

경부선 철도 횡단터널 설계 및 시공사례

최 철 웅 (부산교통공단, 공사1처장)

1. 서론

지하철은 대부분 도심지역의 교통문제를 해결하기 위한 방법중의 하나로서 복잡한 도심지에 주로 건설되어지므로 많은 지하, 지상지장물과 직면하게되어 이에 대한 이설방법 또는 통과 방법 등이 검토되어야 한다. 특히 철도의 통과 시에는 철도의 안전은 인명피해 등 사회적으로 큰 문제를 야기시키므로 철도통과 공법은 세심하고 면밀하게 검토되어야 할 것이다.

부산지하철 2호선 1단계 건설공사 중 부산시 북구와 사상구 경계에 위치한 경부선 철도를 통과하는 구간의 토피가 낮은 터널의 설계 및 시공사례를 소개하고자 한다. 이 구간은 지하철이 공사중인 1993년 시공중이던 전력구 터널의 붕괴로 많은 인명피해를 발생시킨 구포열차 사건이 일어난 지역과 인접된 지역이며 설계시 안전한 철도 통과를 위하여 더욱 세심하고 면밀하게 통과 공법을 검토하였던 구간으로서 설계시의 공법의 선정, 그리고 시공 시 굴착 공법 검토와 보조공법의 특성 및 실시

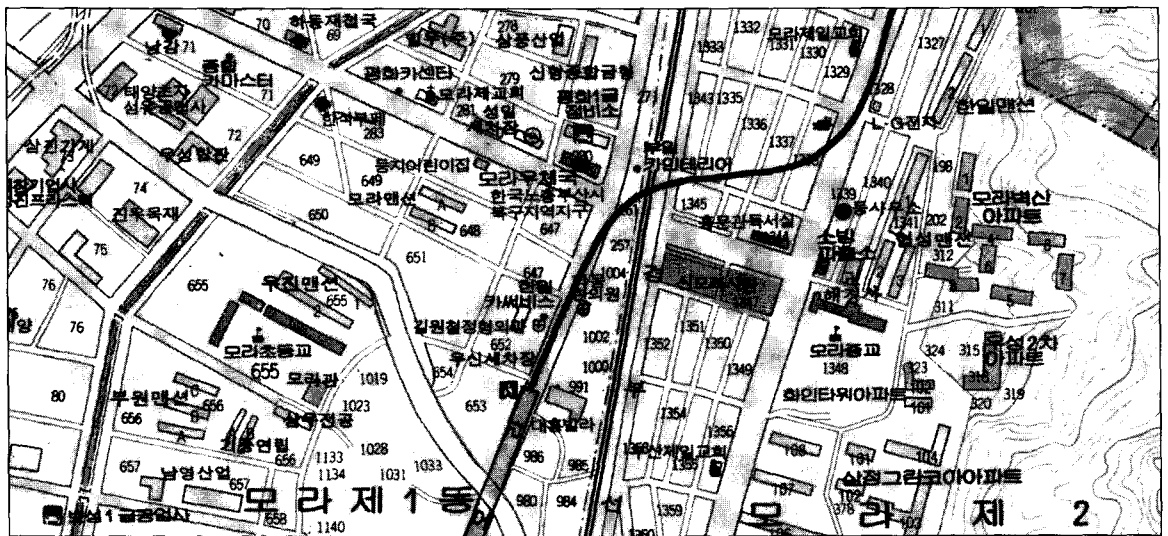


그림 1. 현장 위치도

공에 대한 문제점 등을 고찰하여 차후 이와 유사한 조건에서의 터널공법의 선정, 원지반의 보강방법 등에 참고가 되길 바란다.

2. 현장개요

2.1 현장위치 및 주변현황

본 현장은 부산광역시 북구 모라동 일원으로 터널 Crown상부에 경부선 철도가 횡단하는 특수구간으로 L=48.0M에 걸쳐 위치하고 있으며, 본 현장의 위치 및 터널 종단면도는 그림 2-1과 같다.

210공구 철도횡단 구간은 경부선 철도를 중심으로, 백양산 방향은 H-6.0M 정도의 옹벽을 경계로 주저 밀집지역인 모라 택지지구와 접하고 있으며, 사상로 방향은 사유지 구간이며, 현재 옹벽밀 까지 주택밀집지역에서의 터널굴착은 완료된 상태이며

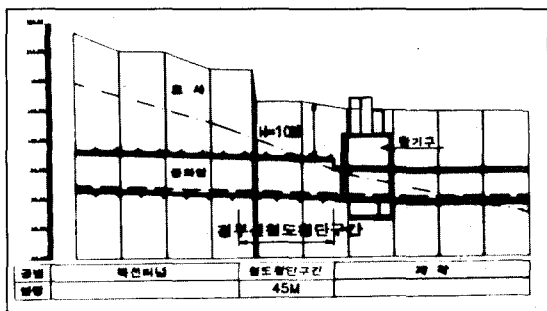


그림 2. 종단면도



그림 3. 현장 전경 사진

곡선반경 R=300로 철도하부를 통과하여 간선도로인 사상로로 진입한다.(그림 1. 2. 3. 참조)

2.2 지형 및 지질현황

이 지역에 분포되어 있는 기반암은 백악기의 관입암류로서 경상계에 속하는 화강암으로 구성되어 있으며 풍화작용의 진전도에 따라 풍화암층, 연암층 및 경암층 등으로 분류된다.

