

# 도심 밀집지역 충적층 터널의 설계와 시공

김대영<sup>\*1</sup>, 박영호<sup>\*2</sup>, 이홍준<sup>\*3</sup>, 김재승<sup>\*4</sup>, 황제돈<sup>\*5</sup>, 박치면<sup>\*6</sup>

## 1. 서론

도심지 터널은 도로나 철도터널과는 달리 상부에 많은 교통량과 중요 도심 구조물이 존재하는 상황 속에서 터널을 굴착하여야 한다는 점에서 많은 장애가 발생한다. 특히 도심 지하철은 심도가 얕음으로 인해 다른 터널에 비하여 불량한 지반에서 시공되는 것이 일반적이다.

본 논문은 이러한 도심지 터널 근접시공의 일례로서 서울지하철 9호선 912공구의 지하수위가 높은 충적지반에서 이수 입체교차로 하부를 터널로 통과하는 구간과 신반포로, 반포아파트 단지 및 상가 하부를 통과하는 구간의 설계 및 시공사례를 다루고자 한다. 이수 입체교차로 하부 기초 통과구간에서는 강관파일과 콘크리트 파일을 포함하여 총 67개의 파

일이 터널내부에 존재하여 절단하면서 터널 굴착을 수행하였다. 이 구간에 대하여 터널의 굴착 및 보강 설계와 시공 및 계측결과를 수록하였다. 반포아파트 단지 및 상가 하부를 통과하는 구간에서는 터널 상부에 위치하고 있는 지하수를 그라우팅으로 차수하고 강관다단 보강을 실시하는 원설계를 막장면 지하수의 배수공법을 적용한 수평제트 그라우팅(강관삽입)의 적용 등으로 변경하여 시공 중에 있으며 이에 대한 지하수 배수 및 터널 보강설계 및 시공현황에 대하여 기술하였다.

## 2. 현장개요

### 2.1 노선개요

912공구는 서울시 동작구 흑석동~서초구 반포동 구간의 총 연장 1.72km의 서울 지하철 9호선 공사현장으로 정거장 2개소(연장 330m), 터널 1,132m, 개착 258m로 이루어져 있다. 공사기간은

\*1 현대건설 기술연구소 책임연구원(dykim@hdec.co.kr)

\*2 현대건설 기술연구소 수석연구원

\*3 현대건설 서울지하철 912공구 현장소장

\*4 서울지하철건설본부 건설1부 계장

\*5 (주)에스코아이에스티 사장

\*6 (주)에스코아이에스티 이사

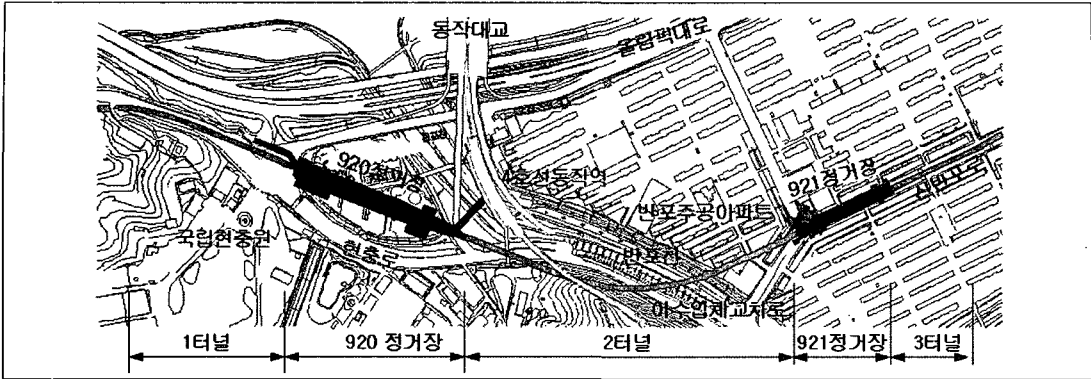


그림 1. 현장 노선도

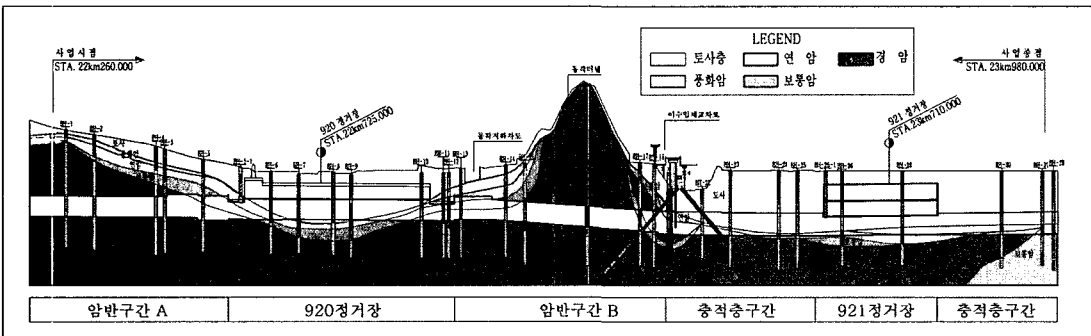


그림 2. 과업구간 지질종단면도

2002년 7월~2008년 12월(예정)이다. 그림 1은 912 공구의 노선도를 나타낸다.

시점부의 경우 국립현충원이 인접하여 있고, 현충로 하부를 통과한다. 920정거장을 지나서 동작지하차도 하부를 터널로 통과한다(이격거리 11.5m). 이후 근접시공구간인 이수 입체교차로 및 반포천을 하부 통과하여 반포아파트 및 상가, 신반포로(폭 30m)를 하부 통과하게 된다.

## 2.2 지형 및 지질 특성

1921년 고지형 분석결과에서 912공구 구간은 논이나 밭의 경작지로 활용되었고, 현재의 국립현충원

앞과 반포아파트 일대는 한강이 흐르는 하천이었다. 이러한 결과를 입증하듯, 지반조사를 수행한 결과 920정거장 이후 구간은 비교적 연마도가 높은 조립질 하상 퇴적물이 두껍게 퇴적되어 있는 것으로 조사되었다.

912 공구의 지질은 선캠브리아기 호상흑운모편마암이 기반암으로 발달하고 있으며, 제4기 충적층이 부정합으로 피복하여 주로 자갈 섞인 실트질 모래로 구성된 하상퇴적물의 특징을 보인다. 기반암인 호상흑운모편마암은 엽리구조가 발달된 이방성 구조를 보인다.

그림 2에는 912공구의 지질종단면도를 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 터널통과심도 기준으로

### 도심 밀집지역 충전층 터널의 설계와 시공

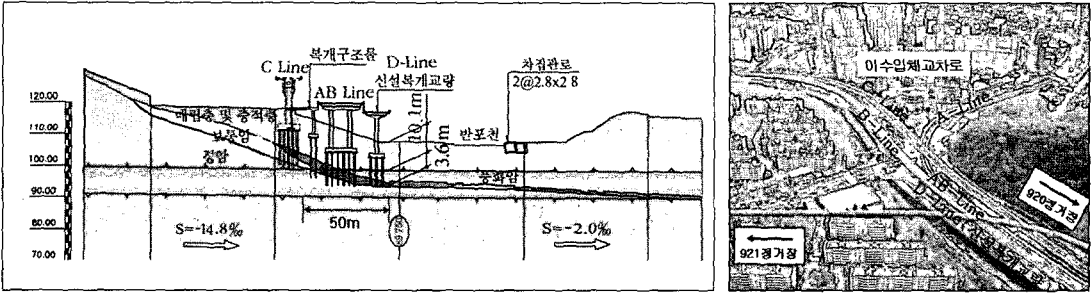


그림 3. 이수 입체교차로 터널 근접사공구간 개요도

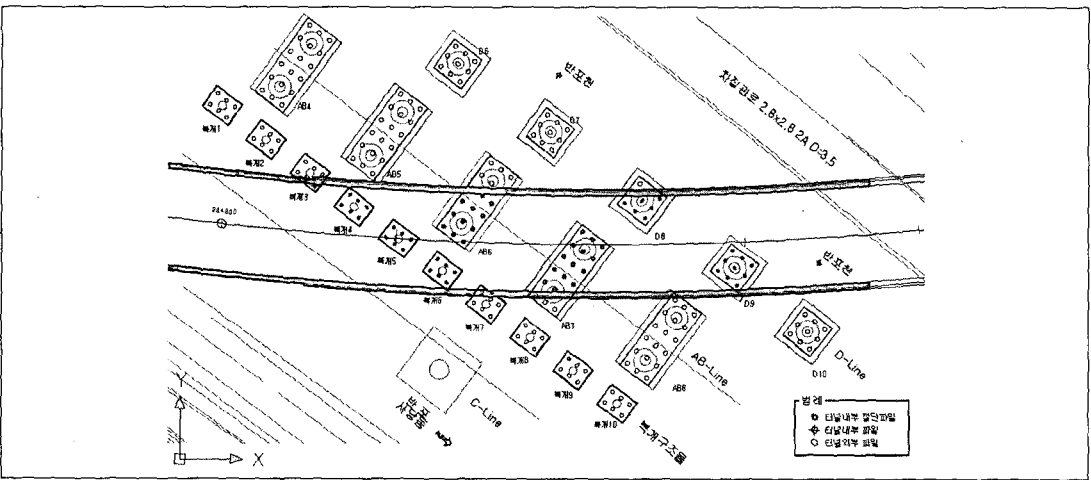


그림 4. 이수 입체교차로 터널통과구간 구조물별 파일 간섭현황

시점부에서 이수 입체교차로 이전까지는 비교적 양호한 연암~경암층(암반구간 A: Q(1.5~4.5), 주로 경암층 통과, 암반구간 B: Q(0.5~3.5), 주로 보통암, 경암 통과)을 통과하고 이후 구간부터 종점부까지는 심도변화가 크지 않은 상태로 충전층(실트섞인 모래, 모래자갈층)을 통과한다. 터널상부의 실트 충전층 분포율은 약 84%, 바닥부의 충전층 분포율은 약 34%로 나타난다.

