

기존 지하철 구조물 하부 횡단 대단면 터널의 계측관리 사례

A Case Study on Instrumentations of a Large Section Tunnel Crossing under the Existing Subway Structure

장석부¹⁾, Seok-Bue Chang, 문상조²⁾, Sang-Jo Moon, 권 승³⁾, Seung Kwon

- ¹⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 차장
- ²⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 상무이사
- ³⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소

1. 현황 및 개요

본 설계 구간은 기존 지하철 하부로 신설 지하철이 통과하는 구간으로서 당초 설계는 개착식에 의한 Under-pinning으로 계획되었으나, 지하 매설물 처리 및 구조적 안정성 문제로 인하여 <그림 1>과 같은 터널공법으로의 변경을 검토하게 되었다. 기존 지하철 구조물 하부통과 구간은 교통량이 매우 많은 도심지 교차로이고 신설 터널이 구조물과 불과 4m 정도 이격되어 있으며 지표 근처에는 통신구 구조물이 위치하고 있다.

지반조건은 정거장측 개착구간과 인접 시추공으로부터 추정되었으며 횡방향으로 지반조건이 다소 차이가 나며 풍화암과 연암 경계선은 <그림 2>와 같은 범위에 위치한다. 터널굴진은 현장 시공순서상 좌측에서 시작되며 우측 개착부는 터널시공과 동시에 이루어진다. 터널 천정부는 풍화암이 위치하고 막장 상반은 풍화암과 경암, 하반은 경암으로 구성되며 대체로 굴진 시점에서 종점측으로 지반조건이 양호해지는 경향이 있다.

터널의 시공 계획시에는 기존 지하철 구조물의 안정성 확보에 역점을 두어 공사 중 터널거동은 물론 기존 지하철 구조물의 거동을 평가할 수 있도록 계측계획을 수립하였다. 계측항목 선정과 각 계측기의 배치는 터널굴착 및 지보의 시공순서에 따른 터널과 기존 구조물의 거동특성 및 계측기 설치를 위한 주변 조건을 고려하였다. 굴착과 지보 시공계획은 안정성 확보를 위하여 일반 터널구간에 비하여 보수적으로 계획하였으며 안정성 예측을 위해서 터널수치해석을 수행하였다. 수치해석결과로부터 예측된 터널 주변 지반과 지보재 및 기존 구조물 거동 예측치는 시공성과의 평가를 위하여 계측결과와 비교평가되었다.

최근 지하철 건설이 증가하면서 운행중인 기존 지하철 하부를 횡단하는 사례가 많아 근접시공에 대한 주의가 요망되고 있다. 특히, 지하철 교차위치는 노선간 환승기능을 위하여 대단면 터널로 계획될 가능성이 높다. 본 논문에서 제시한 터널시공계획과 계측에 의한 시공성과 분석은 이와 유사한 근접시공의 경우에 좋은 사례가 될 것으로 사료된다.

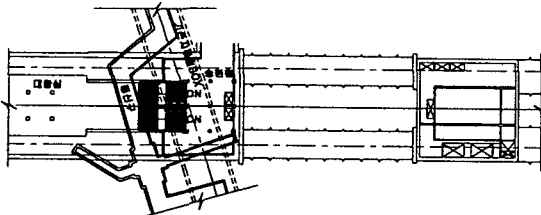
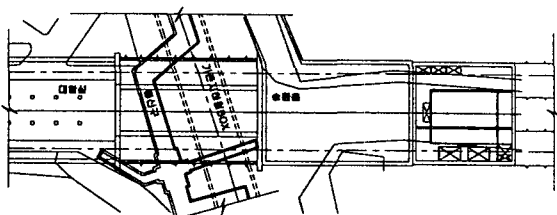
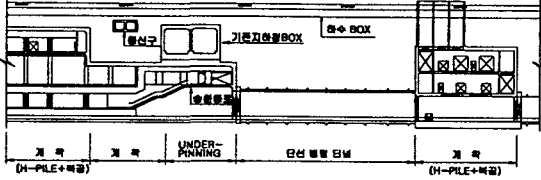
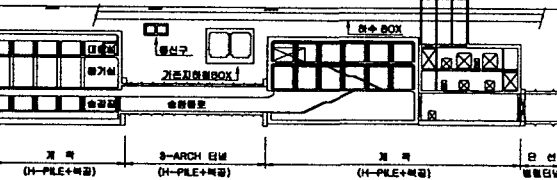
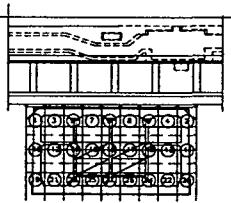
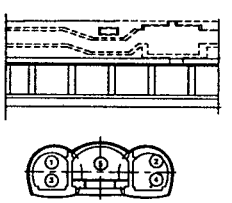
	당초 설계 (UNDER PINNING 공법)	변경 설계 (3ARCH 터널 공법)
평면 계획		
중단 계획		
표준 단면 및 시공 순서	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 풀 파기 2. H-PILE 시공 3. 굴착 및 복공 4. 개착 구간 보강 <ul style="list-style-type: none"> - 지장물 지지 PILE 시공 - 매달기 및 보강재 시공 5. UNDER PINNING 구간 보강 <ul style="list-style-type: none"> - 굴착 순서별 시공 - 강재 지보공 시공 - 주벽 지반 보강 5. 구조물 시공 	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 풀 파기 2. H-PILE 시공 3. 단계별 굴착 및 보강 그라우팅 시공 4. 터널 좌, 우단면 굴착보강 5. 풍양기동 2매, 측부터널 관여널 시공 6. 풍양 터널 굴착 보강 7. 풍양터널 LINING 시공

