

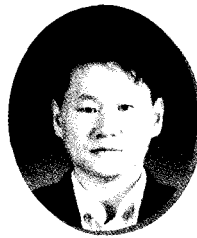
고압분사공법을 적용한 도심지 총적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례



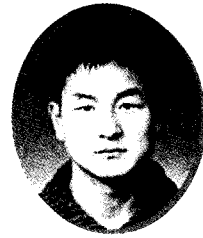
심 동 현
현대건설 부장
기술개발원 설계실



이 홍 준
현대건설 소장
서울지하철912공구



정 원 호
현대건설 차장
기술개발원 설계실
(sfjung@hdec.co.kr)



윤 기 항
현대건설 과장
서울지하철912공구

1. 서론

최근 도심지에 건설되는 지하철은 활용 가능한 토지가 한정되어 있고 도시 미관상 고가 교통구조물의 설치가 제한됨에 따라 지하에 건설되는 것이 일반적인 추세이며, 지하공간의 개발로 인한 기존 구조물과의 간섭이 점차 빈번해지고 있는 실정이다. 특히 8개의 지하철도 노선이 구축되어 있고 주요 도심구간에 고가 및 지하차도 등 입체 교통망이 설치되어 있는 서울의 도시철도 건설은 기존 교량, 하천, 건물, 지하차도 등 도시시설물 하부를 터널로 횡단하여 이루어지는 경우가 빈번한 실정이다. 이러한 지하공간의 사용으로 본 구조물뿐 아니라 상부 및 주변 지반의 안정이 시공시 매우 중요한 요소로 부각되고 있다.

이에 따라 도심지에 건설되는 지하철은 열악한 지형과 지반조건 등 각종 제약조건을 적극적으로 극복

하는 방향으로 설계와 시공방법이 검토되고 결정되어야 한다. 이러한 도심지 지하철 터널공사의 대표적 사례로 서울지하철 912공구 토사터널 통과 구간 중에서 반포아파트 단지 및 상가 하부와 신반포로 하부 구간에 대하여 시공사례 중심으로 소개하고자 한다.

서울지하철 912공구 터널의 특징은 다음과 같다.

- ① 한강과 반포천의 영향으로 인한 높은 지하수위,
- ② 총적 모래자갈층이 터널 상부반단면에서 터널 전 단면까지 분포하는 지반조건,
- ③ 터널 통과 구간 지상과 지하에 존재하는 기존 구조물과의 간섭,
- ④ 터널상부에 30년 이상의 노후된 반포주공아파트와 상가 밀집,
- ⑤ 터널 상부에 위치한 이수입체교차로, 신반포로 등 주요 간선도로,
- ⑥ 인접 하천의 수질관리 및 소음·진동 규제 등 어느 것 하나 방심할 수 없는 각종 약조건에 노출된 전형적인 도심지 난공사구간이다.

이러한 구간에 대하여 주변 구조물 및 지반의 안정성 확보와 터널 자체의 안정성 확보를 위하여 최적의 보강공법 및 굴착공법을 검토하고 적용하였으며, 철저한 품질관리와 시공관리로 서울지하철9호선 공구 중 최대 난공사 구간의 공사를 성공적으로 수행할 수 있었다. 반포천 하부 구간에는 지상에서 수직으로 시공하는 RJP(Rod-in Jet Pile)공법을 적용하였고 반포아파트 및 신반포로 하부 구간에는 터널 내부에서 실시하는 수평제트 그라우팅공법을 적용하는 등 고압분사공법에 의한 그라우팅을 토사층 통과 터널의 주요 보강공법으로 적용하였다.

이번 기사에서는 설계를 위한 각종 시험, 지반정수 산정, 수치해석 등 소프트웨어적인 부분은 설계 보고서나 논문 등으로 기 발표된 바 있어 최소한으로 수록하였으며, 토사터널의 지하수 처리, 안정성 확보, 시공성 향상을 통하여 "설계 의도를 어떻게 실제 현장에 적절히 구현할 것인가?" 하는 시공 방법과 문제점 개선사항을 중심으로 한 하드웨어적 내용을 중심으로 서술하였다.

2. 현장 개요

2.1 노선 개요

당 현장은 9호선 1단계 구간 중 동작구 흑석동(STA. 22k260)에서 서초구 반포동(STA. 23k980)까지의 총 연장 1.72km를 건설하는 구간으로 정거장 2개소(L=330m), 본선개착(L=258m), 터널(L=1,132m)로 구분되어 있다.

2.2 지형 및 지반 특성

912공구의 지형은 북부에 북한산, 북악산, 남산 등 산맥이 돌출하고, 남부에는 관악산을 비롯한 독립된 산지와 낮은 산지가 잔구형태로 분포하며, 북부지역은 장년기 지형을 나타내며, 한강을 중심으로 하는 남부는 높이 100m 이내의 독립된 잔구 및 구릉이 형성된 노년기 지형이 발달한다. 수계는 북서방향으로 흐르는 한강과 직각상으로 발달한 한강의 2차 지류인 탄천, 중랑천, 난지천, 안양천 등이 우세하