#### 2.3 이수 입체교차로 근접사공구간 개요

이수 입체교차로 근접사공구간은 터널이 상부 고

구조물과 약 30°~45°의 사각으로 통과하는 구간으로 고가하부 말뚝기초가 터널 상부반단면 내까지 노출되는 구간이다(Sta.23K+310~Sta.23K+360). 이수 입체교차로는 2002년 12월에 준공된 구조물로 총 12차선(교량부 10차선, 제방부 2차선)으로 되어 있다(그림 3). 그림 3에서 알 수 있듯이 총 4개 구조물의 말뚝기초가 터널과 근접 또는 터널내부로 위치하고 있다. 터널의 심도는 터널천단기준으로 10~20m이며, 지반은 상부 매립층, 충전층, 기반암층으로 분포하며 시점에서 종점으로 갈수록 기반암의 심도가 깊어지는 경향을 보인다(그림 3). 충전층은 상부는 모래층, 하부는 모래와 자갈이 혼재된 모래-자

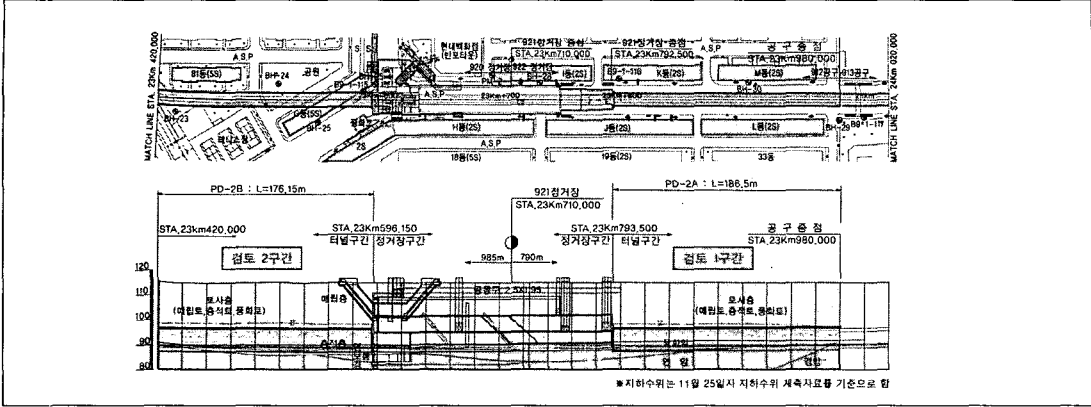


그림 5. 반포아파트, 상가 통과구간 및 신반포로 통과구간 개요

표 1. 반포구간 주요지장물 개요

구 분	PD-2A 구간(검토 1구간)	PD-2B 구간(검토 2구간)
횡단면도		
주요 지장물	상가, 신반포로(7차선), 공동구, 하수박스 등	반포아파트상가(RC콘크리트 말뚝기초)

갈층으로 이루어져 있으며, 막장 및 지반조사 결과 두께 1m내외의 실트층이(주로 모래층과 모래-자갈 층 사이) 관찰되고 있다.

이수 입체교차로 공사지 및 관련자료, 지반조사결과를 종합해 볼 때 구조물별로 터널내부로 관통하는 파일개수는 총 65개로 예상되었으며 그림 4에 나타내었다.

이수 입체교차로에 인접하여 존재하는 반포천은 유로연장 5.25km, 유역면적 29.1km<sup>2</sup>이며, 수심은 갈수기에는 건천상태에 있으며, 우기시에는 반포천의 수위가 상승하나(최대수심 9.5m) 강우 후에는 급속히 수위가 저하하여 건천상태로 있는 기간이 대부분이다.

## 2.4 반포아파트 단지 및 상가하부 통과 구간과 신반포로 하부통과 구간 개요

그림 5와 표 1에 나타난 바와 같이, 반포아파트 및 상가하부 통과구간(단지구간 : Sta.23km420.00~530.00, L=110.0m, 상가구간: Sta.23km530.00~596.150, L=66.15m)은 터널 전단면이 층적 모래자갈층(GL-26.0m)을 통과하는 토사터널 구간으로 자갈의 직경이 5~30cm에 이르며 투수성이 매우 크므로 터널굴착에 따라 수반되는 지하수위 저하 및 발생 침하량에 대해서 주변건물의 안정성 확보가 필요한 구간이다. 터널은 도로 및 상가 하부를 지나게 되며 특히, 반포아파트상가 기초 직하부를 근접 통과

## 도심 밀집지역 축적층 터널의 설계와 시공

한다. 반포아파트상가는 철근콘크리트조 지상 3층, 지하 1층 건물로 RC 콘크리트 말뚝기초로 1973년에 준공되었다.

신반포로 하부통과구(Sta.23km793.00~980.00, L=186m)은 축적 모래자갈층(자갈직경 5~30cm)이 터널 S.L까지 분포하며, 지하수위가 터널상부에 존재하는 취약한 지반조건이다. 도로하부를 통과하는 구간으로 도로 좌·우측에 상가건물이 위치하며, 보도를 경계로 아파트 등이 밀집되어 있으며, 터널상부에 공동구(2.5×2.0m) 박스와 하수박스(1.7×1.7m)가 존재한다(그림 5 및 표 1 참조).

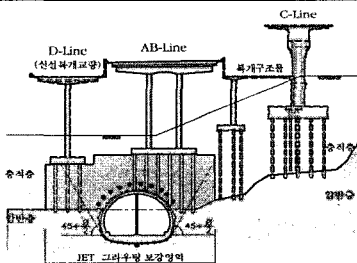
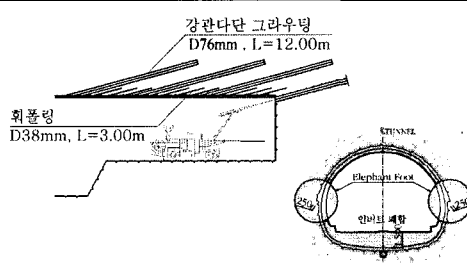
### 3. 이수 입체교차로 통과구간 터널설계 및 시공

#### 3.1 굴착 및 보강설계

터널의 굴착 및 보강설계는 이수 입체교차로 말뚝기초 일부를 절단하는 경우의 상부구조물의 안정성을 확보하고, 인접구간의 반포천의 우기시 지하수 침투영향등을 종합 고려하여 선정하였다. 지상에서는 Jet 그라우팅 보강 및 교각 기초단면 확대를 적용하였고, 터널내부의 주요 보강공법은 강관다단그라우팅 및 휘폴링 공법을 선정하였다. 이러한 근접시공시 고려한 터널 통과공법은 표 2와 같다.

