한강 단층대를 통과하는 하저터널의 안정성 확보에 관한 연구

Stability Evaluation for a riverbed tunnel in the Han River at the Fault Zone Crossing

우 종 태* 이 송**
Woo, Jong-Tac Lee, Song

Abstract

When building tunnels beneath riverbeds where very large quantities of groundwater inflow exist, added to high water head the soil supporting conditions are very poor because the soil consists of sand and silt, etc. It is necessary to have grouting and mini pipe roof installed in the region for ground reinforcement to decrease permeability. According to this result of horizontal boring and laboratory soil testing, ground reinforcement was achieved by L.W grouting for range of 3.0 times the tunnel radius, to increase stability of the tunnel we used the ring-cut method, 0.8m for one step excavation, shotcrete with 25cm thick, steel lib with H-125×125, and a temporary shotcrete invert 20cm thick was installed to prevent deformation of the tunnel.

keywords : Fault zone, Inflow of groundwater, L.W grouting, Mini pipe roof, Ring-cut method, Temporary shotcrete invert

1. 서 론

하천에서의 터널공사는 터널상부에 무한량의 하천수가 있어 굴착중 다량의 하천수를 동반한 붕괴사고를 일으키면 공사 완공은 서의 불가능하며, 대형사고의 참사로 이어질 우려가 있어 계획, 설계, 시공 각 단계별로 세밀한 지반조사와 그에 따른 보강공법 선정 및 정밀시공이 무엇보다 중요하다. 특히 한강 여의도에서 마포를 통과하는 하저터널 구간의 지질은 주로 호상혹운모 편마암이고, 여러 차례에 걸친 변성작용으로 심하게 교란되어 지층 변화가 매우 심하고, 일부구간에서는 극도로 연약화된 단층점토대의 출현과 다량의 용출수가 발생되는 연약지반이었다.

본 연구대상구간은 김포공항에서 도심을 거쳐 여

* 정회원, 경북대학 토목설계과 조교수
** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

동을 연결하는 지하철 5호선 중 여의도와 마포를 한강 밑으로 통과하는 하저터널의 일부로 총연장 1,288m 중 원형단선터널 90m구간이다. 지질 상태는 실트를 포함한 모래층으로 지반이 연약하여 지지력이 작아 막장 자립시간이 극히 불량한 단층 연약대로 터널상부에 무한급수원인 한강의 영향을 받아 터널막장으로부터 다량의 지하수가 용출되었다.

따라서, 이러한 단층 연약대를 통과하는 하저터널의 안정성 확보를 위해서는 수평선진보링에 의한 지반의 지질상태와 용수현황조사, 지하수 유입 차단과 막장부의 지반보강, 터널 천정부 낙반방지, 굴착시 터널 주변 진동최소화, 체계적이고 신속한 계측실시 및 분석으로 정밀한 시공관리가 요구되었다. 단층대구간의 터널굴착을 시행하기 위해 터널주변을 L.W(Lable Water glass) 그라우팅공법으로 지반을 보강하였고, 터널상부의 붕락방지를 위해 강관다단 보강그라우팅 및 포폴링을 시공하였다. 터널굴착공법은 상부반단면은 링컷, 하부반단면은 분할굴착하여 굴착면의 개방을 최소화하였으며, 1회 굴진장은 0.8m, 숏크리트는 두께 25cm, 강지보공은 H-125×125를 사용하여 기계와 인력으로 충격과 진동이 최소화되도록 굴착하였으며, 상부굴착 완료후 가인버트를 시공하여 터널변형을 방지하였다. 또한 일상관리계측과 대표단면계측 시행결과를 분석하여 터널거동 및 지보재의 응력 등의 확인을 통하여 하천하부 단층 연약대에서의 터널시공을 완료하였다.

따라서, 본 연구에서는 한강하저 단층대를 통과하는 NATM 터널에서 시행한 수평선진지반조사, L.W 및 강관다단 보강그라우팅, 터널굴착공법과 지보패턴, 터널변위와 응력확인을 위한 계측결과분석 등을 통하여 터널의 안정성 확보를 검토하고자 하였다.

