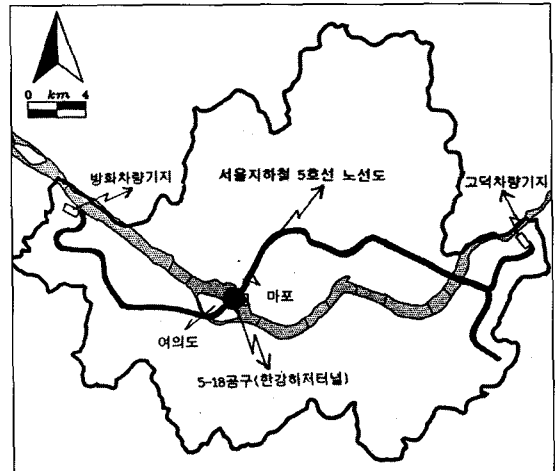


한강 하저터널의 설계 및 시공

서강천(서울도시철도공사 시설관리처, 설계공사팀장)

1. 머리말

서울의 늘어나는 교통수요를 기존의 지하철 1,2,3,4호선(연장 135km)만으로는 감당하기 어려워 교통망 확충 사업으로 지하철 5,6,7,8호선(연장 145km)을 1990년부터 단계적으로 건설하고 있다. 지하철 5호선은 서울의 서부지역을 출발하여 도심부를 거쳐 동부지역에 이르는 연장 52km로서 서울을 동서로 가로 질러 흐르고 있는 한강을 통과하여야 한다. 본 공사구간의 한강 양안에는 이미 기존교량의 램프시설, 고층빌딩, 아파트촌 등이 설치되어 있어 평면선형상 교량공법 채택은 곤란한 실정이었다. 기타 공법으로 침매공법(immersed tunnel), TBM공법, 쉘드공법 등을 검토하였으며 한강 수심의 부적당(평균 수심 4m)과 홍수시 극심한 수위변동 및 세굴영향으로 침매공법은 적절하지 않다고 판단되었고 한강 하부의 불규칙한 지질상태와 취약함으로 TBM공법, 쉘드공법 등도 배제되었다. 이에 따라 여러 가지 공사여건을 감안, NATM공법을 채택하여 터널 첫 번째 막장 굴착을 '92.10.10 착수한 후 하저터널 1,288m(단선병렬)의 토공과 구조물 공사를 '96.2.28 완료하여 공사기간은 약 40개월이 소요되었으며 '96.12.30 지하철 5호선 전구간이 개통되어 서울 시민의 대중교통수단에 중요한 역할을 하고 있다.



(그림 1) 한강 하저터널 위치도

2. 지반상태

2.1 한강소개

한강은 서울 외곽 내륙지방에 위치한 큰 산들과 계곡으로부터 흐르는 물들이 모여 이루어진 강으로 유역면적 23,000km², 유로연장 500km, 연평균 강우량 1,260mm이며 장마기간(7~9월)에 880mm가 집중되어 계절별 유량 차이가 약 130배나 되는 형태를 나타내며 서울 한복판을 동에서 서쪽으로 흐르고 있다.

공사구간의 한강 제원		
폭(m)	약 1,000	
수심 (m)	평상시	홍수시
	4 ~ 10	15 ~ 21
유속 (m/sec)	평상시	홍수시
	0.5 ~ 0.7	3 ~ 4

2.2 지질현황

한강 하저터널 구간은 선캠브리아기의 편마암류와 이를 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있다. 주로 호상혹운모 편마암으로 되어 있는 편마암류는 여러 차례에 걸친 변형작용으로 심하게 교란되어 있으며 특히 암반의 불안정 요소로 존재하는 흑연층이 엽리면과 평행하게 층상구조를 보이는 경우와 단층면, 파쇄대, 절리면 등 불연속면을 따라 불규칙하게 2차적으로 충진된 얇은 띠상의 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 이로 인하여 암반의 전단력 및 마찰력의 현저한 감소를 초래하여 불안정 요인이 되고 있다.

본 공사구간의 암반 상태는 그 구성 암석인 편마암의 극심한 이방성 즉 수차례에 걸친 지각운동의 결과로서 단층 및 단층파쇄대의 연속성이 강하고 가오지 물질을 협재하는 절리와 선적배열을 보이는

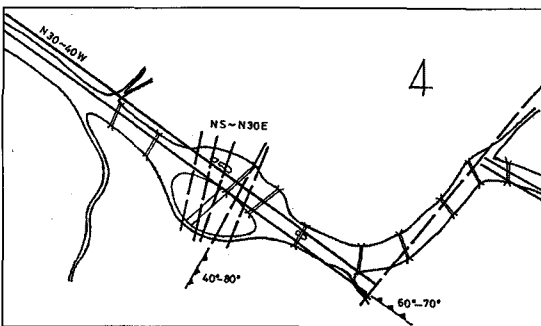
엽리 등 수 많은 불연속면들이 형성되고 이들의 조합에 의하여 붕락 가능성이 크다. 따라서 풍화가 비교적 약하게 진행된 연경암층에서도 암석 자체의 강도는 양호하나 암반으로써는 취약한 원인이 되고 있다.