지상보강을 위해 적용한 보강공법은 RJP 보강공법(D2000, C.T.C 1.8m)으로 삼중관을 이용하여 고압(300~700kg/cm<sup>2</sup>)의 시멘트 현탁액을 분사하여 지반을 교반 및 치환하는 공법이다. 본 구간은 터널 노선과 교량이 30°~45°의 사각으로 교차하므로 터

표 2. 이수 입체교차로 구간 터널 통과공법

구 분	지상보강공법	터널내부 보강공법
개요		
주요내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jet Grouting 보강(RJP 공법)</li> <li>• 교량기초형식 변경                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 선단지지말뚝 → 직접기초</li> </ul> </li> <li>• 기초단면 확폭                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- D-Line(4개소), AB-Line(4개소)</li> </ul> </li> <li>• 기반암층 상부 축적층을 지반치환 및 교반이 가능한 제트 그라우팅으로 보강하여 대상지역을 고결화하여 파일에 작용하는 집중하중을 등분포하중으로 분산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강관다단 그라우팅 : D76mm, L=12m, 보강범위 120°, 설치간격 횡방향 : 0.40m, 종 : 5.60m중첩</li> <li>• 휘폴링 : D38mm, L=3.0m, 보강범위 120°, 설치간격 종/횡 2막장마다/0.40m</li> <li>• 인버트 폐합단면</li> <li>• Elephant Foot 적용</li> <li>• 굴착방법 : Ring Cut 분할굴착</li> <li>• 표준지보패턴 : 강지보(H-150, CTC 0.8m), 강섬유숏크리트(25cm), 록볼트(4m, 종/횡 0.8/1m)</li> <li>• 굴진장 : 0.8m/0.8m, 굴착방법 : 기계굴착</li> </ul>

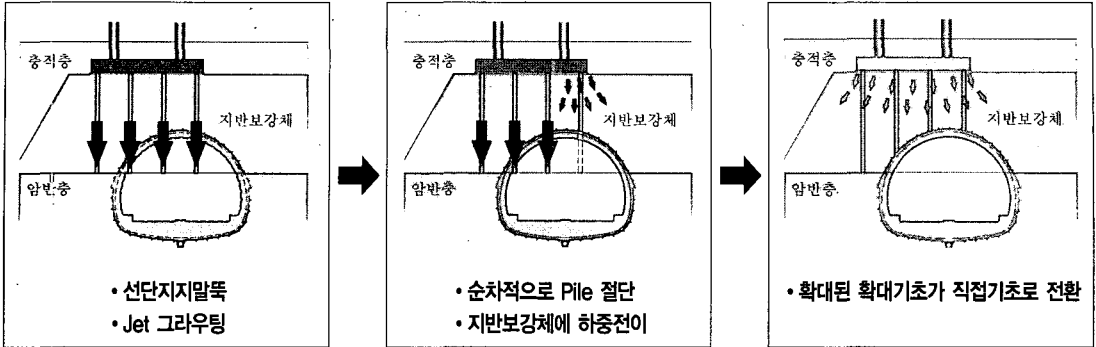


그림 6. 교각기초형식 변경에 따른 하중전이 메커니즘

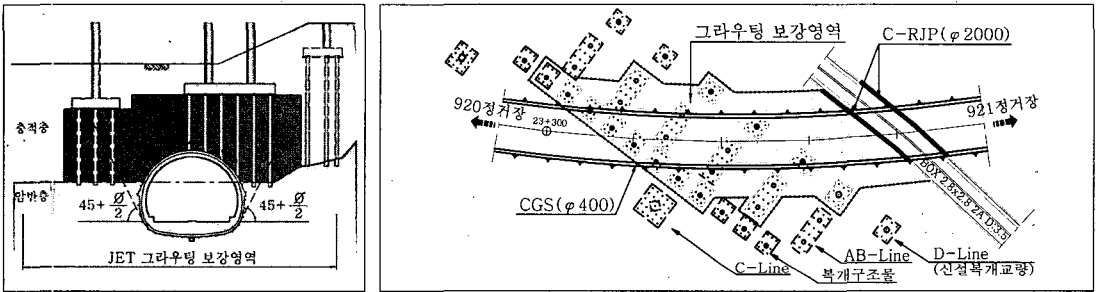


그림 7. 터널 근접시공 구간 RJP 보강범위

널굴착 시 파일절단과 하중전이가 순차적으로 반복되므로 하중이 점진적으로 직접기초면에 전달하게 되어 터널 및 지상 구조물의 안정성을 확보토록 하였다(그림 6). 보강범위는 안정해석결과 교각기초 폭의 2배 이내로 분석되었고, 주변지반 및 교각의 변위는 보강 구조체 거동에 의해 지배되므로 지반파괴이론을 고려하여 그림 7과 같이 선정하였다. 지상보강은 보강범위 외곽을 우선적으로 시행하여 커튼을 형성(C.G.S, C-RJP 공법적용)하여 지하수 유속을 감소시킨 후 보강영역 내를 시공하는 것으로 설계하였다.

### 3.2 터널 안정성 검토

이수 입체교차로 근접시공구간의 안정성을 검토

하기 위하여, 2차원 및 3차원 해석을 수행하였다. 해석방법은 지하수조건을 배제한 전응력해석, 지하수조건을 고려한 응력-간극수압 연계해석(유효응력 해석)을 수행하였다.

RJP로 보강된 지반의 물성치는 고압분사주입 후 28일이 경과한 상태에서 시추한 코아의 실내시험 및 현장시험 결과를 통하여 산출하였다. RJP 고압분사주입 시공후 1년이 경과하여 터널 굴착전에 RJP 구간의 품질확인시험을 재실시하여 개량체의 시간경과에 대한 열화 정도를 측정하였다. 확인 결과 전반적으로 구간은 계획된 직경인 2.0m를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 시추조사로부터 확인된 코아의 연속성은 실트층과 모래층(소입경 자갈 포함), 모래-자갈층에서는 비교적 균질한 연속성을 확보하

## 도심 밀집지역 층적층 터널의 설계와 시공

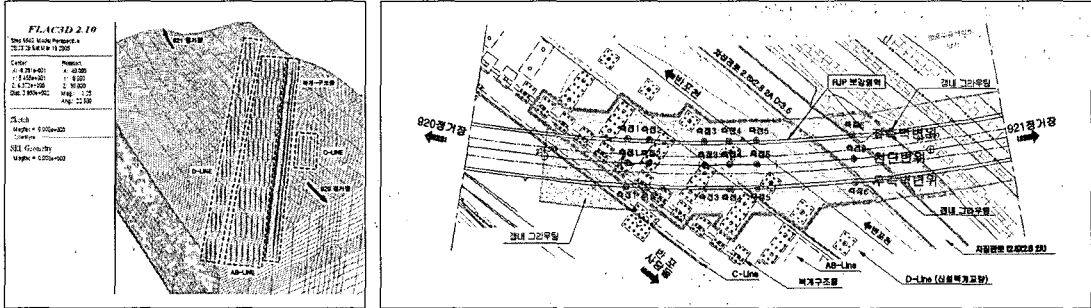
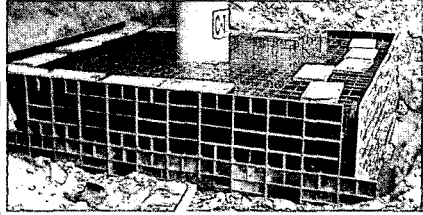
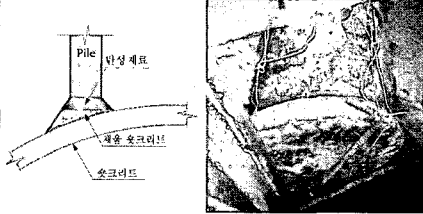


그림 8. 3차원 해석모델 및 관측점

표 3. 이수 입체교차로 구간 단계별 시공순서

시공순서	주요 공정	관련도
① RJP시험 시공	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공사현장 근접위치에서 시험시공 실시 및 개량효과 확인 (시험시공 3개소 개설)</li> <li>• 주요 확인사항                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 균질성 검토</li> <li>- 배합비, 인발속도, 토출압의 변화에 따라서 지질특성에 적합한 최적인자 도출</li> <li>- 목표 설계정수 및 개량체 범위 확인</li> </ul> </li> <li>• 지반개량 시공계획 수립</li> </ul>	
② RJP공법 적용 지반개량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개량체 재령 28일 강도발현을 위해 터널 굴착전 선시공</li> <li>• 지반개량 외곽부 커튼 그라우팅 실시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- C.G.S 그라우팅 실시(D400)</li> <li>- C-RJP 적용(D2000, CTC 1800): 급결제를 사용하여 시공시 주입재 유실방지</li> </ul> </li> <li>• 시공순서                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 외곽에서 내측으로 지반보강 실시</li> <li>- 교량 기초하부 보강은 파일의 거동이 최소화 되도록 지반개량</li> <li>- 경화시간을 고려하여 시공(균일성 확보)</li> </ul> </li> </ul>	
③ 구근 품질 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시추조사                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개량범위 10m당 터널 좌우측 각 1개소</li> <li>- 교량기초부 개소당 1개소</li> </ul> </li> <li>• 현장시험                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 투수시험 : 5공당 1개소</li> <li>- 공내재하시험 : 5공당 1개소 - BIPS, Televiewer</li> <li>- 평판재하시험 : 기초주변지역</li> </ul> </li> <li>• 실내시험 : 일축 및 삼축압축시험</li> </ul>	

표 3. 이수 입체교차로 구간 단계별 시공순서(계속)

시공순서	주요 공정	관련도
④ 교량 기초 확대	<ul style="list-style-type: none"> <li>AB-Line 4개소, D-Line 4개소 확대 실시</li> <li>- AB-Line: 4x10.2x1.2m → 6.8x10.2x2.0m</li> <li>- D-Line: 4x4x1.2m → 6.8x6.8x1.8m</li> </ul>	
⑤ 터널 굴착 및 기초파일 절단	<ul style="list-style-type: none"> <li>기초 파일 출현시 시공순서</li> <li>- 파일 주위 굴착 후 강지보공, 슛크리트 타설</li> <li>- 산소절단기에 의한 파일 절단</li> <li>- 탄성재료 설치</li> <li>- 탄성재료 하부 철근 설치(지시대 형성)</li> <li>- 절단부 슛크리트 타설</li> <li>- 터널굴착작업 반복</li> </ul>	

고 있으나(T.C.R 73%~95%), 일부 자갈의 입도가 큰 경우에 대해서는 불량한 코아회수율을 나타냈다. 자갈의 입도가 큰 지층의 경우 코아회수 당시 교란 될 가능성이 큰 것으로 판단되어, 시추공 영상촬영(BIPS)을 통해 확인하였으며, 그 결과, 심도별 공벽의 그라우트 상태는 전 심도에 걸쳐서 균등하게 시행된 것으로 추정되었다.

