하는 교통하중 등 실제 외부에서 작용되는 변수들 및 터널굴착에 따른 지하수위저하의 영향 때문인 것으로 판단되나 이에 대한 영향이 고려된 실측치도 1차 관리 기준치를 하회하므로 복선티널 일방향 관통에 따른 터널 및 지표침하에 대한 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 5. 맺음말

본 고에서는 현재 시공 중인 인천도시철도 213공구 현장 중 복선티널 일방향 관통구간에 대해 소개하였다. 짧은 지면으로 해석결과 및 계측결과에 대한 상세한 내용을 소개하지는 못하였지만, 공구의 경계에 개착부와 NATM의 경계부가 존재하는 당 현장은 현재 복선티널 일방향 관통 굴착이 완료되었고, 이 후 공사도 순조롭게 진행 중이다. 앞으로도 계측관리 및 인접구조물과 터널 자체의 안정성을 확보하며 공사를 마무리할 계획이다.

마지막으로 여기에서 소개된 복선티널 일방향 관통이 유사한 현장과 산악터널 갱구부 작업부지 협소 또는 민원에 따른 갱구부 작업의 제한 등이 우려되는 현장에서 도움이 되길 기대한다.