

한강 하저터널



이성기
정회원, (주)삼보기술단 상무이사



김제원
정회원, 삼부토건(주) 전무이사



서강천
정회원, 서울도시철도공사 설계공사팀장

1. 머리말

지난 20년간 우리나라 터널기술은 양적으로나, 질적으로 크게 발전하여 이제는 순수 우리나라 기술진에 의해 하저터널이 설계·시공 되었음에 자긍심을 가지며, 하저터널의 예를 소개하고자 한다.

한강 하저터널은 지하철 5호선(김포-고덕)구간중 한강(여의도-마포)하저를 통과하는 5-18공구에 속한 구간으로써, 많은 논란과 우려속에 1990년 12월 31일 착공되었고, 한강하상으로부터 23m 밑에서 굴착공사를 시행한 국내 최초의 하저터널로 공사참여 전 기술진은 물론 학계 및 관련업체의 커다란 관심속에서 공사가 진행되었다.

터널굴착은 1992년 10월에 시작하여 1994년 12월에 1,288M의 상행선(B갱)이, 1995년 1월에는 하행선(A갱)이 관통되었고, 1995년 4월에는 전 굴착공사가 완료되었으며, 1996년 2월에 콘크리트 라이닝 시공을 완료함으로

써 토목공사는 마무리 되었으며, 한강하저터널은 그동안 토목학회, 지반공학회, 터널협회, 서울지하철 건설본부 등을 통해 발표되었지만 그때 미처 소개되지 못한 부분인 콘크리트라이닝 설계 및 시공, 시공단계별 지하수 유출 및 처리, 연약지반대 통과공법의 시공결과, 유지관리 및 시공후 구조물 안전진단 결과등을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 시설물 개요

1) 공간적 범위

본 공사구간의 연장은 총 1,580m로 시점측 단선병렬 터널부, 정거장 개착부, 본선 환기실부, 하저 터널부, 하상수직구, 종점측 단선병렬 터널부로 구분되며 그 현황은 다음과 같다.

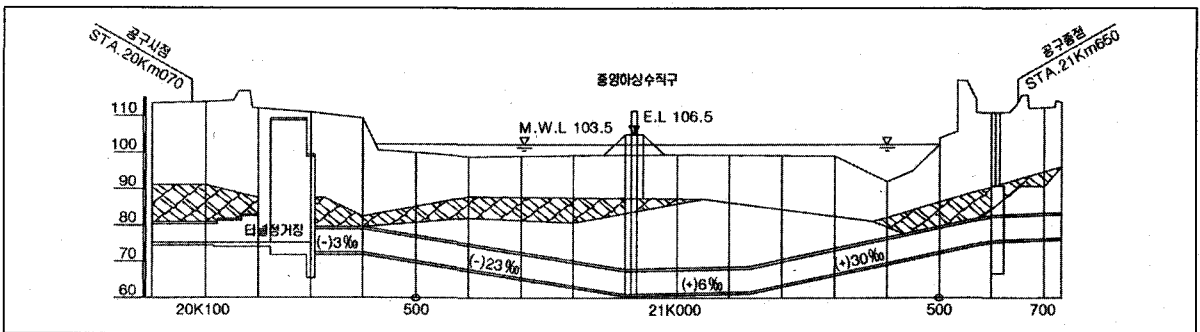


그림1. 하저터널 종단면도

표 1. 시설물 현황

구분	현황
본선	연장: 1,415m(터널 1,370m, 개착 45m) - 하저터널(단선병렬): 1,288m 최대토피고: 36m(터널부는 연암) 최대홍수위: 15.43m(EL. 114.73, 200년) 평상수위: 4.2m(EL. 103.5)
정거장	연장: 165m - 터널: 95m - 개착: 70m 개착구조물: - 차수를 위한 Slurry wall(지중연속벽)을 약 32.2m 깊이로 시공 - 가설지보재 : Pile+Strut+E/A+R/B
부대시설	본선환기실 1개소, 정거장환기구 2개소, 정화조 1개소, 출입구 4개소, 비상수문 4개소, 집수정 3개소 등