터널 시공 직전의 해석에 사용한 보강지반의 물성치는 1년이 경과한 상태의 일축압축시험, 삼축압축 시험 공내재하시험 등을 실시한 후 회수된 코아의 회수율과 RQD, 압축강도 등을 기초로 Hoek-Brown 파괴기준(2002)에 근거하여 실트질 토사부분은 세일, 모래부분은 사암, 자갈부분은 역암으로 간주한 후 현장 보강지반의 물성치로 재 산정 하였다. 그림 8은 해석에 사용한 모델을 나타낸다. 해석 결과, 잘려지는 말뚝이 많이 존재하면서 비대칭인 지점인 3번 계층점에서 가장 큰 천단침하량 4.6mm를 나타내었다. 슛크리트에 작용하는 응력은 최대응력이 24.02kgf/cm<sup>2</sup>으로 허용응력(84kgf/cm<sup>2</sup>)이내

에 있으며 록볼트에 작용하는 최대축력은 0.86tonf으로 허용축력 8.7tonf이내에 있다

### 3.3 터널시공

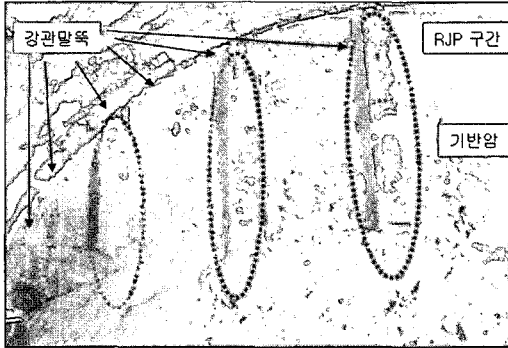
터널시공 순서는 ①RJP 시험시공, ②이수 입체교차로 하부 RJP 공법에 의한 지반개량, ③개량체 품질조사, ④교량기초 확대, ⑤터널굴착 및 접촉되는 기초 파일 절단의 순으로 이루어졌다. 단계별 시공시 주요 고려사항 및 공정은 표 3과 같다.

이수 입체교차로 직하부 통과구간을 굴착하면서 절단한 파일은 총 67개 이다. 시공중에는 강판단단 천공작업중 일부 구간에서 천공경을 통해 누수가 발생하기도 하였으나, 전반적으로 터널의 지하수 조건은 양호한 상태를 나타내었다.

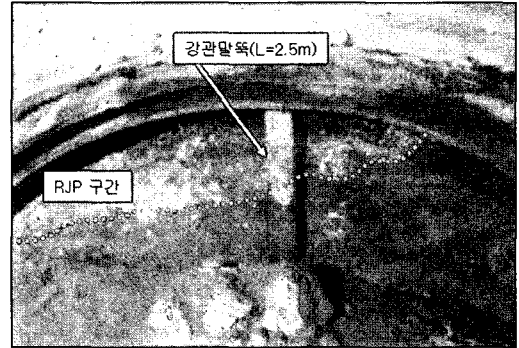
터널굴착은 막장관찰 및 RJP 보강구간의 시료에 대해 점하중 시험등을 실시하여, 보강체의 이상유무를 체크하면서 수행하였다. 그림 9에는 시공중 막장에서 관찰된 파일 전경을 나타내었다.



## 도심 밀집지역 축적층 터널의 설계와 시공



(a) Sta. 23K+327.5



(b) Sta. 23K+343.5

그림 9. 시공중 막장에서 관찰된 파일 전경

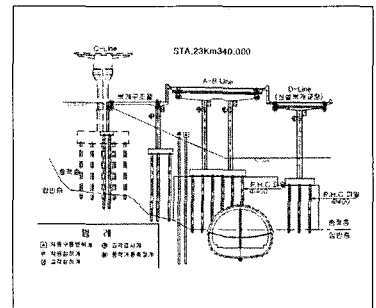
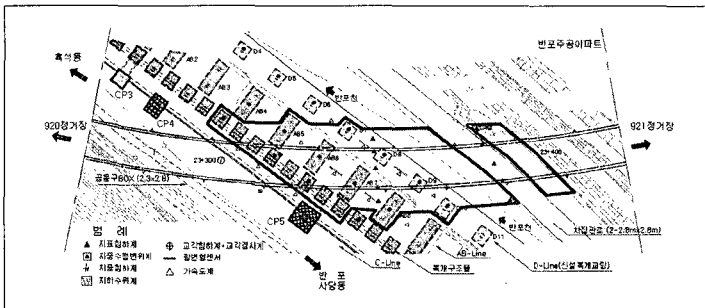


그림 10. 이수 입체교차로 터널통과구간 주요 계획계획

전반적으로 시공중 확인된 교각 파일의 위치는 설계당시 제시된 위치와 큰 차이없이 비교적 일치하는 경향을 보이고 있다. 그러나 설계당시 예측하지 못했던 파일이 추가로 발생되거나(총 13개) 파일의 종류가 설계당시와 다른 경우가 발생하여, 굴진작업에 어려움을 겪었다.

### 3.4 이수 입체교차로 통과구간 계측

이수 입체교차로 통과구간의 시공 중, 운영 중에 상부 구조물 및 터널의 안정성을 확보하기 위하여 교각 상판에 광변형센서계를 부착하여 터널굴착에 따른 교각상판의 동적거동을 분석하고 경사계와 침하

계를 설치하여 상부구조물의 이상여부를 파악하도록 계획하였다. 또한 자동층별침하계와 자동경사계를 설치하여 터널 굴착에 따른 지반의 거동양상을 측정하였고, 터널내에서는 5m마다 천단 및 내공변위를 측정하고, 지중변위 측정 5개소, 지보재응력 측정 5개소 및 영구계측계획을 수립하여 시공 중 및 운영 중 안정성을 확보하도록 계획하였다. 그림 10에는 이수 입체교차로 통과구간의 주요 계측계획을 나타내었다.

시공 중 계측한 주요결과를 보면, 상부 구조물은 설계당시 제시한 관리기준을 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 지표침하 및 천단침하 내공변위등의 결과를 보면 터널의 안정성에는 이상이 없는 것으로 나타났다(그림 11).

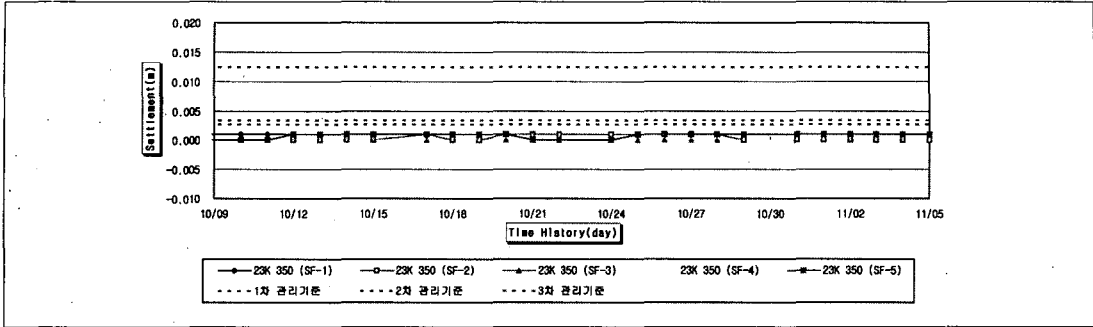


그림 11. 지표침하계 계측결과(D-Line)

표 4. 지하수위 경시곡선 분석

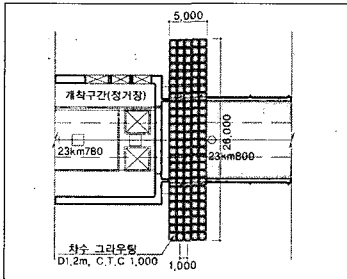
구 분	지하수위 경시곡선	정거장 굴착속도	지하수위 저하속도
PD-2A 구간		0.09m/day	13.81mm/day
PD-2B 구간		0.09m/day	14.21mm/day
반포천 인접구간		-	8.10mm/day