2. 지반 조사

2.1 한강하저의 지질 개요

한강 하저터널은 지하철5호선 종단계획에 따라 한강수면 아래로부터 토피가 약 16m~31m의 깊이에 계획되었으며, 터널건설구간은 기반암인 편마암류와 이를 부정합으로 덮고있는 제 4기의 충적층으로 구성되어 있으며, 여러 차례에 걸친 변형작용으로 심하게 교란되어 일부구간은 절리, 단층대, 파쇄대 등이 발달된 지질여건이 취약하였고, 터널전방 지질상태 확인을 위한 선진시추보링시에 Fig. 1과 같이 A터널은 단층 연약대 구간으로 확인이 되었다.

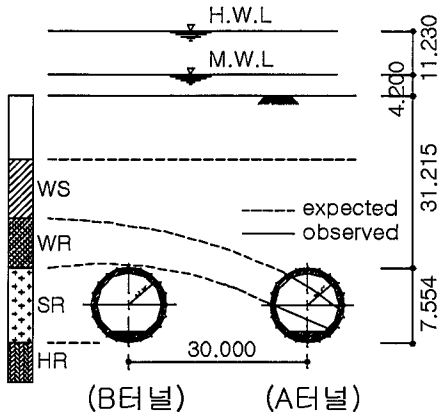

Fig. 1 하저터널 단면도

2.2 지반 조사 결과

한강하부 단층 연약대구간의 지질조사는 삼중 코아 바렐을 사용하여 자연상태에 가까운 시료를 채취하여 이로부터 실내 토질시험과 공내 재하시험 결과로 굴착 전방의 지질상태를 분석하였고, 터널내 용수량은 용기를 사용하여 조사하였으며, 수평선진시추조사 결과는 Table 1과 같고, 수평선진시추시 시추길이에 따른 지하수 유입 용출수 조사결과는 Fig. 2와 같으며, 일반적인 용출수는 100~200ℓ/min/공 정도이나, 단층 연약대 구간에서는 시추길이에 따라 급격하게 지수함수로 증가하는 현상을 나타내었고, 최대 1,200ℓ/min/공 정도로 확인이 되었다.[1]

공내재하시험 및 실내토질시험 결과는 점착력(C)은 0.19~0.35kgf/㎠, 내부마찰각(ϕ)은 29~35°, 단위중량(γ_t)은 1.984~2.309 tonf/㎥, 탄성계수(E)는 458~488kgf/㎠으로 통일분류법(USCS : Unified Soil Classification System)으로 분류시 실트질의 모래인 SM층의 범주로 파악되었으며, 공내재하시험 결과는 Table 2, 실내토질실험 결과는 Table 3과 같다.

Table 1 수평선진시추조사 결과

위치	천공장 (m)	천공각 (°)	조 사 결 과	용수량 (ℓ/min)	비고
A	70	5	0~30.0m : 시료채취 불가 30~42.0m : 슬라임 확인 42~55.5m : 시료채취 55.5~70.0m : 슬라임 확인	- - 300 400	-
B	21.2	0	삼중관 코어배럴로 시료 채취		실내 토질 시험

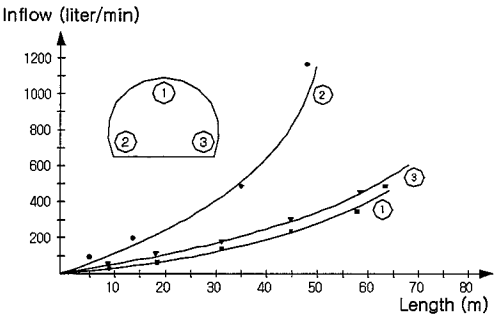

Fig. 2 용수량 현황도

Table 2 공내재하시험 결과 - (1)

