

한강 하저터널에서의 암반분류 및 평가사례

박 남 서¹⁾, Nam-Seo Park, 이 치 문²⁾, Chi-Moon Lee, 김 은 섭³⁾, Eun-Sup Kim

¹⁾ 대덕공영주식회사 대표이사

²⁾ 대덕공영주식회사 전무이사

³⁾ 대덕공영주식회사 과 장

ABSTRACT : The Han River tunnel connecting Yoido and Mapo was constructed as a part of the Seoul subway line No.5, which is 52 km long, to improve the traffic conditions of Seoul. It is constructed 15.6~30m below the river floor. It is the first under-river tunnel in Korea with the length of 1,288m.

Geological conditions of the ground under the Han River were more complex and irregular than expected at the design stage, because there were several faults, fracture zones and slickensided joints coated with graphite.

It was thus indispensable to estimate the ground condition of the tunnel face to apply proper excavation and reinforcement methods. Advance borings and face mappings were performed before excavation to improve constructional efficiency and excavation stability.

Key words : The Han River tunnel, Seoul subway, Advance boring, Face mapping

1. 서 언

서울의 극심한 교통난을 해결하기 위하여 건설된 서울 지하철 5호선(총연장 52km)중 여의도~마포를 잇는 한강통과구간은 한강하저 15.6~30m에서 굴착공사를 시행한 국내 최초의 하저터널(L=1,288m)이다.

하저터널공법을 채택하게 된 배경은 평면 선형계획상의 한강통과구간 양측에 기존교량의 램프시설, 고층빌딩, 아파트촌 등이 위치하고 있어 교량공법 채택시 기존 시설물의 저촉 및 기능저하와 진동 및 소음발생에 따른 민원 등 여러가지 문제점이 제기되었기 때문이었다.

따라서 터널공법으로 침매공법, TBM공법, Shield공법, NATM공법 등이 검토 되었으나, 얇은 한강수심(평균수심 4m)과 홍수시 극심한 수위변동 및 세굴영향으로 침매공법은 적절하지 않다고 판단되었고, 한강하부의 불규칙한 지질상태와 불량한 지반특성으로 TBM공법, Shield공법 등도 배제되었다. 이에 따라 여러 가지 공사여건을 감안하여 최종적으로 NATM공법을 하저터널 시공공법으로 채택하게 되었다.

한강하저의 지질은 당초의 예상과는 달리 커다란 단층구조와 다수의 단층들이 존재하고 있고 깊은 풍화대와 흑연층을 협재한 매끄러운 경면의 발달 등 지질구조적으로 매우 복잡하고 불규칙한 지반조건이었다. 이러한 복잡한 지질구조적 특성을 지닌 지반에서의 터널시공시 안정성 확보를 위해 굴착전 지반상태의 정확한 판단과 이를 토대로 한 적절한 굴착공법과 보강공법이 필수적이였다. 이를 위해서 굴착전 수평시추조사, 막장 Mapping 등으로 지반상태를

세밀하게 분석하였으며 적절한 굴착공법 및 보강공법 시행으로 터널 안정성을 확보하면서 터널공사의 경제성 및 시공성을 향상시켰다.

한강하저터널은 92년 10월 굴착을 시작하여 94년 12월에 1,288m의 상행선(B갱)이, 95년 1월에 하행선(A갱)이 관통되었고, 95년 4월에는 전 굴착공사가 완료되었으며 96년 2월에 2차 라이닝을 마침으로서 약 40개월에 걸친 난공사 끝에 터널공사가 완료되어 현재 서울 대중교통수단으로서 중요한 역할을 하고 있다.

서울지하철 5호선 노선중 한강하저터널의 위치는 그림 1.과 같고, 평면선형계획은 그림 2.와 같다.

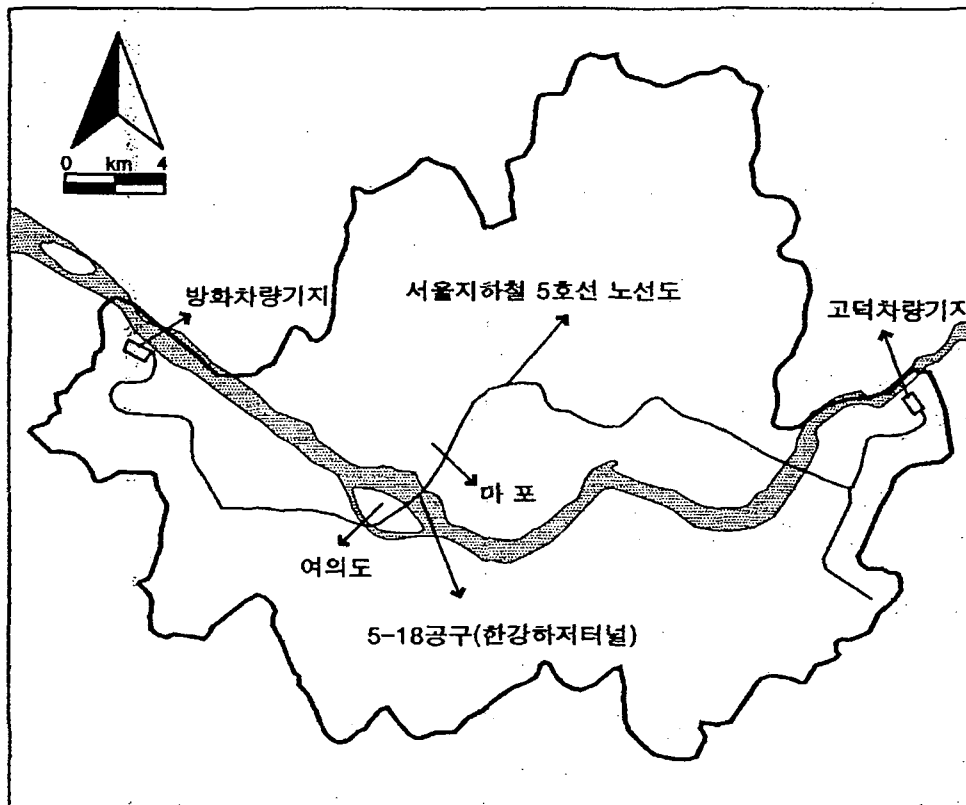


그림 1. 서울지하철 5호선 위치도

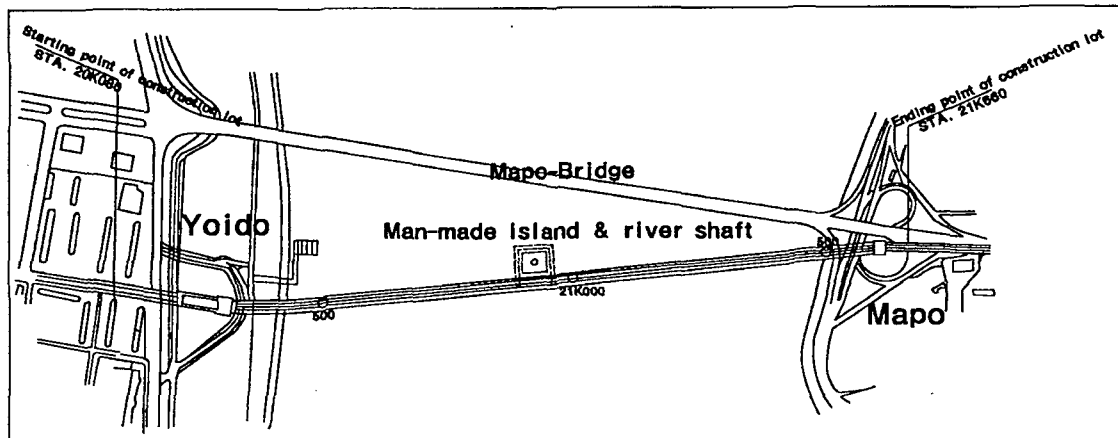


그림 2. 한강하저터널 평면선형계획

2. 수리 및 지반특성

2.1 수리 특성

한강은 서울외곽에 위치한 산들과 계곡들로부터 유입된 지류들이 모여 이루어진 강으로 유역면적 23,000km², 유로연장 500km, 년평균강우량 1,260mm이며 장마기간(7~9월)에 880mm의 강우가 집중되어 계절별 유량차이가 약 130배에 이른다. 홍수시 수방대책으로 여의도측은 공사장 주변에 가제방을 축조하였으며 한강 중앙의 인공섬 하상수직구에는 방수문과 공사용 선박, 바지선 등이 주요 수방시설물이었다. 공사구간의 한강에 대한 제원은 표 1. 과 같고 방류량별 홍수위 발생빈도 및 수위현황은 표 2., 그림 3. 과 같다.

표 1. 공사구간의 한강제원

폭(m)	약 1,000	
수심(m)	평 상 시	홍 수 시
	4~10	15~20
유속(m/sec)	평 상 시	홍 수 시
	0.5~0.7	3~4

표 2. 팔당댐 방류량 및 홍수위 발생빈도

방류량(m ³ /sec)	계획홍수위(m)*	발생빈도(년)
5,000	106.45(6.15)	0.3
12,000	109.29(8.99)	-
25,000	112.67(12.37)	15
30,000	113.57(13.27)	40
33,000	114.10(13.80)	60
37,000	114.86(14.56)	200

* 계획홍수위는 여의도 기준이며 계획홍수위중 ()의 값은 평균 해수면임.

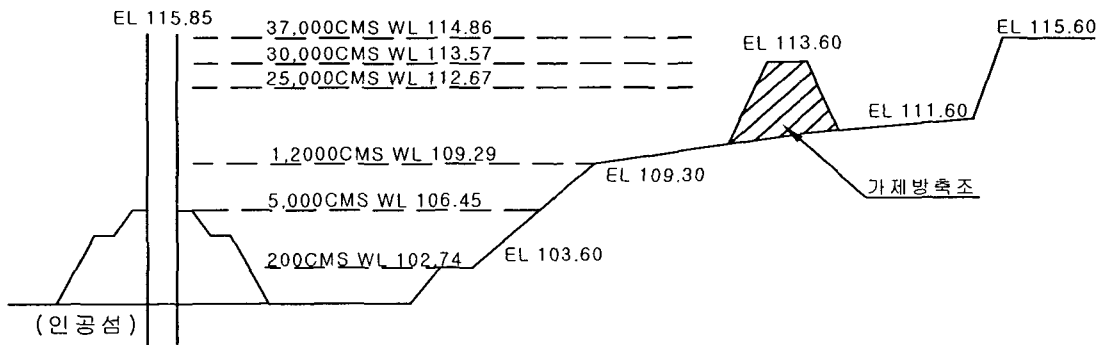


그림 3. 팔당댐 방류량별 공사구간 수위현황

2.2 지반 특성

1) 지질 개요

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 경기편마암 복합체에 해당되는 편마암류와 이를 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있다.

주로 호상흑운모 편마암으로 구성되는 편마암류는 여러 차례에 걸친 변형작용으로 심하게 교란되어 있으며 부분적으로는 변성정도가 낮은 편암류(운모편암, 흑연편암)가 일부 인지되는 곳도 있으며 극히 일부에서는 산성암맥, 석영, 방해석맥이 판상으로 협재되는 경우가 있다.

충적층은 범람원 퇴적물로서 미고결상태의 자갈, 모래, 점토 등으로 구성되며 편마암류 암체를 부정합으로 피복하고 있다.