## 4. 반포아파트 상가 및 신반포로 통과 구간의 터널설계 및 시공

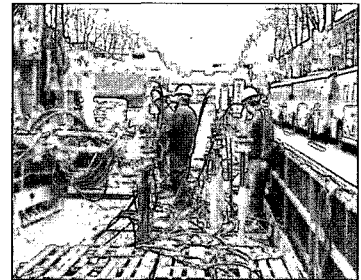
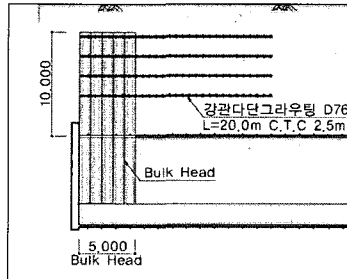
### 4.1 지하수위 조건

반포아파트 상가(PD-2B) 및 신반포로 하부통과 구간(PD-2A)은 정거장 구간의 개착시공으로 인하여 기존설계(GL(-)9.7m)에서 가정했던 것 보다 지하수위가 지속적으로 하강되고 있었으므로(터널 천

## 도심 밀집지역 축적층 터널의 설계와 시공

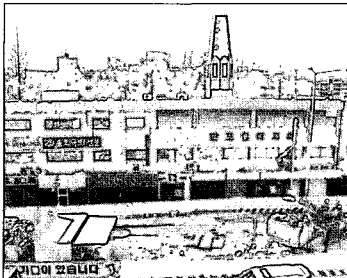


Bulk Head 구간 평면 및 종단(921정거장 종점부)



Bulk Head 시공 전경

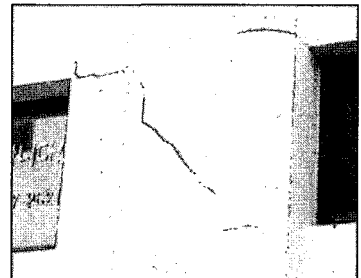
그림 12. 921정거장 Bulk Head 구간 시험시공



주변건물 전경



반포침례교회 내부균열



상가(G동) 외부균열

그림 13. 지상 그라우팅 시공으로 인한 주변건물 영향

단부근에 위치, GL(-)16.61~17.67m) 지하수배제 공법이 효과적으로 적용될 수 있는 환경이 조성되었다. 2005년 7월22일부터 PD-2A구간 10개소, PD-2B구간은 3개소, 반포천 인접구간 5개소의 지하수 위 계측(계측간격 : 10~30m)을 수행하여 정거장 개착에 따른 지하수위변화를 표 4에 나타내었다.

### 4.2 차수그라우팅 시험시공

기존설계의 차수그라우팅 시험시공은 그림 12에 나타낸 바와 같이 921정거장 벌크헤드(bulk head) 구간에서 이루어졌다. 기존설계의 차수그라우팅을 시험시공한 결과, 차수그라우팅의 강도 개선효과를 기대하기 어렵다는 분석이 이루어졌다. 기존설계에

서 차수그라우팅 적용구간의 투수계수와 변형계수를 각각  $3.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 와  $15,000 \text{tf/m}^2$ 로 가정하였다. 시험시공결과 순수 침투주입인 경우, 그라우팅전에 비해 약 70% 정도로 감소하였으며 침투 및 할렬 복합주입인 경우, 그라우팅전에 비해 약 6~12% 정도로 감소(평균투수계수  $3.3 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ )하는 정도의 차수효과가 나타났다. 공내재하시험 결과, 천공 시 공벽이완의 영향을 받아 그라우팅 후의 변형계수가 그라우팅 전과 거의 차이가 없으며 평균값은 약  $2,000 \text{tf/m}^2$ 으로 나타났다. 코야회수율은 매우 낮고 고결도가 낮았다. 육안관찰 결과 할렬주입 형태로 그라우트재가 분포하고 있었으며 지반전체에 균질하게 퍼지는 침투주입은 기대할 수 없었다. 벌크헤드 시공 시 이 할렬주입의 영향으로 지반응기가 발생하

표 5. 현장 계측자료와 수치해석을 통한 지하수위 변화특성 분석

구분	PD-2A 구간(신반포로 하부 통과구간)	PD-2B 구간(반포아파트 및 상가하부 통과구간)
터널굴착 초기조건 (현장계측)		
터널굴착시 지하수위 (수치해석)	<p>· 터널 SL 까지 지하수위 저하 예상(즉시침하 4.0mm)</p>	<p>· 터널 바닥부 까지 지하수위 저하 예상(즉시침하 8.5mm)</p>

표 6. 기존설계와 공법변경 개요

구분	기존설계(2004)	공법변경설계(2006)	비 고
과업구간	<ul style="list-style-type: none"> <li>반포아파트상가(PD-2B)</li> <li>신반포로 하부통과구간(PD-2A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>반포아파트상가(PD-2B-1, PD-2B-2)</li> <li>신반포로 하부통과구간(PD-2A)</li> </ul>	지보패턴 세분화
단 면	복선단면, 곡선인버트, Elephant Foot 적용	복선단면, 곡선인버트, Elephant Foot 적용	Elephant Foot폭 확대
굴착방법	링컷분할굴착, 중벽(CD)분할굴착	링컷분할굴착	막장면 안정성 확보, 시공성을 고려한 방법선정
보강 및 보조공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>휨롤링, 갱내치수그라우팅,</li> <li>강관단단그라우팅</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수평제트그라우팅*, 배수공법 막장면</li> <li>FRP보강그라우팅, 강관보강 레그파일</li> </ul>	지반 및 현장조건에 적합한 공법 선정

\* : 수평제트그라우팅은 고압(제트)을 이용한 시멘트계 그라우팅을 의미하며 천공과 동시에 대구경강관(114)을 삽입함

여 그림 13에 나타낸 바와 같이 정거장 시점부 반포 아파트상가(G동)에 균열이 발생(2005.4)하였다.

벌크헤드 시험시공 결과에 근거하여 터널 기존설계의 갱내 차수그라우팅에 대하여 재검토 하였다. 할렬주입에 의한 주변건물에 미치는 영향을 최소화 하기 위해 주입개념의 그라우팅 보다는 갱내에서 치환개념의 보강을 실시하는 방향 전환이 모색되었다.

### 4.3 터널공법 설계변경

차수그라우팅에 의한 차수 및 강도증대효과가 불확실하고 히빙에 의한 인접 구조물의 악영향 때문에 차수보다는 지하수 배제공법을 검토하였다. 지하수위 계측자료를 이용하여 터널 막장이 굴착되었을 때의 지하수위를 해석을 통하여 산정한 결과(표 5)

### 도심 밀집지역 축적층 터널의 설계와 시공

2005년 12월에 지하수위는 터널 상단에 위치하고, 터널이 벌크헤드를 통과하여 10m 정도 전진하면 터널의 지하수위는 전층이 축적층인 경우 터널바닥까

지 저하되고 풍화암이 SL에 위치하는 경우 SL까지 저하되며 그 이후의 굴진에는 큰 변동 없이 유사한 수위를 유지하는 것으로 예측되었다.

**표 7. PD-2A 구간(신반포로 하부 통과구간)**

구 분	기존 설계	공법변경 설계						
개 요 도								
굴착공법	링컷분할굴착(상반 : 기계굴착, 하반 : 발파)							
보강공법	갱내치수	천단보강	막장보강	측벽보강	배수	천단보강	막장보강	측벽보강
	고분말 시멘트 그라우팅	강관다단 φ76 CTC 400 (2열중첩)	-	록볼트 (L=4.0m) (상·하반)	물베기공	수평제트* CTC 600 (2열중첩)	FRP그라우팅 (40° 간격, 방사형배치)	록볼트 (L=4.0m) (하반)

**표 8. PD-2B-1 구간(반포아파트 단지하부 통과구간)**

구 분	기존 설계	공법변경 설계						
개 요 도								
굴착공법	증벽분할굴착(상·하반 : 기계굴착)							
보강공법	차수	천단보강	막장보강	측벽/각부보강	배수	천단보강	막장보강	측벽/각부보강
	고분말 시멘트 그라우팅	강관다단 φ76 CTC 400 (2열중첩)	-	록볼트 (L=4.0m) (상·하반)	물베기공	수평제트 CTC 600 (2열중첩)	FRP그라우팅 (40° 간격, 방사형배치)	록볼트 (L=4.0m) (간격 0.8m)

이 지하수위 예측결과를 바탕으로 물을 배제시키면서 동시에 천단부, 측벽부 및 막장부의 변위를 최대한 억제할 수 있는 강성보강공법으로 변경하였다. 주요변경 사항은 기존설계에서 터널주변지반 보강 및 차수용으로 설계되었던 차수그라우팅 대신 막장면 배수공을 이용한 배수공법으로 변경되었으며, 부족한 지반의 강성에 대해서는 갱내 수평제트그라우

팅에 의한 강성의 케노피(canopy) 형성으로 굴착으로 인한 하중을 부담하는 공법으로 변경되었다. 주요변경내용을 표 6에 정리하였다.