시험 횟수	시험심도 (m)	고무라바의 평균반경	정지토압 (kgf/㎠)	항복압 (kgf/㎠)
1	0.7	4.178	2.75	14.85
2	1.7	4.313	1.96	16.83
3	2.7	4.034	3.20	16.58
최대	2.7	4.313	3.20	16.83
최소	0.7	4.034	1.96	14.85
평균	1.7	4.175	2.64	16.09

Table 2 공내재하시험 결과 - (2)

시험 횟수	파괴압 (kgf/㎠)	반력계수 (kgf/㎠)	탄성계수 (kgf/㎠)
1	18.95	87.35	474.45
2	18.79	81.70	458.08
3	19.23	93.15	488.48
최대	19.23	93.15	488.48
최소	18.79	811.70	458.08
평균	18.79	87.40	473.67

Table 3 실내토질실험 결과 - (1)

시료	수평길이 (m)	Wn (%)	Atterberg	
			LL	PI
A	2.0~3.0	21.5	N.P	N.P
B	8.5~9.0	22.7	N.P	N.P
C	16.4~16.8	25.7	N.P	N.P

Table 3 실내토질실험 결과 - (2)

시료	일축압축시험	직접전단시험		USCS
	qu (kgf/㎠)	C (kgf/㎠)	ϕ (°)	
A	0.71	0.35	35	SM
B	0.54	0.24	32	SM
C	0.38	0.19	29	SM

3. 지반 보강 공법

한강 단층대를 안전하게 통과하기 위하여 지반보강은 약액주입인 L.W그라우팅 공법과 강관다단보강을 시행하였다. 즉 연약 단층대 지반의 특성에 부합되도록 개량하기 위해 특별한 성질을 갖는 주입재를 지반 속에 침투시키는 공법으로 터널막장의 지하수유입 차단과 지지력 증대를 위한 그라우팅 공법과 상부굴착면 과쇄절리의 봉합과 소규모 낙반방지를 위한 강관다단 보강공법이 적용되었다. 하서 연약지반에서 터널을 시공한 경우 문제점으로는 굴착시의 침투수량 과다발생, 극히 짧은 막장 자립시간, 한강 하천수로 인한 무한한 지하수 공급, 터널 변위 과다발생 및 변위 수렴시간의 지연 등이 가장 큰 문제이므로 터널굴착을 안전성이 확보된 상태에서 시공하기 위해서는 터널 내로 유입되는 지하수의 차단과 지반보강이 터널시공에 가장 중요한 요소가 되었다.[2]

3.1 L.W 그라우팅

3.1.1 L.W 그라우팅 설계

한강하저의 단층 연약대에 대한 지반조사를 종합 검토하여 L.W 그라우팅 설계사항을 요약하면, 주입범위는 터널반경의 3배 범위인 7.95m 이고, 주입율은 주입공 간격과 대상체적 등에서 주입율을 결정하여 평균

주입율은 21%로 적용하였으며, 주입압력은 한강수위의 4~6배인 12~18kgf/㎠ 이며, 주입속도는 25ℓ/min, 주입방법은 이중관 롯드방식, 주입순서는 터널 외측공에서 내측공의 순서로 주입하여 주입효과 확인이 용이한 Fig. 3과 같이 내삽법으로 계획하였으며, 주입순서는 Fig. 4와 같다.

L.W 그라우팅의 배합비 결정은 주입효과와 시공성을 고려하여야 하며, 지질상태, 공극율, 주입범위, 주입목적에 따라 Table 4의 1단계와 Table 5의 2단계의 배합비로 구분하였다.