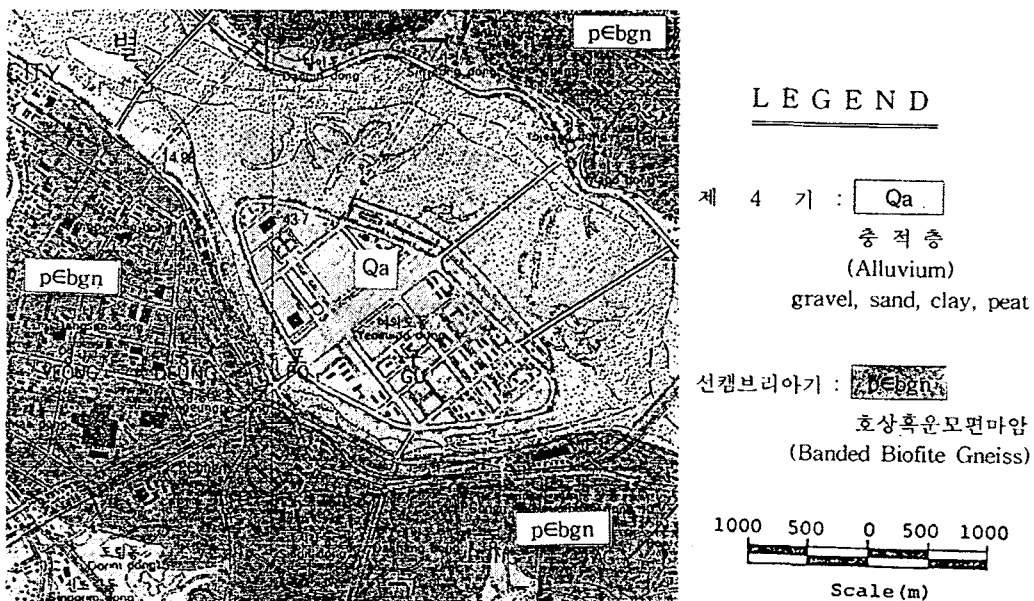


그림 4. 여의도 인근 지질도

2) 암반 상태

본 구역에서의 암반상태는 수차례에 걸친 지각운동의 산물로서의 단층 및 단층파쇄대, 연속성이 강하고 gouge물질을 협재하는 절리, 강한 선적배열을 보이는 엽리 등 수많은 불연속면이 형성되어 있는 극심한 이방성을 나타낸다. 이러한 특성으로 인해 심한 풍화대가 형성되고 단층점토가 협재되는 매우 연약한 지반이 분포하며 풍화가 비교적 약하게 진행된 암반도 암석자체의 강도는 양호할지라도 암반으로서의 매우 취약한 상태를 보여주고 있다.

3) 지반조사 성과

실시설계를 위한 지반조사는 90. 6. 14 ~ 90. 11. 30까지 시행하였으며 시추조사 24공(BX, NX size 각 12공씩)과 현장 원위치시험으로 표준관입시험, 투수시험, 수압시험, 공내재하시험, 물리탐사, 수직도 검층 등을 실시하였고 채취된 시료에 대하여 토질시험 및 암석시험을 실시하였다.

지반조사 결과를 요약하면 다음과 같고 지질 단면도는 그림 5와 같다.

• 편마암 경암코어시료의 공학적 특성

구 분	Young율(E) ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)	포아송비	점착력(c) (kg/cm^2)	내부마찰각 ϕ (°)	단위중량 $\gamma_1(\text{g/cm}^3)$	변형계수(E_b) ($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)
범 위	1.91~7.70	0.16~0.24	130~310	33~50	2.61~2.72	-
평균치	4.26	0.21	232	42	2.67	2.39

• 물리탐사 결과

수상구간의 기반암층(풍화대 포함)은 여의도측은 하상부터 10m하부, 중앙부는 약 7m하부, 마포측은 2~3m하부에 분포하는 것으로 나타났으며 이는 시추조사결과와 거의 일치하는 것으로 판단되었다.

또한 마포측에서는 대규모 구조선이 분포하지 않는 것으로 판단되었으나 이외 지역에서는 수심이 얕고 사력층이 두껍게 분포하고 있어 구조선의 분포여부가 불확실한 상태로 나타났다.

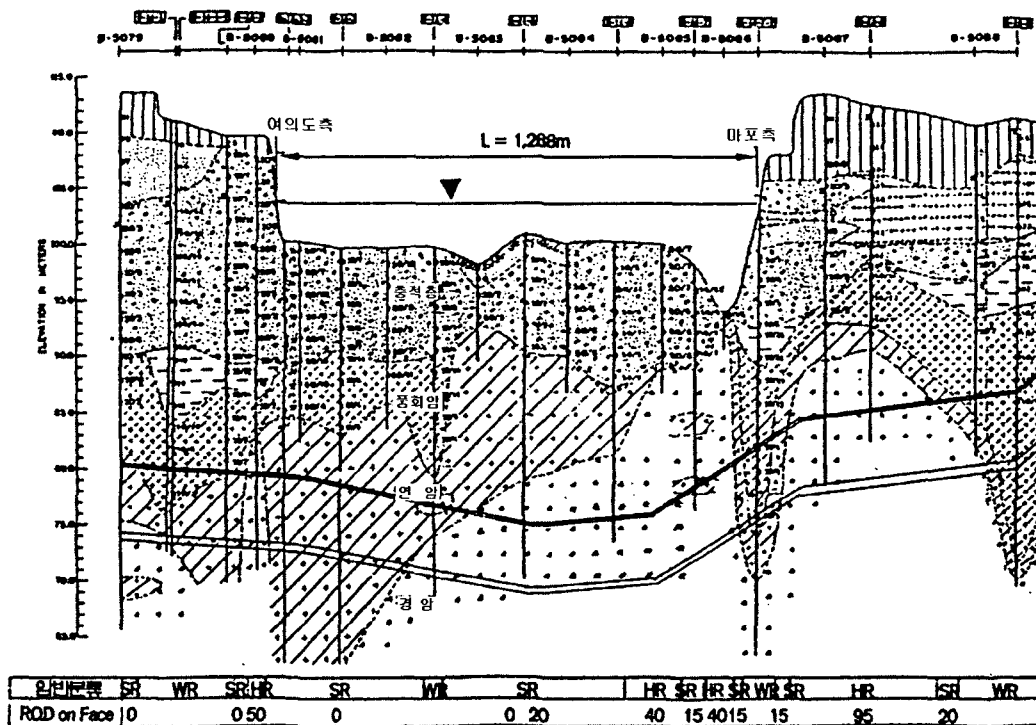


그림 5. 한강 하저터널 지질 단면도

3. 하저터널 설계

3.1 당초 설계

- (1) 본선터널(직경 6.3m)은 시공중의 안정성 및 작업효율 증대와 공사 완료후 유지관리시 환기 등을 효율적으로 하기 위해 단선병렬로 계획하였으며 굴착단면의 형상은 응력집중의

최소화와 완전방수의 효율을 증대시키기 위해 원형단면으로 설계하였다. 본선터널의 굴착 방법은 상부 반단면 분할 굴착을 기본으로 계획하였으며, 작업구는 여의도 둔치와 마포대교 북단에 각각 1개소에서 굴착하도록 계획하였다.

- (2) 보조터널(직경 4.0m)은 본선터널 굴착에 앞서 지반정보를 사전에 정확하게 파악하기 위해 계획되었으며 시공시에는 배수, 환기, 비상통로, 공동구 등으로 활용가능한 service tunnel의 역할이 되도록 하였다.
- (3) 본선터널과 보조터널을 연결하는 횡갱은 시공중 공사자재 반입 및 굴착토 반출, 배수로, 유지보수 등의 목적으로 약 200m마다 교대로(Zigzag형) 계획하였다.
- (4) 터널내부의 방수는 터널 전주변에 방수재를 설치하여 지하수의 터널 내부 유입을 차단함으로써 작용수압을 내부 복공 콘크리트가 받게 되는 완전 방수방식으로 계획하였다.
- (5) 2차 라이닝 콘크리트는 완전방수터널로 계획 홍수시의 최대수압과 자중을 고려하여 설계하였다.

3.2 변경 설계

터널구간 굴착공사 추진중 당초 예상보다 지반상태가 불량하고 터널 상부 토피 절대부족과 여의도 시점측 터널간격 근접 등의 이유로 다음과 같이 시공계획이 변경되었다.

1) 터널 종단계획 변경

터널시점부 막장을 굴착한 결과 사전에 시행한 시추조사 내용보다 암반이 심하게 풍화되었고 당초 계획된 종단구배 계획 상태에서는 강바닥의 충전층과 터널상단부 사이의 여유고 부족으로 만일 낙반사고가 발생된다면 하천수 유입과 같은 대형사고가 우려되어 터널의 안정성 확보와 지반보강공사 물량축소에 따른 공기단축 및 공사비 절감을 위하여 전동차 운행에 지장이 없는 범위내에서 최대한 종단구배를 하향 조정하였다. 종단구배 조정결과 그림 6.과 같이 터널의 풍화대 피복이 8.5~9.5m에서 13.5~19.5m로 증가되었으며 풍화대 통과 구간은 당초 340m에서 140m로 감소하였다.

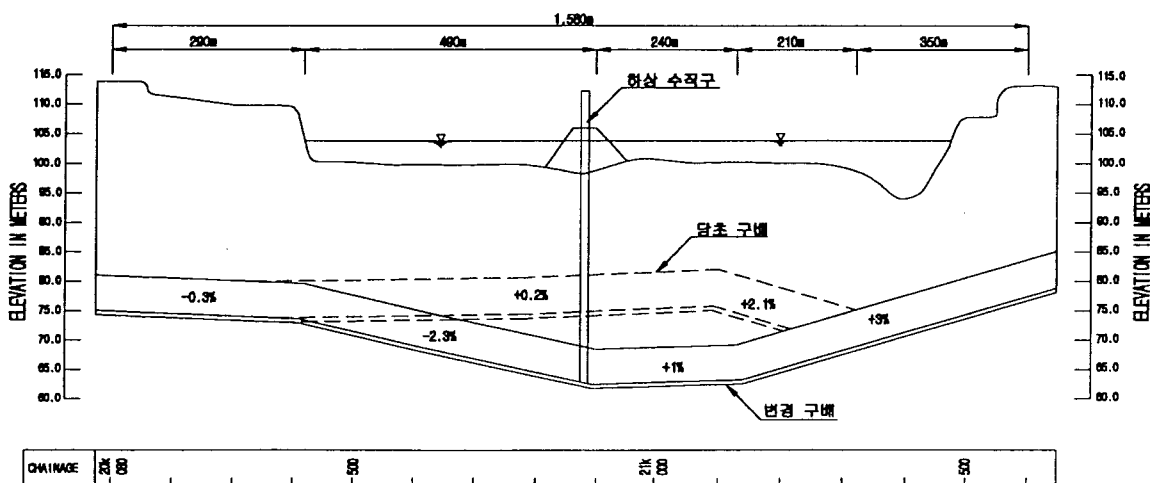


그림 6. 터널구간의 종단구배계획

2) 보조터널 설치계획 삭제

한강 하저터널에서 보조터널 설치목적은 지반조사와 차수 및 지반보강 효과 확인, 비상시 대피통로로 활용하는 등 안정성 확보 및 다수막장 확보로 공기단축, 배수로와 환기덕트 등 공간으로 활용하도록 계획되었다. 그러나 공정검토결과 장대 하저터널 전구간(1288m)을 작업구 2개소(여의도 및 마포 각 1개소)만으로는 계획공기내 터널공사 시행이 불가하여 한강중앙에 인공섬을 축조하여 하상수직구를 신설토록 계획이 변경됨에 따라 당초 보조터널 설치목적이 상실되었으며 본선터널과 이격되어 있어 보조터널로 지반조사 및 지반보강 효과 확인이 미흡하고 연결횡갱의 경사가 급하고 간격이 멀어 대피공간과 작업로 등으로 활용하는 효과도 미흡하여 보조터널 설치계획을 삭제하였다.

이에 따라 막장 수평 선진시추조사 및 수발공을 설치하여 사전지질조사로 안전시공에 대처하고 적정개소에 횡갱설치로 공정축진의 효율성을 고려하였다.

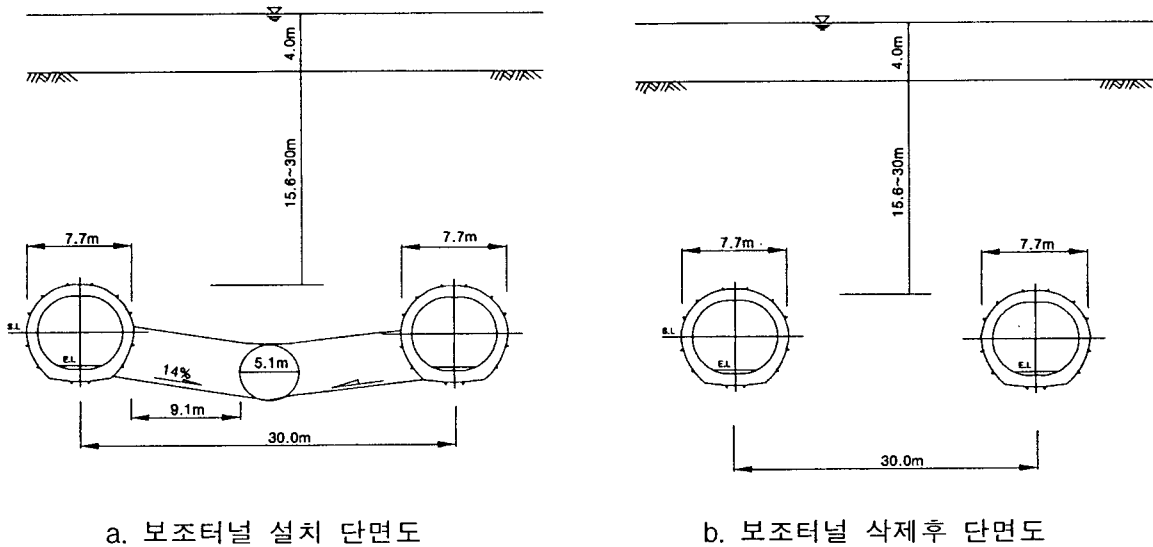


그림 7. 터널단면도

3) 한강 중앙 인공섬 설치

터널 막장의 지반이 당초 예상보다 연약한 것으로 확인되어 안전시공을 위한 추가 보강공사가 불가피해짐에 따라 상당한 공기지연이 예상되었다. 또한 터널을 굴착하기 위한 작업장은 한강 양안의 고수부지에 각각 1개소씩 설치되어 있어 공기 만회를 위해서는 한강 중앙부에 인공섬을 축조하여 작업장의 추가 설치가 불가피하였다.