2.3 지질구조

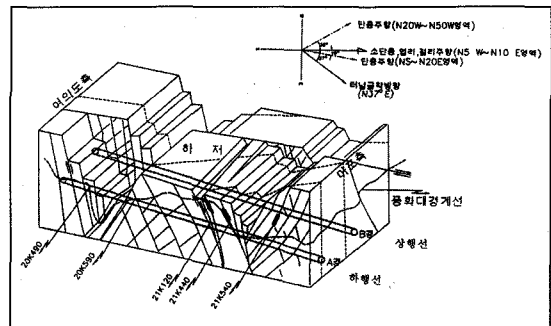
본 하저터널 구간에서의 단층을 포함한 불연속면들의 방향성은 평사투영에 의한 주 분포 영역은 다음과 같다.

- 1) 단층의 경우 N25W/50NE(N15W~N50W영역)의 방향성을 보인다.
- 2) 강한 절리 또는 소규모 단층의 경우 N12E/57SE(NS~N20E영역)의 방향성으로 나타난다.
- 3) 절리의 경우 N5W/53NE 및 N78E/60NW의 2개의 방향성이 거의 직교하면서 복합절리(conjugate joint)로 대부분 나타나며
- 4) 엽리의 경우 NS/50E(N5W~N10E영역)의 방향성으로 소규모 단층 혹은 절리계와 평행한 상태를 보이는 것이 특징이다.

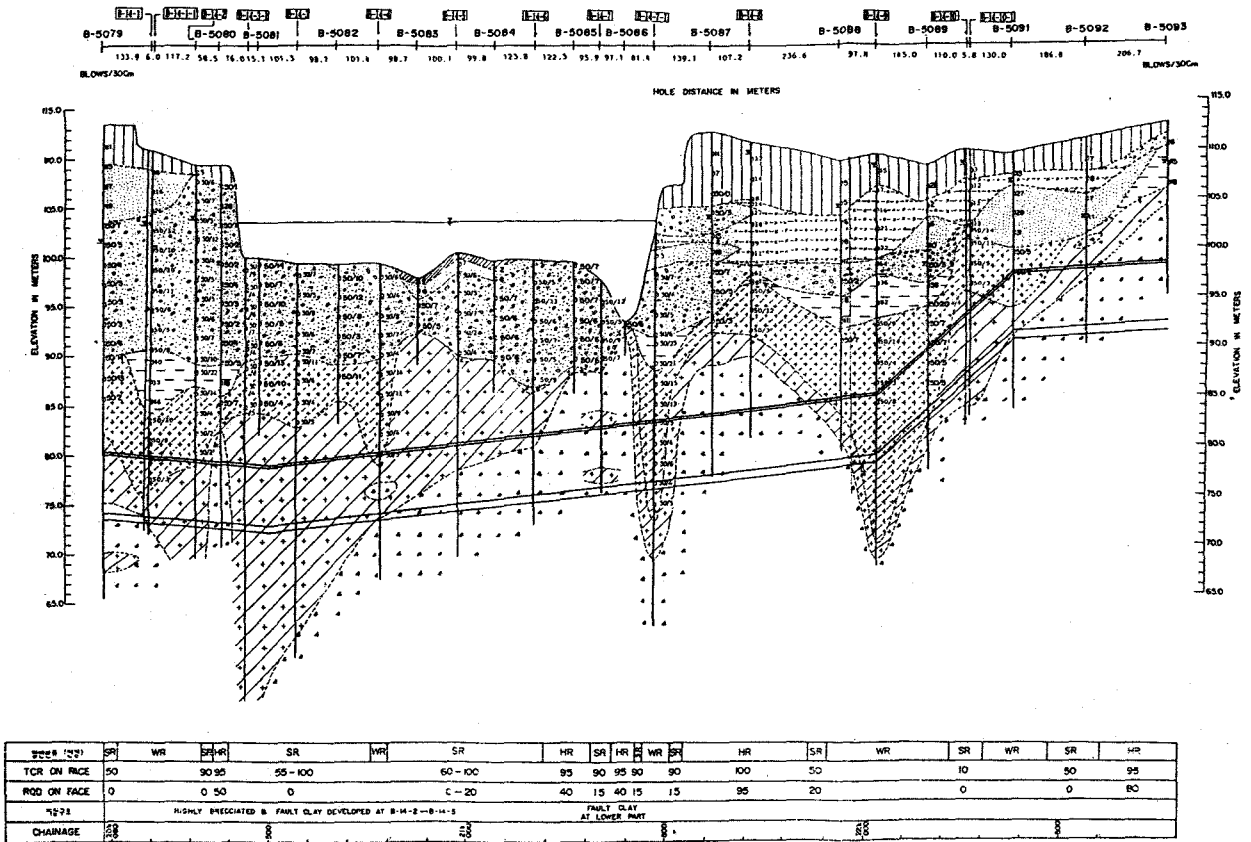
각 불연속면들의 분포 빈도수는 절리가 49% 정도이고 단층 및 Sheared plane이 약 40% 그외 엽리 및 기타 면구조들이 11% 정도로 구성되어 있다. (그림 2, 3 참조)