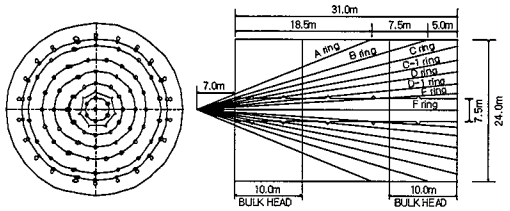

Fig. 3 L.W 그라우팅 주입 단면도

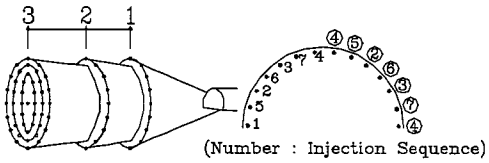

Fig. 4 L.W 그라우팅 주입 순서도

Table 4 L.W 그라우팅 1단계 배합비

A액		B액	
물유리	물	시멘트	물
100ℓ	100ℓ	80kg	175ℓ
200ℓ		200ℓ	
400ℓ			

Table 5 L.W 그라우팅 2단계 배합비

A액		B액	
물유리	물	시멘트	물
100ℓ	100ℓ	100kg	168ℓ
200ℓ		200ℓ	
400ℓ			

3.1.2 L.W 그라우팅 시공결과

L.W 그라우팅의 시공결과를 보면, 주입압력은 간극층의 물을 밀어내고 공극내에 주입재가 치환되어야 하므로 용수압보다는 커야 되므로 한강수위의 1~8배 범위인 3~25kgf/㎠을 나타내었고, 시간당 주입량은 거의 일정하였지만 주입시간의 증가에 따라 주입압이 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 용출수량과 주입량과의 관계는 용출수량의 지수함수적 증가에 따라 주입량은 선형으로 증가하였다. 주입형태는 주재가 주입대상의 공극 및 연약부분을 채운 후 맥상주입되는 형태를 나타내었고, 주입율의 범위는 19.8~23.4% 이며, 평균주입율은 20.9%이었다. 그라우팅 장비선정시 천공 및 주입장비가 길면 로드가 휘어져 계획한 위치에 주입이 곤란하여 천공 및 주입길이는 25m로 하고 20m를 굴착하여 5m는 주입영역이 겹치도록 하여 막장의 안전을 확보하였다. 투수시험은 수압에 의한 투수시험법인 루젼시험(lugeon test)으로 실시하였는데 루젼시험은 틈을 포함한 불균질 지반의 투수성을 시험하는 방법으로 주로 댐 기초지반의 투수성 평가에 사용되고 있지만 한강 하저터널 주입공사의 효과를 확인하기 위해서 주입공사 시행 전·후에 실시하였으며, 루젼치는 공경 약 70㎜ 정도의 시추공에 10kgf/㎠로 물을 주입한 다음 주입길이 1m당의 주입량을 리터 단위로 나타낸 것을 의미한다.

따라서, 한강 하저터널에서는 그라우팅 완료후에 누계시간 30분 동안 5분 간격, 주입압 4~10kgf/㎠ 범위에서 2kgf/㎠ 간격, 분당 주입량은 2ℓ로 하여 시험을 실시하였으며, 전반적인 투수계수의 변화는 주입전 약 10^{-4}~10^{-5}㎝/sec에서 약액주입 후 약 10^{-5}~10^{-6}㎝/sec로 감소하는 효과가 있었다.[3],[4]

3.2 강관다단 보강그라우팅

이 공법은 일명 Mini pipe roof , Umbrella arch 공법이라고도 하며, 직경 50mm의 강관을 30~50cm의 간격으로 직경 8mm의 구멍을 뚫어 데이프로 봉한 후 천공된 구멍에 삽입하고, 이중팩키 그라우팅에 의하여 주변지반을 보강하는 방법이다. 이 공법의 특징은 암괴의 전단보강으로 단층 파쇄대 및 파쇄절리의