그림 1. 기존 지하철 하부통과구간 당초 설계와 변경설계

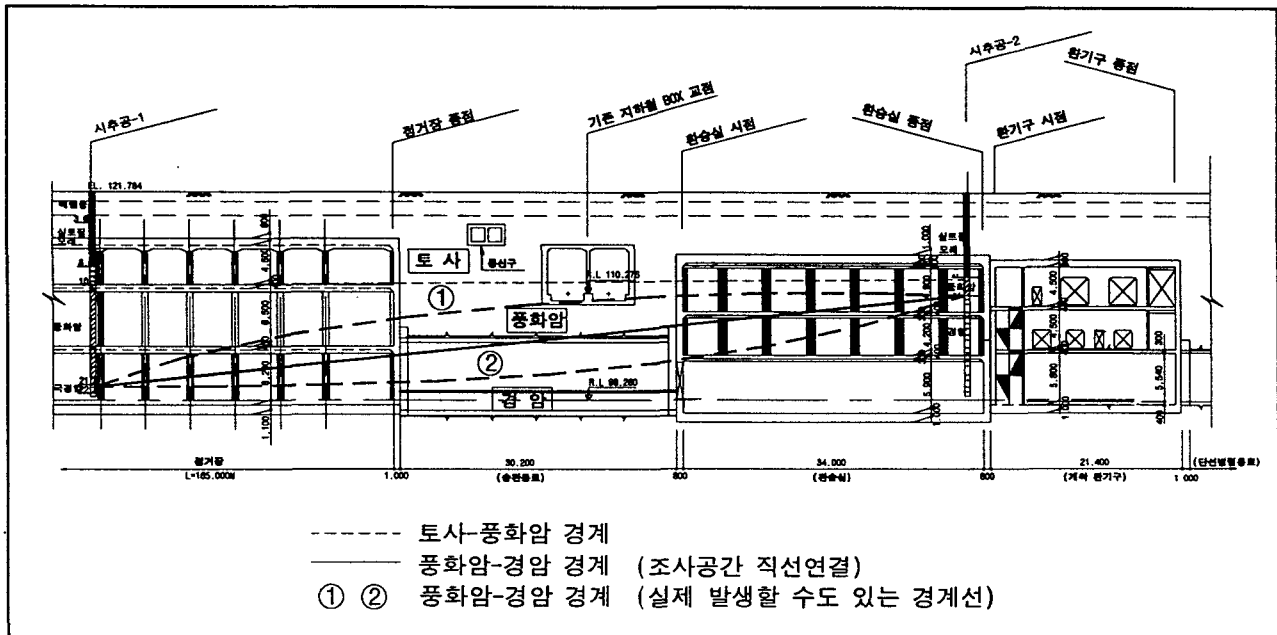


그림 2. 설계구간 중단면도 및 지반조건

2. 터널시공

2.1 표준단면

터널내공은 열차의 원활한 소통을 위한 건축한계를 확보하고 승환통로로서의 공간을 확보하여야 하며 구조적으로 안전하여야 한다. 그림 3은 기둥이 2개인 3-ARCH터널의 표준단면도를 보이고 있다. 두 개의 벽체는 운행중인 열차의 소음 및 공기압으로부터 승객을 보호하고 중앙 터널 굴착시 상부하중을 지지할 수 있도록 기둥이 아닌 벽체로 계획하였다. 일반적으로 3-ARCH터널은 중앙 터널의 반경을 가능한 작게 하기 위하여 측부터널에 비하여 높게 설계되나, 본 구간은 현 단면에 대해서도 기존 지하철 구조물 바닥 슬라브와의 이격거리가 약 4m에 불과하므로 중앙터널 천정의 높이를 낮게 하였다. 이러한 3-arch 터널은 불량한 지반조건에 대단면 터널이 계획될 때, 지반하중을 분산 지지하기 위하여 적용된다(Iwamura 등, 1994).

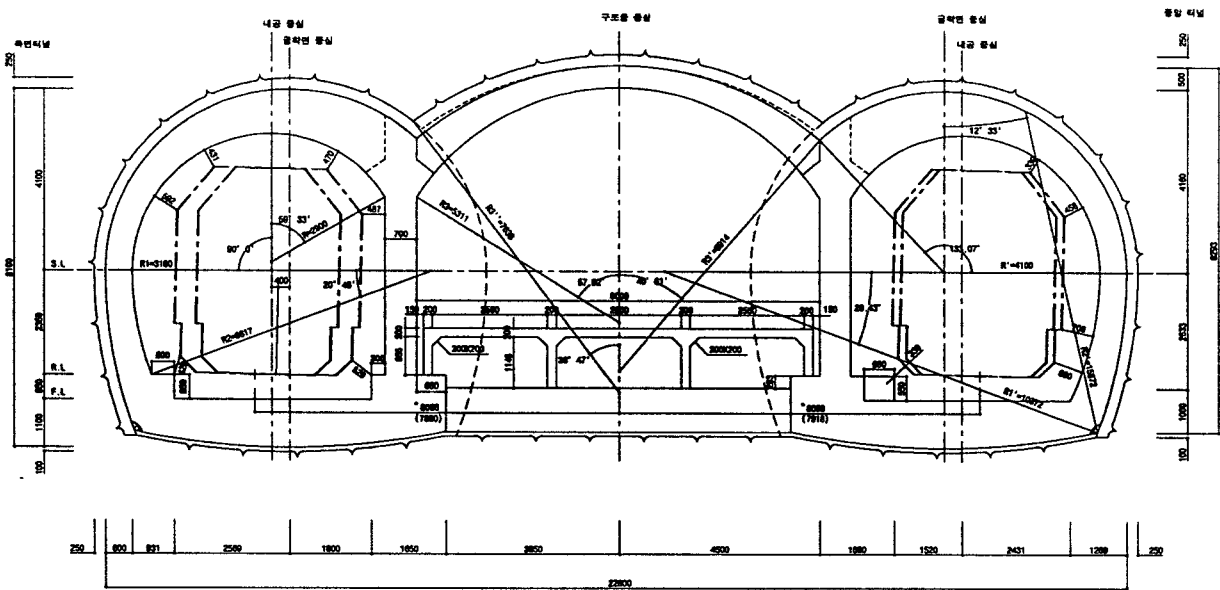


그림 3. 3-ARCH 터널 표준단면도

2.2 지반보강

본 구간의 터널 상반은 풍화암으로 예상되고 터널상부 약 4m에 기존 지하철이 운행되고 있으며 터널 구간이 30m에 불과하여 강관다단 그라우팅 공법에 의한 막장안정과 지반침하 억제를 도모하였다.