(그림 2) 한강 단층의 주향도



(그림 3) 하저터널 단층구조 모식도



(그림 4) 하저터널 지질 단면도

3. 하저터널 설계

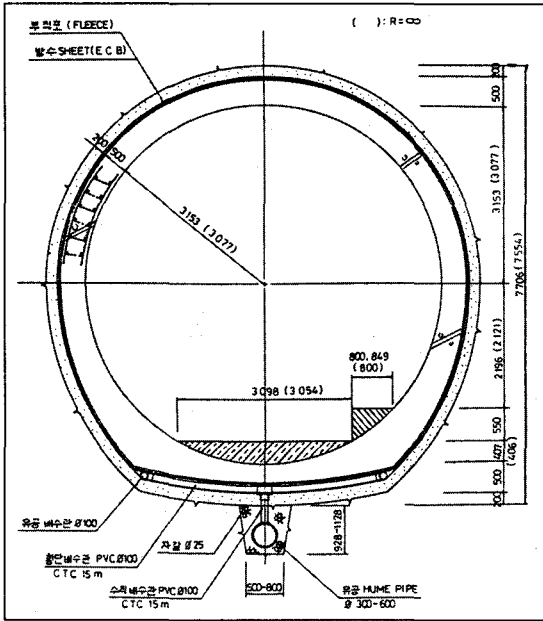
3.1 터널 단면 설계

3.1.1 설계개요

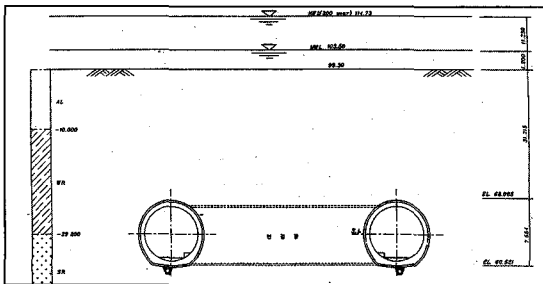
공법	NATM	
	단면형태	굴착단면
	원형에 가까운 마제형	원형
구조형식	철근콘크리트 원형 터널	
굴착방법	발파 및 기계굴착	
하중적용	200년 빈도의 최대 홍수의 수두 41m와 상재 토압(h=31m) 적용	

3.1.2 지보재

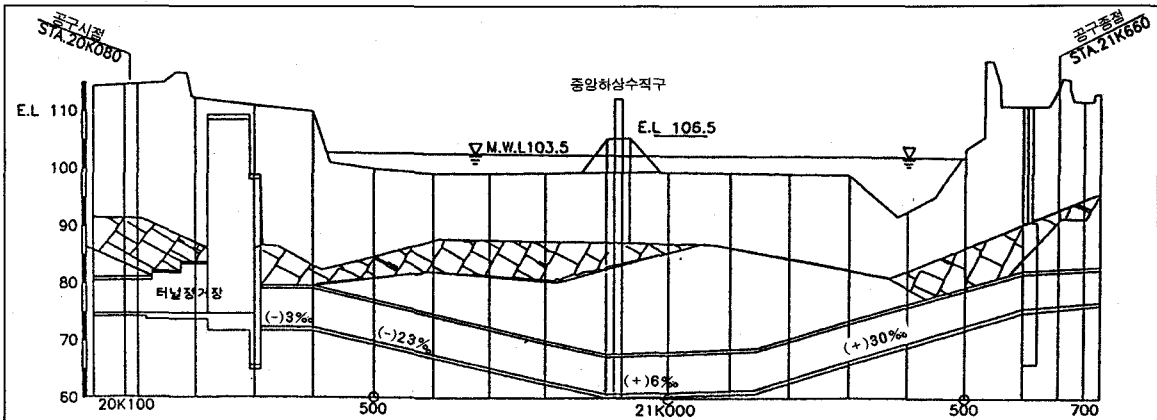
-shotcrete 두께 (cm)	연경암대	파쇄대	토사층(SM)
		15	20
와이어 매쉬	φ5 × 100 × 100		
록볼트	길이 3m, 직경 25mm (random bolt)		
강지보공	연경암~파쇄대	토사층(SM)	
	H-100 × 100	H-125 × 125	



(그림 5) 하저터널 단면도



(그림 6) 하저터널 횡단면도



(그림 7) 하저터널 종단면도

3.1.3 구조물

콘크리트 라이닝 두께는 50cm, 설계기준 강도는 σ_{ck} 210kg/cm²을 설정하였다.