인공섬은 사각형(44×44m)으로 슈트파일을 설치한 다음 주변의 강바닥 충적토를 준설 채움하고 세굴방지를 위하여 슈트파일 주변에는 사석과 피복석으로 보호를 했다. 인공섬에는 직경 15m의 원형수직구를 깊이 45m로 뚫고 본선 터널을 굴착하여 약 16개월의 공기단축효과를 보았다.

공사완료후에는 홍수시의 와류현상으로 인접한 기존교량에 나쁜 영향이 생기지 않도록 준설토로 메운 후 인공섬을 철거하였다.

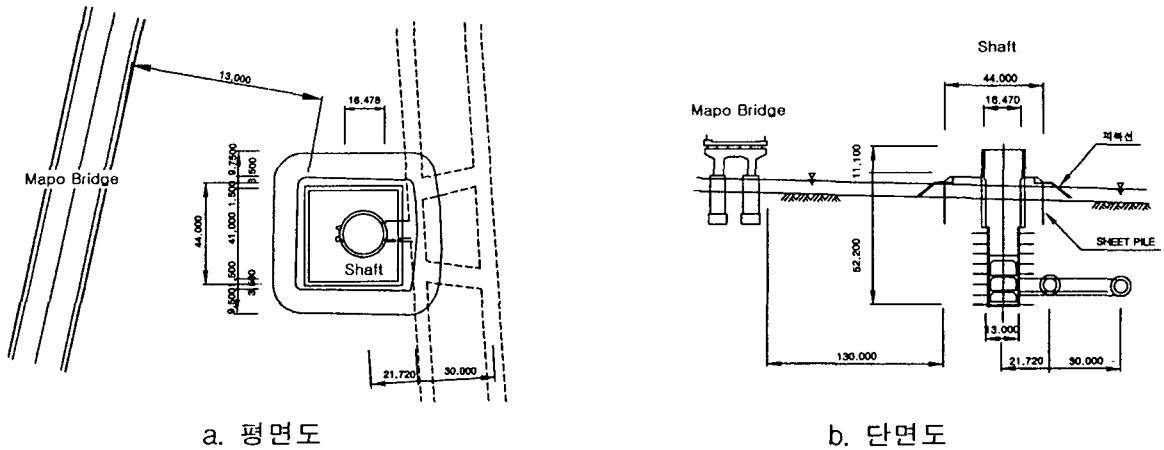


그림 8. 인공심 평면도 및 횡단면도

4) 하저터널 굴착단면 변경

하저터널 단면은 높은 수압발생에 대처하고 완전방수 공법에 따른 구조적 안정성을 확보하기 위해 원형단면으로 설계하였으나 원형단면으로 하부 굴착시 장비주행성의 결여로 장비이동이 어렵고 대피공간 확보가 곤란하며 시공성이 낮아 굴착단면을 원형에 가까운 원형성 마제형으로 단면을 조정하여 시공성을 개선하였으며 2차 라이닝 콘크리트 단면은 원형으로 시공하여 수압에 대한 구조적 안정성을 확보하였다.

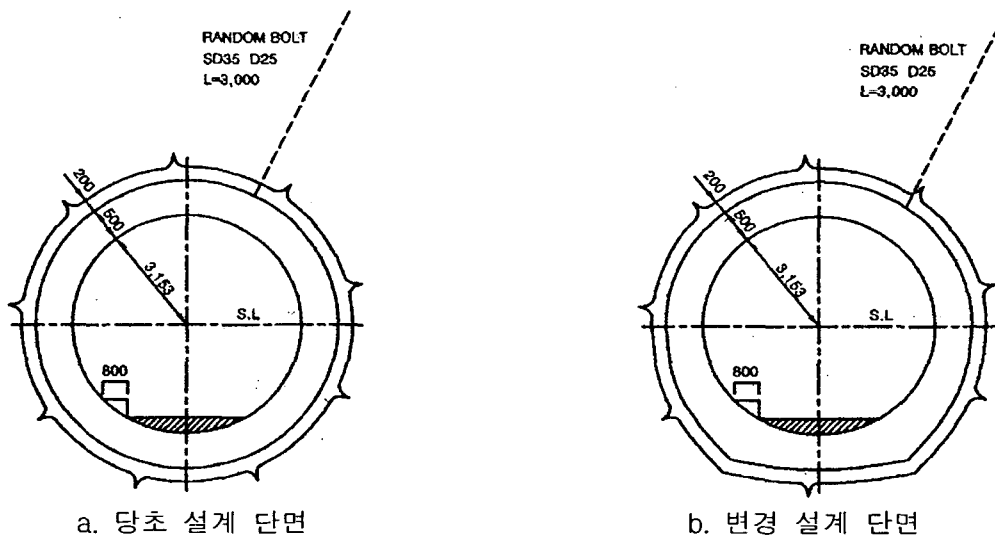


그림 9. 터널 굴착 단면

3.3 표준지보패턴

표준지보패턴은 지질조사자료를 기초로하여 지반의 종류에 따라 그에 적합한 패턴을 결정하였다. 터널 천정부에서 $1/2H$ (H: 터널높이)을 기준으로 하여 그 지점안에 터널 막장부위보다 약한 암반이 분포할 경우 막장의 암반을 기준으로 지보패턴을 결정하지 않고 한 단계 낮은

지반에 적합한 패턴을 채택하였다. 또한 단단한 암반이라도 단층과쇄대에는 한 단계 낮은 지보패턴을 적용하였다.

표 3. 암반조건에 따른 지보패턴 및 보강공법

암반조건	암반 분류 (RMR)	지보 패턴	보강 공법
경암구간	58~78 (매우 양호)	-1회 굴진장 : 1.0m -shotcrete : 15cm -rockbolt : $l=3m$, 4ea -steel rib : H100×100 -굴착방법 : 발파	-grouting : 28공 -강관보강 : 13ea ($l=15m$, ctc 0.5m)
경암우세 (부분적연암)	47~78 (양호)	-1회 굴진장 : 0.8m -shotcrete : 20cm -rockbolt : $l=3m$, 4ea -steel rib : H100×100 -굴착방법 : 발파+로드헤더 발파+I.T.C	-grouting : 41~45공 -강관보강 : 13~17ea ($l=15m$, ctc 0.5m)
연암, 경암 혼재	34~76 (보통~양호)	-1회 굴진장 : 0.8m -shotcrete : 20cm -rockbolt : $l=3m$, 4ea -steel rib : H100×100 -굴착방법 : 발파+로드헤더 발파+I.T.C	-grouting : 41~45공 -강관보강 : 13~17ea ($l=15m$, ctc 0.5m) -forepoling(random) ($l=3m$, 6~13ea)
파쇄연암 (풍화암 혼재)	20~48 (불량)	-1회 굴진장 : 0.8m -shotcrete : 20cm -rockbolt : $l=3m$, 4ea -steel rib : H125×125 -굴착방법 : 로드헤더, I.T.C hand breaker	-grouting : 81공 -강관보강 : 17ea ($l=15m$, ctc 0.5m) -forepoling(system) ($l=3m$, 8~13ea)
연약대 구간 (토사 구간)	17~40 (매우 불량)	-1회 굴진장 : 0.8m -shotcrete : 25cm -rockbolt : - -steel rib : H125×125 -굴착방법 : 인력굴착, I.T.C hand breaker	-grouting : 111공 -강관보강 : 26ea ($l=15m$, ctc 0.3m) -forepoling(system) ($l=3m$, 13~20ea)

3.4 터널의 방수와 배수

1) 터널의 방수

한강하저터널은 상부에 상시 흐르고 있는 많은 량의 하천수가 있어 배수식 방수형태로 시공할 경우에는 터널 내부로 지하수의 유입을 허용하게 됨에 따라 공사완료후 유지관리시에 여러 가지 어려움이 예상되어 터널인버트를 포함한 터널전주변에 배수재와 방수재를 설치하여 주변의 지하수가 터널 내부로 유입되지 않도록 계획하였다. 터널 굴착중에는 지하수 처리를 위하여 터널 바닥 중앙에 유공관을 설치하였다. 비배수 방수를 채택한 하저터널에서는 터널 양측벽 하단부에 종방향으로 설치한 유공배수관(Ø100mm)을 연결하였다. 이것은 터널바닥의 유공관(Ø 300~600mm)에 종방향 간격 15m로 세운 수직배수관(Ø100mm)에 연결시킨 후 터널 인버트를 포함한 전주변에 배수재와 방수재를 설치하고 라이닝을 시공토록 하였다. 이에 따라 터널 주변의 지하수는 터널 내부로 유입될 수 있는 길이 완전히 차단되었으며 터널의 종단구배를 따라 라이닝 밖의 터널바닥 중앙부에 설치된 유공관을 통하여 흐르도록 조치하였다.

2) 터널의 배수

하저터널 중단계획 변경으로 하저터널 중간지점이 가장 낮은 저점부가 되며 그 위치의 본선터널 옆에 기설치된 인공섬을 이용한 원형수직구내에 집수정을 설치하여 집수한 후 하저터널 상행선(B갱) 측벽에 설치된 스테인레스관을 통하여 공사 종점측 수직구로 펌핑을 하도록 하였다. 한강중앙에 설치된 집수정의 용량은 하저터널의 배수량 $2\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$, 집수시간 60분, 배수시간 30분으로 하였으며 지하철 운행중에 하저터널 구간의 침수사고가 발생할 경우 전원 공급곤란으로 인한 양수기 작동 불능에 대비하여 여의나루 역에서도 전원을 공급할 수 있도록 하였다.

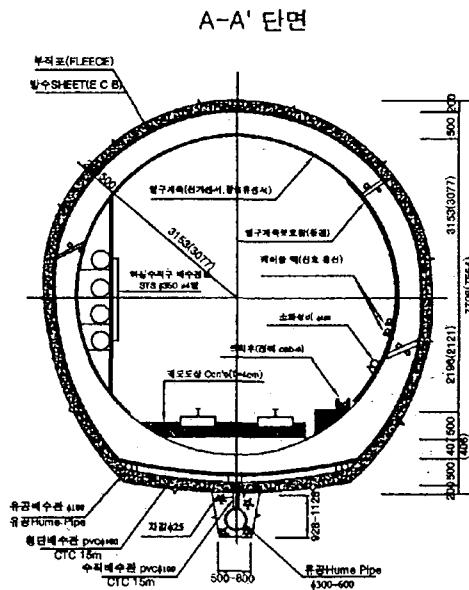
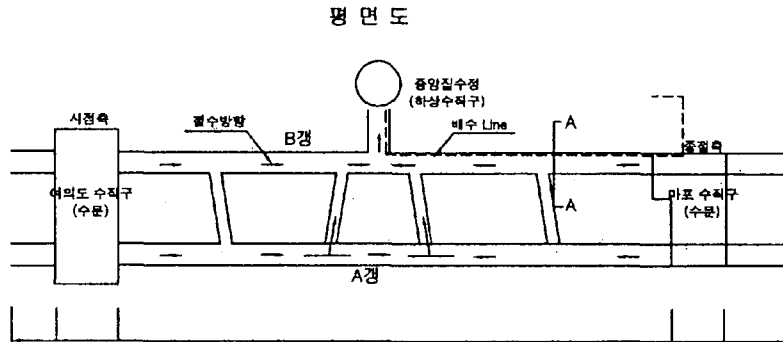


그림 10. 하저터널의 배수시스템

4. 하저터널 시공

4.1 하저터널 굴착 순서

한강하저터널의 특수한 상황, 즉 굴착중 하천수 유입을 동반한 붕락사고를 일으키면 공사의 완성이 거의 불가능하게 되는 치명적인 상황의 초래를 철저히 방지하기 위하여 다음과 같이 4 단계의 작업을 반복 시행하였다.