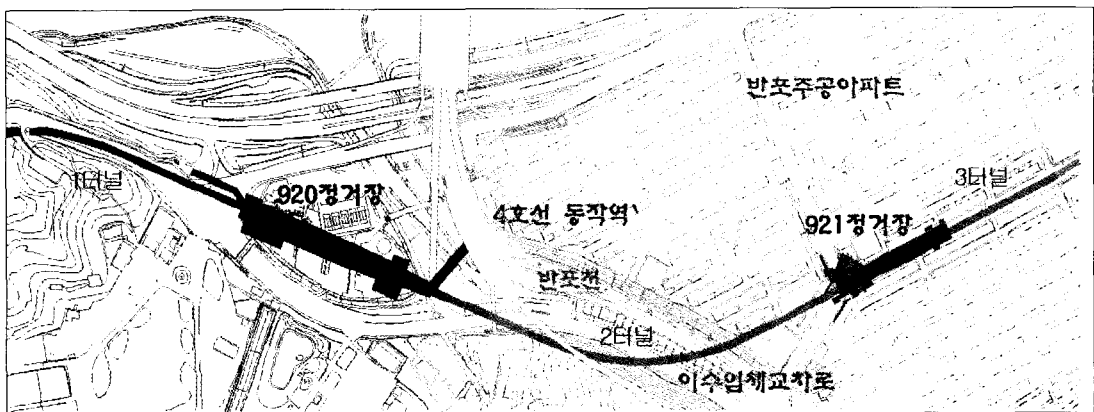


그림 1. 912공구 노선 개요도

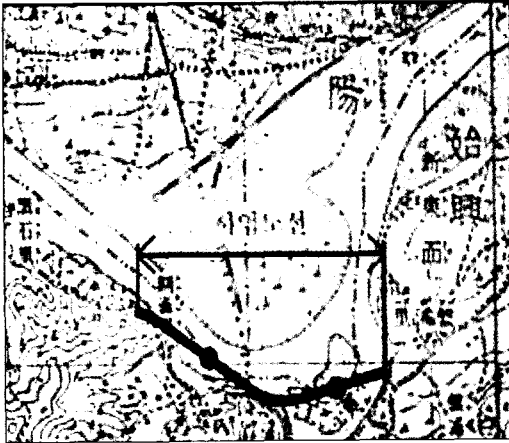


그림 2A. 공사구간 고지형도(1919년)

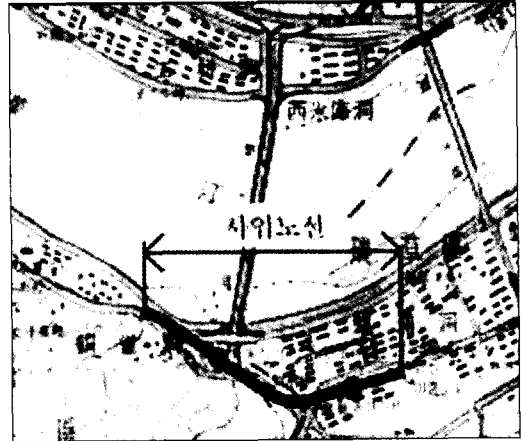


그림 2B. 공사구간 현지형도

게 발달하여 한강으로 유입되며, 한강변은 80년대 한강유역정비에 의한 하폭 확대와 직선화되도록 변화되어 자연형상을 상실하였다.

1919년 고지형도 분석결과 912공구 공사구간은 논이나 밭의 경작지로 활용되었고, 현재의 국립현충원 앞과 반포아파트 일대는 한강이 흘렀던 하천으로 조사되었다. 이러한 결과를 근거로 지반조사를 수행한 결과 비교적 연마도가 높은 조립질 하상 퇴적물이 두껍게 퇴적되어 있으며, 총적층의 지층변화가 심한 것으로 조사되었다(그림 2A, 2B).

공사구간의 지질은 호상흑운모편마암이 기반암으로 발달하고 있으며, 총적층은 주로 자갈 섞인 실트질 모래로 구성된 하상퇴적물의 특징을 보인다. 기반암인 호상흑운모편마암은 엽리구조가 발달된 이방성 구조를 보인다.

지반조사 및 시험결과 당 현장 총적 토사층의 일반적 특징은 다음과 같다.

(1) 일반사항

- 매립층 및 총적층(실트 섞인 모래 및 모래 섞인

자갈층)으로 형성

- 터널상부의 실트 총적층 분포율은 약 84%, 바닥부의 총적층 분포율은 약 34%로 나타남
- 한강의 지류인 반포천이 인접해 있고 모래자갈층으로 이루어져 지하수량이 많고 유속이 빠름

(2) N치 분포

- 심도에 따라 증가하는 경향을 보임
- 매립층의 경우는 N치가 넓은 범위로 분포(20~50)하는데 이는 매립층의 구성 및 전석의 함유 여부와 관계가 있음
- 5~15m 심도에서 N치는 20이하의 범위에서 분포하고 있으며, 15~25m에서는 50이상의 분포를 보임

(3) 변형계수 분포

- 현장시험 : 연암층 $E=1.0 \times 10^3 \sim 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, 보통암층 이상: $E=1.0 \times 10^4 \sim 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- 실내시험 : $E=1.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

고압분사공법을 적용한 도심지 층적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

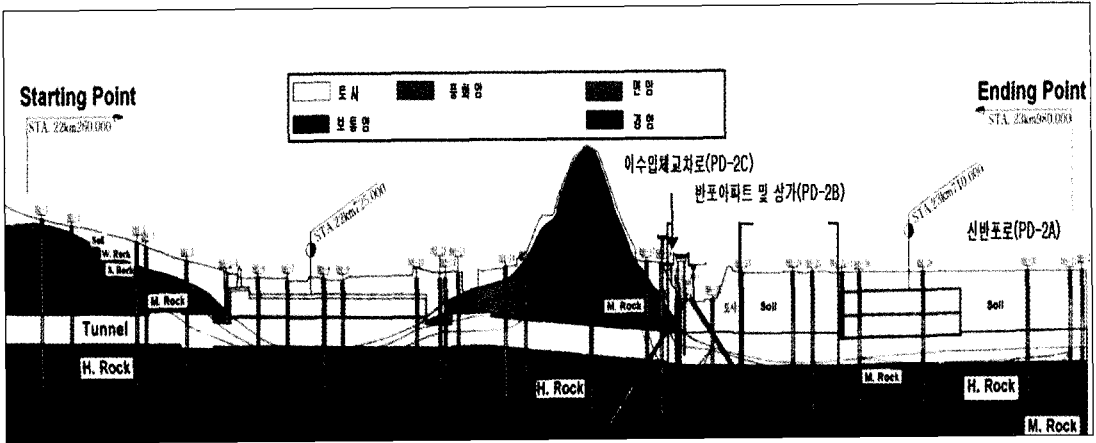


그림 3. 공사구간 지질증단면도

표 1. 정거장 및 터널 굴착 중 확인된 층적 모래자갈층

현황 사진			
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 천단부~바닥부 심도에 해당하는 자갈의 직경은 5~30cm로 하부로 갈수록 커짐 • 심도별로 10%~17%의 세립분 함유 		