지반보강을 위한 강관다단그라우팅 계획은 그림 4와 같이 측부터널은 4열, 구조적으로 가장 취약한 중앙터널은 5열을 적용하였다. 강관다단 그라우팅의 주입압이 지하철 구조물에 영향을 미치지 않도록 구조물에 너무 근접하지 않도록 하였다. 보강영역의 산정은 횡방향과 종방향에 대한 간략 계산법을 이용하여 검토하였다(장석부 등, 1999).

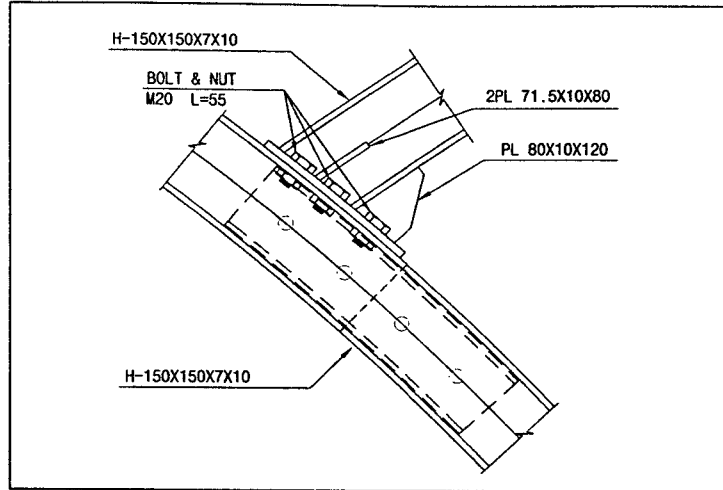


그림 6. 강지보재 연결부 보강도

2.4 시공순서

터널의 시공순서는 그림 7과 같이 양측부 터널을 굴착하고 벽체와 콘크리트 라이닝을 타설한 후에 중앙터널을 굴착하도록 하였다. 중앙가지보는 중앙터널의 굴착 및 보강이 완료된 후에 제거하도록 하였다.

단면형상	상세공정
1	<ul style="list-style-type: none"> - 경구부 강관다단 그라우팅 - 양측 터널상부 굴착 및 보강 ▪ S.L부 알반이 통과할인 경우, 가인버트 설치
2	<ul style="list-style-type: none"> - 양측 터널 하부 굴착 및 보강
3	<ul style="list-style-type: none"> - 양측 터널 벽체 및 라이닝 타설
4	<ul style="list-style-type: none"> - 중앙 터널 상부 굴착 및 보강
5	<ul style="list-style-type: none"> - 중앙 터널 하부 굴착
6	<ul style="list-style-type: none"> - 중앙 가지보벽 제거
7	<ul style="list-style-type: none"> - 중앙 터널 천정부 라이닝 타설 및 바닥 콘크리트 타설

그림 7. 3-ARCH 터널 시공순서

3. 터널 수치해석 및 관리기준 설정

3.1 해석개요

본 구간의 터널안정성 검토를 위한 수치해석에는 국내외에서 지반공학적 문제에 폭 넓게 적용되고 있는 2차원 유한차분법 프로그램인 FLAC(ver.3.3)을 이용하였다. 수치해석은 기존 구조물 교차부(CASE-1)와 환승통로 시점부 위치(CASE-2)에 대하여 수행되었으며 각 해석단면에 대한 지질조건과 경계조건은 그림 8과 같다.