2) 지질현황

한강 하저터널 구간의 지질은 선캠브리아기의 편마암류와 이를 부정합으로 덮고있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있다. 주로 호상흑운모 편마암으로 되어 있는 편마암류는 여러 차례에 걸친 변형작용으로 심하게 교란되어 있으며 특히 암반의 불안정 요소로 존재하는 흑연층이 엮리면과 평행하게 층상구조를 보이는 경우와 단층면, 파쇄대, 절리면 등 불연속면을 따라 2차적으로 충전된 얇은 락상의 흑연이 불규칙하게 분포한다. 이것은 본 지역의 심한 지각운동의 결과로서 공학적인 문제점은 협재된 흑연층이 압력이나 내부적 마찰력에 의해 그 표면이 유리처럼 매끄럽게 경면(Slickenside)화된 경우가 대부분이고



사진 1. 막장관찰전경

이로 인하여 암반의 전단력 및 마찰력의 현저한 감소를 초래하여 불안정 요인이 되고 있다.

본 공사 구간의 암반상태는 그 구성 암석인 편마암의 극심한 이방성 즉 수차례에 걸친 지각운동의 결과로서 단층 및 단층파쇄대의 연속성이 강하고 Gouge 물질을 협재하는 절리, 엮리 등 수많은 불연속면들이 형성되고 이들의 조합에 의한 Failure 발생 가능성이 크다. 따라서 풍화가 비교적 약하게 진행된 연·경암층에서도 암석자체의 강도는 양호하나 암반으로써는 취약한 원인이 되고 있다.

3. 하저터널의 설계

3.1 단면설계

1) 설계개요

- 공 법 : NATM
- 단면형태 : 굴착(원형에 가까운 마제형), Lining(원형)
- 구조형식 : 단선병렬 철근 콘크리트 원형터널 (D=6.5m)
- 굴착방법 : 발파 및 기계굴착 병용
- 하중작용 : 2차 Lining Concrete는 200년 빈도의 최대 홍수위시 터널 상부로부터 기준하여 수압(H=37m)과 상재토압(H=31m)적용

2) 지보재

- 2차 Lining Concrete : 500mm
- Shotcrete : Ave.200mm(150~250mm), 막장부 50mm
- Wire-Mesh : $\Phi 5 \times 100 \times 100$
- Rock Bolt : 길이 3.0m
- Steel Rib : H-125 \times 125(H-100 \times 100)

3) 구조물 강도

- Lining Concrete(ock) : 210kg/cm²
- Shotcrete(ock) : 210kg/cm²

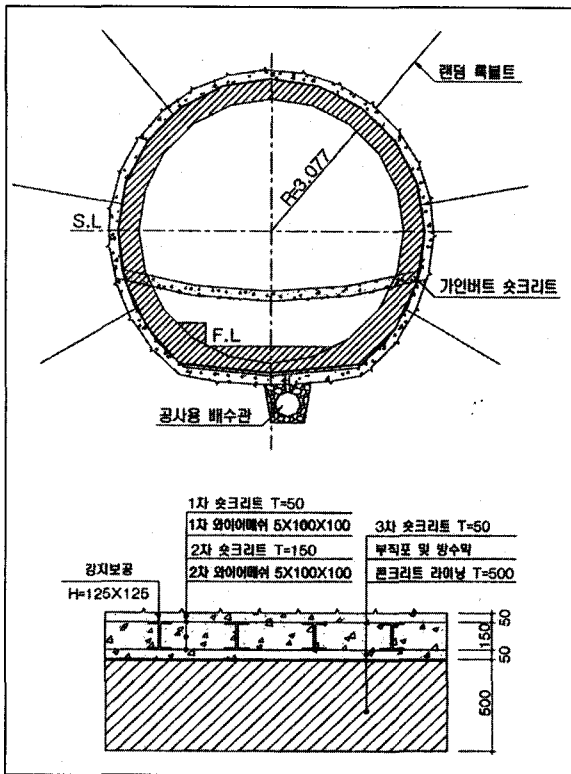


그림 2. 하저터널 표준단면도

3.2 콘크리트 라이닝의 설계

1) 설계개념

한강 하저터널은 전주방수(비배수방식)터널로 당초 설계시 계획 홍수위까지의 수압(H=37m)과 콘크리트 라이닝 구조물의 자중을 하중 조합하여 유사시 터널 상부지반에 어떤 변동 요인이 발생하여 터널에 예기치 못한 하중이 작용 될것에 대비하여 Safety 개념으로 일부 지반 상재 하중을 작용시켜 두께 50cm의 복철근 콘크리트 구조로 설계하였으며 시공단계에서 콘크리트라이닝의 안전성을 재확인 하기 위해 아래와 같이 검토하였다.