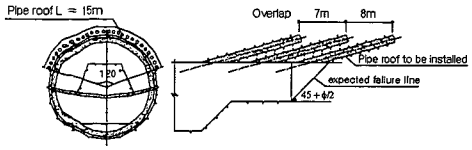

Fig. 5 강관다단 보강그라우팅

이탈을 방지하며, 상부 굴착면의 안정성 확보 및 그라우팅의 2차 효율을 증대할 목적으로 시행하는 공법으로 암반내의 비교적 큰 블럭을 봉합하므로서 대규모 암반붕락에는 효과적이나, 파쇄가 심한 경우의 소붕락에는 그 효과가 크게 미치지 못하므로 암반 파쇄가 심한 경우에는 작업시의 안전성 및 소규모 붕락으로 인한 암반 이완방지를 위해 포폴링의 병행 시공이 필요하다. 강관다단 보강그라우팅의 구체적인 시공방법으로 천공직경은 보강용 강관직경의 1.8~2.0배로 하고, 강관의 본당길이는 6m로 하여 1본씩 커플링으로 연결하였으며, 천공구멍과 강관 외관 사이에 지수발포제로 1차 코킹하여 지하수유입을 차단하고, 그라우팅에 의한 최대압력인 20kgf/㎠에 견딜 수 있도록 급결시멘트로 2차 코킹을 하였으며 강관다단 보강그라우팅은 Fig. 5와 같다.

주입압력은 지하수위의 정수압에 3~4배, 주입재료는 물유리와 시멘트를 주 주입재료로 하여 차수효과와 보강효과를 동시에 얻도록 하였고, 주입 지속시간은 주입속도가 10ℓ/분 이하에서 주입압 10kgf/㎠로 10분간 주입되었을 때까지를 기준으로 주입관리를 하였다.[5],[6]

4. 터널 굴착방법 및 지보패턴

단층 연약대 구간에서 터널 굴착방법은 터널 굴착후 막상자립이 극히 불량하기 때문에 터널굴착으로 인한 노출면을 최소화하기 위해 상부반단면은 링컷, 하부반단면은 분할굴착하여 즉시 폐합하였다. 1회 굴진장은 0.8m, 숏크리트두께는 3차에 걸쳐 25cm, 강지보공은 H-125×125를 사용하였고, 기계와 인력굴착으로 충격과 진동이 최소화되도록 굴착하였으며, 상부굴착 완료후에는 측벽 및 하부 연화로 인한 터널의 변형을 방지하기 위하여 가인버트를 시공하였으며, 하저터널 구조물 단면도는 Fig. 6과 같다.

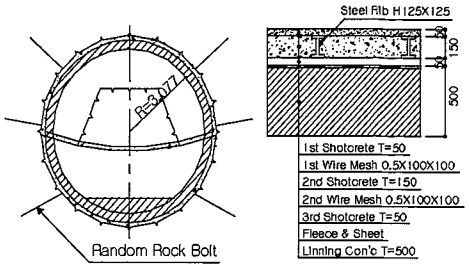

Fig. 6 하저터널 구조물 단면도

5. 공사중계측 결과 분석

터널 굴착공사에 앞서 설계나 시공계획은 극히 제한된 구역의 지질조사로 추정한 지반조건에 의해 수행되는 관계로 토압의 형태, 크기 등을 확실히 예측하기 곤란하며, 굴착공법, 시공순서 및 공정 등에 의해서 지반의 움직임은 상당한 차이를 보인다.

공사중 계측은 이러한 시공중에 발생되는 실제지반의 움직임을 측정, 당초의 설계와 비교하여 안전하고 경제적인 시공을 유도하는데 있으며, 계측항목은 터널 주변지반의 안전성 확보와 설계 및 시공의 반영을 위하여 행하는 일상관리계측과 지반, 록볼트, 숏크리트 라이닝의 거동, 미굴착 구간과 장래 설계 및 시공을 위하여 행하는 대표단면계측으로 구분할 수 있다.

본 연구구간은 터널 시공 중에 변형의 이상유무와 실시설계의 적정성을 확인하고, 향후 터널시공자료로 활용하기 위하여 일상관리계측과 대표단면계측이 함께 시행하였다.

5.1 일상관리계측

일상관리계측의 주요항목으로는 내공변위와 천단침하를 계측하였으며, 계측 단면도는 Fig. 7, 계측결과는 Table 6과 같다.