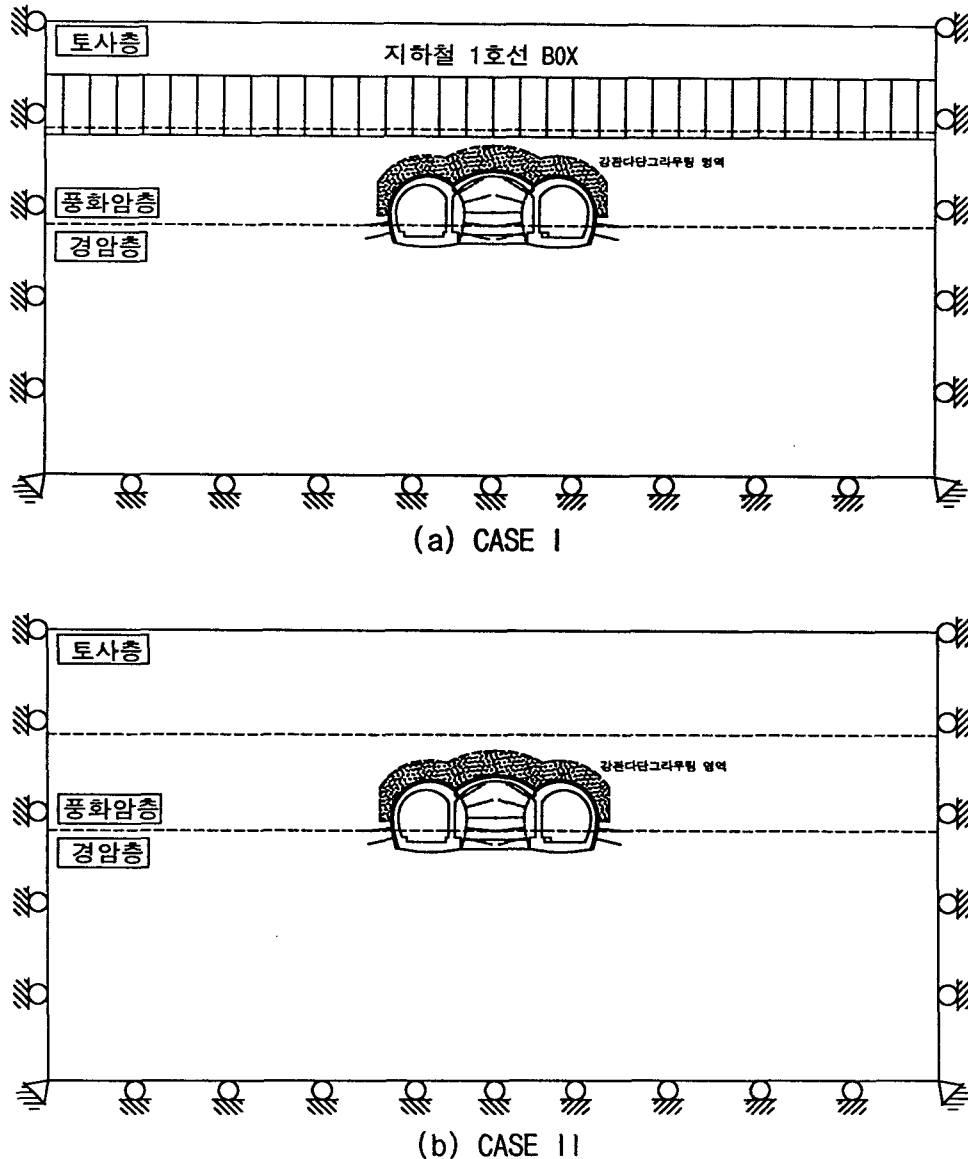


그림 8. 해석단면의 지질조건 및 경계조건

본 해석에는 표 1과 같은 인접공구 터널해석보고서의 지반 물성치를 적용하였으며, 강관다단그라우팅 영역의 지반 물성치는 본 공법의 연구보고서(건기원, 1994)를 참조하여 연암에 준하는 물성치를 적용하

였다. 숏크리트, 록볼트 및 콘크리트 내부라이닝과 벽체기둥의 물성치는 표 2와 같으며, 콘크리트 라이닝의 두께는 최소 두께치를 적용하였다.

표 1. 지반의 탄소성 입력 물성치

구 분	탄성계수 (t/m^2)	포아슨비	단위중량 (t/m^3)	접착력 (t/m^2)	내부마찰각 ($^{\circ}$)	인장강도 (t/m^2)	측압계수
토 사 층	1,730	0.40	1.89	5.50	27.0	0.0	0.5
풍 화 암	10,340	0.35	2.10	25.48	32.5	5.1	0.5
연 암	228,280	0.27	2.48	32.62	37.5	10.0	0.5
경 암	908,800	0.20	2.70	37.72	42.0	15.0	0.5

표 2. 지보재의 입력 물성치

구 분	요 소 유 형	단위 중량 (t/m^3)	탄성 계수 ($\times 10^6 t/m^2$)	단면적 (m^2)	2차단면 모멘트(m^4)
Soft shotcrete (t=25cm)	보(beam)	-	0.5	0.25	0.0013
Hard shotcrete (t=25cm)	보(beam)	-	1.5	0.25	0.0013
록 볼 트 (ctc=0.8m)	케이블	-	26.3	0.0005	-
콘크리트 라이닝 (측 벽)	보(beam)	2.5	2.3	0.60	0.0180
콘크리트 벽체기둥	보(beam)	2.5	2.3	0.70	0.0286

해석단계는 실제 시공과정을 고려하였으며, 굴착 - soft shotcrete - hard shotcrete에 대한 하중분배율은 40%-30%-30%를 적용하였다. 중앙가지보벽은 구조적 지지기능 보다는 공사중 측부터널의 콘크리트 벽체기둥 및 방수재 손상을 방지하기 위하여 중앙터널 공사가 끝난 후에 제거하도록 계획하였다. 따라서, 수치해석상에는 가벽을 중앙터널 굴착과 동시에 제거하였다.

3.2 시설 구조물의 허용변위량 검토

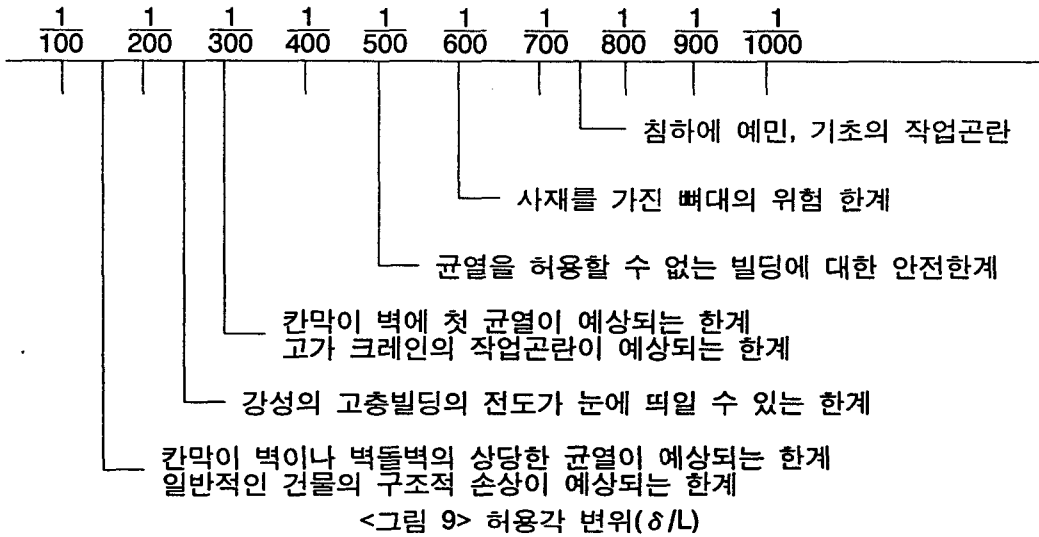
시설 구조물의 허용변위량은 일반 구조물의 사용목적을 유지하는데 필요한 기준과 시설구조물이 운행 중인 지하철임을 감안하여 궤도에 대한 허용기준에 대하여 검토하였다. 허용변위량 기준은 표 3과 그림 9와 같으며, 구조물 측면에서는 절대침하량보다는 부등침하량(또는 각변위)이 구조물의 안정성과 직접적인 관련이 있으므로 주로 부등침하량을 관리기준으로 하였다. 주요 궤도 변형에 대한 기준은 표 4와 같으며 궤도구조에 따라 기준치의 차이가 있어 자갈도상궤도에서는 궤도정비에 대한 대처가 용이하나, 슬래브 궤도에서는 궤도정비에 의해 대처할 수 있는 범위가 제한되므로 더욱 엄격한 허용치 준수가 요구된다.