- 주변지반 및 1차라이닝(숏크리트 및 Rock Bolt 등) 지보 능력 부족 여부를 검토
- 근본적인 개념상 터널 굴착에 따른 이완 하중 발생 및 응력 재배치 값들은 주변지반과 지보재가

분담하는 것으로 고려 되었으며

- 설계시 유한요소 해석(FEM)을 통해 주변지반 소성도 파악 및 주요 지보재에 미치는 응력 상태와 변위등을 구함으로서 터널의 안정여부를 예측하였으며 또한 시공시에는 시공중 실시하는 계측으로 주변지반의 변위와 1차 라이닝의 지보 능력을 확인하면서 시공
- 유한요소 해석 및 계측결과 콘크리트 라이닝 설치 전에 터널은 안정된 것으로 평가되었다. 원지반과 숏크리트 라이닝의 지보 능력을 확보 하더라도 시간경과에 따라 기능저하에 대한 터널 안정성을 검토
- 콘크리트 라이닝은 터널 구조물의 내구년한 동안 지보재 기능저하에 따른 안전확보와 부직포, 방수재의 지지 및 미관상 표면처리등의 목적으로 설치 된다.
- 장시간 경과에 따른 원지반과 숏크리트 라이닝의 기능 저하 예측은 해석적인 방법으로 숏크리트 라이닝에 미치는 응력들을 콘크리트 라이닝에 작용시키는 것으로 해석하면 가능할 것으로 판단하였다. 따라서 시공단계에서 계측된 최대 숏크리트 Cell에 전달없이 콘크리트 라이닝에 전이되는 것으로 고려(장기 안정성 확보 차원)한다면 숏크리트 라이닝 보다 강성이 더 큰 콘크리트 라이닝의 안정에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.

2) 구조 검토 결과

외국 기술자(오스트리아 Geo Consult사)에 의한 한강 하저터널 특별안전진단(94. 12)시 연약지반에서 심도가 낮은 지하철 콘크리트 라이닝의 설계시의 하중조건은 자중, 계획 홍수위까지의 수압, 암반 및 토사 하중을 고려할 것을 추천하여 재 해석한 현재의 설계로도 안전한 것으로 검토되었으며 Geo Consult 추천에 의한 콘크리트 라이닝 재해석 결과 콘크리트 라이닝 시공에 앞서 보다 큰 장기적인 안정성 확보를 도모하기 위해서 콘크리트 라이닝에 미치게 될 불확정 요소들(다양한 지질조건의 변화, 연약 층적층 출현, 얇은 터널의 편압발생, 터널 굴착

중 붕락이 발생되었던 곳, 향후 운행시 지하철 진동등)을 감안하여 시공단계에서부터 전구간 철근 보강을 하였으며 검토 현황 및 구조해석 결과는 다음과 같다.

표 2. 한강 하저터널 콘크리트 라이닝 검토 현황

단계	콘크리트 라이닝 강도 (σck) (kg/cm ²)	두께 (cm)	하중 조합	보강 현황	비고
당초설계	210	50	자중 + 수압	복철근 콘크리트구조 (D19mm-간격 20cm)	• 단선 병렬 터널 • 전주방수 (비배수 방식) (그림3) 참조
시공단계 검토결과	210	50	자중 + 수압	복철근 콘크리트구조 (D19mm-간격 20cm)	
외국인 추천방법에 의한 검토결과	210	50	자중 + 수압 + 이완지반하중	복철근 콘크리트구조 (D19mm-간격 20cm)	

한강 하저터널 콘크리트라이닝 구조해석 단면
 - 최대홍수위 : EL. 114.73(200년 빈도 홍수위)
 - 평수위 : EL. 103.50
 - 방수형태 : 전주방수(비배수방식)
 - 하중조건 : 자중+전수압+이완지반하중