- 1) 굴착전방의 지질상황과 용수량을 정확히 파악하기 위한 수평선진시추를 시행하여 적절한 굴착공법 및 보강공법의 범위를 결정한다.(그림 11. a 참조)
- 2) 지수를 위한 주입공사를 실시하여 용수를 확실히 차단한다. 주입공법은 Rock Grouting 및 Soil Grouting을 구분하여 L.W주입공법을 채택했다. 전방 25m구간을 주입하고 20m 굴착하는 작업을 반복한다.(그림 11. b 참조)
- 3) 불연속면들의 교차에 의한 막장암반의 썩기파괴 및 연약화된 암반의 전단파괴 등을 사전에 방지하기 위하여 터널 천단부위에 강관보강 설치작업을 한다.
외경 50mm, 강관길이 15m 짜리를 횡간격 30~40cm로 삽입하고 10m를 굴착하는 작업을 반복한다. 단 국부적으로 추가보강이 필요시 Fore Poling으로 보완한다.(그림 11. c 참조)
- 4) 보강공사후 가능한 진동을 최소화할 수 있는 기계굴착(로드헤더, ITC) 등을 시행한다.
(그림 11. d 참조)

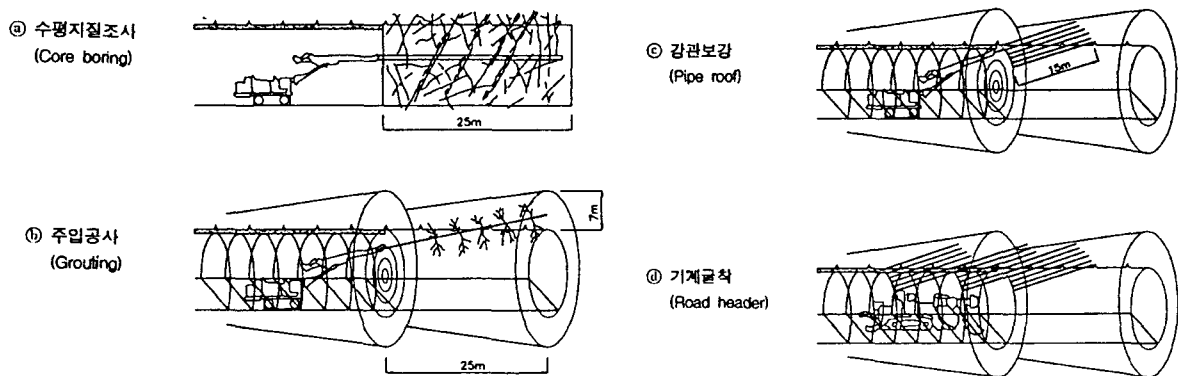


그림 11. 하저터널의 굴착순서

4.2 지반 보강

한강하저의 지질상태는 깊은 풍화대, 단층 및 파쇄대, gouge를 협재하는 절리면의 발달 등 지질구조적으로 심하게 교란되어 있고 공학적으로 매우 취약한 지반상태를 보이므로 갱내조사를 통한 막장전방의 지질상황에 적절한 보강공법 및 굴착패턴을 선정하여 시공에 임하였다.

설계를 위한 지반조사와 실제 시공시 지반조사 결과를 비교하면 표 4와 같이 실제 시공시의 조사결과가 설계시 지반조사결과에 비해 풍화암(불량)이나 풍화토(매우 불량)가 많은 것으로 조사되었다.

표 4. 설계시와 시공시의 암반분류결과 비교

구 분	암 반 분 류				
	계 (%)	경 암 (양질암)	연 암 (보통암)	풍화암 (불량암)	풍화토 (극불량암)
설 계	100	57	36	7	-
시 공	100	35	36	21	8

1) 차수 그라우팅

차수 그라우팅의 주입 영역은 원형공동에의 주입시 역학적 해석 및 경험치를 따르면 주입 지역을 아무리 크게 해도 별 의미가 없으며 터널반경의 2~3배가 적정치가 된다고 알려져 있다. 따라서 본 공사구간에서는 주입범위 7m를 표준으로 하고 암반상태 및 시공방법에 따라 주입범위를 조정하였다.

주입간격은 저압 주입시의 유효범위 중복을 고려하여 1.5~2m로 하고 주입량은 시공 실적 인 공당 주입량의 상한치와 이론적 계산방법인 간극율, 주입공 간격, 주입재 또는 지하수의 유출방지를 목적으로 막장 암반 상태에 따라 주입장 및 벌크헤드(bulk head)를 결정하였으며 일반적으로 주입장 25m, 벌크헤드 5m를 표준 패턴으로 시공하였다.

주입순서는 주입재의 주입범위 밖으로의 일출방지와 시공과 병행하여 주입 효과의 확인이 용이한 내삽법(외측에서 내측으로 주입)으로 시행하며, 동일 line은 2공 간격으로 주입하여 천공시의 주입량이 주입 당초의 용수량에서 감소되므로 주입효과를 확인하였다.

주입압력은 수두의 4~6배로서 평균 12~18kg/cm²이었으며, 주입속도는 최대 25 l/min로 하였다.

본 공사구간에서 주로 시행한 L.W 주입공법은 지반조건에 따라 5가지 패턴(표 5. 참조)으로 나누어 시공하였으며 차수그라우팅 배합비는 3가지 type을 적용하였다.(표 6. 참조)

표 5. L.W 그라우팅 패턴별 시공내용

패 턴	암반상태	주입범위(m)	주입공수(공)	주입장(m)	벌크헤드(m)
A	경 암	3.5	28	25	5
B	경암우세	5.0	42	25	5
C	연암우세	5.0	55	25	5
D	풍화암	7.0	81	25	5
E	토 사	7.95	111	31	10

표 6. L.W 그라우팅 배합비(m³)

배 합	주입량 (ℓ)	A액		B액			Gel time (sec)	주입비율 (%)
		물유리 (ℓ)	물 (ℓ)	시멘트 (kg)	물 (ℓ)	W/C (%)		
I	1000	250	250	95	470	500	92	80
II	1000	250	250	115	463	400	57	20
III	1000	250	250	150	452	300	45	필요시

2) 강관보강 그라우팅

강관보강 그라우팅 공법은 암괴의 전단보강으로 단층파쇄대 및 파쇄절리의 이탈을 방지하며 상부 굴착면의 안정성 확보와 차수 그라우팅의 2차적인 효율을 증대할 목적으로 시행한 공법이다.

주입방식에 따라 강관 1단주입과 강관다단주입방식으로 구분되며 양호한 암반구간에는 1단 주입방식이 유리하고 파쇄되거나 풍화가 많이 진행된 경우 또는 용수가 다소 존재하는 경우에는 강관다단주입방식이 유리하다. 본 현장에서는 주입효과를 높이기 위해 강관다단을 적용하였다.

시공방법은 차수 그라우팅 완료후 시행하며 외경 50mm의 강관을 S.L상부 120° 내에 암반 상태에 따라 13~26개를 시공하며 15m를 표준시공길이로 하는데 그 중 5~8m를 겹침시공함으로써 막장의 안정성을 도모하였다.

이 공법은 파쇄정도가 심한 경우의 소규모 봉락에는 효과적이지 못하므로 암반파쇄가 심한 경우에는 작업시의 안정성 및 소규모 봉락으로 인한 암반의 이완방지를 위해 길이 3m의 fore-poling을 시행하였다.

또한 주입압력변화에 따라 표 7.과 같이 3가지 배합비를 탄력적으로 적용하였다.

표 7. 그라우팅 배합비

배 합	주입량 (ℓ)	A액*		B액*		
		규산소다 (ℓ)	물 (ℓ)	시멘트 (kg)	물 (ℓ)	W/C (%)
I	400	100	100	60	181	302
II	400	100	100	80	175	219
III	400	100	100	100	168	168

* A액 : B액 = 1 : 1

4.3 연약대 구간 시공

여의도측 하저터널 A갱에서 선진수평시추조사중 연약대를 확인하였으며, 전체적인 연약구간(단층대)은 시공결과 20k495에서 20k580까지 폭 85m의 비교적 큰 규모의 단층대를 형성하고 있었다.

본 연약대구간은 다음과 같은 공법을 적용하여 약 9개월간의 공사기간의 소요로 시공완료하였다.

1) 연약대(단층대) 구간 지반조사

여의도측 하저터널 A갱 STA. 20k485 지점에서 수평시추조사중 시추시점부터 약 10m 전방 지점(STA. 20k495)에서 단층각력암이 출현하고 이후 풍화대 및 점토와 함께 200~400 ℓ/cm³ 정도의 지하수가 용출되기 시작하여 최대 1,200 ℓ/cm³의 용수가 발생하였다.

따라서 터널의 안전시공을 위하여 시추조사, 공내재하시험, 토질시험 등 세밀한 지반조사를 시행하였으며 이에 대한 조사결과를 요약하면 표 8. ~ 표 10.과 같다.

표 8. 수평선진시추조사 결과

구 간	연장 (m)	경사 (°)	작업 내용	출수량 (ℓ/min)	비 고
20k 501.4~571.4	70	5	0.0~30.0m : Non coring 30.0~42.0m : Slime check 0.0~30.0m : Coring 0.0~30.0m : Slime check	300 400	22m 지점에서 용출수 급격히 증가
20k 501.4~521.6	21.2	0	트리플 바렐로 코어채취 가능		

표 9. 공내재하시험 결과

측 점	시험심도 (m)	정지토압 Po(kg/cm ²)	항복압 Py(kg/cm ²)	파괴압 Pi(kg/cm ²)	반력계수 Km (kg/cm ³)	탄성계수 Em (kg/cm ²)
20k 502.1	0.7	2.75	14.85	18.95	87.35	474.45
20k 503.1	1.7	1.96	16.83	18.79	81.70	458.08
20k 504.1	2.7	3.20	16.58	19.23	93.15	488.48

표 10. 토질시험 결과

sample	horizontal depth(m)	W _n (%)	Gs	Atterberg		일축압축 q _u (kg/cm ²)	직접전단		USCS
				LL	PI		c (kg/cm ²)	φ (°)	
A	2.0~3.0	21.5	2.66	NP	NP	0.71	0.35	35	SM
B	8.5~9.0	22.7	2.66	NP	NP	0.54	0.24	32	SM
C	16.4~16.8	25.7	2.66	NP	NP	0.38	0.19	29	SM

2) 연약대 구간 통과공법 검토

시공시 과도한 침투 지하수량, 불량한 막장 자립력, 과도한 변위발생 및 변위수렴 지연과 한강 하천수의 풍부한 공급량 등의 문제점에 대한 세부공법 수립을 위하여 다음 표 11. 과 같은 공법들을 비교 검토하였다.

연약대 구간 통과공법 검토결과 다른 공법에 비하여 Grouting공법과 강관다단 보강공법이 다른 공법에 비하여 양호한 것으로 검토되었다.

표 11. 연약대 통과공법 비교

항 목 \ 공 법	동 결	압 기	Jet Grouting	PUIF	Grouting (현탁액형)	강관다단 보강공법
적 용 지 반	○	△	△	○	△	○
차 수 성	○	○	△	○	○	△
강 도	○	△	○	○	△	△
설 계 의 정 도	△	△	△	○	○	○
시 공 성	△	×	△	○	△	○
문 제 발 생 시 대 처 능 력	×	×	△	○	○	○
시 공 계 획 변 경 의 난 이 도	×	×	○	○	○	○
국 내 시 공 실 적	×	×	△	△	○	○
공 사 기 간	×	×	△	○	△	○
경 제 성	×	△	△	×	○	○

○ : 양 호 △ : 보통 × : 불량

3) 지반보강 및 굴착공법

실트질 모래층이 확인됨에 따라 굴착중에 지하수 용출의 과다와 지반지지력이 낮은 막장의 자립시간이 매우 불리함에 따라 터널의 변위발생이 커지고 변위의 수렴이 지연될 것으로 예상되어 치밀한 차수 그라우팅(현탁액형 L.W)과 막장보호를 위한 강관다단공법을 채택하여 지반을 보강하였으며 굴착은 벤치커트에서 링커트로 변경시공하였다.