3. 반포아파트 단지, 상가하부 및 신반포로 하부 구간 터널 설계 및 시공

3.1 반포 아파트 및 상가 구간과 신반포로 구간 개요

921정거장을 기점으로 반포아파트상가 하부 (PD-2B) 및 신반포로 하부 구간(PD-2A)을 터널로 굴진하였다. 본 터널 구간은 상부에 아파트 및 상가 등의 구조물이 밀집되어 있고 지하수위가 존재하는

층적층 지반에 시공되므로 터널 굴착시 지하수 영향 및 막장면 안정성을 고려한 굴착공법 및 보강대책 수립이 필요하였다. 특히 PD-2B 구간은 반포아파트 상가 건물 하부를 통과하는 구간으로서 터널 천단부의 토피가 약 17m에 불과해 지반변위 및 침하를 억제하여 구조물의 안정성을 유지하는 것이 무엇보다도 중요한 시공관리 항목이었다.

3.2 터널공법 설계변경

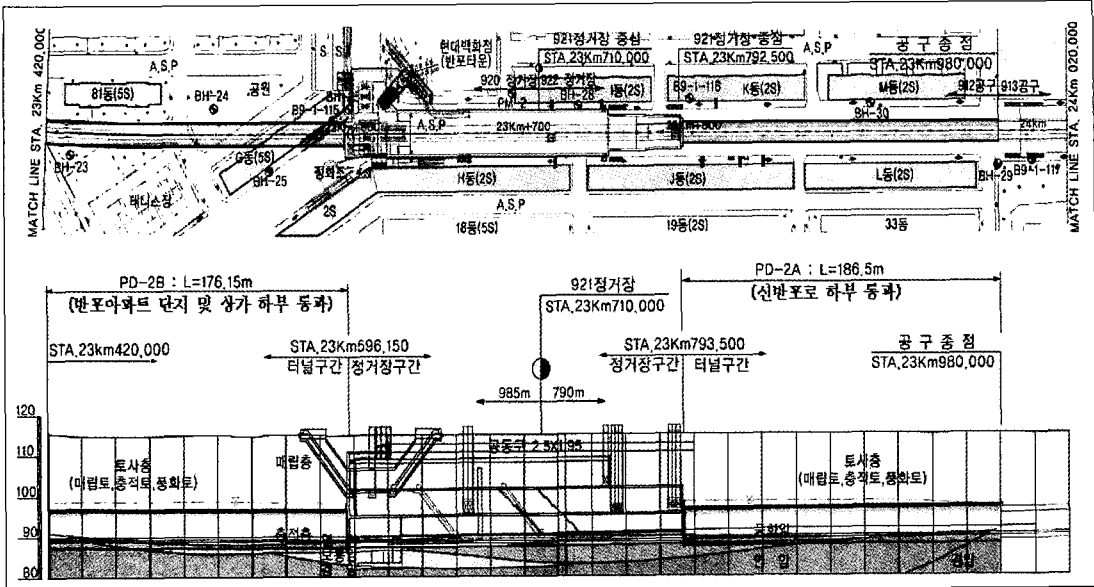


그림 4. 토사터널 구간 평면도 및 종단면도

표 2. 공법변경 주요 착안사항

구분	지하수 문제	안정성 문제	시공성 문제
문제해결 방안	<ul style="list-style-type: none"> 기존설계시 적용한 차수그라우팅(고 분말 시멘트 그라우팅)의 시공품질 및 차수효과 검토 지하수의 저하특성 예측 ⇒ 합리적인 극복방안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 충적 모래자갈층으로 이루어진 천층 토사터널로 천단 및 막장 안정성 확보 필요(변위억제) ⇒ 강성 높은 보강공법 적용 ⇒ 주변 건물의 안정성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 합리적인 굴착공정을 제안하여 시공성 개선 안정성 확보를 위한 최적굴착공법 계획 및 시공공정 수립 ⇒ 공기 단축

당 현장의 정거장 구간 개착공사시 관찰한 지하수 위 거동을 분석한 결과, 당초 예상하였던 것보다 굴착에 따른 지하수위의 저하 폭이 큰 것으로 분석되었다. 또한 당초 설계의 터널 보강공법인 고분말시멘트 주입에 의한 갱내 차수그라우팅은 터널의 안전한 시공에 필요한 충분한 지반개량 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단되었다. 따라서, 터널보강설계의 기본 개념을 침투 그라우팅에 의한 차수가 아니라, 지하수를 적극적으로 배제시켜 지하수위의 하강을 유도하고 동시에 천단부, 측벽부 및 막장부의 변위

를 최대한 억제하는 강성보강의 개념으로 전환하여 설계변경을 수행하였다.

토사터널 구간 중 가장 다양한 보강공법이 적용된 반포상가 하부 통과구간의 지보패턴 및 보강공법 적용 현황을 표 3에 요약하였다.

3.3 수평제트 그라우팅 공법

3.3.1 공법 개요

강관동시삽입형 수평제트 그라우팅 공법(이하 수

고압분사공법을 적용한 도심지 충적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

표 3. 반포사가 하부 보강공법 적용 현황

<p style="text-align: center;">표준지보패턴</p>	<p style="text-align: center;">막장보강(물뺀기공+FRP)</p>	
<p style="text-align: center;">시공 제원</p> <ul style="list-style-type: none"> • 수평제트 : D114, L=13.5m, 3열중첩 • 물뺀기공 : D75, L=12m, 다발관 • FRP : D60, L=12m, 방사형 배치 • 각부보강 : D76, L=5m, 매막장 시공, 설치각도(45~60°) • 측벽보강 : D76, L=5m, 매막장 시공, 설치각도(종방향 30°, 횡방향 0~20°) 	<p style="text-align: center;">천단보강(수평제트그라우팅)</p>	
	<p style="text-align: center;">각부보강 (Leg 파일)</p>	<p style="text-align: center;">측벽보강(강관파일)</p>

평제트 그라우팅)은 지반 개량공법으로 널리 사용되고 있는 제트그라우팅 공법을 터널 천단부 보강목적으로 응용한 공법이다. 이 공법은 터널 굴착전에 터널 천단부를 따라 제트 그라우팅을 실시하여 우산망 형태의 보강영역을 구축하므로 차수 및 지반보강의 효과를 기대할 수 있다.