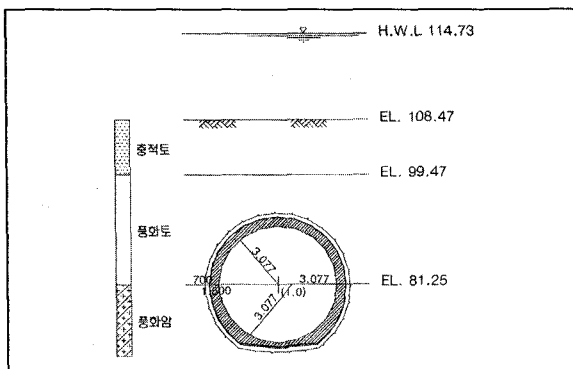


그림 3. 하저터널 콘크리트라이닝 구조해석단면도

4. 하저터널의 시공

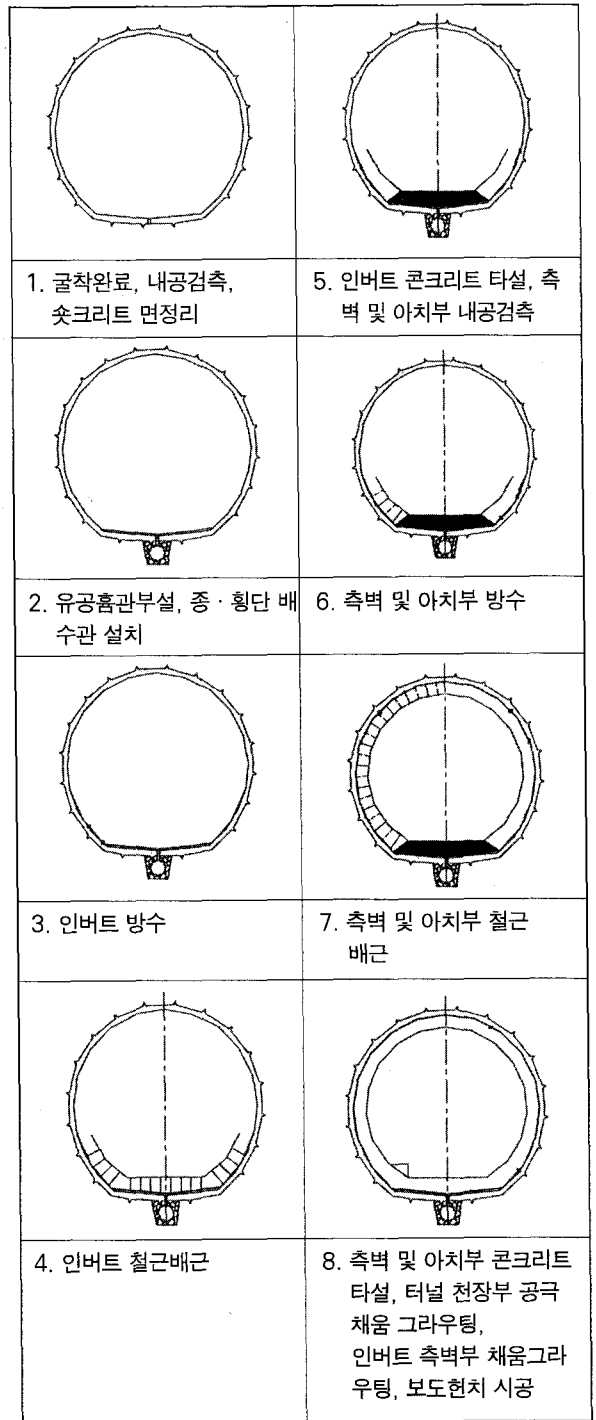


그림 4. 한강하저터널 구조물 시공순서도

4.1 구조물 시공

1) Lining Concrete

- 강도(σck) : 210kg/cm²
- 두께 : 50cm
- 시공방법 : 2회 분리시공(터널 바닥~인버트, 인버트~터널상부)
- 철근 : 복철근 배근(D19 200)
- Con'c 타설 : Sliding Form 사용