(1) 그라우팅

- 주입공법 : L.W
- 주입패턴 : 그림 12. 참조
- 주 입 장 : 31m
- 벌크헤드 : 10m

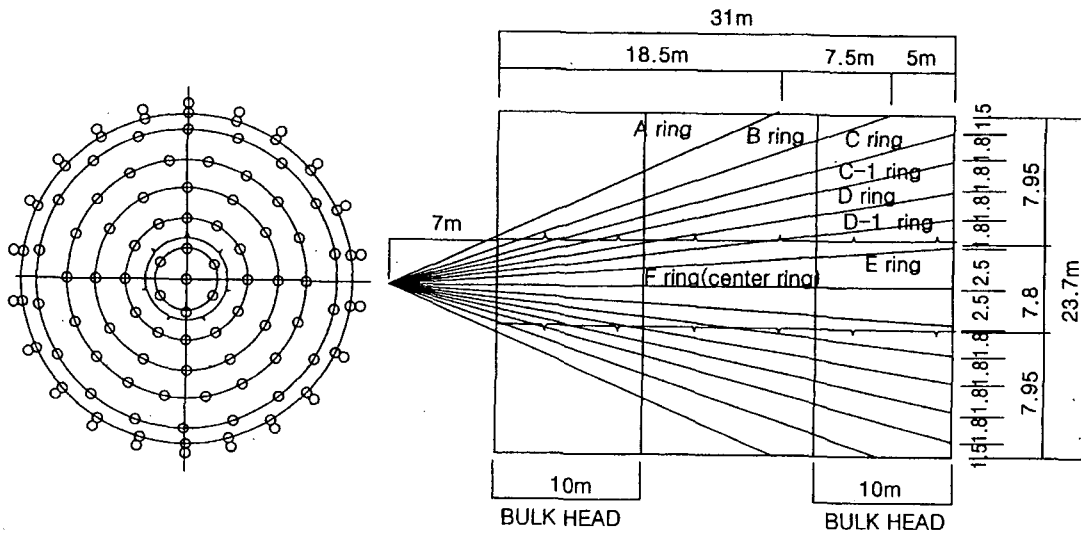


그림 12. 주입패턴도

(2) 강관보강다단 그라우팅

본 구간의 강관보강다단 그라우팅은 터널막장 크라운부에 그림 13. 과 같이 횡방향 30cm간격으로 26공을 시행하였다.

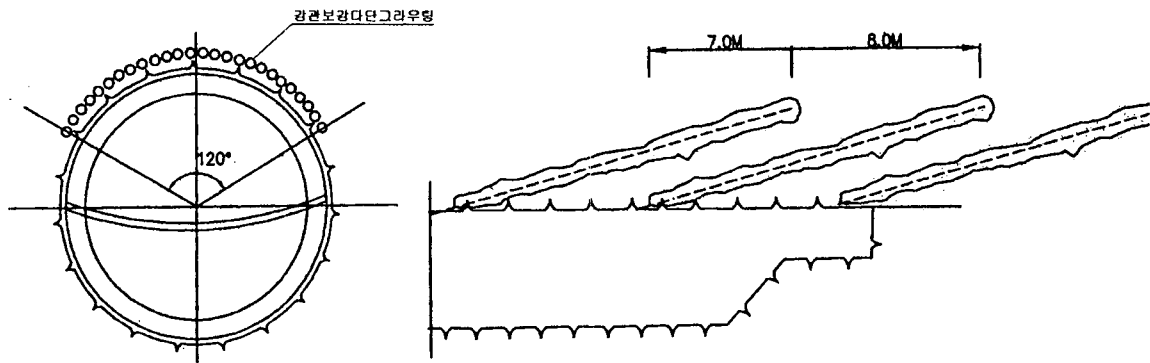


그림 13. 강관다단 보강도

(3) 굴착 및 지보패턴

- 굴착방법 : ring cut
- 1회굴진장 : 0.8m
- 지보패턴
 - 숏크리트 두께 : 25cm
 - 막장 숏크리트 두께 : 5cm
 - 가인버트 숏크리트 두께 : 20cm
- 굴착장비 : back-hoe 및 인력굴착
- 1일 평균굴진장 : 0.33m/day
- 와이어메쉬 : $\varnothing 5 \times 100 \times 100$, 2회 설치
- 강지보공 규격 : H-125 \times 125 \times 9 \times 12
- 상부반단면 코어유지길이 : 4스팬(3.2m)이상

1. 굴착 2. 1차 S/C 3. 막장보강 Sealing	1. ①굴착 2. 1차 S/C 3. 막장보강 Sealing 4. Steel Rib 5. 1차 Wire Mesh 6. 2차 S/C	1. ③굴착 2. 막장보강 Sealing 3. 가인버트 4. 2차 S/C 완료구간 5. 2차 Wire Mesh 6. 3차 S/C	1. ④굴착 2. 막장보강 Sealing *BENCH 장 10~20m
1. ⑤굴착 2. 1차 S/C 3. Steel Rib 4. 1차 Wire Mesh 5. 2차 S/C	1. ⑥굴착 2. 1차 S/C 3. Steel Rib 4. 1차 Wire Mesh 5. 2차 S/C 6. 2차 S/C 완료구간 7. 2차 Wire Mesh 7. 3차 S/C	1. ⑦굴착 2. 유공관 매설	1. 먼정리 2. 방수 3. 2차 Lining Con'c타설

그림 14. 굴착 및 지보순서도

4.4 봉락구간 시공

하저터널 공사 시행중에 두차례의 소규모 봉락 및 Sliding이 발생하였으며 보강공사 시공사례는 다음과 같다.

1) 하행선 횡갱구간(A갱 21k249지점)

횡갱 상부 반단면 굴착중 천단부에서 봉락(규모 6m×4m)이 발생하였다.

횡갱 막장의 주요 불연속면의 방향성은 굴진방향에 반대방향이며 막장 천단부 2~3m 상단에 흑연층이 협재되어 있었고 용수량은 소량이였다.

보강공사로 그림 15.와 같이 막장부에 폐합 슛크리트를 타설하였고 공동부위는 충전 그라우팅을 시행하였다. 추가보강으로 측벽부에 슛크리트 타설과 록볼트 길이 3m짜리를 1m 간격으로 18개소 설치하였다.

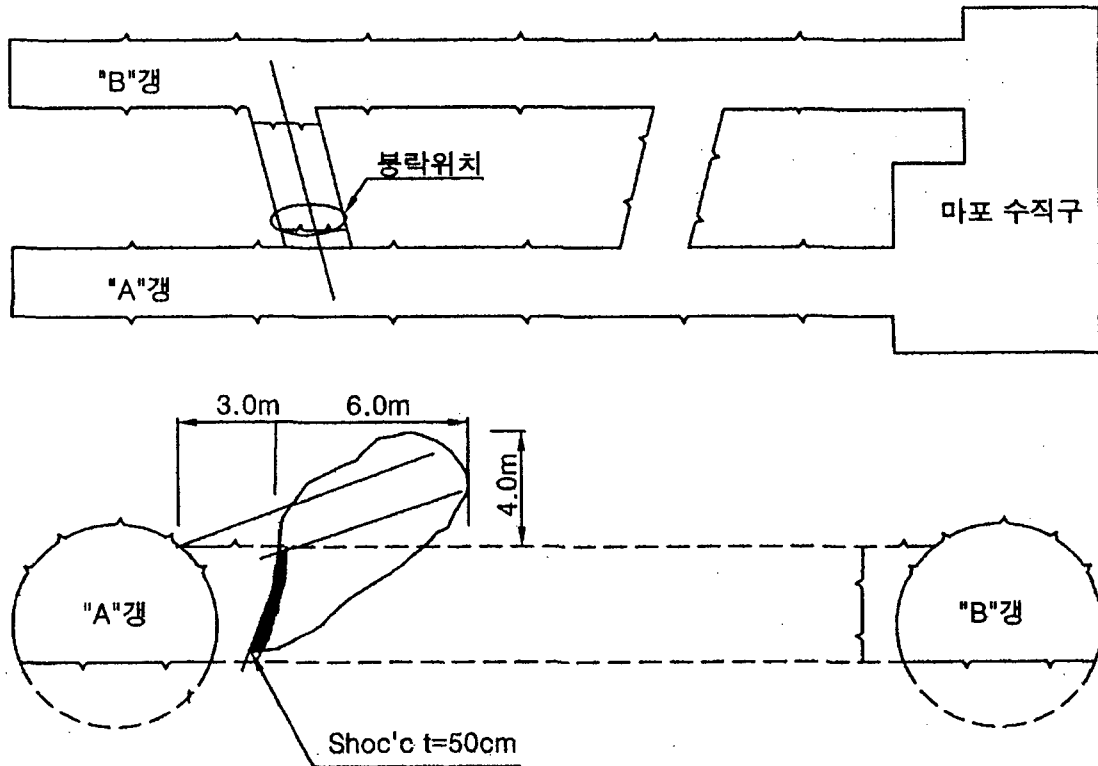


그림 15. 봉락발생위치 종, 평면도

2) 하행선 본선구간(A갱 20k910지점)

하저터널 본선(A갱) 상부 반단면 굴착중 천단부에서 봉락(규모 3m×1.5m)이 발생하였다.

횡갱 막장의 주요 불연속면의 방향성은 굴진방향에 반대방향이며 흑연층이 협재되고 경면화되어 있어 불규칙하게 발달하는 절리계의 조합으로 인한 썩기파괴로 추정되었다.

보강공사로는 그림 16.과 같이 공동부위 충전 그라우팅과 강관보강 다단 그라우팅을 시행하였다.

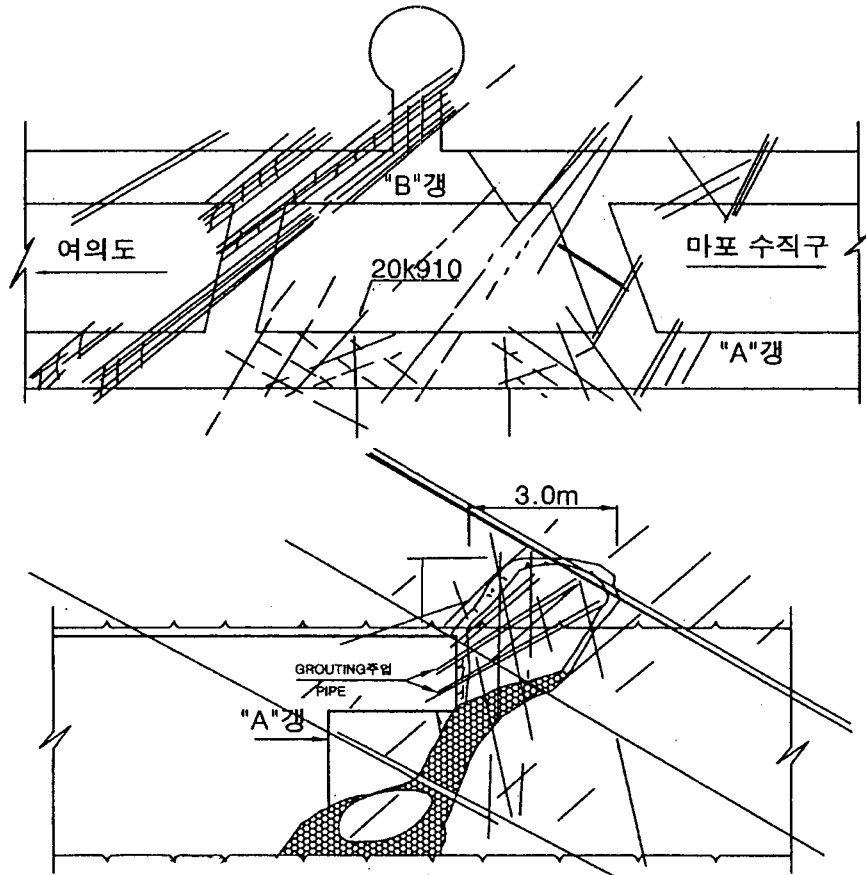


그림 16. 붕락발생 위치 중, 평면도

4.5 구조물 시공

1) 라이닝 구조물

한강 하저터널은 비배수 방식 터널로서 계획홍수위(수두 41m)를 고려한 수압과 라이닝 콘크리트의 자중을 하중 조합하였다. 또한 장기적인 안정성 확보를 위하여 라이닝에 미치게 될 불확정 요소들(다양한 지질조건의 변화, 연약대 출현, 향후 전동차 운행에 따른 진동 등)을 감안하여 50cm 두께의 복철근콘크리트 구조로 설치되었으며 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})는 210 kg/cm^2 을 채택하였다.

2) 방수 시공

비배수방식으로 계획된 하저터널은 터널 전주변에 방수슈트를 설치하게 됨에 따라 터널주변의 지하수에 의해 방수슈트의 굴곡이 발생할 경우 콘크리트의 설계두께를 확보하기 어렵게 되므로 시공성을 고려하여 터널주변의 지하수를 터널바닥 중앙 트렌치에 유공관을 매설하여 유도하였다.