철도와 지하철의 교차부에서는 4개의 추가 Boring(1993. 11)이 실시되었으며 이 조사결과에 의하면 지층의 구성은 매립토, 퇴적토, 풍화토, 풍화암으로 되어있고 각 층은 평행하게 퇴적되어 있다. 풍화암층은 터널의 Crown부분인 GL-10M에서 GL-25M까지 평균 15M의 두께로 구성되어 있으나 입자간의 결합력은 대부분 상실되어 공기 중에 노출되면 가벼운 충격에도 쉽게 모래와 암편의 혼합물로 분해된다. 터널 상부층에 위치하는 퇴적토층은 실트질 모래층으로 N치는 상부는 10~15로 중간 정도의 상대 밀도를 보이나 하부는 N치 30~50으로 비교적 조밀한 상태를 보인다. 또한 채취한 시료를 관찰하여보면 BH-4의 자적토의 부분은 색이 검고, 토질 상태로부터 판단하여 보면 예전의 계곡부에 퇴적된 퇴적토로 보는 것이 바람직한 것이다. 이 경우 이러한 계곡의 퇴적토 쪽으로 지하수가 유출될 가능성이 크고 이것이 터널의 천단부에서 터널 내부로 흘러나올 가능성도 배제할 수 없다. 지하수위는 GL-4M ~ GL-5M에 주로 분포하며 퇴적층의 투수계수는 $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ cm/sec, 잔류토층의 투수계수는 1.0×10^{-4} cm/sec로 비교적 투수계수가 크다.

시공 시('94. 11) 조사한 지질현황은 다음과 같다.

● 지층조건

- GL-0.0M~GL-3.0M : 매립토층(모래질 자갈층)
- GL-3.0M~GL-8.5M : 퇴적토층(자갈을 함유한 실트질 모래층)
- GL-8.5M~GL-10.8M : 잔류토층(실트질 모래층)

표 1. 공법별 개요

구분	Frame Messer	Pipe Roof	Front Jacking
시공개요	1) 발진기지설치(Shield Messer 지보공 설치) 2) Shield 추진 (60 Cm 씩) 3) Messer 지보재추진 (60 Cm씩) 4) 2), 3)의 반복작업 5) Lining 타설	1) 발진기지설치(수평보링기 설치 위치 확보) 2) 상단부 수평천공과 동시에 강관 삽입(형철로 천공) 3) 측벽부 수평천공 4) Pipe 주위의 Grouting시행 5) 본선굴착(버티지보공을 설치하며 굴착) 6) 구조물 타설	1) 발진기지 설치 2) 강관삽입은 Pipe Roof와 동일 3) 출입구 양쪽에 Box Con'c 구축 4) 수평보링으로 합체의 상호견인용 P.C강선 설치 5) 굴착(P.C강선을 인장하며 합체를 견인) 6) 터널중간에서 양합체가 접하면서 굴착완료
특징	1) 소음 및 진동이 없다. 2) 선형에 따라 곡선에도 적용되어 방향수정이 가능하다. 3) 전방에 장애물(전석, 매물강재 등)이 있더라도 제거하며 굴진할 수 있으며 토사층과 암반층이 혼재되어도 굴진이 가능하다. 4) 굴착면의 침하가 적다. (침하방지용 Grouting시행) 5) 시공실적이 적다.	1) 성토재에 따라 시공판단. * 토사층은 시공가능 * 암석, 전석층은 수평 보링이 곤란. 2) 직선구간에서만 시공가능 3) 시공연장이 길 때에는 수평보링의 시공오차가 커서 정밀도가 낮다. 4) 수평천공을 위해서는 전진기지부에 성토를 한후 기계설치장소를 만들어야 한다. 5) 지반침하가 적다.	1) 양쪽의 콘크리트 합체를 P.C강선으로 상호 견인하는 작업은 상당한 경험이 필요하다. 2) 갱내에서의 콘크리트 타설이 아니므로 구조물의 품질이 우수하다. 3) 안전성이 우수하다. 4) 직선구간에만 시공이 가능하다 5) 발진기지가 시중점부 2개소가 소요된다.
안전성	안전	안전	안전
공기	6 개 월	9 개 월	14 개 월
경제성	4,000 만원	5,100 만원	6,300 만원

- GL-10.8M~GL-25.5M : 풍화암(기반암의 풍화대로서 압편을 함유한 세립 내지 조립 모래로 분해됨)
- GL-25.5M~ : 연암(기반암인 화강암의 연암층)

3.2 공법검토

본 구간의 공법선정에 있어서 최우선으로 고려되어야 할 사항은 철도의 안전성이나 주변현장 조건도 고려되어야 한다.