2) 시공 Joint

- 1회 시공길이 : 상부 10m, 하부 30~50m
- Joint 처리 : 상부-외측 철근 연결 및 내측철근 절단, 하부-전체 철근 연결

3) 방수시공

- 방수 Sheet : ECB Sheet(2mm)+Fleece(2mm)
- 공사용배수 : 터널인버트 하부에 유공관 설치후 유도 배수

4.2 시공 단계별 지하수 유출 및 처리

1) 지반 보강 Grouting 후 지하수 유출

- 암절리가 Grouting에 의해 충전되어 지하수 유입은 없으나 암반 전체가 젖어 있는 상태임
- 굴착 진행중 또는 후에 지하수가 유출되는 부위가 발생하면 Hose를 이용 유도 처리함

2) Shotcrete 타설

- Shotcrete 타설후 약2-7일이 지나면 Shotcrete면에 지하수 유출 개소 발생
- 유출 부위에 2차 Grouting 시에는 인접 부위의 Shotcrete 면에 균열 발생되거나 다른 지점에 지하수 유출 발생됨.
- Shotcrete 배면차수 Grouting은 다량 누수 개소에 만 부분적으로 시행하고 그 외는 누수 유도공 설치(Hose 이용)하여 터널내로 유도 처리함.

3) 방수시공 및 2차 Lining Concrete 배수처리

- 굴착후 방수 Sheet 및 2차 Lining 시공시 터널 인버

트 하부에 설치된 유공관으로 지하수를 유도 배수시켜서 터널내 지하수 유출이 거의 없이 시공함.

- 터널 전구간(L=1,288mm)의 유도 배수용 유공관을 통해서 중앙 집수정(하상수직구)으로 집수되어 Pumping되는 양은 약3600~4000m³/day(약2.6m³/Min)임.

4.3 연약지반대 통과공법 시공결과

'93. 8월 말경 여의도측 하행선(A갱) 터널굴착 진행중 Sta. 20k485 지점에서 터널 전방 지반을 조사하기 위한 수평 선진 시추조사 결과(사진2 참조) RQD 20~25%, TCR 70% 정도의 연암 Core가 채취되다가 10m 전방지점(Sta. 20k495)에서 단층 각력암(Fault Breccia)이 출현하고 그후 3~4m 구간의 풍화대를 지나서 부터는 풍화토 및 점토와 함께 200~1200l/min./공당의 지하수가 출수되었으며, 풍화토 및 점토층의 연장은 70m 였고, 이구간의 일일평균 굴착량은 0.33m에 불과하였다.

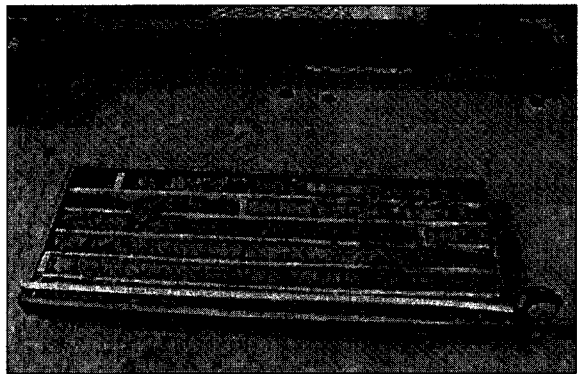


사진 2. 선진시추 조사시의 Core 상태

터널의 안전시공을 위한 연약대구간의 지질특성 파악과 제반 자료수집을 위해 총3공의 수평선진 시추조사를 추가 시행한 결과 연약지반층이 확대됨에 따라 관련기술자(발주처, 시공자, 감리자, 토질 및 지질분야 전문가)들이 2개월동안 국내, 외 시공사례등 기술자료를 수집, 검토하고 이를 토대로 시공계획안을 수립하였으며 1993. 11. 9 전문가(21인) 자문회를 거쳐 차수가 필요한 구간에

서는 현탁액형 L.W Grouting을 적용하며 지반보강이 필요한 구간은 강관 보강 다단 Grouting을 적용하고 분할 굴착후 가인버트를 타설하는 것으로 결정하였다.