3-arch 터널과 기존 BOX는 약 70° 로 사교하여 직교조건에 근사하므로 터널굴착에 의한 횡방향(기존 노선측에서는 종방향) 침하에 의한 영향을 주요 검토대상이므로 하였다. 따라서, 표 3에서 수직방향의 부등변위량 중에서 선로가 휘어지는 양을 나타낸 접어넣기를 검토항목으로 하였다. 지하철의 열차 속도를 감안하면 접어넣기량에 의한 부등침하량은 9/1000이다. 그림 9의 검토조건에서 지하철 BOX를 어떤 범주에 포함할 것인지는 명확하지 않으나, 지하철은 대중이 빈번하게 사용하는 공공시설임을 감안하면 1/800 정도면 충분할 것으로 사료되었다.

표 3. 구조물의 허용 침하량 및 각변위

침하 형태	구조물의 종류	최대 허용 침하량
전체 침하	배수 시설	15.0 ~ 30.0 cm
	출입구	30.0 ~ 60.0 cm
	석적 및 조적 구조	2.5 ~ 5.0 cm
	뼈대 구조	5.0 ~ 10.0 cm
	굴뚝, 사이로 매트	7.5 ~ 30.0 cm
전도	탑, 말뚝	0.004 S
	물품 적재	0.04 S
	크레인 레일	0.003 S
	빌딩의 조적벽체	0.0005 S ~ 0.002 S
부등 침하	철근콘크리트 뼈대구조	0.003 S
	강 뼈대 구조(연속)	0.002 S
	강 뼈대 구조(단순)	0.005 S

주) S는 기둥 사이의 간격 또는 임의 두점 사이의 거리



<그림 9> 허용각 변위(δ/L)

표 4. 열차를 지지하는 구조물의 레일레벨에서의 허용부등 변위량

변위의 방향	열차속도 (km/h)	턱 슬 (mm)	꺾임각도(1/1000)			
			평행 이동		접어 넣기	
			L<30m	L≥30m	L<30m	L≥30m
수직	70	2	9	9	9	9
	110		7.5	9	9	9
	160		5	6	6.5	7
	210		4.5	4	5.5	4.5
	260		3.5	3	4	3
수평	70	2	6	6	6	6
	110		4	5.5	5	6
	160		3	3	3.5	4
	210		2.5	2	3	2.5
	260	1.5	2	1.5	2.5	2

주1) 자갈도상 궤도의 경우는 턱슬의 검토를 하지 않아도 좋다.

4. 계측관리

4.1 계측계획

계측계획은 터널시공단계에 따른 터널거동특성을 평가할 수 있도록 하였으며, 과업구간의 중요성을 감안하여 일반적인 경우보다 상대적으로 많은 계측항목과 계측수량을 적용하였다. 각 계측기별 적용수량과 목적은 표 5와 같으며, 크게 일상계측, 정밀계측, 영구계측으로 분류할 수 있다.

그림 10은 일상계측과 정밀계측 실시 위치를 보여주고 있으며, 그림 1>은 터널단면상에 배치된 계측기 항목과 설치형태를 보여주고 있다. 일반적으로 일상계측에 비하여 정밀계측의 계측간격이 크지만 터널연장이 짧고 중요 구조물 하부를 횡단하므로 일상계측과 정밀계측을 동일 축선에 배치하였고 계측간격은 10m로 하였다.

터널단면에서 내공변위 측정은 좌·우측 터널에 대해 각 4개소에서 수행되었으며, 천단변위는 좌·우측 터널 및 중앙터널에 대해 각 1개소에서 계측하였다. 슛크리트의 응력측정은 아치부의 6개소 및 측벽 4개소 그리고 중앙터널 천정부 2개소에서 이루어졌으며, 록볼트의 축력은 좌·우 양측 터널에서 아치부 및 측벽에 대해 각각 2개소에서 측정하였다. 지중변위는 양측 터널에서 아치부와 측벽에 대해 1개소에서 계측하였고, 지중응력은 슛크리트의 응력 측정시 사용되었던 계측기와 동일한 것을 사용하였으며, 굴착면에 삽입하여 지반의 반경방향 및 접선방향 응력을 측정하도록 하였다. 또한 벽체 기둥에 대하여는 변형률계 매설형식 (strain gauge embedment type)의 계측기를 사용하여 좌·우측 기둥에서 압축응력을 측정하였다. 벽체기둥에 설치된 계측기는 중앙터널 굴착시 벽체가 지지하는 하중을 검토하기 위한 것으로 본 3-arch 터널 공사중 안정성이 가장 낮은 공정이다.