3.2 종단구배 조정

터널 시점측 막장을 굴착한 결과 사전에 시행한 시추조사 내용보다 암반이 심하게 풍화되었고 당초 계획된 종단구배 계획 상태에서는 강바닥의 충적층(alluvium)과 터널 상단부 사이의 여유고 부족으로 만일 낙반사고가 발생된다면 하천수 유입과 같은 대형사고가 우려되어 터널의 안전성 확보와 지반보강 공사 물량 축소에 따른 공기 단축 및 공사비 절감을 위하여 전동차 운행에 지장이 없는 범위내에서 최대한 종단구배를 하향 조정하였다. 종단구배 조정 결과 터널의 풍화대 피복이 8.5~9.5m에서 13.5~19.5m로 증가되었으며 풍화대 통과 구간은 당초 340m에서 140m로 감소하였다.(그림 7 참조)

3.3 표준 지보 패턴

표준 지보 패턴은 지질조사 자료를 기초로하여 지반의 종류에 따라 그에 적합한 패턴을 결정하였다. 터널 천정부에서 1/2H(H:터널높이)을 기준으로 하여 그 지점안에 터널 막장 부위보다 약한 암반이 분포할 경우 막장의 암반을 기준으로 지보

패턴을 결정하지 않고 한 단계 낮은 지반에 적합한 패턴을 채택하였다. 또한 단단한 암반이라도 단층 파쇄대에는 한 단계 낮은 지보 패턴으로 시공을 하였다. 표준단면 형상은 하저터널이라는 특수성을 감안하여 수압과 구조적 안전성 확보를 위하여 원

형단면으로 설계하였으나 하부반단면 굴착시 장비 주행성 향상을 위하여 원형에 가까운 마제형으로 단면을 조정 시공하였다. 콘크리트 라이닝 단면은 원형으로 시공하여 수압에 대한 구조적 안전성을 확보하였다.

(표 1) 일반 조건에 따른 지보패턴 및 보강공법

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

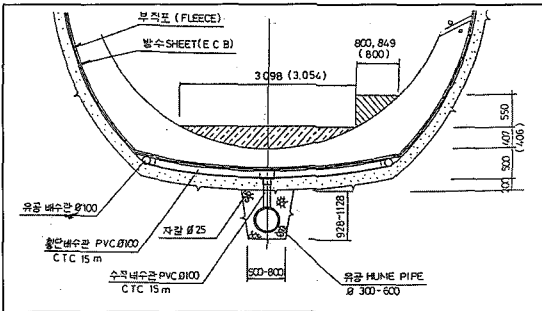
3.4 터널의 방수와 배수

3.4.1 터널의 방수

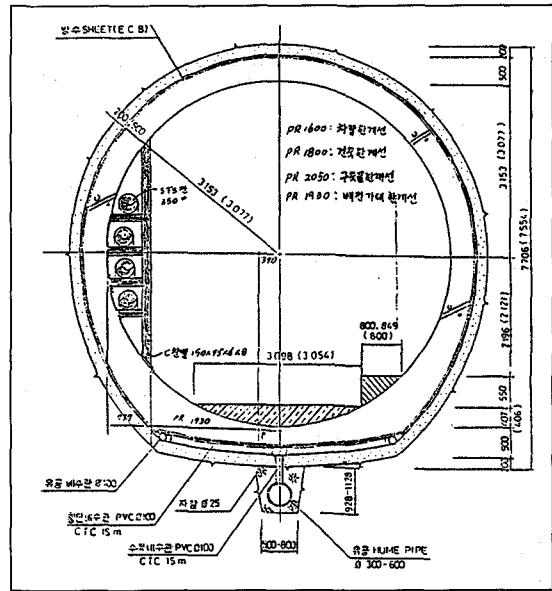
한강 하저터널은 상부에 상시 흐르고 있는 많은 양의 하천수가 있어 배수식 방수 형태로 시공할 경우에는 터널 내부로 지하수의 유입을 허용하게 됨에 따라 공사 완료후 유지관리시에 여러 가지 어려운 점이 예상되어, 터널 인버트를 포함한 터널 전 주변(arch, wall, invert)에 배수재(fleece)와 방수재를 설치하여 주변의 지하수가 터널 내부로 유입되지 않도록 계획하였다. 터널 굴착중에는 지하수 처리를 위하여 터널 바닥 중앙에 유공관을 설치하였다. 국내의 NATM 터널의 방수시공 사례를 종합 검토하고 국내의 방수기술 수준과 방수재 내구년한을 고려할 때 NATM 터널에서는 완벽한 방수시공이 현실적으로 한계가 있다고 판단되어 방

수시공 계획을 일부 조정하였는데 그 내용은 다음과 같다.