1) 차수공법(현탁액형 L.W Grouting)

구분	현황
주입 영역	• 주입두께 7.95m 터널반경의 3R범위(일본 Seikan터널의 경우참조)
주입압	• 수두의 4~6배 주입압이 가장효과적 - 사 력 : 2~3 kg/cm ² - 일반토사 : 12 kg/cm ² - 점 토 : 18~22kg/cm ²
주입 방법	• 이종관 Rod를 사용하여 SGR현탁액을 L.W와 병행주입 • 주입순서는 내삽법으로 외측공에서 내측공 순으로 유효범위 중복을 고려하여 1.5~2.0m 간격으로 시행 • 주입완료후 Check공을 천공하여 지수효과 판단 및 수발공을 설치

2) 지반보강공법(강관다단보강 Grouting)

구분	현황
보강 목적	• 단층파쇄대 및 파쇄절리의 이탈방지 • 상부굴착면의 안정확보 • Grouting의 2차 효율증대
시공 순서	• 차수 그라우팅 완료후 $\phi = 75\text{mm}$ 로 천공 • 용수량 측정후 강관삽입(L=15m, 외경:50m) • 입구 Corking후 Seal재 및 주입재 주입

3) 계측계획 및 결과분석

① 계측 시행계획

- 시행구간 : Sta. 20k500~단층 파쇄대 통과후 30m 까지
- 계측항목
 - 일상관리 계측(A계측) : 내공변위, 천단침하(설치간격 10m)
 - 대표단면 계측(B계측) : 지중변위, Rock Bolt 축력, Shotcrete 응력
- 측정빈도

날짜	0~7일	8~21일	22일이상
빈도	2회/1일	1회/1일	1회/2일

② 계측결과 분석

• 시행구간 최대 변위량

- 위 치 : Sta. 20k515지점
- 내공변위량 : 63.2mm
- 천단침하량 : 32.0mm

• 결과분석

- 변위량이 예상보다 크게 발생하였으나 대부분 막장통과후 10~20일 경과후 수렴되었다.
- 수렴 위치는 계측기 설치지점에서 터널 직경 2배의 막장 이격거리 정도임
- 굴착시 가 인버트 조기폐합과 최대 변위량 발생지점은 Rock Bolt로 보강
- Shotcrete 응력은 최대 21.52kg/cm²의 압축응력이 발생하고 있으며 FEM 해석치(26kg/cm²)와 비슷하고 허용 압축응력기준인 84kg/cm²(0.4 σ_{ck}) 이내로 안전한 것으로 나타났다.

4) 시공결과 정리

단층의 영향으로 인한 연약지반대의(토질분류 : SM)구간을 터널의 상부반단면(Top Heading)이 무사히 통과되었다.

시공중 어려웠던 점은

- 터널 종단선형 역구배에 따른 막장의 배수처리
- 물과 뒤섞여 곤죽된 굴착토사의 처리문제
- 주입공법에 의한 지반개량 안전여부 확인
- 분할굴착에 따른 약 10배의 공기 소요등이었으며 다행스러웠던 점은
 - 지질 전문가에 의한 사전 지반조사 철저
 - 현장기술진(발주처, 감리, 시공)의 적극적인 참여등 혼연 일체되어 무사히 공사가 수행되었다.

5. 유지관리 및 구조물 안전진단 결과

5.1 터널주변 지하수 관리

1) 터널 외부배수

- 시공중 터널 인버트 하부 중앙에 설치한 유공관을 통해서 중앙 집수정으로 집수후 터널 측벽에 부착된 배수관으로 종점측(마포) 지상 하수관로에 강제 배수시킴 (Pump 상시가동)
- 터널 주변 Shotcrete 외측 부직포층을 통해 침투수를 유도처리하므로 터널에 수압이 작용하지 않아 구조적으로 안정함.

2) 터널내 배수

- 터널내 청소등으로 인한 물은 도상 콘크리트 측벽에 설치된 U-Ditch이용 중앙 집수정으로 유도 배수

5.2 중앙 집수정의 관리

1) 일상관리

- 열차 운행정지시간(00:00~05:00)에는 유지관리 요원이 집수정 및 펌프유지 상태를 직접 현장 점검함
- 열차 운행시간(05:00~24:00)에는 시점측(남측) 정거장에서 CCTV 및 자동경보등에 의하여 펌프 정상가동 여부를 확인 및 원격조정함
- 사고발생시 관리 요원이 직접 중앙 집수정으로 가서 육안으로 확인 후 Pump 가동등 비상 조치함.