3.3.2 공법의 특징

(1) 지반 보강 원리

수평제트 그라우팅은 고압의 주입재 분사에 의해

천공 및 지반 절삭과 동시에 대구경 강관(통상 외경 114mm 이상)을 삽입하고, 고압분사에 의해 투입된 주입재가 강관과 함께 원주형 구근을 형성하여 터널 아치부의 붕락 및 탈락을 억제하는 터널보강 보조공법이다.

주입은 제트그라우팅에 의한 고압분사주입(1차 주입)을 실시한 후 공극을 채우는 저압주입(2차 주입)의 2단계로 나누어 시공하며, 주입재는 기본적으로 시멘트와 물을 배합하여 사용한다. 조성된 개개의 구근 강성이나 강도는 보강의 적정성을 결정하는

표4. 수평제트 그라우팅의 시공 순서

구분	1 단계	2 단계	3 단계	4 단계	5 단계
시공 방법	<ul style="list-style-type: none"> • 벌크헤드부 천공 • 강관타설 	<ul style="list-style-type: none"> • 소정의 심도까지 강관 삽입하면서 고압분사하여 원추형의 개랑체 형성 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계심도 20cm 전방에서 고압분사를 중지하고 강관 압입 (경화제 누출방지) 	<ul style="list-style-type: none"> • 강관은 지반 내에 잔치 후 린드 인발 	<ul style="list-style-type: none"> • 2차 주입(저압) 실시
개요도					

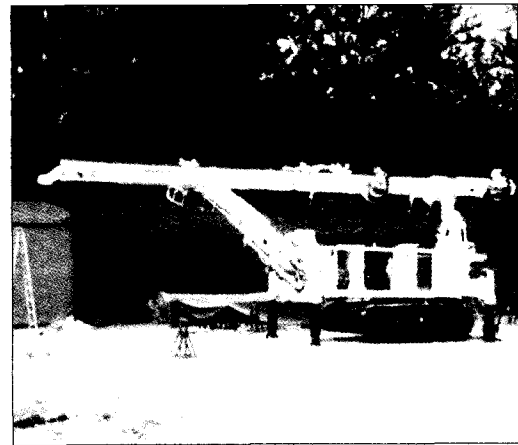
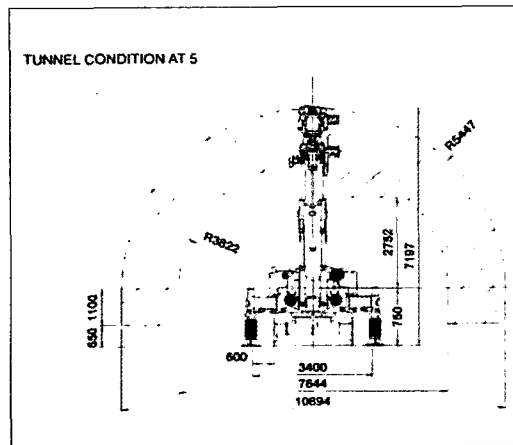
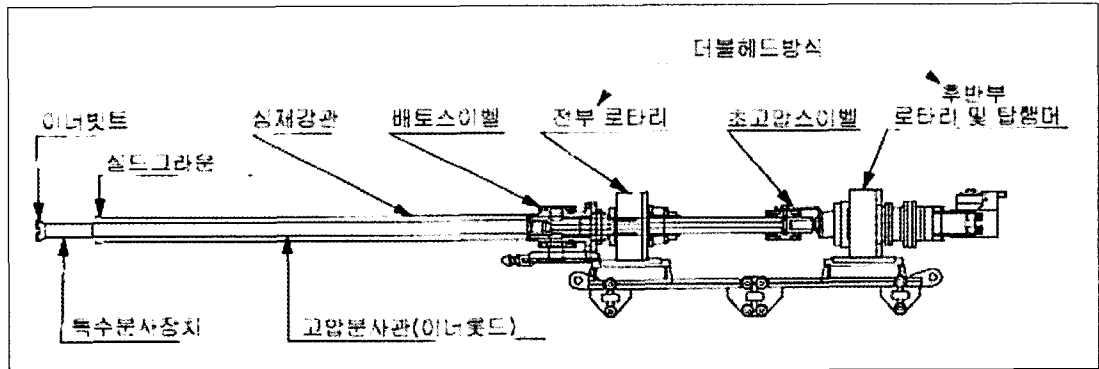


그림 5. 수평제트 그라우팅 장비 개요

고압분사공법을 적용한 도심지 충적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

중요한 인자이지만, 터널 보강 측면에서 보다 중요한 인자는 구근간의 배치상태(Geometry)라고 할 수 있다.

따라서 최적의 구근 시공간격 및 시공간도의 결정과 정밀한 시공이 본 공법의 성패를 좌우한다고 할 수 있다.

(2) 적용 지반조건

수평제트 그라우팅 장비는 타격과 회전이 동시에 가능한 장비이지만, 일반적인 공압 또는 유압 드릴에 비해서는 타격에너지가 낮으므로, 분사압력에 의해 절삭이 용이하지 않은 지반에는 적용이 곤란하다(즉, 풍화암 이상의 강성을 갖는 지반에 적용가능).

또한 대상지층의 지하수위가 높다면 막장면 물빠기공 등 지하수위 저감 공법과 병행하는 것이 바람직하며, 이때 2차주입은 규산소다를 함유한 LW그라우팅을 실시함이 바람직하다.