3. 터널설계

3.1 비교공법의 선정

본 구간은 종평면도에서 나타난 바와 같이 터널 상부의 지지층이 낮고 지질조건이 불리하여 일반 NATM 공법의 적용 시 막장 붕괴 등의 위험성을 내포하고 있어 지반침하를 최소화할 수 있는 공법을 필요로 하였다. 철도의 하부 통과에는 주로 Pipe Roof 공법 및 Front Jacking 공법이 적용되며 설계당시 신공법인 Frame Messer 공법을 선정하여 비교하였다.

3.2.1 안전성

앞에서 선정하여 비교한 3가지의 공법은 굴착 시 원지반의 침하를 억제하는데는 효과적인 공법으로 검토되었다.

3.2.2 현장여건에의 적용성

1) 현장조건

비교된 3가지의 공법은 전진기지, 또는 도달기지를 필요로 하는 공법으로서, 특히 Front Jacking 공법은 전진기지와 도달기지 등 2개의 기지를 필요로 하고 있다. 현장 여건으로 볼 때 본구간의 1

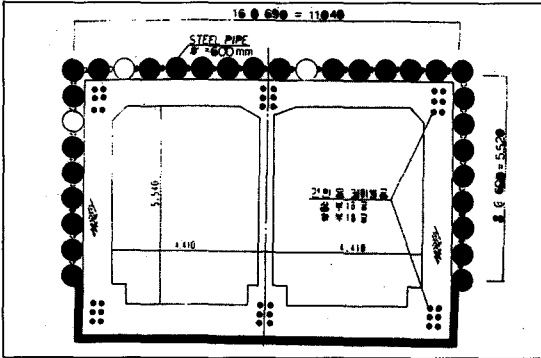


그림 4. Front Jacking

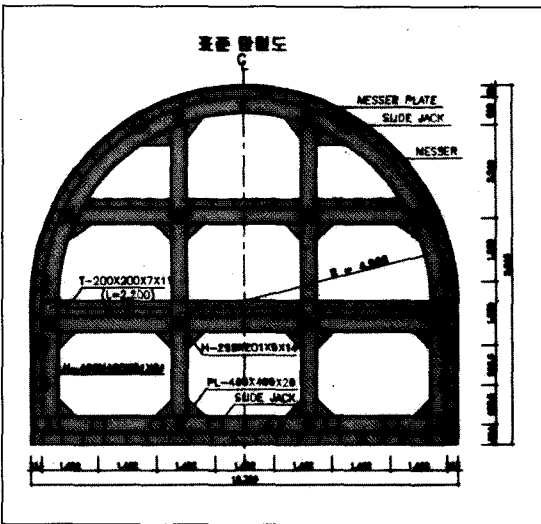


그림 5. Frame messenger

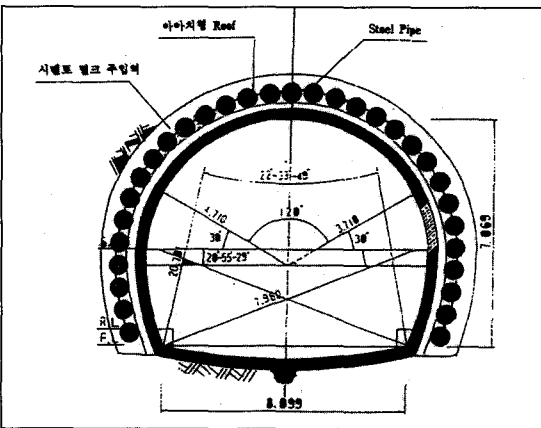


그림 6. Pipe roof

개소의 기지만이 설치가능한 구간으로 Front Jacking 공법은 기지설치에 대한 사유지의 매입등으로 불리한 공법으로 검토되었다.

2) 선형조건

본 구간의 선형은 $R = 300M$ 의 곡선구간으로 Pipe Roof공법 및 Front Jacking 공법의 적용은 불리하다. 이 두 가지 공법의 적용 시 곡선구간의 단면을 유지하기 위하여는 불필요한 굴착과 단면이 확대된다. 그러나 Frame Messer 공법은 지보공의 추진이 1 Element씩 추진되므로 선형에 관계없이 시공가능한 유리한 공법이었다.

3.2.3 경제성

Frame Messer공법은 Messer의 제작이 국내에서는 불가능한 단점이 있어 공법 자체의 공사비가 다소 고가이나 필요단면만을 굴착, 시공하므로 타공법에 비하여 가장 경제적인 공법으로 검토되었다.

3.2.4 공사기간

비교한 3가지 공법중 Frame Messer공법의 공사기간은 약 6개월 정도 소요되어 타 공법에 비하여 공기단축에 있어서도 매우 유리하였다.

3.3 공법의 선정

위에서 검토한 바와 같이 3가지 공법 중 Frame Messer 공법이 안전성 및 기타조건에 대하여도 가장 유리한 공법으로 판단되어 실시설계에 적용하였으며, 공법선정 기준표는 표2와 같다.