표 7부터 표 9에 신반포로 통과구간, 반포아파트 하부통과구간 그리고 반포아파트 상가 하부통과구간에 대한 기존 설계와 공법변경설계 내용을 정리하여 나타내었다.

표 9. PD-2B-2 구간(반포아파트 상가하부 통과구간)

구분	기존 설계				공법변경 설계			
굴착공법 개요도								
굴착공법	중벽분할굴착(상·하반 : 기계굴착)				링컷분할굴착(상·하반 : 기계굴착)			
보강공법	차수	천단보강	막장보강	측벽/각부보강	배수	천단보강	막장보강	측벽/각부보강
	고분말 시멘트 그라우팅	강관다단 φ 114 CTC 400 (2열중첩)	-	록볼트 (L=4.0m) (하반)	물배기공	수평제트 CTC 600 (3열중첩)	FRP그라우팅 (40° 간격, 방사형배치)	록볼트 (L=5.0m) (간격 0.8m)

표 10. 시공순서 (배수 및 막장보강)

① 배수공법(필요시) / ② 물배기공	③ 막장보강공(FRP 보강그라우팅)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물배기공(PVC 다발집속관) : L=12m, 설치간격=2.5m, 집속경=75mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 막장보강공 : L=12m, 설치간격=40° 방사형, 직경(관경)=60mm</li> </ul>

## 도심 밀집지역 축적층 터널의 설계와 시공

표 11. 시공순서 II(천단부 보강)

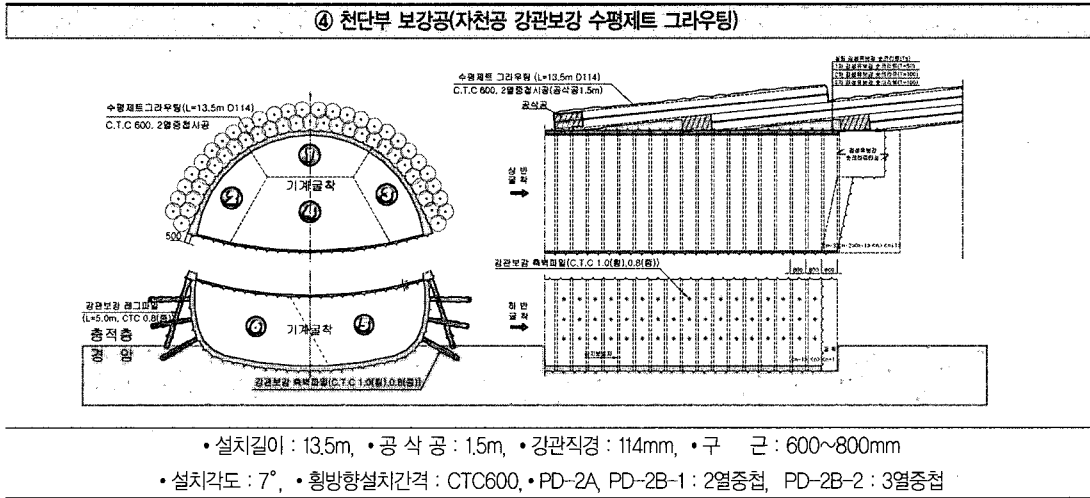
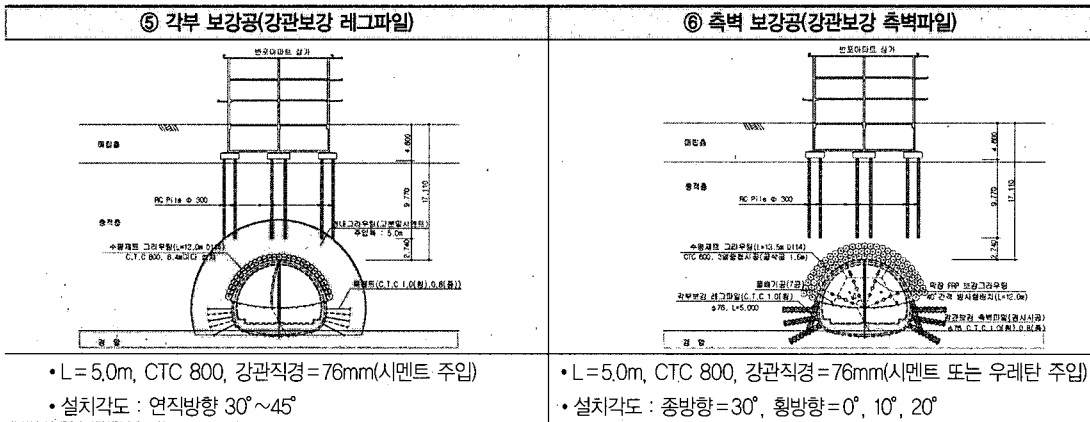


표 12. 시공순서 III(각부 및 측벽보강)



시공순서는 표 10부터 12에 도면과 함께 나타난 바와 같이 ① 필요시 터널 측벽에 배수공법 실시, ② 막장면 물빼기공(길이 12m) 시공, ③ 막장부 보강공 시공, ④ 천단부 수평제트 그라우팅 시공, ⑤ 각부 보강공(강관보강 레그파일) 시공, ⑥ 측벽 보강공 시공의 순서이다.

### 4.4 터널안정성 검토

터널 안정성 검토에 사용한 지반물성치는 이수 입체교차로 통과 구간과 동일하나 수평제트 그라우팅 부분의 물성치를 변경하여, 변경된 물성치에 따라 기존설계와 수평제트 그라우팅을 적용하였을 경우의 CD분할 굴착과 링컷분할 굴착을 표 13에 비교하

표 13. 공법변경에 따른 안정성 검토(2차원해석)

구 분	PD-2A 구간(신반포로 하부 통과구간)	PD-2B 구간(반포아파트 단지 및 상가 통과구간)				
터널변위 발생경향						
숏크리트 휨압축응력 발생경향						
구 분	최대변위(mm)	압축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	판 정	최대변위(mm)	압축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	판 정
기존설계	91.45	72.83	O.K	12.59	89.71	N.G
공법설계	49.41	57.28	O.K	15.52	60.82	O.K

표 14. 시공조건을 고려한 3차원 안정성 검토

구 분	PD-2A(STA.23km860~908)	PD-2B-1(STA.23km432~480)	PD-2B-2(STA.23km542~590)
최종굴착시 지보재의 휨압축응력 및 축력 발생경향			
유효응력 증가로 인한 지표침하량			
검토결과	천단변위 (mm): 17,62 내공변위 (mm): 15,74 휨압축응력 (kg/cm <sup>2</sup> ): 61,48 O.K	천단변위 (mm): 25,04 내공변위 (mm): 10,65 휨압축응력 (kg/cm <sup>2</sup> ): 69,24 O.K	천단변위 (mm): 25,45 내공변위 (mm): 23,03 휨압축응력 (kg/cm <sup>2</sup> ): 63,95 O.K



## 도심 밀집지역 총적층 터널의 설계와 시공

표 15. 배수공법 적용에 따른 터널안정성 검토(Coupled Analysis)

구 분	PD-2A 구간(신반포로 하부 통과구간)	PD-2B 구간(반포아파트 단지 및 상가 통과구간)
최종굴착시 지보재의 휨압축응력 및 축력 발생경향		
유효응력 증가로 인한 지표침하량		
검토결과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 휨압축응력 31.2%, 지보재 축력 2.8% 증가</li> <li>• 유효응력 증가로 인한 지표침하는 4.60mm</li> <li>• 지보재 휨압축응력, 축력 등이 허용치내</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 휨압축응력 10.5%, 지보재 축력 6.3% 증가</li> <li>• 유효응력 증가로 인한 지표침하는 5.69mm</li> <li>• 지보재 휨압축응력, 축력 등이 허용치내</li> </ul>

였다. 이 결과 수평제트그라우팅을 적용할 경우 기존의 설계보다 효과적인 것으로 나타났으며, CD 굴착보다 링컷굴착을 할 경우 지보재의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

터널이 통과하는 주요 지점에 대하여 표 14에 나타난 바와 같이 3차원 해석을 실시하여 시공위치별 터널 침하량과 지보재의 안정성을 검토하였다. 또한 유효응력 해석과 침투압을 고려한 응력-간극수압 연계해석을 실시하여 안정성을 비교하였다(표 15).