그림 12는 기존 구조물의 영향을 평가하기 위한 구조물 침하 영구계측기 배치를 보여주고 있다. 기존 구조물 진행방향으로 설치된 5개의 계측기는 터널굴착에 의한 구조물 종방향 침하양상을 평가하기 위한 것이고 횡방향의 2개는 터널막장이 접근됨에 따라 발생할 수 있는 횡방향 전도양상을 분석하기 위한 것이다. 계측기로는 구조물의 침하 및 경사측정을 위해 Electrolytic tilt sensor를 선택하였다. 본래 본 계측기는 연속적으로 설치하여야 침하양상을 정확히 파악할 수 있으나, 각 계측기가 고가이고 기존 구조물은 종방향으로 연속된 강성구조물이기 때문에 불연속침하가 발생할 가능성이 희박하기 때문에 5점에서의 측정으로 충분한 예측이 가능할 것으로 판단되었다.

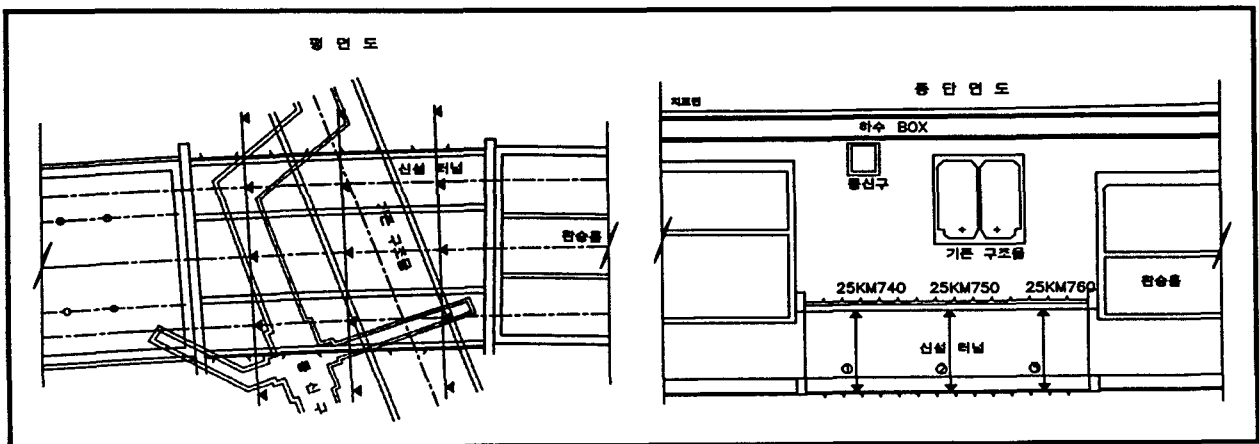


그림 10 계측계획도

표 5. 계측항목 및 목적

항 목	위치별 계측수량				계 측 목 적	
	25km740	25km750	25km760	계		
신 설 터 널	내공변위측정	8	8	8	24	단면 변형 및 터널변위 수렴상태 파악
	천단침하측정	3	3	3	9	천단 침하량 측정
	록볼트 인발시험	50본당 1회				정착효과 평가
	록볼트 축력측정	8	8	-	16	록볼트의 하중 측정
	숫크리트 응력측정	12	12	-	24	숫크리트 응력 및 배면토압 측정
	벽체기둥응력측정	2	2	2	6	벽체기둥의 안정성 평가
	지표침하측정	5	5	5	15	지표면 변위 측정
	지중변위측정	4	4	4	12	터널 주변 이완영역의 범위, 지반 안정도 평가
	지중응력측정	8	8	8	24	굴착에 따른 지중응력 재분배 측정
발파진동측정	매 발파마다 측정				발파 인근지역에 대한 영향평가	
기존 구조물	침하 및 경사측정	7개소(기존 지하철구조물에 설치)			터널굴착이 기존 구조물에 미치는 영향평가	