표 2. 공법선정 기준표

구분	Frame Messer	Pipe Roof	Front Jacking	비고
안전성	○	○	○	
현장여건	○	△	×	
경제성	○	△	×	
공기	○	△	×	

4. 터널시공

4.1 터널공법 변경

실시 설계 시 검토한 Frame Messer 공법은 앞서도 언급한 바와 같이 국내 시공실적이 미흡하여 공법에 대한 확실성이 검증되지 않은 단점이 있으나 지반침하의 대응에는 가장 효과적인 것으로 판단되었다. 그러나 본 구간의 시공시기에 본 공법의 전문 시공업체가 확인되지 않아 Frame Messer의 제작이 불가능하였으며 특히 인접지역에서 터널붕괴로 인한 열차사고가 발생함으로써 철도의 하부통과구간에 대한 공법의 재검토가 불가피하였다. 경부선 철도 통과구간이 철도레일이 위치한 지표면의 침하를 최소화하여 철도의 피해를 방지하고, 터널의 안전성을 확보코자 NATM 공법에 강관다단 그라우팅, Micro Pile, Jet 그라우팅 등의 터널 보조공법을 사용하는 방안을 강구하였으며 터널 적용공법은 표 3과 같다.

4.2 시공계획

4.2.1 터널굴착

터널 시공은 경부선 철도 횡단구간(L=48m) 전체를 Jet Grouting 및 강관다단 그라우팅 공법을 5m마다

표 3. 터널적용 공법

구분	적용 공법	비고
터널굴착	· 상부반단면-Silot 굴착후 Rling Cut굴착 · 하부반단면 좌, 우측 2분할 굴착 · 상부 가인버터 슛크리트(T=5cm)시공	
보조공법	· J.S.P Grouting - 막장 갱구부 보강3열 · J.E.T Grouting - 터널상부 지반 개량 · 강관다단 Grouting - 터널상부 차수 및 지반보강	
철도보강	· Micro Pile - 철도 침하 방지(경사시공) · 상조식 레일받침 설치	

교대로 시공하여 터널상부 지반을 차수 및 지반 보강을 실시한 후 굴착하였으며, 터널 굴착 방법은 터널상부가 퇴적층이며, 철로 하부의 지표침하를 최소화하여야하므로 터널 좌우측에 Silot 터널을 선시공한 후 Ring Cut 방식으로 굴착하고, 하부는 좌우측으로 분할하여 굴착하였다. Silot 터널은 터널 내측에 1.5m의 Rock Bolt를 좌·우측 각 3 개씩을 설치하고 슛크리트를 20 cm 두께로 측벽부에 타설하여 Silot 터널의 안정을 유지하였다. 터널굴착단면도는 그림 7과 같다.

본 공법의 시공 순서는, ①Grouting 작업, ②터널 상부 작업: 강관다단 그라우팅→A Silot 굴착→B Silot 굴착→Ring 굴착→Core 굴착, ③터널 하부 작업: A부분 시공→B부분 시공의 순이다.

작업 시 주의사항은 ①Silot 터널을 Ring부분과 5 m 이상 이격시키며, Core 부분은 Ring 부분과 3 Span(1.8 m) 이격시킨다. ②하부단면 굴착 시 A 및 B 부분은 3 Span(1.8 m) 이격시킨다.

4.2.2 보조공법

1) 보조 공법검토

본 구간은 지반보강을 하지않은 무지보상상태(하중분포율 40%)에서의 터널중앙지점에서 침하가 지표에서 2.5 cm가 발생되므로 터널 굴착 시 지반 보강을 위한 보조공법을 필요로 하였다.