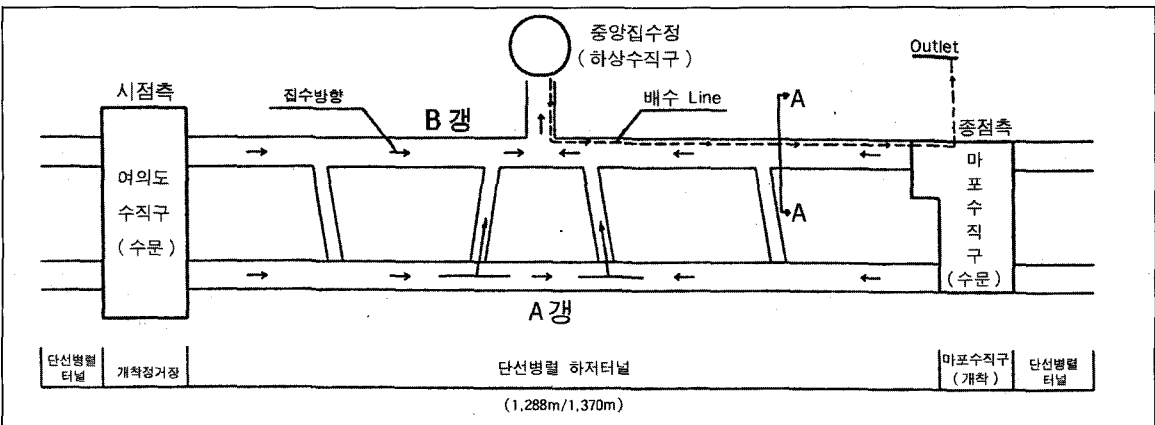
배수식 방수 방법을 적용한 터널은 인버트에 방수재를 설치하지 않고 여러 가지 중.형배수관을 중앙 바닥의 유공관에 연결시켜 지하수의 원활한 흐름을 유지하게 하고 일정한 간격(c.t.c 15~30m)으로 맨홀을 설치하여 준설이 가능토록 하고 있으나, 비배수 방수를 채택한 본 하저터널에서는 터널



(그림 8) 하저터널 배수 단면도



(그림 9) 하저터널 집수 및 배수계통도



< 평면도 >

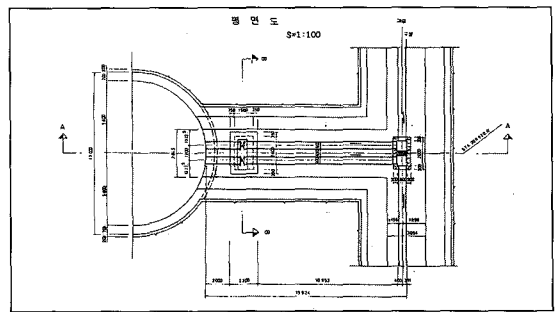
양측벽 하단부에 종방향으로 설치한 후렉시블한 유공배수관(Φ100mm)과 종방향 간격15m로 횡배수관(Φ100mm)을 연결하였다. 이것은 터널바닥의 유공관(Φ300~600mm)에 종방향 간격 15m로 세운 수직배수관(Φ 100mm)에 연결시킨 후 터널 인버트를 포함한 전주변에 배수재(fleece)와 방수재를 설치하고 라이닝을 시공토록 하였다. 이에따라 터널 주변의 지하수는 터널 내부로 유입될 수 있는 길이 완전 차단되었으며 터널의 종단구배를 따라 라이닝 밖의 터널 바닥 중앙부에 설치된 유공관을 통하여 흐르도록 조치하였다. (그림 8참조)

3.4.2 터널의 배수

하저터널 종단계획 변경으로 하저터널 중간 지점이 가장 낮은 저점부가 되며 그 위치의 본선터널 옆에 기설치된 인공섬을 이용한 원형수직구내에

집수정을 설치하여 집수한 후 하저터널 상행선(B 갱) 측벽에 설치된 스테인레스 관(Φ350mm-4열, l = 690m)을 통하여 공사 중점측 수직구로 펌핑을 하도록 하였다. (그림 9 참조)