따라서 방수슈트를 터널 전둘레에 설치 폐합함으로써 구조물 내부로는 누수가 전혀 없도록 하였고, 부직포를 통해 유공관으로 유입된 물은 한강 중앙 집수정으로 모아서 마포측 수직구를 통하여 지상으로 양수 처리되도록 하였다.

3) 터널 2차 라이닝

터널 2차 라이닝은 하저터널에 2차 라이닝 타설용 스틸폼 7조(길이 10m)를 투입하여 94년 8월부터 96년 2월에 완료하였다.

- 시공 단위물량 : 10m 1스판당 콘크리트 120m³, 철근 8ton
- 작업 소요시간 : 1스판당 39시간
 - 콘크리트 타설 10hr - 양생 20hr - 스틸폼 이동 1hr - 스틸폼 설치 3hr
 - 스틸폼 탈형 3hr - 마감리판 설치 2hr

4.6 라이닝 배면공극 채움 그라우팅

라이닝 콘크리트를 타설하게 되면 콘크리트의 블리딩 현상, 페이스트의 유출 등에 따라 라이닝의 크라운부 일부에 공동이 발생한다. 이러한 공동을 방지할 경우 라이닝 구조물에 취약한 균열이 생긴다. 또한 터널방수가 비배수 방식인 경우에는 복합적인 원인으로 완벽한 방수를 기대하기 어려우므로 콘크리트 라이닝 배면공동, 터널 시공이음부, 누수발생 예상부위 등을 밀실하게 충전시킬 필요가 있다.

1) 1차 주입시행

라이닝 배면공동 채움주입을 위하여 콘크리트 타설전에 길이 10m짜리 스틸폼 크라운부에 직경 50mm파이프를 5m간격으로 2개를 설치하였다. 주입공사는 격공으로 우선 홀수번 주입공을 통하여 주입재(기포몰탈)가 유출될 때까지 주입하고 나서 짝수번 주입공을 통해서 3~5kg/cm²의 압력으로 주입하는 과정을 2회 반복 시공하였다.

표 12. 그라우팅 배합비(m³당)

시멘트 (kg)	기포재 (kg)	물 (ℓ)	W/C (%)
1299	5.84	584	45

2) 2차 주입시행

시멘트 밀크 주입시 시공 이음부의 균열을 통해서 주입재가 유출되지 않도록 시공이음부를 V형으로 커팅한 후에 에폭시로 실링처리를 하고 누수발생 예상부위에 추가로 배면 채움주입을 시행하였다. 2차 주입의 목적은 콘크리트 라이닝 배면의 추가 충전이며 방수재의 훼손이나 터널 바닥에 설치된 배수계통 시설에 영향을 주어서는 안된다. 2차 주입시의 압력은 1~2kg/cm²로 관리하였다.

표 13. 그라우팅 배합비

A액(규산소다 용액)			B액(시멘트 밀크)		
규산소다	물	계	시멘트	물	계
100 ℓ	100 ℓ	200 ℓ	19 ℓ (60kg)	181 ℓ	200 ℓ

3) 인버트측부 채움주입 시행

콘크리트 라이닝의 본체와 인버트 접속부의 균열 및 누수에 따른 열화 요인을 방지하기 위하여 인버트 양측부에 주입관($\phi 16\text{mm}$ 폴리에틸렌 재질, 1스판당 $L=10.3\text{m}$)을 매설하였다. 본 주입관에는 지그재그 20cm간격으로 $\phi 5\text{mm}$ 의 주입구멍을 뚫고 비닐테이프로 감았다. 본체 배면공동 채움 주입 완료후 본주입관을 이용하여 인버트측부 채움주입을 시행하였다.

4.7 영구계측기 설치 및 측정

지하철 구조물의 과학적이고 합리적인 유지관리를 위하여 영구계측 시스템을 도입 설치하였다. 영구계측기는 대표단면계측으로서 토압계, 수압계, 변형률계와 일상관리계측으로서 계측핀, 반사경, 전기저항식 및 광섬유센서로 구분 설치하여 구조물관리에 참고하고 있다.

영구계측기는 지반취약구간, 한강최심부, 개착과 터널연결부, 인근 구조물 근접지점 등 총 26단면에 설치하여 계측을 수행하고 있다.

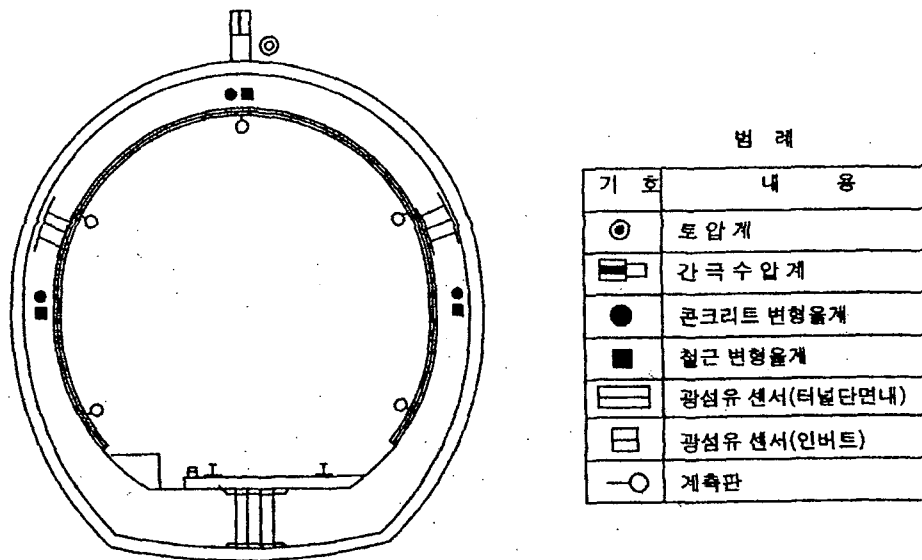


그림 17. 영구계측기 설치 단면도

4.8 비상 수문 설치

한강 하저터널 구간에서 지하철 운행중 지진 또는 지각변동 등과 같은 예상치 못한 대형 재난 발생시 하저터널 내부로 한강물이 유입되는 재해를 예방하기 위하여 여의나루역과 마포수직구에 비상수문을 설치하였다. 한강하저터널에 설치된 비상수문은 설계조건이 불리한 지역의 설계수두인 41m(계획홍수위 기준)를 적용하였고 현장조작과 원격조작이 가능하도록 설치하였다.

1) 설계 기준

최대 홍수위에서도 수문이 수압에 견딜 수 있도록 설계할 경우 여의도와 마포측의 수두차

이가 다소 있으나 설계조건이 불리한 여의도 지역의 수두를 기준으로 설계하고 양측 전부 동일한 사양으로 제작하였다.

- 최대 홍수위 : EL.+114.730m
- 평상 수위 : EL.+103.500m
- 본선하단고 : EL.+ 73.130m
- 설계 수두 : $41.60\text{m}(4.16\text{kg}/\text{cm}^2) = 114.730\text{m} - 73.13\text{m}$

2) 수문 형태

일반적으로 수문의 단면형태는 I형과 Box형의 두가지가 주종을 이루는데 설계대상 수문이 중량형임을 감안하여 자기 배수식으로 부력을 최소화하고 침투수의 충격수압의 작용시에도 수문이 하강할 수 있도록 I형으로 채택하고 충분한 자중을 갖도록 하였다.

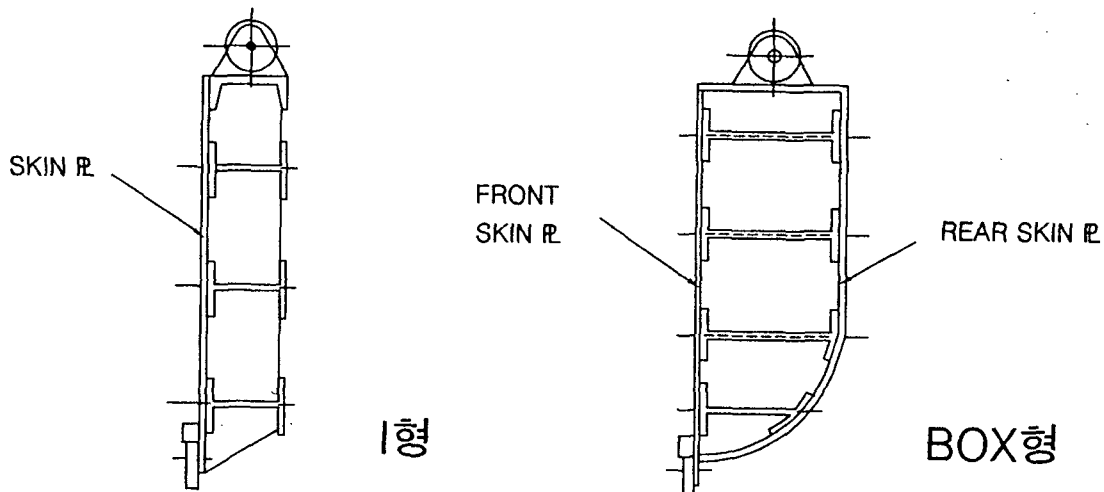


그림 18. 수문단면 형태

5. 한강 하저터널 막장관리

5.1 개요

한강하저부의 암반상태는 구조적으로 복잡하고 변화가 심하여 사전에 충분한 조사가 시행되었다하여도 예상치 못한 암반상태가 출현되는 경우가 많았다. 한강하저 터널의 특수성에 비추어 최대의 안전시공을 확보하기 위하여 막장에서의 정밀한 지질조사가 실시되었고 수평선진시추조사 및 slime checking 등과 더불어 시공중 조사자료가 수집되어 Pre-Grouting 주입범위 및 굴착공법 내지 보강공법의 검토 보완 등이 암반상태에 따라 신속히 이루어질 수 있도록 하였다. 더불어 이들 막장관찰조사자료를 취합하여 터널노선의 지질 종평면도 및 단면도를 작성하여 안전시공 및 추후의 유지보수에 참고가 되도록 하였다.

5.2 막장관찰 방법

막장 지질조사에서 암반등급구분은 R.M.R분류법에 기초하여 작성하였으며, 관찰항목은 다음과 같다.

- 1) 암석의 강도(함마 타격시 반발력 등으로 확인), 풍화의 정도
- 2) R.Q.D
- 3) 불연속면의 간격
- 4) 불연속면의 상태
- 5) 지하수조건 등의 기본항목

위 항목 외에 터널굴진방향과 불연속면의 방향성과의 관계를 고려하여 이들의 평점 합계로써 암반평가가 이루어지며, 그 외에 지질학적인 사항의 기록 및 지하수의 용출상태 등을 기록하였다.

이러한 막장 암반상태에 적절한 보강공법등을 막장관찰자 의견으로 제시하고 해당 막장의 지질단면 SKETCH CARD(축척= 1:100)를 첨부하였다.

5.3 막장조사 결과

막장 관찰 기록 예는 그림 19. 및 그림 20.과 같으며 막장조사결과 단층을 포함한 각 불연속면들의 방향성 및 경사는 다음과 같다.

- ① N30~40W(30~70NE) 계열
- ② NS~N30E(40~60SE) 계열이 가장 우세
- ③ 기타 불규칙한 방향성을 보이는 소규모 단층, 절리, 엽리 등으로 구분

①, ②번 계열의 불연속면들의 경우 특히 그 불연속면이 일정규모의 파쇄대로서 존재할 경우, 거의 예외없이 흑연층이 협재하고 흑연층의 경면(Slickensided Plane)화로 인한 전단강도, 마찰저항의 현저한 감소로 굴착시 암반 파괴를 발생시키는 주요인이 되었다. 또한 gouge 내지는 clay material이 협재된 소규모 단층이 도처에 분포하며 그 방향성은 엽리면과 평행한 경우가 우세하나 다소 산재되어 분포한다. 이는 비교적 큰 규모의 단층(폭:30cm 이상의 graphite 내지 clay 협재)에 수반되는 경우이며 막장의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 단층대(fault zone)도 N20W/60NE 내지 N30W/50NE의 방향성을 보인다.

특히, 그 굴착방향이 불연속면들의 경사방향과 대체로 반대방향(against dipping)인 마포층의 경우 Direct tensional failure의 발생가능성이 항상 존재하고 있었으며 여의도층의 경우는 그 반대의 상황으로서 비교적 안정적이라 할 수 있으나 불연속면이 규칙적으로 발달하여 단층파쇄대를 따라 풍화가 심하게 진행된 경우에는 막장내의 변위가 크게 발생함으로써 막장의 안정성을 불안정하게 하는 요인이 되었다.