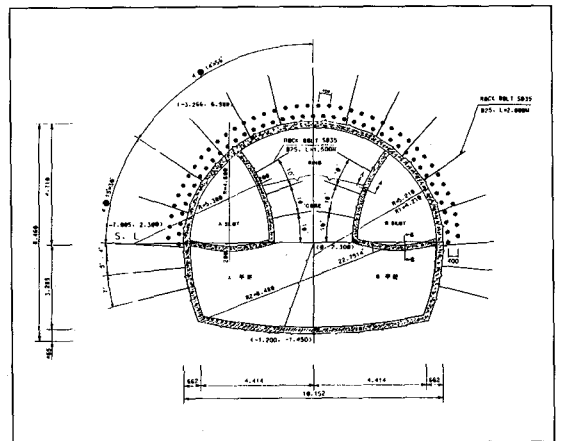


그림 7. 터널 굴착 단면도

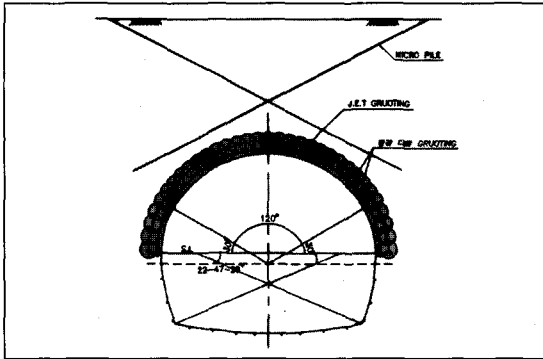


그림 8. 터널보강 Grouting 단면도



그림 9. Micro Pile 시공 전경

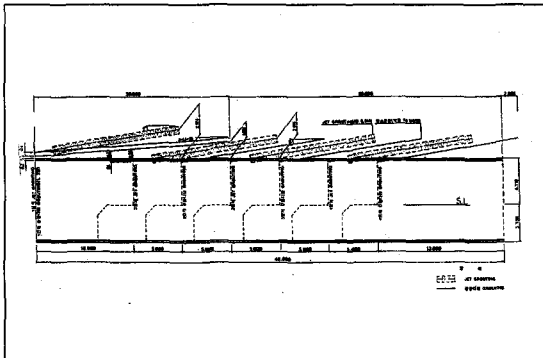


그림 10. Jet Grouting과 강관그라우팅 시공 현황도

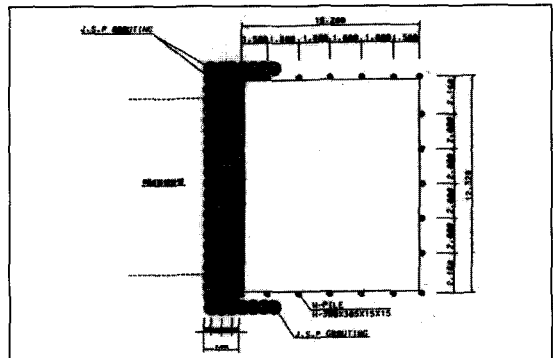


그림 11. 터널 갱구부 JSP 보강

본 구간은 터널상부와 지표면과의 토피고 약 10 m로서 터널상부지반에 퇴적층이 존재하므로 터널 굴착 중 굴착면의 안정도, 지표침하 방지, 지하수 유출을 억제할 수 있고 최근 도심지 지하철 터널공사에 시공 실적이 있는 강관다단 그라우팅, Jet Grouting을 검토하였다. <표4-2 참조>

또한 철로의 처짐 및 지반개량 시 지반의 용기를 예방하기 위하여 강관다단 그라우팅 공법과 유사한 Micro Pile공법을 터널상부의 원지반에서 터널 진행방향과 교차되게 양쪽에서 C.T.C 1.0 m로 강관(외경 50.5 mm)을 시공토록 계획하였다. 터널의 막장부는 굴착전 갱구부의 안전을 고려하여 JSP Grouting(3열)을 시행토록 계획하였다.

2) 보조공법의 시공

Jet Grouting은 5.0M의 두께로 Grouting하며

강관다단 그라우팅과 교대(C.T.C 5m) 시공하고 유효주입반경은 80 cm, 공간격은 60 cm로 적용하였다.

강관다단 그라우팅은 터널 시점부에서 C.T.C 40 cm 간격으로 2열을 수평시공하고 터널을 굴진하며 Arch부에 Jet Grouting과 격번제 순으로 시공하되 2.0 m이상의 접이음을 두도록 하였으며, 천공경 127 mm, 강관은 외경 76.3 mm의 압력배관용 탄소강관으로 시공하였다. Micro Pile은 철도의 중심선을 기준으로 수평각을 터널방향과 90°, 진행방향과 50°로 하고 수직각을 32°를 기준으로 시공하였다. 천공심도는 L=19.5 m로 천공간격 1 m로 하여 상행선 28공, 하행선 28공을 시공하였고 그라우팅 주입 압력은 3~7 kg/cm²로 실시하였으며, 배합은 현장 시험 후 결정하였으며 강관은 탄소강관으로 시공하였다. (그림 8, 9, 10, 11, 참조)













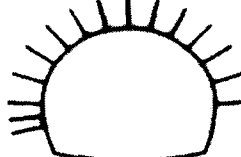
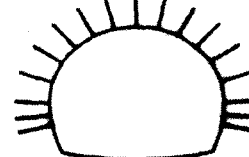
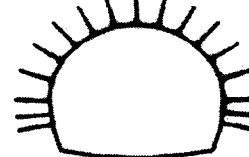
Step No.	1	2	3
시공단계	좌측 Silo굴착+강지보	Rock Bolt+연한 슛 크리트	스� 크리트 강도증가
하중분담율	40%	70%	100%
형 상			
Step No.	4	5	4
시공단계	우측 Silo굴착+강지보	Rock Bolt+연한 슛 크리트	스� 크리트 강도증가
하중분담율	40%	70%	100%
형 상			
Step No.	7	8	7
시공단계	Ring 굴착+강지보	Rock Bolt+연한 슛 크리트	스� 크리트 강도증가
하중분담율	40%	70%	100%
형 상			
Step No.	10	11	10
시공단계	좌하반 굴착+강지보	Rock Bolt+연한 슛 크리트	스� 크리트 강도증가
하중분담율	40%	70%	100%
형 상			
Step No.	13	14	15
시공단계	우하반 굴착+강지보	Rock Bolt+연한 슛 크리트	스� 크리트 강도증가
하중분담율	40%	70%	100%
형 상			

그림 12. 터널 해석 단계

상기와 같은 터널보조공법을 시행한 단면도는 다음과 같으며 개량된 지반의 물성치를 사용하여 터널해석을 시행하였다.