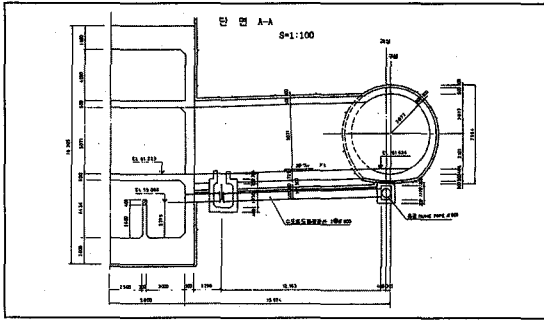
한강 중앙에 설치된 집수정의 용량은 지하철 5호선 설계시(1990년) 단선터널 배수형인 경우 3m³/min/km, 단선터널 비배수형인 경우 2m³/min/km의 배수량을 기준으로 산정하였으나 표2(집수정 용량 산정기준)와 같이



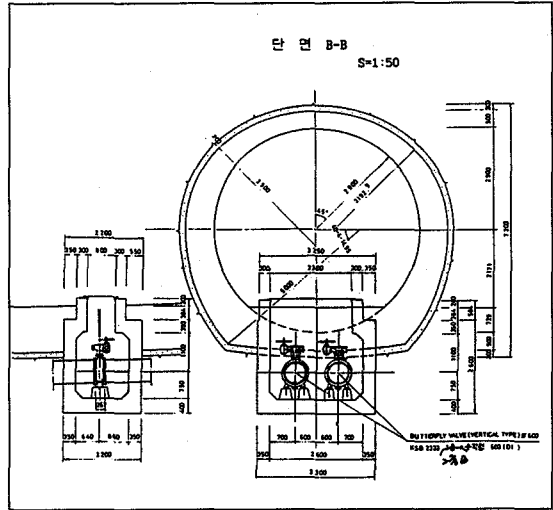
(그림 10) 한강중앙 집수정 배수관로

(표 2) 집수정 용량 산정 기준

종 류	구 분	당 초 계 획	집수정 규모의 산정기준 변경안 (93. 6. 15)	비배수터널의 집수용량기준통보 (94. 10. 18)	적 용
단선터널 (배수형)		3m ³ /min/km	—	—	
단선터널 (비배수형)		2m ³ /min/km	—	—	
침사조		집수조 용량의 30%	집수조 용량의 20~30%	집수조 용량의 30%	집수조 용량의 30%
집수조 유효고		본선바닥 이하를 기준으로 함	유입관 관저고를 기준으로 함	—	유입관 관저고를 기준으로 함
집수시간	일반구간	30분	30분	—	30분
	하저구간	60분	—	60분	60분
배수시간		30분간격	30분 간격	30분 간격	30분 간격
집수정 용량 할증		50% (하천, 용수지대, 기타)	50% (유도 배수 터널)	—	50% (하저구간제외)
펌프식 바닥 최소 면적		4 × 8 m	—	—	4 × 8 m
집수조의 유효깊이		2.5 ~ 3.5 m	2.5 ~ 3.5 m	—	2.2 ~ 3.5 m
생활오수조 규모		—	폭(B) 4m이상 길이(L) 2m이상	—	폭(B) 4m이상 길이(L) 2m이상
기 타	※ 단, 하저구간의 집수용량 할증은 현장여건을 고려하여 제외함.				



(section A-A)



(section B-B)

하저터널의 배수량을 2m³/min/km, 집수시간 1시간, 배수시간 30분으로 변경하였다.

3.4.3 하저터널 양수기 설치 현황

○ 공사중 양수기 설치

집수정위치		여의나루역 (sta 20k 287)		한강중앙 수직구 (sta 20k 920)		마포 수직구 (sta 21k 609)	계
수중펌프규격		6" × 50HP	4" × 30HP	6" × 50HP	4" × 30HP	4" × 50HP	—
수량 (대)	계	2	3	4	4	4	17
	가동	1	—	1	1	1	4
	예비	1	3	3	3	3	13
- 일평균 배수량 (m ³ /day)		1,380		3,700		600	—
- 일평균 배수량 (m ³ /min)		(0.96)		(2.62)		(0.42)	—
집수정 유효 용량 (m ³)		152		243		91	—

○ 유지관리용 양수기 설치

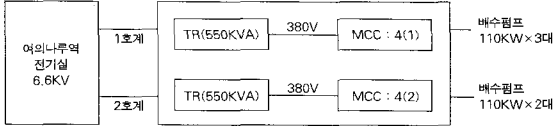
집수정위치		여의나루역 (sta 20k 287)	한강중앙 수직구 (sta 20k 920)	마포 수직구 (sta 21k 609)
수중펌프규격		8" × 60HP	10" × 150HP	6" × 40HP
분당 배수량(m ³ /min)		(3.0m ³)	(4.0m ³)	(2.2m ³)
양정고(m)		55	75	55
수량 (대)		3	6	3
집수량의 300% 용량으로 펌프 설치				
배관		D8" - 3열	D14" - 4열	D6" - 3열

지하철 운행중에 하저터널 구간의 침수사고가 발생할 경우 전원 공급 곤란으로 인한 양수기 작동

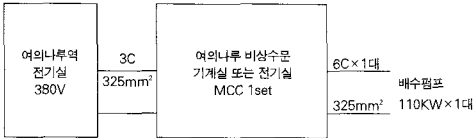
불능에 대비하여 여의나루 역에서도 전원을 공급할 수 있도록 추가 설치하였다.