(3) 시공 장비

수평방향으로 고압분사 및 파이프 삽입을 정확하게 시공하기 위해서는 수평제트 그라우팅 전용 장비

가 필요하다. 즉, 절삭에 의해 발생하는 슬라임을 원활하게 공 밖으로 배출하기 위해서는 내관(룻드)과 외관(강관)을 각각 반대방향으로 구동시킬 수 있고, 천공과 타격을 동시에 할 수 있는 Roto-Percussion 헤드가 장착된 천공기가 필요하다.

이러한 장비는 현재 국내에 약 10기 내외가 있으며, 대부분이 Italy의 SoilMec社가 제작한 SM-Series 장비이다. 또한 고압의 분사작업을 위해서는 특수 제작된 고압펌프가 사용되어야 하며, 펌프~작업장까지의 거리에 따라 압력의 손실이 발생함을 감안하여 충분한 용량의 펌프를 선정해야 한다.

3.3.3 수평제트 그라우팅의 품질 확인

(1) 시험시공

시험시공은 그림 6, 7과 같다.

(2) 슬라임의 밀도 및 강도 확인

고압펌프로 압송 전에 플랜트에서 배합한 주입재(시멘트+물)와 시공중 공내에서 유출되는 슬라임(시멘트+물+공내토)의 밀도를 측정하여 비교함으로써 주입의 효과를 확인하였다. 즉, 주입재의 밀도에 비

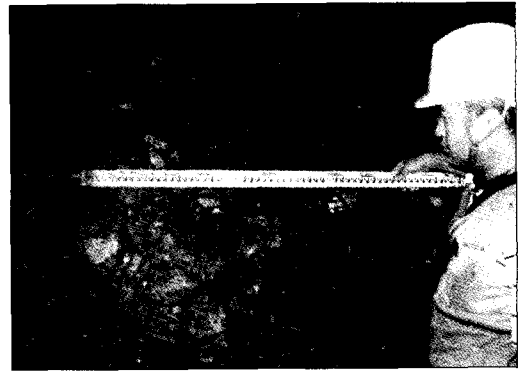


그림 6. 시험시공한 수평제트 그라우팅 구근의 조성상태 확인



그림 7. 터널 천단에 노출된 수평제트 그라우팅 구근 및 강관

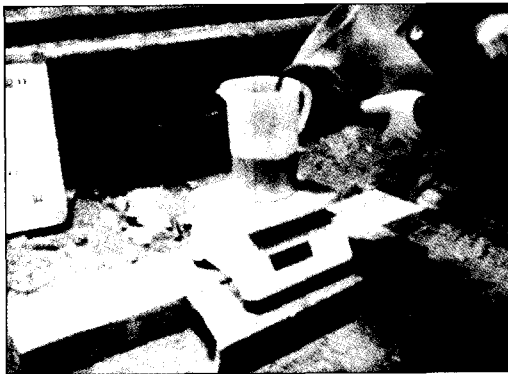
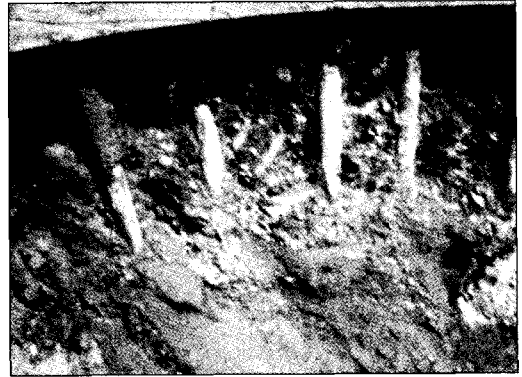


그림 8. 슬라임 밀도 측정

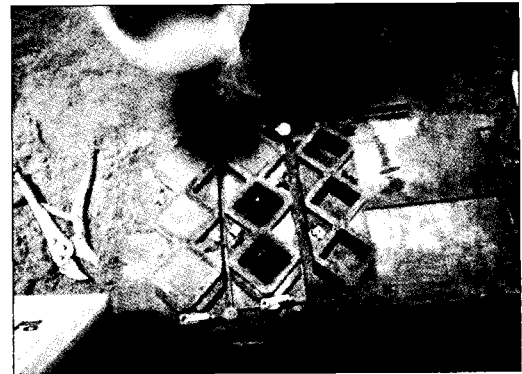


그림 9. 강도시험용 시편제작

하여 슬라임의 밀도가 클수록 조성된 구근의 품질은 상대적으로 양호한 것으로 판단할 수 있다. 또한 슬라임을 몰드로 제작하여 압축강도 시험을 실시하여, 구근의 강도를 간접적으로 파악할 수 있다.

3.3.4 수평제트 그라우팅 현장 적용 개선 사례

(1) 터널 단면의 확폭

수평제트 그라우팅 구근이 최적으로 배치되기 위해서는 수평제트 구근의 천공각도는 연직기준 $7^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 가 가장 적절하며, 노선방향으로 슛크리트 면의 각도 동일한 각도가 유지되어야 한다. 또한 수평 제

트 장비의 드릴 헤드가 운행하기 위해서는 천공 룯드와 슛크리트 면과의 이격거리가 최소 30cm 이상 필요하다. 따라서 동일 Stage내의 터널 단면은 매 지보별 계단식으로 확대되는 형태가 요구되며, 당 현장의 경우 확폭 크기는 78cm가 적절한 것으로 검토되어 시공에 반영하였다.