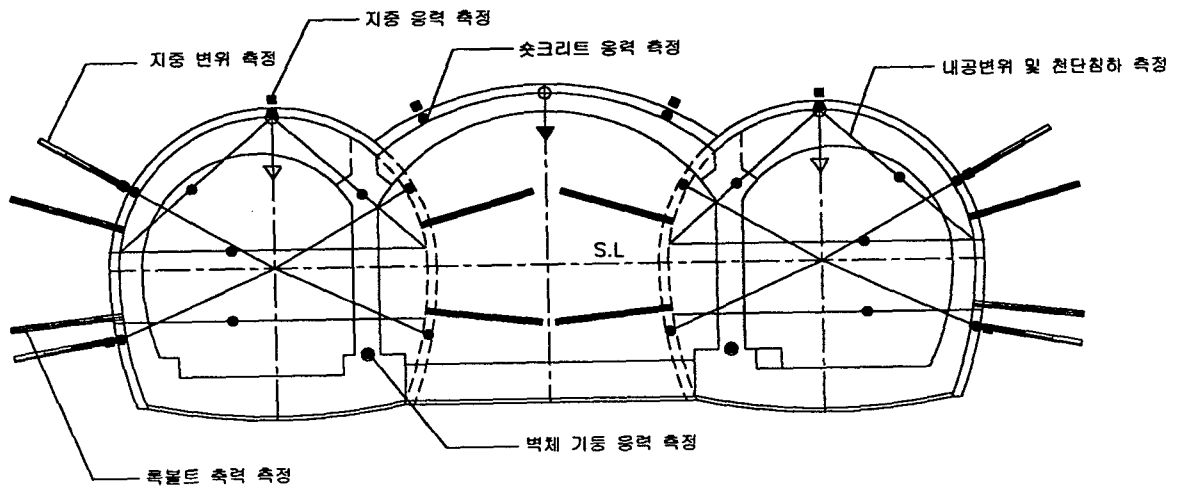


그림 11. 터널 계측 상세도

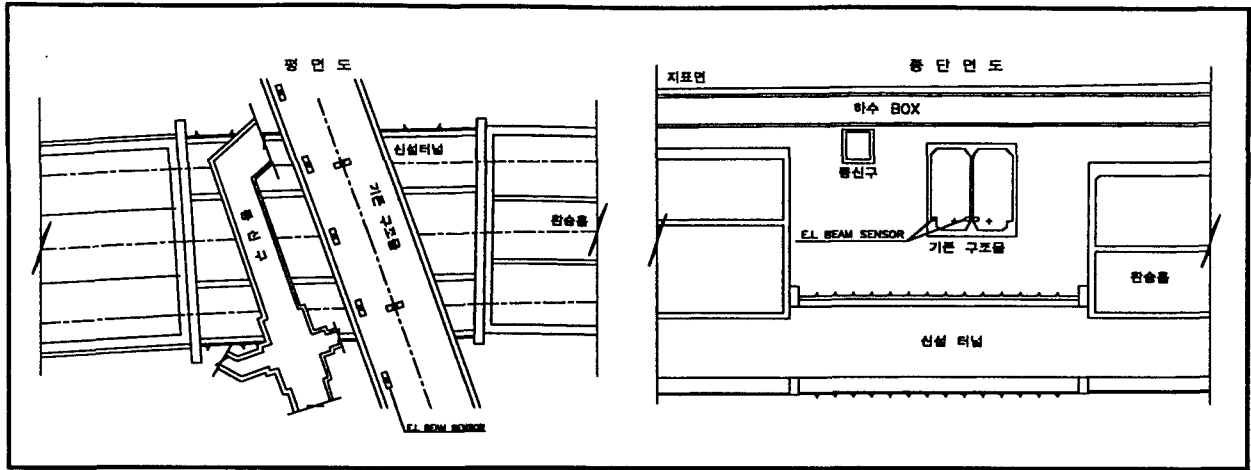


그림 12. 기존 구조물 계측 계획도

4.2 현장 계측관리기준

계측관리는 단계별 대처를 위하여 표 6과 같이 3단계로 나누어 수행하였다. 각 단계에 대한 계측기준치는 인접구간의 시공성과 분석을 토대로 설정하였다.

표 6. 계측 기준치

항 목	계측 기준치		
	주의단계 I	주의단계 II	주의단계 III
내공 변위	5 mm 이하	10 mm 이하	12 mm 이하
천단 침하	6 mm 이하	12 mm 이하	15 mm 이하
록볼트 축력	5 tonf 이하	10 tonf 이하	12 tonf 이하
숫크리트 응력	33.6 kgf/cm ² 이하	67.2 kgf/cm ² 이하	84 kgf/cm ² 이하
시공중 현상	<ul style="list-style-type: none"> • 변위 속도 증가 • 숫크리트의 국부적 균열 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 변위 속도의 큰 증가로 인한 록볼트 축력 증가 • 지중변위 이완영역 확대 • 숫크리트의 심한 균열 및 떠오름 현상 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 각 계측기의 변위량 지속적인 증가 • 숫크리트 균열 및 지하수 유출 확대
대처방안	<ul style="list-style-type: none"> • 측정빈도를 1일 1회에서 1일 2-4회로 늘임 	<ul style="list-style-type: none"> • 내공, 천단 측정 증대 • 록볼트추가 및 강지보재 간격 조정 • 굴진속도 늦춤 • 굴착길이를 줄이고, 조기에 숫크리트를 타설 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사를 중지 • 24시간 계측 관리 시행 • 긴급 대책반을 통한 지보재 보강 시행

4.3 계측결과

계측결과는 측부터널 굴착과 중앙터널 굴착의 2단계로 분류하여 분석하였다. 이는 측부 터널굴착에 의한 지반변형의 수렴을 확인하여 지반이 안정화된 후에 중앙터널을 굴착하기 위한 것이다.

측부터널 굴착시 최대천단변위는 3mm, 최대 내공변위량은 4mm, 록볼트 축력은 1~4 ton, 슛크리트 응력은 최대 46 kg/cm² 이었다. 터널변위는 상반굴착에 의하여 발생하였으며, 하반굴착시에 변화는 극히 미소하였다. 굴착 완료 후, 1~2개월이 경과된 이후의 변위양상은 추가변위가 발생하지 않아 측부터널의 변위는 수렴된 것으로 판단되었다.

중앙터널 굴착시 천단침하 3mm, 슛크리트 응력은 5.0 kg/cm², 벽체응력은 3.5 kg/cm² 이었고 지하철 구조물의 최대 침하량은 1.64mm이었다. 지보재 하중과 터널변위 및 구조물 침하량이 관리기준치에 현저하게 못 미치는 매우 낮은 값을 보였고 최종 1개월간의 추이는 1mm 이하의 미소한 변위가 반복적으로 나타나 터널굴착에 의한 지반의 수렴을 확인할 수 있었다.

4.4 수치해석결과와 계측결과의 평가

표 7은 터널시공시 측정된 계측결과와 수치해석결과를 비교하여 정리한 것이다. 중앙터널의 천단변위는 수치해석을 통한 예측치와 유사하게 나타났으나, 슛크리트와 라이닝 벽체 기둥의 압축응력은 실제 측정된 값이 예측치보다 적게 나타났다. 그림 13은 터널굴착에 의한 기존 구조물의 침하량을 보여 주고 있다. 기존 구조물의 최대 침하량은 수치해석시 10.5mm 이었으나, 계측결과는 1.64mm로 큰 차이를 보였다.