○ 전원 공급 계통도

(정상시 계통)



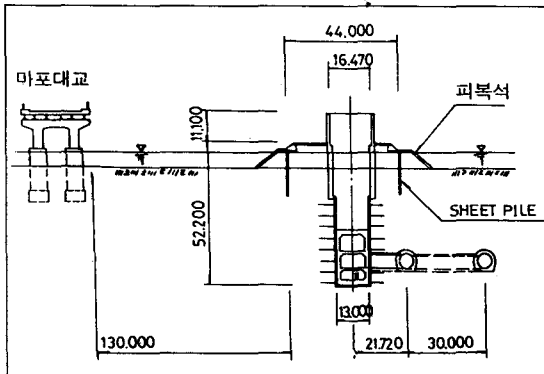
(비상시 계통)



3.5 인공섬 설치

터널 막장의 지반이 당초 예상보다 연약한 것으로 확인되어 안전시공을 위한 추가 보강공사가 불가피해짐에 따라 상당한 공기지연이 예상 되었다.

또한 터널을 파기위한 작업장은 한강 양안의 고수부지에 각각 1개소씩 설치되어 있어 공기 만회를 위해서는 한강 중앙부에 인공섬을 축조하여 작업장의 추가 설치가 불가피 하였다. 인공섬은 사각형(44×44m)으로 슈트파일을 박은 다음 주변의 강바닥 충적토를 준설 채움하고 세굴 방지를 위하여 슈트파일 둘레에는 사석(捨石)과 피복석(被覆石)으로 보호를 했다. 인공섬에는 직경 15m의 원형수직구를 깊이 45m로 뚫은 다음 본선 터널을 굴착하여 약 16개월의 공기 단축 효과를 보였다. (그림11참조) 공사 완료후에는 홍수시의 와류 현상으



(그림 11) 인공섬 및 원형수직구 단면도

로 인접한 기존 교량에 나쁜 영향이 생기지 않도록 준설토로 메운후 인공섬을 철거했으며 원형수직구의 폐쇄는 그림12와 같다.