(2) 작업 공간의 확보

국내의 복선 철도 또는 복선 지하철 터널의 경우 터널 굴착 단면적이 통상 100m^2 내외, 상부 반단면의 면적은 $50 \sim 60\text{m}^2$ 인 것이 보통이다. 그러나 이 정

고압분사공법을 적용한 도심지 중적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

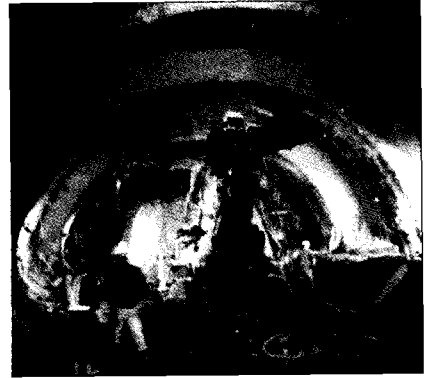
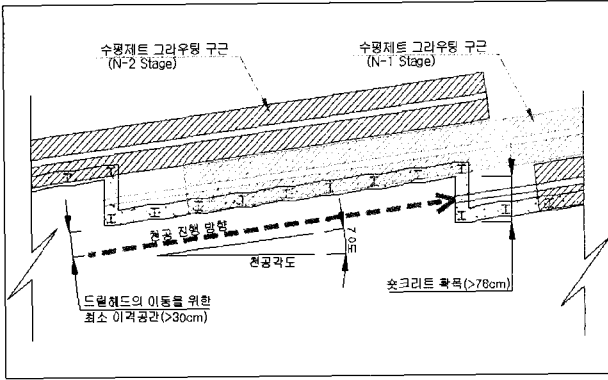


그림 10. 터널 단면의 확폭

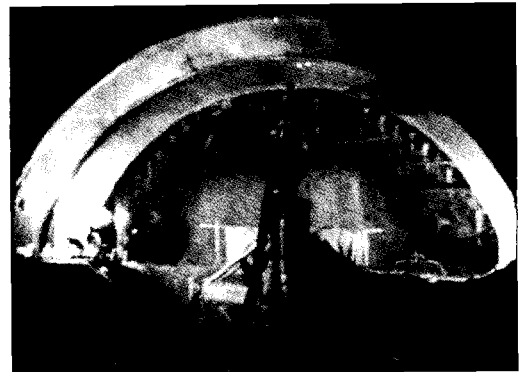
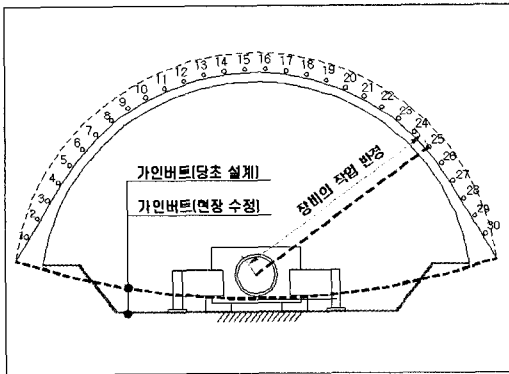


그림 11. 수평제트 그라우팅 작업 공간의 확보

도의 면적하에서는 수평제트 그라우팅 장비가 작업을 하기에는 공간이 협소하므로 작업이 원활하게 이루어지기 위해서는 상반바닥고의 저하가 요구된다.

그러나 통상 수평제트 그라우팅 보강을 실시하는 터널의 지반조건은 연약지층 또는 토사층인 경우가 대부분이며, 이 경우 단면의 가폐합을 위해 가인버트 슛크리트가 수반되는 것이 보통이다. 따라서 수평제트 그라우팅 계획시 장비의 크기 및 작업반경을 고려하여 가인버트가 간섭되지 않도록 계획할 필요가 있다. 따라서 당 현장에서는 가인버트의 기본적인 역할인 가폐합의 기능을 상실하지 않는 범위 내

에서 시공 Level을 낮추어 시공하였다.

(3) 자갈-전석층 천공으로 인한 장비의 잦은 고장 당 현장 터널 구간의 지반조건은 실트, 사질토, 자갈 및 전석층으로 이루어져 있는데, 이러한 지층조건에서의 천공작업은 공벽의 형성이 어려우며, 자갈이나 전석의 회전(Rotation) 및 엇물림(Interlocking)으로 인해 타격에너지의 손실이 크고, 천공장비에 과부하가 작용하여 장비의 고장이 잦은 등 작업이 매우 어려운 실정이다. 이러한 현상으로 인해 공사 초기에는 장비의 구동장치 및 강관이음부, 천공 룯



그림 12 A. 강관 이음부 파손



그림 12 B. 뚫트 이음부 파손

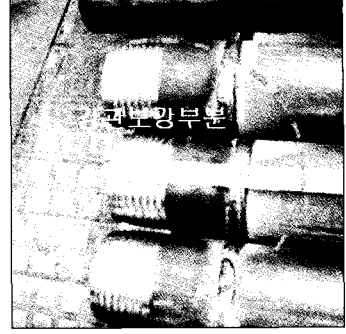


그림 12 C. 이음부 보강

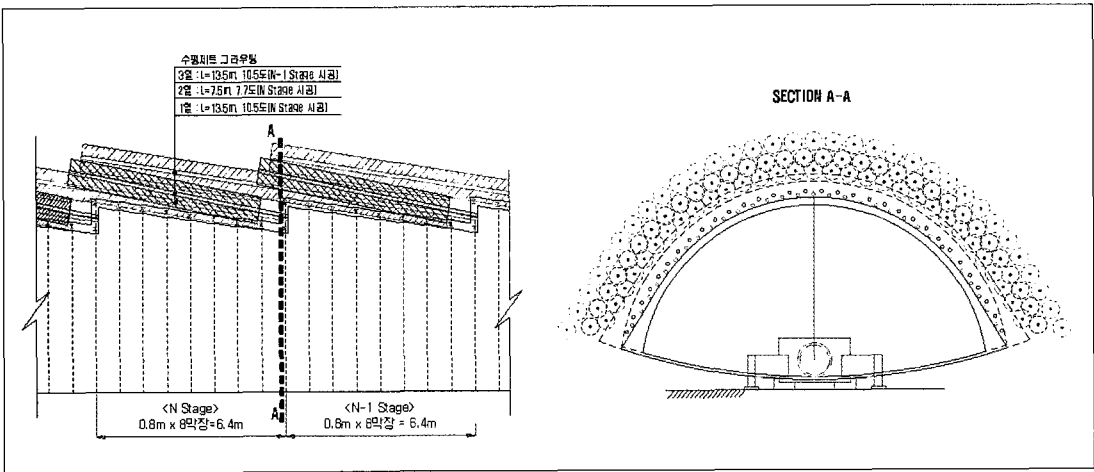


그림 13. 수평제트 그라우팅 3열 중첩 시공도

드의 파손 등이 빈번하게 발생하였다.