4.3 터널해석

4.3.1 해석방법

본 시공법에 대한 터널해석은 지반응력을 분할하여 굴착면에 적용시키는 응력분배법에 의하여 암반 요소는 4개의 절점을 갖는 사각요소로, 슛크리트는 Beam요소로, Rock Bolt는 케이블요소로 하여 굴착 이전에 앞서 터널 상부단면에 5.0 m의 Grouting Zone을 형성하여 터널 상부 지반이 보강

된 상태로 2차원 단면해석을 실시하였으며 해석단계는 그림12와 같다.

4.3.2 해석결과

본 구간의 터널을 5단계의 분할굴착, 터널상부지반은 보강 후의 물성치를 적용하여 해석한 결과 경부선 철도의 침하는 최대 0.6 mm, 천단침하는 최대 0.8 mm, 지보재에 작용하는 응력은 허용범위내에 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 기초로 하여 설계변경을 시행하였으며 공사에 착수하였다.

터널해석결과는 < 표4, 5, 6, 7, >와 같다.

표 4. 지표면침하와 터널변위 결과

구분	단계	3	6	9	12	15	비고
A(지표침하)		0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	
B(천단침하)		0.1	0.2	0.6	0.7	0.8	
C(내공변위)		0	-0.1	-0.6	-0.5	-0.5	(-)는 팽창을 나타냄
D(인버트, 응기량)		0.2	0.5	2.5	3.5	5.1	

표 5. 강지보의 축력 및 모멘트

구분	단계	3	6	9	12	15	비고
최대 압축응력	kg/cm ²	815	822	1,057	1,089	911	
최대 전단응력	kg/cm ²	158	156	125	127	126	
최대 휨응력	kg/cm ²	827	832	1,061	1,092	914	

표 6. 슛크리트 응력

구분	단계	3	6	9	12	15	비고
최대 압축응력	kg/cm ²	4.5	4.7	17.5	19.6	13.5	
최대 전단응력	kg/cm ²	1.2	1.2	1.6	1.7	2.4	
최대 휨응력	kg/cm ²	12.2	12.0	27.9	29.5	67.3	

표 7. Rock Bolt 축력

구분	단계	3	6	9	12	15	비고
최대 Rock Bolt 축력	tonf	2.1	3.3	2.4	5.2	4.8	

표 8. 보조공법 변경시공안

구분	방 조	변 경
시공안 요약	- 3단계 시공 - 5M 기둥식 시공 - 36° ~ 12°로 천공	- 4단계 시공 - 3M 주열식 시공 - 9° 각도로 천공시공성
시공성	- 높은각도의 상향천공으로 장비의 시공능력 저하	- 일정각도의 주열식시공으로 작업성 및 보강효과 증대
안전성 검토	- 2차원 단면해석 - 2차원 단면해석으로는 강관다단 그라우팅이 점으로 표시되어 효과 파악이 불가능함.	- 3차원 유한요소 해석 - 시공순서에 따른 정확한 거동 분석가능 및 강관다단 그라우팅의 효과분석이 가능함.
해석결과 지표침하량	6 m	0 m

4.4 터널시공 문제점 및 대책

4.4.1 시공상 문제점

터널 보조공법인 Jet Grouting 및 강관다단 Grouting 시공장비가 시험시공 결과 본 터널내부에서는 기동식 5.0m의 지반개량을 위한 천공각도 (36°~12°)로 시공이 어렵고 Jet Grouting의 상향각도로 천공분사 시 주입액이 유출되는 문제가 발생되어 시공장비의 능력과 터널상부 지반개량을 확실히 하기 위해 보조공법 시공 방안을 검토하였다.

4.4.2 시공상 대책

본 장비(PG-125)로 시공 가능한 3.0m 지반개량 Zone을 형성하되 Jet Grouting내에 강관을 삽입, 2차 그라우트 약액을 주입하여 완전 충전하였다. 개량된 지반의 일축압축강도가 160kg/cm² 이상이 되도록 하고, 주열식으로 Jet Grouting과 강관다단 그라우팅을 5.0m 굴진 시마다 교차 시공하였다. <표 8. 참조>

4.4.3 3차원 터널해석

터널의 구조적 안정성검토를 위하여 일본의 Soft-Brain사에서 개발한 3D-6라는 프로그램을 이용하여 지반은 솔리드요소를 쏿크리트는 쉘요소를

를 강관과 Rock Bolt는 트러스요소를 사용한 탄성 해석을 3차원 유한요소 해석으로 실시하였으며 해석결과 터널의 변위는 바닥부에서 최대 7mm, 쏿크리트와 Rock Bolt축력은 허용치의 67%, 73%로 나타나 터널의 3차원 해석결과는 비교적 안전한 것으로 나타났으며 실제 시공 시에는 중방향 60cm 간격으로 시공되므로 터널은 조금 더 안전한 구조물로 예측되었다. 이 결과로 Jet Grouting은 시공 가능한 3.0m Grouting Zone으로 변경하여 시공하였다.