막 장 관 찰 야 장

공 구 : 지하철 5-18공구

측 점 : 21 km 352¹

일 시 : 1994년 1월 10일

막장번호 : 다포하저 A갱

작성 자 :

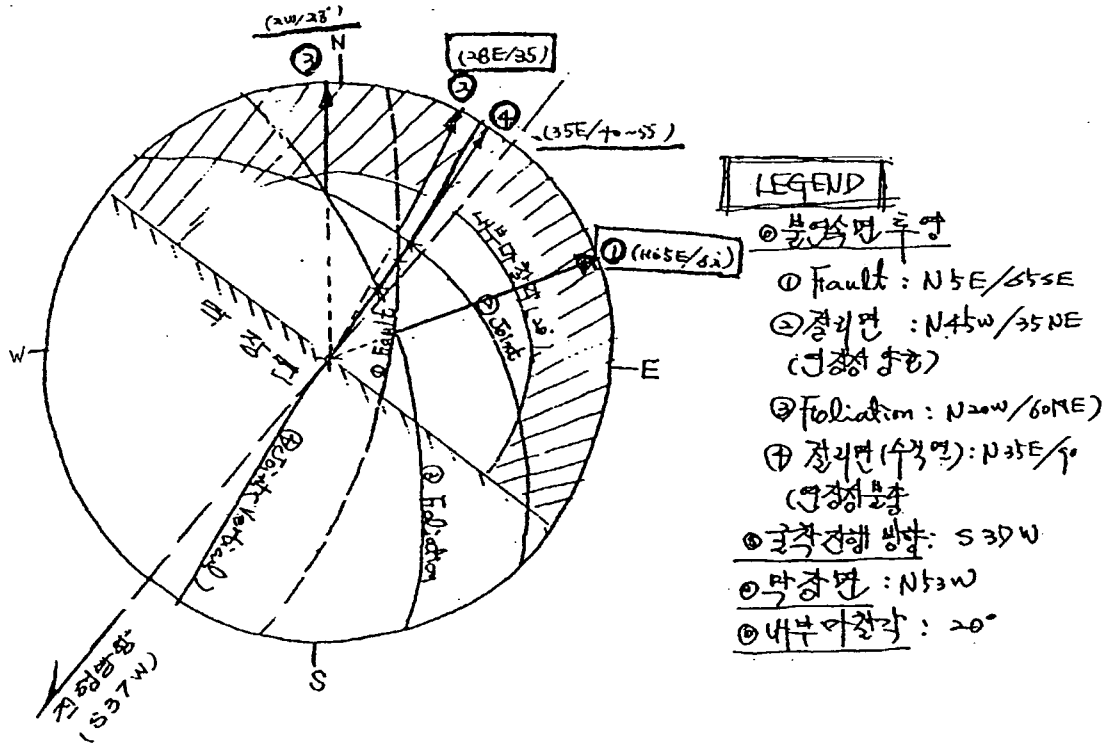
분류항목		평					집
1	암석 강도	함마타격시 뒤어오 강한함마 타격에:함마타격에 용이하:함마로 치면 틱음:약한 함마타격에 부 르고 벗겨질때 :갈라지며 불연속면 계 갈라지며 불연 을 내고 부서지며 서지고 일부 손으로; 붙음이 뒤는정도 을 따라 비교적 크 속면을 따라 비교 균열이 되면서 길 도 부서짐. (극경암) (경암) 적 소면으로 갈리 라짐 Pick로 긁힌다 (풍화암~풍화토사)					
	평 점	15	12 (11)	7	4	2	
2	R. Q. D.	90 ~ 100 *	75 ~ 90 *	50 ~ 75 *	25 ~ 50 *	< 25 *	
	평 점	20	(17)	13	8	3	
3	불연속면의 간격	> 3 ■	1 ~ 3 ■	0.3 ~ 1 ■	50 ~ 300 mm	< 59 mm	
	평 점	30	25	20 (15)	10	5	
4	불연속면의 상태	거칠다. 불연속. 밀착. 신선	약간거칠다. 절개면 간격<1mm. 약간풍화	약간거칠다. 절개면 간격<1mm. 보통풍화	경면. 혹은 Gouge(5mm, 절개면 간격 1 ~ 5 mm	연한Gouge 5mm 이 상. 또는 절개면 간 격 1 ~ 5 mm 완전 풍화	
	평 점	25	20 (16)	12	6	0	
5	지하수 조건	건 조 상 태	습기 인지 정도	습윤(10~25l/min)	벽면을 타고 물이 흐르는 상태 (25~125l/min)	피압수. 압력상태의 집중용수 (>25l/min)	
	평 점	10	8	(7)	4	0	
6	불 연 속 면	경사방향	경사방향 = 굴착방향		경사방향과 굴착방향이 서로반대	주향이 굴착방향에 평행	주향이 굴착방향과 사고
		경사각	(Drive With Dip)		(Drive Against Dip)	(Parallel Strike)	(Irrespective Strike)
	평 점	45 ~ 90°	20 ~ 45°	45 ~ 90°	20 ~ 45°	45 ~ 90°	20 ~ 45°
7	총 평 점	100 ~ 81	80 ~ 61	(60 ~ 41)	40 ~ 21	< 20	
	암 급	매우 양호	양 호	(보 통)	불 량	매 우 불 량	

1) 막장 압박상태
 ○ 전체적으로 장벽이 비교적 낮은 상태로 형성되고 암석의 풍화가 거의 없는 신선한 경암으로 구성되어 있다
 ○ 좌측에 세교적 함정수를 이루는 단층의 영향에 의한 Fracturing 현상으로 좌측 및 crown 부위가 연화되어 있음
 ○ 단층면 및 연장성이 양호한 (장벽간격은 넓음) 절개면은 Graphite에 의해 충전되어져 있으며 slickenside 현상도 관찰됨

2) 지하수 상태
 ○ 벽면을 적시는 정도의 지하수 (3~4개 부위)
 ○ 불연속면들의 STEREOGRAPHIC projection 설명
 - 후면 첨부 -

그림 19. 막장 관찰 야장 (계속)

《블록 면들의 STEREOGRAPHIC PROJECTION》



* 블록 면의 stereographic projection 에 의한 기하학적 Model 에 의하면
4가지의 Wedge failure 를 가능케 하는 Block 이 형성되지만 ③, ④ 번의 경우는
Wedge angle 이 이 비교적 작아지거나, 혹은 연장이 불충분 한부의 고상으로서 이러한
Failure 위험성이 낮아지므로 사후이다.

- ① 번 고상의 경우는 단층면의 접합면의 고상으로서 고도의 응력을 이루고 있고
- ② 번 고상의 경우는 단층면의 연장이 양호한 Graphite 가 끼여 있는 정리면에서
고상으로서 경사로 35° 정도에 해당하므로 주의를 요함.

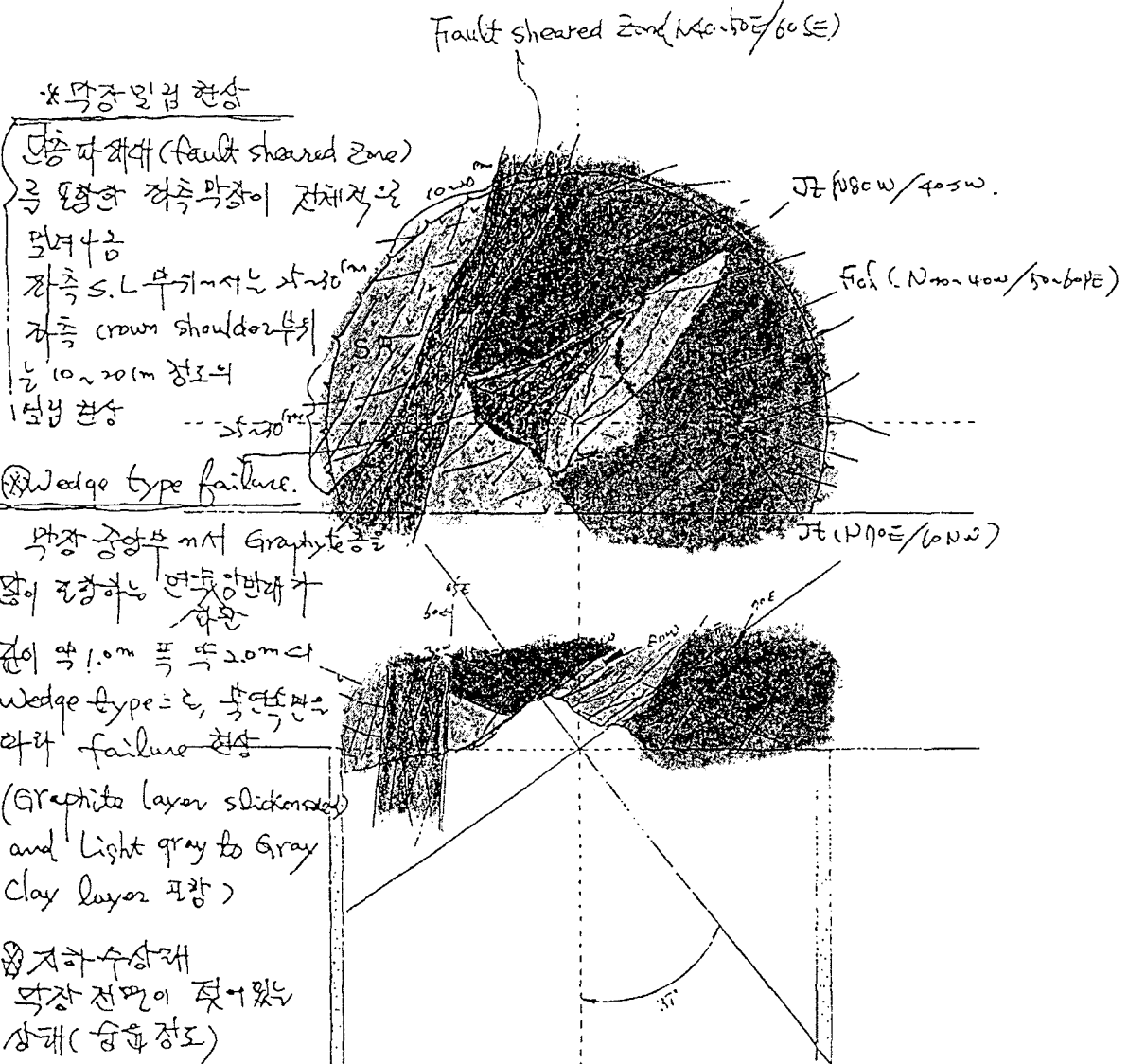
⑤ 즉 막장 단층의 작용 단층면이 지나가는 crown 부위의 Wedge failure 에
대하여 fore-piling 등 대책은 요함.

그림 19. 막장 관찰 야장

SKETCH CARD

圖 番	
M6-37	

場 所: 5-18 공구 아픈하저 B경 大德工務株式会社
 地 址: 21K 308.47 (55-299.87) 縮 尺: 1:100
 測 定 日 付: 1992. 3. 2. 測 定 者: .



* 막장 밀집 현상
 (중심 아래 (fault sheared zone)
 큰 방향의 적층 막장이 전체적으로
 밀려나옴
 적층 S.L 부기에서 2-30m
 적층 crown shoulder 부기
 는 10~20m 정도의
 1층씩 현상

⊗ Wedge type failure.

막장 중앙부에서 Graphite 층을
 많이 포함하는 연약한 반대가
 층이
 길이 약 1.0m 폭 약 2.0m
 wedge type 이고, 불연속면은
 아래 failure 현상
 (Graphite layer slickensides)
 and Light gray to Gray
 Clay layer 포함)

⊗ 지하수상대
 막장 전면이 젖어있는
 상태 (습도 정도)

⊗ 막장 밀집 및 wedge failure 발생 원인

가로 방향 방향과 거의 방향은 같이 하는 fault sheared zone 이
 포함하는 적층의 연약 지반이 Grading 작업
 에 의해 불연속면의 방향으로 밀려나오면서 함께 주변부 (중앙부)
 의 Graphite 층을 많이 함유하는 연약한 반대가는 wedge type 의 failure
 발생된 것으로 판단됨.

그림 20. 막장 관찰 기록 (SKETCH CARD)

5.4 지반의 불연속면과 터널의 안정성 해석

1) Stereonet 투영 결과

본 구간의 지질구조를 해석하기 위하여 stereo-net에 불연속면의 방향을 투영한 결과 전체적인 불연속면의 방향은 N20E/54SE 방향이 가장 우세하게 분포하며 이를 불연속면의 특성에 따라 분석해 보면 그림 21.과 같으며 지질조사 결과에 의한 각 구역별 불연속면의 방향성은 표 14.와 같다.