따라서 이러한 문제점을 개선하고자 강관 이음부를 두꺼운 강관($t=6\text{mm} \Rightarrow 8\text{mm}$)으로 보강하고, 천공-분사 작업시 장비 및 자재에 부하를 감소시키기 위하여 선천공(Preboring) 후 수평제트 그라우팅 작업을 실시함으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있었다.

(4) 2차 주입

통상 수평제트 그라우팅의 2차주입시에는 시멘트와 물을 배합하여 주입하는 것이 일반적이지만, 지

하수위가 높거나 용수가 다량 유출되는 지반조건하에서는 규산소다(물유리)가 함유된 LW그라우팅이 요구된다.

당 현장의 초기 수평제트 그라우팅의 설계시에는 규산소다가 포함되지 않았지만, 터널 굴착작업도중 지하수 유출이 빈번하고 그 양도 상당하여 규산소다를 함유한 배합비를 결정하여 이를 적용하였다. 규산소다를 배합하여 2차주입을 실시하더라도 완전한 차수체를 조성하기는 용이하지가 않지만 1차주입으로 형성된 수평제트 구간이 더 치밀하게 조성될 수

고압분사공법을 적용한 도심지 충적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

표 5. 터널 굴진 속도 비교 (신반포로 하부 구간)

기 존 설 계 (강관다단그라우팅+갱내차수)	공 법 변 경 (수평제트그라우팅+막장보강)
(1) 강관다단 그라우팅(L=12.0m / 6.4m간격) - 시공수량 : 30공/Stage - 시공속도 : 8공/일 ⇒ 30 / 8 = 3.8일 (2) 차수 보강(L=4.7~26.0m / 19.2m간격) - 시공수량 : 154공/Stage - 시공속도 : 16공/일 ⇒ 154 / 16 = 9.6일/Stage - 1Stage = 6.4m로 환산할 경우, ⇒ 6.4m / 3.2일 (3) 굴착,지보설치 및 슛크리트 타설 - (0.8m x 3막장=2.4m)/일 ⇒ 6.4m/2.4m = 2.7일 (4) 평균굴진속도 - 6.4m / (3.8일+3.2일+2.7일) ⇒ 0.66m/일 ^{주1)}	(1) 천단보강(L=13.5m / 6.4m간격) - 시공수량 : 31공/Stage - 시공속도 : 8공/일 ⇒ 31 / 8 = 3.9일/Stage - 작업준비 및 작업후 정리 : 0.5일 (2) 막장보강그라우팅/수발공 설치 ⇒ 0.3일 (3) 굴착,지보설치 및 슛크리트 타설 - (0.8m x 3막장=2.4m)/일 ⇒ 6.4m / 2.4m = 2.7일 (4) 평균 굴진속도 - 6.4m / (3.9일+0.5일+0.3일+2.7일) ⇒ 0.86m/일 ^{주2)} ⇒ 기존설계대비 변경설계의 굴진 속도 = 130%

주¹⁾ 차수보강 그라우팅의 시공속도는 당현 PD-2C 작업시의 소요시간 참조함.

주²⁾ 반포아파트 하부 : 0.68m/일, 반포상가 하부 : 0.56m/일(각부보강과, 수평제트그라우팅 3열시공 고려)

있는 보조적인 역할 측면에서 상당한 성과를 얻을 수 있었다.

(5) 3열 중첩 시공

반포아파트 상가 하부 구간은 터널의 시공으로 인한 지중변위 및 지반침하가 매우 민감한 구간인 관계로 수평제트 그라우팅을 3열 중첩 시공하는 것으로 설계하였다. 그러나 동일 Stage에서 3열로 시공을 하는 것이 용이하지 않아, 다음과 같은 수정안을 적용하여 시공하였다. 즉, N-1 Stage에서 1열은 13.5m, 2열은 7.7m 시공을 하고, 이중 1열은 N Stage에서의 3열이 되며, 다시 N Stage에서 1열을 13.5m, 2열을 7.7m로 시공하여 3열 중첩 시공이 가능하였다.

(6) 터널 굴진 속도 비교

갱내차수 그라우팅과 강관다단 그라우팅의 조합으로 이루어진 당초설계에 비하여 수평제트그라우팅과 막장보강 그라우팅으로 변경된 설계로 시공함으로써 작업속도를 상당히 단축할 수 있었다.

3.4 계측관리 개요 및 계측 결과

3.4.1 계측관리 개요

본 검토 구간과 같이 취약한 토사 지반은 터널 굴착시 큰 변위가 유발될 수 있으며, 계속된 변위의 누적으로 터널 및 지반의 침하가 발생하여 터널뿐만 아니라 인접 구조물의 안정성에 문제가 될 수 있다. 따라서 NATM 방식으로 시공되는 터널은 계측이

필수적이며, 계측결과에 따른 지보등급이나 보강방법의 적절한 조정이 수반되는 것이 일반적이다. 당 현장의 경우, 터널 상부에 아파트 및 상가 등이 밀집되어 있어 터널의 안정성 확보가 무엇보다도 우선적이며 이에 따라 터널의 변위를 최소화 하기 위해 수평제트 그라우팅에 의한 강성보강을 도입하게 되었다.

터널 내 계측은 매 5.0m마다 일상계측 단면을 설정하였으며, 반포아파트 및 상가에는 건물의 안정성을 확인할 수 있도록 건물경사계, 균열계 등을 집중 배치하였다.