5. 계측

5.1 계측계획

상기 개선방안과 함께 절대 허용 침하의 확인 및 안전 예방으로 일반 터널구간 계측 외에 연통관식 침하계 및 지중침하계를 본 터널에 적용하여 지표의 변위량을 측정하였다.

5.2 계측 결과

현장계측은 지표침하, 천단침하, 내공변위를 측정하였다. 특히 지표침하는 경부선 철도의 통과로 인하여 Level에 의한 것과 연통관식에 의한 것으로

표 9. 변위

구분	지표면	터널천단부	터널S.L부	터널바닥부	단위
측벽도강 터널굴착	0.0	0.60	0.18	8	mm
굴착 완료후	0.0	0.58	0.77	7	mm

표 10. 쏿크리트 응력 및 Rock Bolt 축력

시공단계	단계	쏘크리트 응력	Rock Bolt 축력	단위
측벽도강 터널굴착후		35.7	4.68	응력단위 :kg/cm ²
굴착 완료후		56.3	5.54	축력단위 :ton

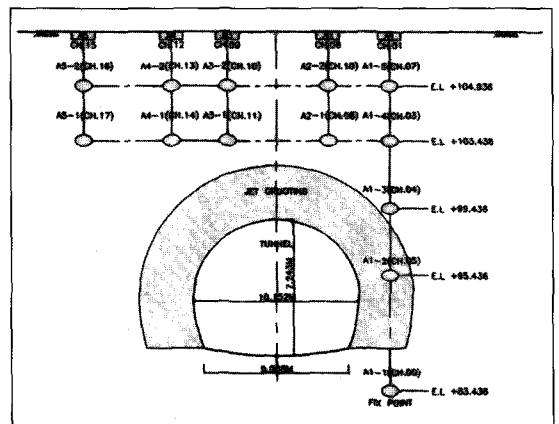


그림 13. 터널 계측 단면도

로 계측을 실시하였다.

이러한 계측에 의한 각 지점에서의 계측결과들은 다음 표에 나타내었다. <표11>에서 Level에 의한 지표침하하는 최대 5.0mm의 침하량 값을 보이지만, 연통관식에 의한 지표침하량은 터널의 중심부에서 최대 4.9mm, 그리고 중심부에서 벗어날수록 점차 작게 계측되었다.

천단변위는 초기에 발생된 변위량이 터널굴착 진행여부에 관계없이 일정한 값인 1.0mm를 유지하고 있다. 이것은 터널굴착 공사가 진행되면서 실시하는 강지보 설치, Rock Bolt 및 슛크리트의 적절한 시공 결과인 것으로 생각된다.

내공변위는 9단계 시공까지는 시공단계에 따라서 점차 터널 내측으로 변위가 증가하다가 12단계,

즉 좌측 하단부 굴착 시에는 내공의 변위가 터널 내측 쪽의 방향보다는 오히려 터널 외측의 방향으로 더 진행되는 결과를 보여주었다. 그러나 최종단계인 15단계에서는 터널굴착 시 발생하는 터널 내측으로의 변위 양상으로 다시 바뀌고 있다. 변위량은 최종 15단계에서 최대 4.1mm로 만족할 만한 값을 보여주고 있다.

5.3 예측 및 현장계측 결과의 비교

5.3.1 굴착단계별 지표변위의 비교

각 시공단계에 따른 지표변위는 유한요소 해석 결과 및 Level 측량에 의하여 얻어진 중심선 상의 지표면에 발생된 최대값과 현장계측 중의 연통관식에 의한 위치별의 침하량을 비교하면 앞의 <표

표 11. 터널 계측 결과 (단위:cm)

구 분		단 계	3	6	9	12	15	비 고
지 표 침 하	Level식		0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	
		연통관식	0.018	0.013	0.018	0.028	0.038	A1
	연통관식		0.367	0.370	0.399	0.442	0.490	A2
			0.194	0.267	0.295	0.333	0.353	A3
			0.174	0.212	0.236	0.309	0.386	A4
			0.181	0.212	0.2033	0.231	0.243	A5
B (천단침하)			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
C (내공변위)			-0.07	-0.24	-0.32	-0.41	-0.41	(-)는 팽창을 나타냄

표 12. 터널 계측 결과 (단위:cm)

구 분		단 계	3	6	9	12	15	비 고
유한요소 해석결과			0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	
현 장 계 측	Level 식		0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	
		연통관식	0.18	0.13	0.18	0.28	0.38	A1
	연통관식		0.37	0.37	0.4	0.44	0.49	A2
			0.19	0.27	0.29	0.33	0.35	A3
			0.17	0.21	0.24	0.31	0.38	A4
			0.18	0.21	0.20	0.23	0.24	A5

11)과 같다.

이 표에서 보면, 중심선 상에 따라 얻어진 예측 값과 Level 측량에 의한 값을 비교하면 초기과정의 공정에서 예측값이 계측값보다 훨씬 작은 반면에 굴착이 진행되면서 두 값은 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다. 연통관식에 의한 지표침하량은 예측값에서 선정된 위치와 정확히 일치하지는 않지만 중심선에 가까이 올수록 침하량은 크게 계측되었으며 예측값과 최종적으로 비슷한 계측량을 보여주고 있다.