표 14. 구역별 불연속면 방향성

구 간		Sets	Set. #1	Set. #2
여 의 도	Fault		N30°W/40°NE	
	Shear		N2°E/ 55°SE	N34°E/vertical
	Joint		N77°W/63°NW	N6°W/46°NE
	Foliation		N8°W/42°NE	
마 포	Fault		N29°W/48°NE	
	Shear		N13°E/57°SE	
	Joint		N12°W/46°NE	N74°E/55°NW
	Foliation		N2°E/44°SE	
인 공 섬	Fault		N18°W/60°NE	
	Shear		N7°E/63°SE	N20°W/45°NE
	Joint		N5°W/60°NE	N80°E/57°NW
	Foliation		NS/64°E	

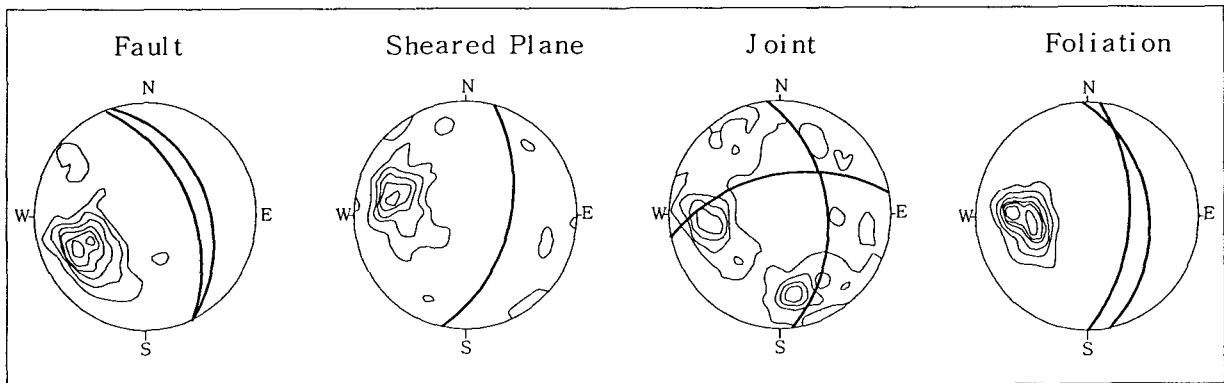


그림 21. 평사투영 결과

2) Unwedge 해석결과

Unwedge는 지하 굴착 시 암반내의 불연속면에 의해 형성되는 underground wedge의 기하학적 특성 및 안정성을 분석하기 위한 program으로 Toronto 대학의 Rock Engineering Group에서 Joe Carvlho, Evert Hoek and Bin Li에 의해 개발되었다.

본 검토에서는 터널 굴착시 굴착면 관찰을 통하여 얻어진 지질자료에 기초하여 터널 굴착 진행시 형성될 수 있는 잠재적 wedge의 geometry 및 face wedge의 안정성을 평가하고 보강 방법으로 shotcrete와 rock-bolt를 고려하였으며 터널단면은 폭 7.5m의 변형된 마체형 터널에 대해 천단, 측벽, 막장에서의 unstable wedge를 검토하였다.

표 15. 해석단면의 입력치

구 분 \ Type	Fault	Shear	Joint	Foliation
입력물성치 c (kg/cm ²) ϕ (deg)	$c = 0, \phi = 25^\circ$	$c = 0, \phi = 30^\circ$	$c = 0, \phi = 33^\circ$	$c = 1, \phi = 33^\circ$
단위중량 γ (ton/m ³)	2.65			

해석시 수압은 고려하지 않았으며, 무지보시의 안전성과 지보시의 안전성을 비교하였다. 슛크리트의 경우 굴착 직후 안전성의 검토를 위해 시방기준강도(200kg/cm²)의 약 1/10인 20kg/cm²을 취하였다.

막장면의 경우 sealing shotcrete에 대한 입력치로서 두께 5cm, 강도 10 kg/cm²을 입력치로 산정하였다. 다음 표 16.은 여의도 방향의 해석 결과를 보이며 그림 22.는 상기의 불연속면에 대한 해석예를 보인다.

표 16. 여의도 방향 해석결과

구 분 \ Analysis		해석 a	해석 b	해석 c	해석 d	
여 의 도	천단	자중(ton)	302	173	464	447
		안전율(무지보)	1.28	0.88	1.01	1.01
		안전율(지보)	-	1.35	1.45	1.35
	측벽	자중(ton)	No wedge forms			
		안전율				
	막장 (NE face)	자중(ton)	201	246	106	149
안전율		+ ∞	+ ∞	+∞	+∞	

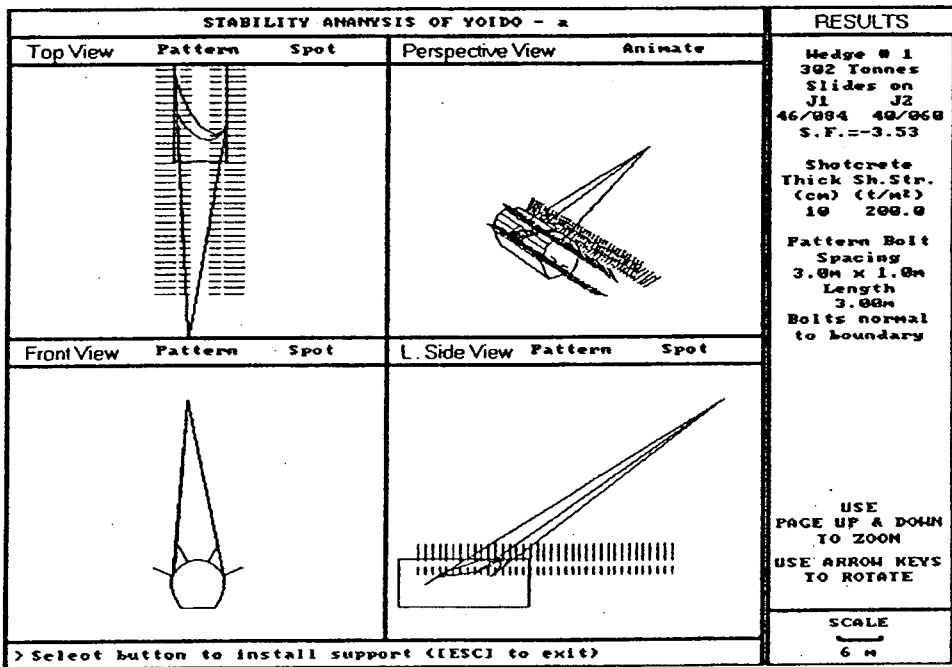
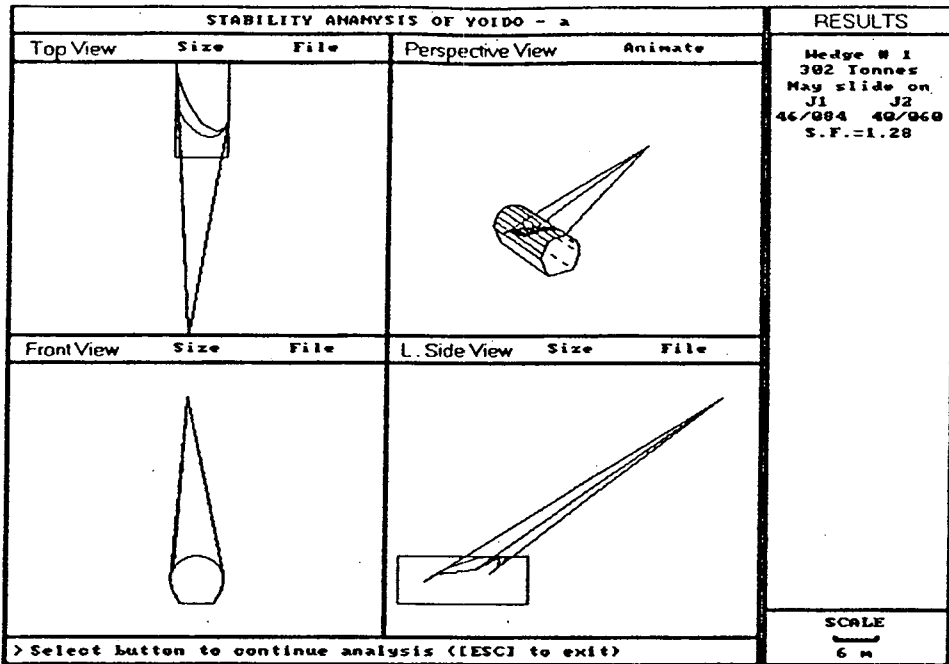


그림 22. Unwedge 해석 결과

6. 결 언

서울 지하철 5호선 건설구간중 여의도와 마포를 잇는 길이 1,288m의 한강 하저터널을 성공적으로 시공하여 1996년 12월 30일 개통되었다. 한강은 계절적으로 여름철에 홍수가 집중됨에 따른 급격한 수위변동과 간만의 차가 심한 인천앞 바다의 영향으로 비우기철에도 공사구

간의 한강 수위가 평상시와 삭망시에 0.6~1.2m의 수위변동을 보인다. 따라서 한강 중앙에 설치한 인공섬을 이용하여 터널을 굴착할 때는 바지선운행과 수방대책에 철저한 관리를 해야만 했다.

한강 하저의 지반은 매우 교란되어 있고 불규칙하여, 여의도에서 마포쪽으로 뚫는 우측터널(A갱)에서는 실트질 모래층을 만나 악전고투를 하고 있는데 반해 같은 지점 좌측 터널(B갱)에서는 파쇄암층을 로드헤더를 이용한 기계굴착과 일부는 발파를 할 정도로 암반의 분포상태의 변화가 심하였다.

이러한 불규칙한 지반에서의 터널공사를 시행하는데 있어서는 사전에 지반상태를 정확하게 예측하는 것이 필수적 과제이다. 본 터널에서는 그라우팅 전에 선진수평시추를 통하여 암반상태를 예측하며 또한 굴착하면서 face-mapping을 통해 불연속면의 분포상태 및 풍화상태 등을 조사하는 방식을 취하였다. 이러한 조사는 터널굴착시 야기되는 크고 작은 막장 붕괴사고의 위험성을 인지하고 대처하는데 필수불가결한 요소로서 터널시공시 암반상태의 사전예측 및 내재된 암반파괴의 가능성을 사전예측하여 안전시공을 도모할 수 있는 반드시 필요한 조사로써 추천되어진다.

본 하저터널 굴착중 지반조사를 통해 얻어진 하저터널의 암반조건은 주로 불연속면(단층과 쉐대 내지 절리)을 따라 발달하는 풍화대와 단층점토 등의 지반강도가 현격히 낮은 지반을 포함하여 연, 경암대 내에서도 절리 등을 따라 심하게 파쇄된 경우가 많아 절리면의 전단강도를 크게 약화시키므로 연, 경암대 내에서의 절리면을 따른 파괴의 위험성을 내재한다. 또한 그 방향성은 일정한 패턴을 보여주며 굴착방향과 관련되어 마포측의 경우에는 against dipping이 지배적이며 여의도측의 경우에는 with dipping이 지배적으로 우세하여 마포측의 경우 경암대에서도 방향성에 따른 파괴가 발생할 가능성이 매우 컸으므로 신중하게 공사를 진행하였다.

모든 종류의 공사가 다 마찬가지이겠지만 경험이 없는 이론은 공허하고 이론이 뒷받침되지 않은 경험은 무모하다고 볼 수 있다.

그러나 경험과 이론이 겸비되어 있어도 광인과 같은 집념이 없으면 난공사를 헤쳐 나가기 어려울 것이다.

참고문헌

1. 서울특별시 지하철 건설본부, 1991, 서울지하철 5호선 실시설계 보고서
2. 서울특별시 지하철 건설본부, 1990, 서울지하철 5-18공구 지질조사 보고서
3. 대덕공영주식회사, 1995, 서울지하철 5호선 5-18공구 한강하저터널 막장지반조사
4. 서울특별시 지하철 건설본부, 1994, 한강하저터널 특별안전진단보고서
5. 한국지반공학회 터널분과위원회, 1997, '97터널기술 Work Shop-II (정보화 시대의 터널기술의 위상)
6. Bieniawski, Z.T, 1986, Engineering rock mass classification, John Wiley Sons
7. E. Heok & E. T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London