### 4.5 지표침하특성 분석 및 인접구조물 건전도 검토

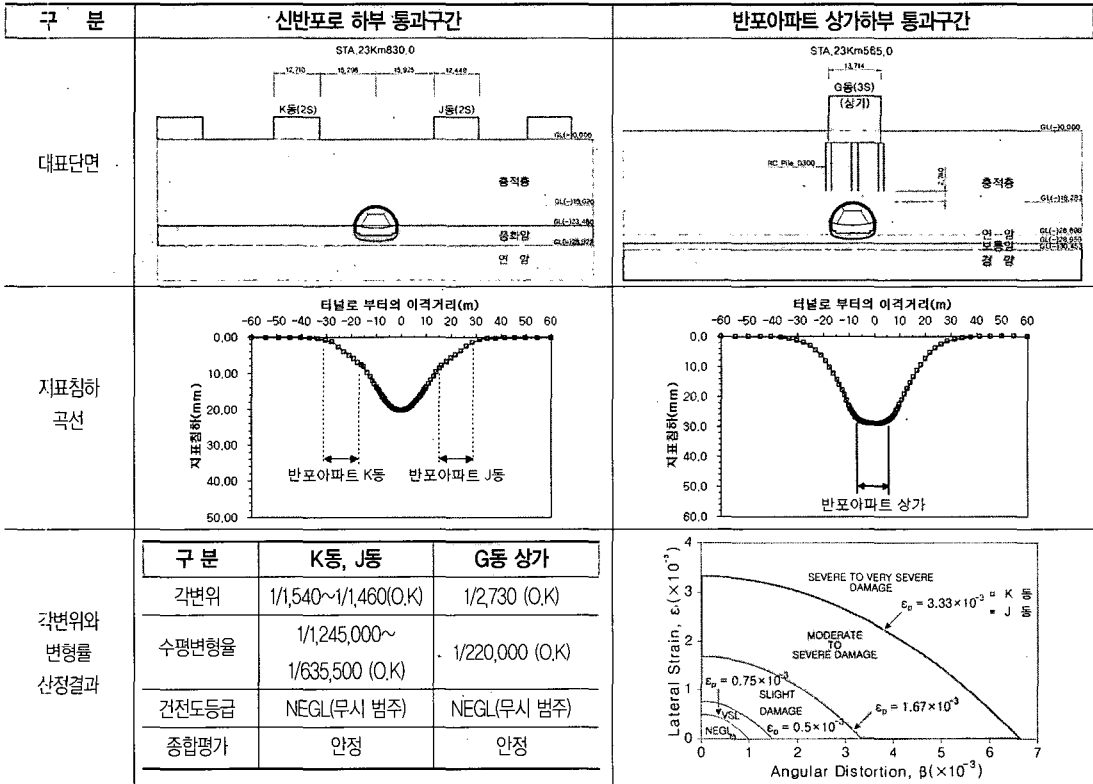
PD-2A 구간은 터널굴착 방향으로 좌·우측에 반포아파트와 상가 등이 존재하며, PD-2B 구간중 921 정거장 근접구간은 터널 직상부에 반포아파트

상가(토피고약 17~20m, 상가기초는 RC 파일)가 존재한다. 터널 굴착에 따라 건물 및 지반에 발생하는 각변위 및 수평변형율을 이용하여 표 16에 나타난 바와 같이 구조물의 건전도 평가를 수행하였다. 아파트 및 상가의 건전도를 평가한 결과, 각변위 및 수평변형율 등이 기준치(각변위 1/500, 수평변형율 1/2,000)를 초과하지 않으며 Son & Cording(2001)의 건전도평가 등급에서도 무시범주 이내에 속한다. 지중구조물인 공동구 박스와 하수박스에 대하여도 굴착으로 인한 건전도 평가를 실시하여 안전범위 이내에 속함을 확인하였다.

### 4.6 반포아파트 상가 및 신반포로 통과구간의 터널 시공

반포아파트하부, 반포아파트 상가 하부 및 신반포

표 16. 인접 지상구조물 건전도 평가

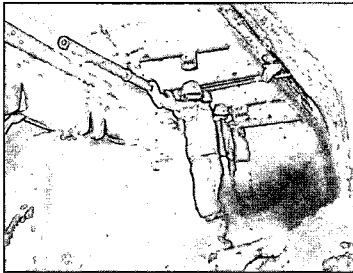


로 통과구간의 시공은 공법 변경시 결정된 시공순서와 조금 다르게 시공되고 있다. 시공순서는 ①막장면 FRP 보강, ②수평제트그라우팅 및 개량체 품질조사, ③막장전방 배수공설치, ④ 굴착, ⑤ 1차지보재 설치, ⑥ 레그파일 설치, ⑦ 엘리펀트 풋(elephant foot) 설치 ⑧ 하반 측벽보강(록볼트 또는 강관그라우팅), ⑨ 하반굴착, ⑩ 1차지보재 설치의 순으로 이루어진다. 그림 14에 시공과정에 대한 사진을 정리하였다.

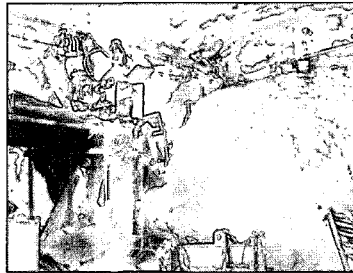
수평제트그라우팅은 트레비젯으로 강관케이싱과 그 내부에 분사노즐이 장착된 비트가 동시에 굴진되어 1.5m까지는 공삭공으로 고압분사를 하지 않은

상태로 천공하고 그 이후부터 13.5m까지 고압분사를 실시하며, 강관 케이싱이 약 50cm의 뒤에서 삽입되므로 공 붕괴를 방지하여 드릴비트의 재밍(jamming)을 방지할 수 있는 공법이다. 현장 적용 시에는 케이싱과 동시에 천공, 고압 분사하는 방법은 굴진이 어려워 선 천공을 실시한 후 케이싱과 비트가 동시에 굴진하면서 주입하는 방법으로 변경하여 적용하였다. 이러한 수평제트그라우팅 1공을 설치하는데 소요되는 시간은 총 2시간 20분(선천공 30분, 케이싱 삽입 및 고압분사 81분, 코킹 및 캡설치 30분) 정도가 소요된다. 각공의 주입시 서로의 간섭을 피하기 위해 격공으로 천공하였으며 전체 수평제

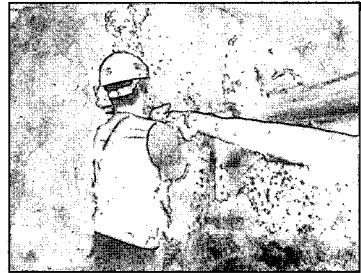
## 도심 밀집지역 층적층 터널의 설계와 시공



① 막장면 FRP 보강



② 수평제트그라우팅 및 구근 품질조사



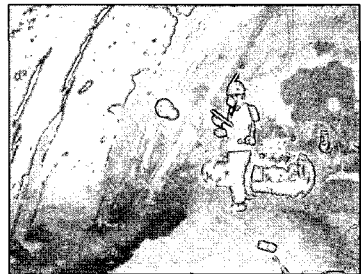
③ 막장전방 배수공설치



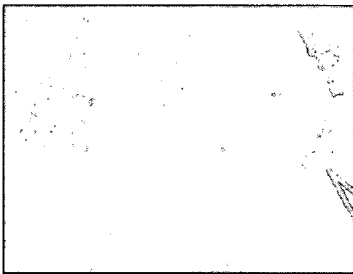
④ 링컷 분할굴착



⑤ 1차 지보재설치



⑥ 레그파일 천공



⑦ 레그파일 케이싱 내 설치



⑧ 엘리펀트 풋 프레임 용접

그림 14. 반포아파트 및 아파트 상가 통과구간 시공과정

트 구근이 설치되는데 소요되는 시간은 평균 4일이다. 수평제트그라우팅을 실시하는 중에 회수되는 슬라임(모래와 시멘트밀크)을 채취하여 강도 측정용 공시체를 만든다(재령7일의 압축강도 범위 54~80kg/cm<sup>2</sup>). 수평제트그라우팅 시공 후 막장면에 배수공을 설치하고 링컷 굴착으로 0.8m 굴진한 후 강지보와 슛크리트를 타설한다. 다음 수평제트그라우팅 위치까지는 6.4m를 굴진하며 이때까지 굴진 시간은 8일에서

10일이 소요된다. 수평제트그라우팅에서 다음 수평제트그라우팅까지 소요시간은 12~14일 정도이다. 지하수는 지하수면 이하에서 균일하게 배수되지 않고 부분적으로 배수된다. 배수공을 설치한 상황에서도 수위하락은 빠르지 않은 1~3cm/day로서, 수평제트그라우팅 후 굴진이 계속되면 약 20cm 정도 수위가 상승한다. 막장면은 FRP 그라우팅 없이도 유지되는 상태이나 안전성 확보를 위하여 보강하고 있다.