2) 비상시 관리

- 침투수 다량 유입시
 - 외부 침투수가 다량 유입되어 중앙 집수정의 수위가 급히 상승시에는 수위 감지센서가 작동되어 정거장에서 원격 조정하여 집수정내 설치된 Pump(6대) 전체를 가동(27m³/분)하고 비상체제 돌입함.
- 터널 침수시
 - 터널 외부 침투수가 처리 용량보다 많거나, 터널 Lining Concrete에 문제가 발생하여 터널 내부가 침수될 경우 열차운행을 중지시키고 터널 양측(시, 종점측)에 설치된 비상수문을 폐쇄하여 침수 확대 방지 조치함.
- 정전 사고 발생시
 - 집수정 공급 전기는 2중으로 장치되어 있음에도

불구하고 만일 정전 사고 발생시는 유지관리 차원의 보유장비인 비상 발전기를 가동시켜 배수 처리함

5.3 구조물 안전진단 결과

터널 슛크리트는 암반에 밀착 시공되어 공동은 발견되지 않았으며 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 두께는 설계 두께 이상으로 시공된 것을 확인하였고 측정결과는 다음과 같다.

표 3. GPR 측정결과

측정위치	측정 깊이 (m)	두께			
		설계	시공	과	부족
20k324~20k334 (A갱좌측)	SL-1.25m	10	20	25	+5
20k552~20k557 (A갱좌측)	SL-2.20m	5	20	25	+5
20k560~20k567 (A갱좌측)	SL-2.20m	7	20	25	+5
20k569~20k578 (A갱좌측)	SL-2.20m	9	20	25	+5
20k595~20k604 (A갱좌측)	SL-2.20m	9	20	25	+5
20k610(황단면)	황단면	5	20	25	+5
한강통과 구간 20k613~20k618 (A갱좌측)	SL-2.20m	5	20	25	+5
20k711~20k715 (B갱우측)	SL-0.20m	4	15	16	+1
20k715~20k724 (A갱좌측)	SL-0.20m	9	15	17	+2
20k810~20k820 (B갱우측)	SL-0.20m	10	15	17	+2
21k500~21k524 (A갱좌측)	SL-0.80m	24	20	21	+1
21k530~21k546 (A갱좌측)	SL-0.80m	16	20	20	0
21k487~21k511 (B갱우측)	SL-0.20m	24	20	20	0
21k518~21k526 (B갱우측)	SL-0.20m	8	20	20	0
21k530~21k540 (B갱우측)	SL-0.20m	10	20	20	0

6. 맺음말

- 한강하저터널은 서울 지하철 5호선중 여의도와 마포 지역을 잇는 터널로서, 국내최초로 우리 기술진(설계·감리·시공)에 의해 건설된 장대 하저터널이다
- 서울지역에서 하저에 건설되는 특수성에 따른, 만일에 발생할지도 모를 피해가 막대함을 고려하여, 안전시공을 최우선으로 설정하고 터널 굴착중에는 복잡하고 불규칙한 지반특성을 슬기롭게 극복하고자 선진시추조사 및 막장관찰과 계측을 강화하여 안전을 확보하면서 경제성과 시공성을 향상시켰고, 구조물 시공중에는 시공단계별로 품질검사 및 관리를 철저히 하여 내구성 향상에 최선을 다하였으며 또한 구조물 유지관리를 위해서는 유지관리계측시스템을 도입 운영중에 있으며 만일에 있을지도 모를 재난대비

를 위한 비상수문등을 설치 인접구간 침수 확산을 방지토록 하였다.

그리고, 연약대 출현에 따른 보강대책수립과 공기만회를 위한 하상수직구 설치등 적극적이고 혼연일체가 된 참여기술자의 노력과 시공사의 신장비구입 및 기술력증대를 위한 해외기술연수, 외국전문인력초청, 과감한 공사비 투입등의 결실로 건설된 것으로 생각된다.

향후의 또다른 하저나 해저터널의 건설을 위해, 기발간된 시행청 및 감리단 시공사의 발간책자등이 많은 참고가 되기를 희망하며, 한강 하저터널의 교훈을 거울삼아, 새로운 기술개발 및 연구에 적극 동참함은 물론, 터널인으로서의 각오를 다시금 다져볼 계기가 되었으면 한다.