수치해석결과와 계측결과의 차이는 상대적으로 양호한 실제 지반조건이 주원인으로 판단되며 기존 구조물의 자체강성에 의한 지반하중의 차단과 지보재와 지반 상호작용의 수치해석 모델링 상의 제한도 미소하나마 원인으로 작용했을 가능성이 있다.

터널굴착과 지반보강 및 지보재 시공계획시에는 운행중인 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 지반의 변형 및 강도특성을 지반조사 결과에 의하여 예상되는 범위내에서 상대적으로 낮게 평가하여 지반보강 및 지보량을 결정하였다.

표 7. 계측결과와 수치해석치의 비교

항 목	계측치	수치해석치
중앙터널 천단침하 (mm)	3.0	3.2
중앙터널 슛크리트 응력 (kgf/cm ²)	5.0	26.9
벽체 기둥의 압축응력 (kgf/cm ²)	3.5	39.4

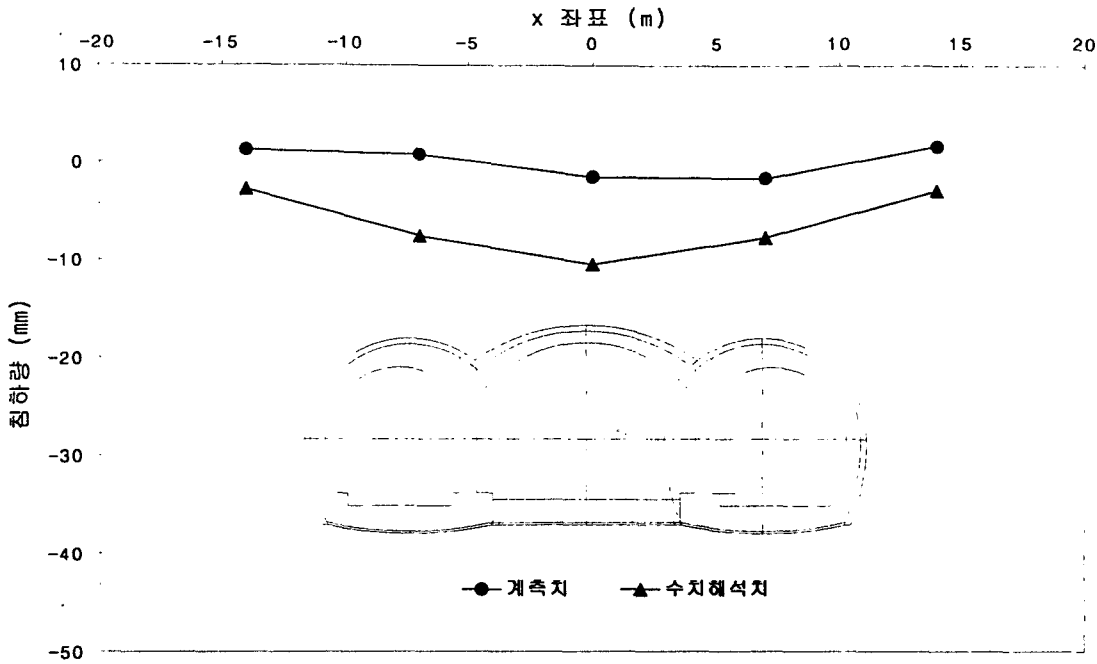


그림 13. 터널굴착에 의한 기존 구조물 침하양상

5. 맺음말

기존 지하철 구조물 하부를 대단면 3-arch로 터널로 안전하게 통과하기 위하여 안정성에 역점을 두어 시공계획을 수립하였으며 시공중 이를 확인하기 위하여 계측을 통한 안전관리를 수행하였다. 특히, 측부터널의 계측치를 분석하여 터널변형의 수렴여부를 확인한 후에 중앙터널을 굴착하도록 함으로써 공사관리에 만전을 기하였다.

시공계획시에는 발생 가능한 지반조건 범위 내에서 가장 불리한 조건에 대하여 굴착 및 보강계획을 수립하여 수치해석에 의한 결과치와 현장 계측결과의 큰 차이가 있었다. 그러나, 수치해석을 통하여 복잡한 시공과정에 대한 터널거동 특성을 이해하여 계측계획을 수립하고 계측결과에 의한 터널수렴여부를 파악하여 단계적 공사를 진행한 것은 정보화 시공의 한 예를 보여준다고 하겠다. 다만, 터널변위, 구조물 침하량, 지보재 하중 등의 계측결과가 대부분 미소하여 터널굴착과 관련된 경시변화 분석은 어려웠으나, 현장 계측결과 분석시 최종 결과치의 수렴여부와 관리기준치와의 비교로 안전관리 수준에만 머무른 데는 아쉬움이 남는다. 앞으로, 본 사례와 유사한 경우에 참고할 수 있도록 상세한 현장 시공순서와 막장조건을 계측결과와 연계된 분석을 수행하여 보다 정밀한 터널거동 및 기존 구조물 침하 특성을 분석할 계획이다. 끝으로, 현장자료 수집에 협조해 주신 진로건설 담당자에게 지면을 빌려 감사를 드린다.

참고문헌

- 1) 건설기술연구원 (1994), “강관보강형 다단 그라우팅 공법의 개발”.
- 2) 장석부, 이경환, 한경달, 추용범 (1999) “기존 지하철 구조물 하부 횡단 3-arch 터널의 설계”, 유신 기술회보, 제6호, pp.78~100.
- 3) 진로건설 (1999) 3-arch 본선구간 중앙부 터널수령 보고서.
- 4) 진로건설 (1999) 3-arch 터널 수령 보고서.
- 5) Itasca Consulting Group, Inc. (1996) FLAC User Manual.
- 6) Iwamura I. , Vsuda, S. & Mituso, J. (1994) Construction of triple face tunnel by urban NATM. Tunnelling and Ground Conditions, pp143~149.