5.2 대표단면계측

대표단면계측의 주요 항목으로는 숏크리트응력, 록

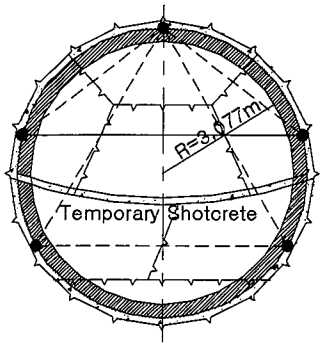

Fig. 7 일상관리계측 단면도

Table 6 내공변위 및 천단침하 계측결과

구 분		변 위 량 (mm)		
		상반내공변위	하반내공변위	천단침하
단층대 구 간	범위	19.7~64.0	12.8~26.0	14.0~24.0
	평균	44.8	19.9	17.8
연 암 구 간	범위	4.8~7.4	1.6~2.2	3.0~10.0
	평균	6.0	1.8	6.7

볼트축력, 지중변위를 계측하였으며, 계측 단면도는 Fig. 8, 계측결과는 Table 7과 같다.[7]

5.3 계측결과 분석

단층 연약대 구간의 터널 계측결과를 하지터널 시공구간 중의 연암구간 계측결과와 비교하였다. 일상관리 계측의 상반 내공변위의 평균치는 단층 연약대에서 44.8mm, 연암구간에서 6.0mm가 발생되었고, 천단침하의 평균치는 단층 연약대에서 17.8mm, 연암구간에서 6.7mm로 큰 차이를 보였다. 대표단면계측의 접선방향 숏크리트응력 평균치는 단층 연약대에서 7.9~15.9kgf/㎠, 연암구간에서 7.1~14.8kgf/㎠가 발생되어 유사한 결과를 보였고, 록볼트축력 평균치는 단층 연약대에서 1.3~4.3tonf, 연암구간에서 0.5~3.1tonf가 발생되어 허용기준치인 12tonf와 비교할 때 거의 유사한 결과를 보였으며, 지중변위 평균치는 단층연약대에서 0.6~2.4mm, 연암구간에서 0.6~2.5mm로 같은 결과를 보였다. 따라서 대표단면 계측결과로 볼 때 단층 연약대 구간을 지반보강공법인 L.W와 강관다

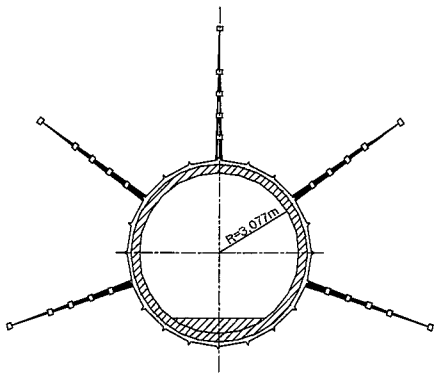

Fig. 8 대표단면계측 단면도

Table 7 대표단면 계측결과 - (1)

구 분			숏크리트응력 (kgf/㎠)					
			10일	20일	30일	40일	50일	300일 이후
단층대 구 간	법선 방향	범위	5.1~ 9.5	5.0~ 12.8	5.0~ 12.8	5.0~ 13.6	5.1~ 13.9	6.2~1 7.0
		평균	6.1	7.0	7.0	7.2	8.9	10.4
	접선 방향	범위	7.4~ 9.5	8.2~ 17.0	5.06 ~17	5.06 ~17	10~ 16.5	12.5~ 21.8
		평균	7.9	10.7	10.8	10.0	12.9	15.9
연암 구간	법신 방향	범위	2.4~ 6.9	2.9~ 11.2	3.9~ 12.1	4.1~ 13.1	4.2~ 13.2	5.3~ 15.5
		평균	4.5	6.6	7.4	8.0	8.0	9.0
	접선 방향	범위	3.4~ 10.4	5.1~ 13.9	5.2~ 16.1	6.2~ 18.0	8.6~ 18.3	10.4~ 18.1
		평균	7.1	11.5	13.1	13.7	13.7	14.8

Table 7 대표단면 계측결과 - (2)

구 분		록볼트축력(tonf)			
		1.0m	2.0m	3.0m	4.0m
단층대 구 간	범위	3.4~5.4	3.0~4.1	2.2~2.4	1.3~1.4
	평균	4.3	3.5	2.3	1.3
연 암 구 간	범위	1.0~5.0	0.4~2.7	0.3~1.7	0.3~0.9
	평균	3.1	2.0	1.4	0.5