3.4.2 계측 결과

1) 반포아파트 및 상가하부 구간

대표계측 단면(STA.23k560)으로 설정된 반포G동 상가 하부 구간을 분석한 결과 천단침하는 최대 6.4mm, 내공변위는 최대 5.7mm, 지표침하는 최대 9mm로 나타나 관리기준치 및 한계치와 비교해 볼 때 매우 안정적인 값을 보이고 있다. 또한 터널의 변위속도도 천단 및 내공변위 모두 0.8mm/월로 수렴된 것으로 판단된다. 슛크리트 응력도 굴착초기 45.37kgf/cm²을 정점으로 현재 19.0kgf/cm² 부근에서 수렴된 것으로 판단된다. 지하수위도 터널 굴착과 함께 점점 하강하는 경향을 보이다 현재 터널 상반 중간 정도 위치에서 일정한 값을 보이고 있다.

이상의 결과를 고려할 때, 수평제트그라우팅에 의한 지반보강은 모래자갈 충전층을 통과하는 터널의 보강공법으로 매우 효과적인 것으로 판단된다.

2) 신반포로 하부 구간

천단침하는 최대 7.9mm, 내공변위는 최대 6.0mm, 지표침하는 최대 11mm로 나타나 반포상가 하부구간과 유사한 경향을 보이며 관리기준치 및 한계치와

비교해 볼 때 매우 안정적인 값을 보이고 있다. 터널의 변위속도는 천단침하 0.5mm/월, 내공변위 0.3mm/월로 수렴된 것으로 판단된다. 슛크리트 응력도 2006년 12월 28.63kgf/cm²을 정점으로 2007년3월 현재까지 28.0kgf/cm² 거의 일정한 값을 보여 수렴된 것으로 판단된다. 지하수위는 현재 터널 천단부 약 1.2m 지점에서 일정한 값을 보이고 있다.

본 구간에 적용된 수평제트그라우팅에 의한 지반보강 역시 반포상가 하부 구간과 마찬가지로 모래자갈 충전층을 통과하는 터널의 보강공법으로 매우 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

서울지하철 912공구의 터널은 교량 및 상가 하부를 통과하고, 터널 천단의 토피가 얇고, 지층의 대부분이 자갈을 다량 함유한 충전층지반으로써 지극히 열악한 작업조건을 가지고 있다. 또한 터널 상부에 이수교차로 및 반포아파트 상가, 신반포로 등이 위치하여 터널의 안정성이 확보되지 못하면 중대 재해가 일어날 개연성이 매우 큰 구간으로 발주처인 서울도시철도건설본부뿐만 아니라 전사적으로도 중점적으로 관리하는 현상이었다.

도심지 하부의 토사층에 터널을 시공하는 방법은 당 현장에 적용된 NATM 공법뿐 아니라 쉴드터널, TRM, NTR 등 여러 가지 공법이 있으며 9호선에도 시공사례가 있다. 우리나라의 경우 수치해석에 의한 터널의 안정성 검토는 소프트웨어의 발전, 이론적 배경이나 다양한 설계 경험 축적 등으로 그 기술력이 비교적 높은 편이나 시공측면에서는 아직도 시행착오를 겪는 과정이라 판단된다. 최적의 터널 보강공법

고압분사공법을 적용한 도심지 총적층 토사터널의 보강공법 현장 적용 사례

표 6. 주요 계측결과 요약

구분	항목	최대값	관리한계치	최근 1개월 추이	비고
반포상가 하부	내공변위	5.7mm	25.0mm	0.8mm/월	수렴
	천단침하	6.4mm	49.0mm	0.8mm/월	
	지표침하	9.0mm	39.7mm	0.0mm/월	
	숏크리트 응력	45.37kgf/cm ²	84.0kgf/cm ²	0.12kgf/cm ² /월	
신반포로 하부	내공변위	5.7mm	25.0mm	0.3mm/월	수렴
	천단침하	6.4mm	49.0mm	0.5mm/월	
	지표침하	11.0mm	39.7mm	0.1mm/월	
	숏크리트 응력	28.63kgf/cm ²	84.0kgf/cm ²	1.02kgf/cm ² /월	

의 선정은 실제 현장의 지반조건, 장비조합 및 운용, 경제성 등을 면밀히 검토하여 결정하여야 함에도 불구하고 설계단계에서는 종종 이에 대한 중요성이 간과되기도 한다. 따라서, 시공의 성패 혹은 난이도를 좌우하는 이러한 요소들에 대한 정확한 분석이나 면밀한 검토없이 계획을 세운다면 공사진행 과정중 난관에 봉착할 우려가 크다고 할 수 있다.

이러한 관점에서 볼 때 서울지하철 912공구는 설계나 시공 모든 면에서 사전에 철저한 조사와 분석이 수반된 사례(이수입체교차로 통과 구간)와 설계시 지반조건과 실제 지반조건의 불일치로 인한 설계 변경 사례(반포아파트 상가 및 신반포로 하부 구간) 등 사전 검토단계에서 성공과 실패 사례를 보여주는 현장이라 할 수 있다.

또한, 당 현장과 같이 도심지에 위치하여 작업공간상의 제약이 많이 따르고, 자갈 및 전석 등을 다량 분포한 지층의 경우 적합한 공법을 찾기가 용이하지

않다는 점에서 RJP공법 및 수평제트 그라우팅 공법 등 고압분사공법의 성공적인 현장 적용사례는 추후 유사한 공사를 수행함에 있어서 시공 사례로서 중요한 가치를 가진다고 사료된다.

참고 문헌

1. 서울지하철 9호선 912공구 건설공사(토목) 정거장 규모 축소 및 설계기준 조정에 따른 변경설계 보고서(2004), 서울특별시 지하철건설본부, pp.325~454
2. 서울지하철 9호선 912공구 토사터널 공법변경보고서(신반포로 하부, 반포아파트 및 상가 하부구간, 2006), 서울특별시 지하철건설본부
3. 김대영, 박영호, 이흥준, 김재성, 황제돈, 박치면(2006), 도심 밀집지역 총적층 터널의 설계와 시공, 한국지반공학회지 vol.22, No.11, pp.9~30