대체적으로 최종굴착시의 계측 및 예측량은 비교적 좋은 일치를 나타내지만 굴착의 초기단계에서는 예측값이 과소 평가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 시공 중에 발생할 수 있는 현상을 충분히 모형화할 수 없는 이유 등으로 사료된다.

〈표12〉에 나타난 바와 같이 전체적으로 계측에 의한 값이 크게 나타나고 있다. 그리고 연통관식에 의한 것보다 Level에 의한 값이 더 크게 나타나고 있다. 이것은 경부선 철도의 운행에 따른 진동영향과 기온 등에 의한 영향, 기타 여러 가지 오차의 원인이 있었던 것으로 사료된다.

그러나 유한요소 해석 결과와 현장 계측에 의한 값이 시공 단계에 따라서 약간씩 차이는 있으나, 경부선 철도통과에 따르는 안전침하량인 1.0cm에는 훨씬 못미치는 안정한 범위 내에 있는 것으로 나타났다.

5.3.2 굴착단계별 공내변형의 비교

터널 굴착단계에 따른 터널의 공내변위를 유한요소 해석 결과와 예측치와 현장계측에 의한 값으로 분석하면 아래의 〈표13〉과 같다.

표 13. 터널 계측 결과 (단위:cm)

	3	6	9	12	15	비고
유한요소 해석결과	0	0.01	0.03	0.05	0.05	(-)는 팽창을 나타냄
현장계측	-0.07	-0.24	-0.32	-0.18	-0.41	

유한요소 해석 결과와 현장계측치의 경향은 각 터널굴착단계에 따라서 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 초기굴착단계에서 9단계까지는 증가하는 경향을 보이다가 12단계에서 감소하여 다시 최종 굴착단계인 15단계에서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 정량적인 변위값은 전체적으로 계측치에 의한 값이 크게 나타나고 있지만, 이 값은 터널 굴착시공에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

이상과 같은 유한요소 해석 결과와 현장계측치의 비교·분석에 의하면, 터널굴착 시 발생하는 지표변위와 공내변위는 터널굴착 공사 시 강지보공, Rock Bolt 및 슛크리트의 적절한 시공으로 지표상부를 지나가는 경부선 철도의 철로와 터널굴착 공사에는 큰 영향을 미치지 않았다.

6. 결론

부산지하철 2호선 1단계 공사 중 '93년 구포 열차사고에 연이어 인접된 지역에서 대단면의 터널로 경부선 철도를 통과하여야 했던 본 구간은 터널굴착으로 인한 지반의 변형으로 철로에 미치는 영향을 많은 관계자들이 우려하였으나 지반조사 및 실험, 그리고 시공단계별 정확도 높은 계측을 시행함으로써 큰 문제없이 공사를 마칠수 있었다.

당초 설계인 Frame Messer 공법은 Frame 자체로서 지반 침하에 대응하는 공법인데 반하여 변경된 시공방법은 Grouting을 통한 지반개량 및 강화로 터널을 굴착한 방법이다. 계측결과에서도 나타난 바와 같이 터널해석 시 가정된 물성치가 실제로 개량된 지반의 물성치와 어느 정도 일치함을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 국내, 또는 국외에서 시행되었던 계측의 결과와 분석, Grouting의 효과를 지질조건에 따라 정량화시킬 수 있는 방법이 강구되어진다면 이와 유사한 지장물의 통과를 지

지층이 다소 미약하더라도 지반개량 및 강화로 상부 지장물에 피해 없이 통과할 수 있음을 보여 주고 있다.

3. 경부선철도 횡단구간 계측보고서 (1997. 1)
4. 부산지하철 2호선 1단계 토목실시설계 용역 보고서
5. 김상수 역 “도시터널의 NATM 공법” (1992. 9)

참고문헌

1. 박강호 “터널굴착에 따른 변형 예측 및 현장 계측” (1996. 12)
2. 지반조사보고서 (1993. 11)

광 고 계 재 안 내

본 협회에 관심을 갖고 광고계재를 많이 이용하여 주셔서 감사합니다.
협회 발전을 위하여 앞으로도 지속적인 협조 있으시길 바랍니다.

대한터널협회지

- 발 간 부 수 : 1회 1,000부
- 발 간 시 기 : 매년 2회(3월, 9월)
- 배 부 처 : 본 협회 전회원 및 회원사, 관공서, 관련업체, 언론기관 및 각 대학교 도서관, 전국 시·국립 도서관, 기타.

(단위: 만원/1회)

	표 4	표 3	표 2	내지
갈 리	60	50	60	45
출 배	40	35	40	30

※ 특별회원사 : 15% D.C

☎ 문의처 : 社團法人 大韓터널協會
서울특별시 관악구 남현동 602-25 (웅남B/D)
TEL : (02)598-3138 FAX : (02)598-3139