Table 7 대표단면 계측결과 - (3)

구 분		지중변위량 (mm)			
		1.0m	2.0m	3.0m	4.0m
단층대 구 간	범위	2.3~2.5	1.4~2.0	0.9~1.2	0.5~0.7
	평균	2.4	1.7	1.0	0.6
연 암 구 간	범위	1.4~3.1	1.0~1.4	0.8~1.1	0.2~0.7
	평균	2.5	1.3	0.9	0.6

단 보강그라우팅 시행 그리고 지반굴착공법 및 지보패턴 변경으로 하저터널내 연암 지역의 터널 거동과 거의 유사하게 터널이 시공 된 것으로 판단할 수 있으며, 터널측벽 하부지지부의 연화로 천단침하와 내공변위가 비교적 크게 발생된 것을 알 수 있었으며, 측벽지지부의 보강방법에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 지하철 5호선 한강 하저터널 단층 연약대를 통과하는 NATM터널에서 시행한 수평선진 지반조사, L.W 및 강관다단 보강그라우팅, 터널굴착공법과 지보패턴, 터널 변위와 응력확인을 위한 계측결과 분석을 통하여 터널의 안정성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수평선진보링시 자연상태에 가까운 시료를 채취하여 실내토질시험과 공내재하시험으로 단층 연약대는 실트질의 모래인 SM층으로 파악되었으며, 막장 지하수 유입 용출수 조사결과 시추길이에 따라 지수함수적으로 급격하게 증가하는 현상을 확인하였고, 이에 따라 구체적인 지반보강공법, 터널굴착공법 및 지보패턴을 결정할 수 있었다.
2) L.W 그라우팅의 주입율 범위는 19.8%~23.4%이었고, 평균주입율은 20.9%이었으며, 용출수량과 주입량과의 관계를 용출수량의 지수함수적인 증가에 따라 주입량은 선형함수적으로 증가하였고, 루전시험에 의한 투수시험결과 투수계수가 10^{-4}~10^{-5}cm/sec에서 10^{-5}~10^{-6}cm/sec로 약 10배 감소하였다.
3) 대표단면 계측결과 L.W 및 강관다단 보강그라우팅, 지반굴착공법 및 지보패턴 변경으로 단층 연약대와 연암구간에서 시공된 터널의 숏크리트 응력, 록볼트축력, 지중변위계측치가 거의 같은 값으로 계측된 것을 볼 때 터널의 안정성은 확보된 것으로 판단된다.
1) 일상계측 결과 터널 상반내공변위와 천단침하는 연암구간보다 크게 나타났는데, 이는 하부지지부의 연화로 인한 것으로 판단되며, 측벽지지부의 보강방법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 서울특별시지하철건설본부, "한강하저터널 지반분석 및 보강공법", 1996
2. 우종태, 서강천, 이송, "지하철 한강하저터널 낙반사고 사례분석을 통한 지반보강 및 시공방법 개선에 관한 연구", 한국지반공학회 터널기술위원회 논문집, 2001, pp.93~102
3. B.S Chun et al, "The Ground Reinforcement Technique for Tunnel Cross-Over the Han River", Ground Improvement Techniques, 1997, pp.44~47
4. S.Lee, J.T Woo, Ground Reinforce for tunnel in weathered soil beneath a Han riverbed in Korea", Modern Tunnelling Science and Technology (IS-kyoto 2001), 2001
5. 우종태, 양태선, 구재동, "하저터널의 보강 및 시공방법 개선에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제18권 제III-5호, 1998, pp.669~677
6. 우종태, 변임근, 이송, "공사중인 터널의 낙반사고 복구사례 및 시공방법 개선에 관한 연구", 한국구조물진단학회 2001년도 봄학술발표회 논문집,
7. 서울특별시지하철건설본부, "계측자료정리 및 분석 종합보고서", 1996, pp.509~550

(접수일자 : 2001년 6월 8일)