표 17. 계측관리기준

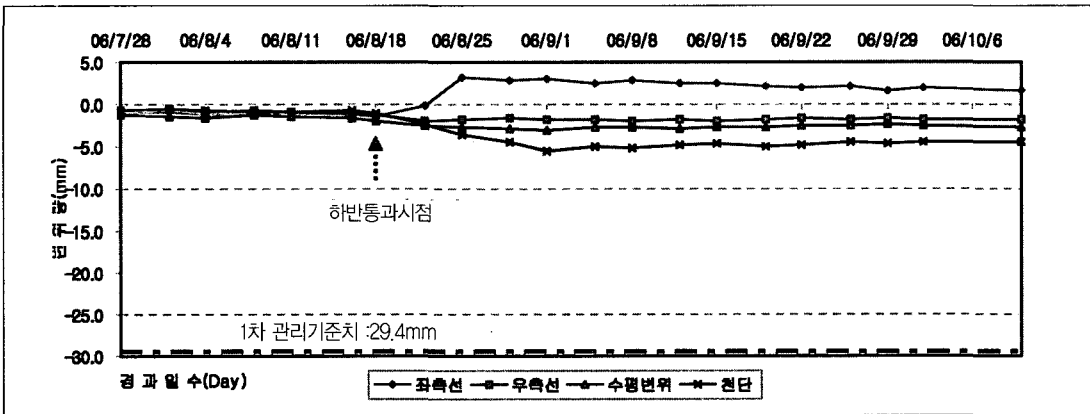
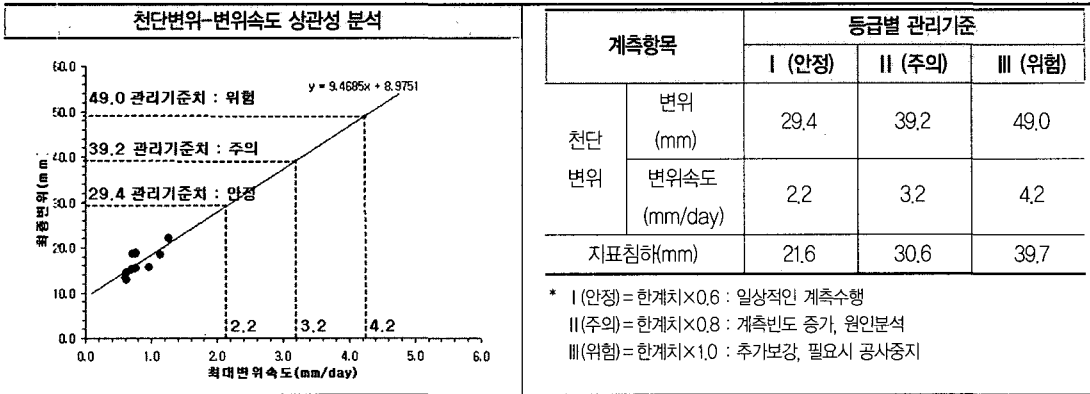


그림 15. PD-2A 구간 St.23+810 단면 터널 변위 계측결과

### 4.7 반포아파트 상가 및 신반포로 통과구간의 계측관리

계측관리는 수치해석결과를 이용하여 관리기준치를 표 17과 같이 설정하였으며 이에 따라 관리하고 있다.

천단변위와 내공변위의 결과는 그림 15에 일부 구간을 나타내었다. 변위는 우려했던 것과는 달리 예측치보다 매우 작게 나타나고 있다. 상반 굴착시 약 2~3mm 내외로 측정되었고 하반 굴착시 최대

5~8mm 정도 발생하는 것으로 나타났다. 계측기 후방 설치로 인한 손실변위를 약 30%~40% 정도 고려하면 상하반 최종 굴착시 약 10~12mm의 변위가 발생하는 것으로 예상되며, 이는 관리기준치의 안정범위(29.4mm) 이내에서 안정된 상태에서 굴착되고 있는 것으로 판단된다. 변위량이 안정측의 1/3 정도로 작게 측정되고 있는 것은 터널 주변지반의 물성치 산정에서 특히, 모래자갈 중적층의 변형계수의 산정에 더 많은 연구 노력이 필요함을 보여준다.

## 5. 결론

지하수위가 높고 투수성이 큰 충적층으로 구성된 지반에서, 도심지 지장물을 통과하는, 특히 항시 차량의 통행이 빈번한 이수 입체교차로의 교각말뚝 절단 통과 및 반포아파트 상가 하부통과에 대하여 세간의 많은 우려와 관심 속에 지하철 9호선 912공구의 터널시공이 이루어지고 있다. 여러 인자들을 고려한 설계기법의 적용 및 안전성을 깊이 고려한 시공법을 결정하여 시공 중에 있는 충적층 지반에서의 지장물을 통과하는 터널의 설계와 시공에 대하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 이수 입체교차로 하부 말뚝 절단통과를 위하여 계획한 제트그라우팅에 의한 모래자갈층의 고화는 실트질 토사에서는 치환 및 교반이 완벽하게 이루어지지 않았으나 모래 자갈층에서는 성공적으로 수행되었다. 일부 값들(변형계수)이 관리기준치에 미달하기는 하였지만 전반적으로 양호하게 구근이 형성되었다.
- 2) 말뚝절단 시에 축하중을 주변 보강지반으로 전달하여 상부구조물이 안정된 상태에서 굴착을 수행하였다. 터널을 굴착하면서 계속한 계측 데이터는 모두 관리기준치 이하의 작은 값들을 나타내었다. 터널통과 시 지표침하량이 1mm 이내로 상부구조물이 안정된 상태에서 굴착을 완료할 수 있었다.
- 3) 반포아파트 및 상가 신반포로 통과구간의 터널 공법은 주변지반의 지하수위 상황, 차수공법 시험시공, 지하수위 저하를 고려한 수치해석 등을 통하여 면밀히 검토하여 기존의 차수 및 보강공법에서 배수 및 보강공법으로 변경하였다.
- 4) 변경된 공법은 터널 막장면의 지하수 배수와 터

널 상부수평제트그라우팅에 의한 강성 케노피의 설치가 주요 내용이며, 충적층의 심도에 따라 각부 레그파일과 측벽부 강관보강 그라우팅으로 구성되어 있다.

- 5) 현재 굴착 초기단계이며 수평제트그라우팅을 실시한 후 배수공을 설치하여도 예측했던 수위 보다는 약간 높은 상태를 나타내고 있다. 현재 까지 계측 데이터는 상반 굴착 시에는 천단침하량이 약 2~3mm로 계속되고 있으며 하반 굴착 시 7~8mm 정도에서 수렴하는 것으로 나타나 1차관리기준치(29mm, 안정상태) 이하의 안정된 상태를 보이고 있다.
- 6) 이수 입체교차로 통과 및 반포아파트 통과 구간의 해석과 계측결과를 비교하면 안전측에서 시공되었거나 시공 중에 있다. 이 시공 및 설계사례를 바탕으로 추후의 유사 사례의 공사에서는 원지반 물성 파악에 대한 새로운 측정방법의 적용을 도입하는 등 보다 많은 노력을 기울여 보다 경제성과 안전성을 모두 확보하는 설계와 시공을 할 수 있기를 기대한다.

## 참고 문헌

1. 서울지하철 9호선 912공구 건설공사(토목) 정거장 규모 축소 및 설계기준 조정에 따른 변경설계보고서, 서울특별시 지하철건설본부, pp.325~454
2. "서울시 지하철 912공구 터널구간 설계/시공 계획 타당성 검토용역" 성균관대학교 과학기술연구소, pp.77~93
3. "지하철 터널의 설계와 시공자료집", 서울특별시 지하철 건설본부, 제 1,2,3권
4. 주광수, 나도상(2005), "고가도로 기초파일에 근접한 터

- 널의 시공사례에 관한 연구” 대한토목학회 터널시공기술  
대토론회
5. 서울지하철 9호선 912공구 토사터널 공법변경보고서(신  
반포로 하부, 반포아파트 및 상가 하부구간), 서울특별시  
지하철건설본부
6. 921정거장 주입공법 시험시공 보고서, 현대건설기술연구  
소
7. Cording, E.J., Long, J.H., Son, M., and Laefer, D.F.  
(2001). “Modeling and Analysis of Excavation-  
Induced Building Distortion and Damage Using a  
Strain-based Damage Criterion,” Proceedings of  
the Conference on Response of Buildings to  
Excavation-induced Ground Movements, CIRIA,  
London (6).

## 2006년 정보화시공기술위원회 학술발표회 안내

한국지반공학회 정보화시공기술위원회에서는 다음과 같이 학술발표회를 개최하고자 합니다. 관심 있는  
분들의 많은 참여를 부탁드립니다.

- 아 래 -

- 제 목 : 도심 지하철 9호선 최신 정보화시공의 현황과 발전 방향
- 일 시 : 2006년 11월 23일(목) 14:00 ~ 18:00
- 장 소 : 한국교총회관 2층 세미나실 (서초구 우면동)
- 참가비 : 정회원 15,000원 / 학생회원 10,000원 / 비회원 20,000원  
(논문집 포함, 논문집 별도 구입시 10,000원)