4. 하저터널 시공

4.1 지반보강

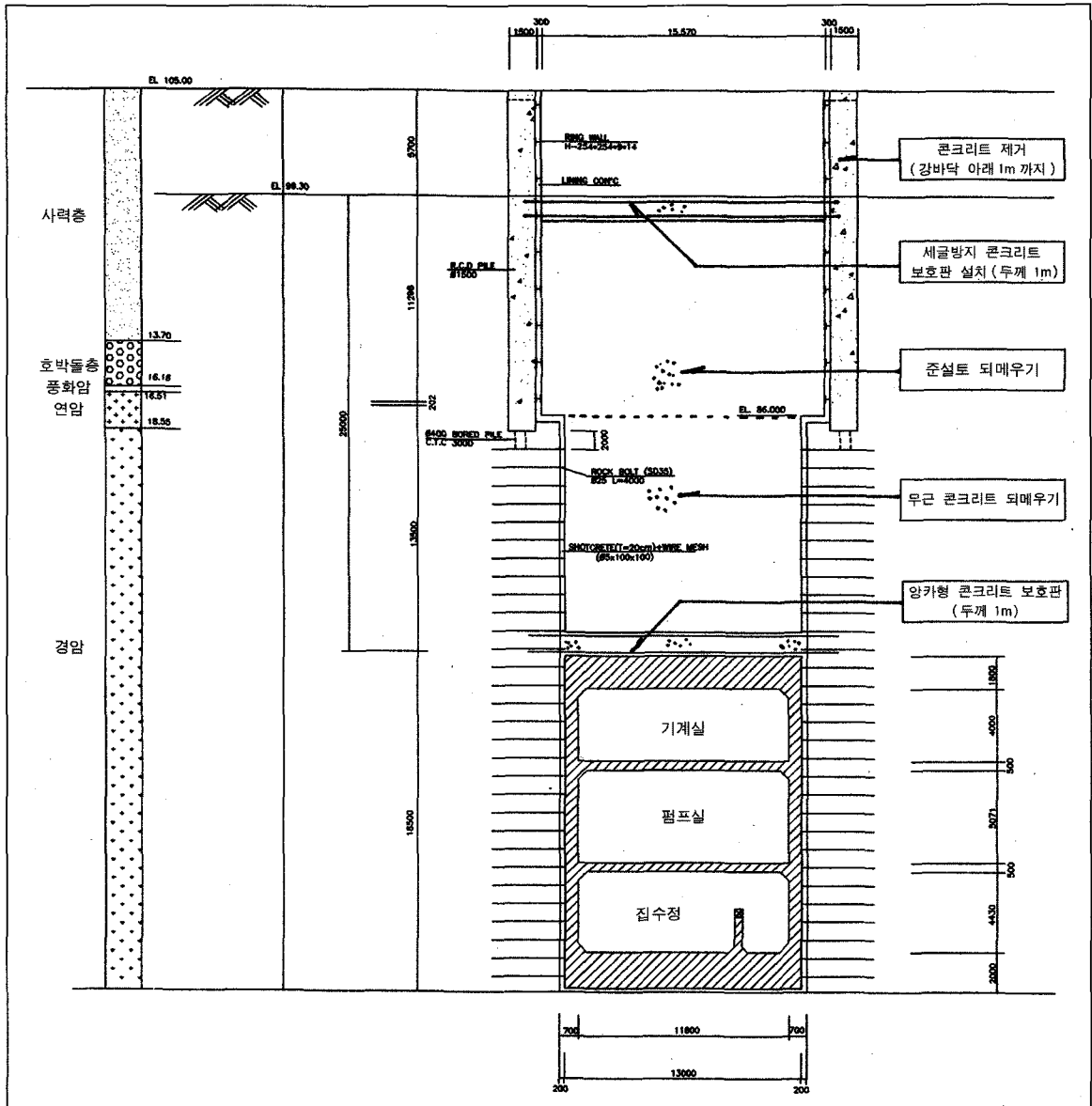
4.1.1 차수 그라우팅

본 공사구간의 차수 그라우팅의 설계와 그 내용에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 터널 주변에 시공하는 차수 그라우팅의 주입 범위는 역학적 해석과 경험치에 따르면 주입 범위를 크게해도 별의미가 없으며 터널 반경의 2~3배가 적당한 범위라고 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 실적인 공당 주입량의 상한치와 이론적 계산 방법인 간극율, 주입공 간격, 주입재 또는 지하수의 유출방지를 목적으로 막장 암반상태에 따라 주입장 및 벌크헤드(bulk head)를 결정하였으며 일반적으로 주입장 25m, 벌크헤드 5m를 표준 패턴으로 시공하였다.

주입 순서는 주입재의 주입범위 밖으로의 일출 방지와 시공과 병행하여 주입 효과의 확인이 용이한 내삽법(외측에서 내측으로 주입)으로 시행하였다. 주입 압력은 수두의 4~6배로서 평균 12~18kg/cm²이었으며, 주입 속도는 최대 25 l/min로 하였다. 본 공사구간에서 주로 시행된 LW 주입공법을 지반조건과 대비하여 살펴보면 다음과 같이 5가지 패턴으로 나눌 수 있다.

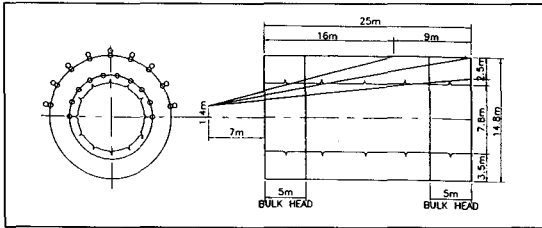
□ A - Pattern. 경암구간

- 주입범위 3.5m, 주입공수 28공.
- 암반분류(RMR) II 등급 (평균 80~61). 양호한 경암구간의 그라우팅 패턴으로 주입범위 3.5m로 상부반단면만을 주입하는



(그림 12) 원형수직구 폐쇄 단면도

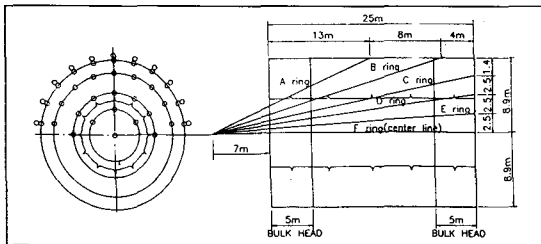
- ① RCD pile 제거는 강바닥 아래 1m까지 시행
- 세굴방지를 위한 콘크리트 보호판 설치(두께 1m)
- ② 토사층은 준설토로 되메움
- ③ 암반층은 무근콘크리트로 되메움
- ④ 지하1층 기계실 톱스라브 상부에 콘크리트 보호판 설치



방식이다. 초기에는 하부반단면까지 주입하는 방식으로 설계되었으나 주입간격을 줄이고 주입효과를 높이기 위하여 하부 반 단면 주입물량을 상부반단면에 옮겨 주입하는 방식으로 변경하였다.

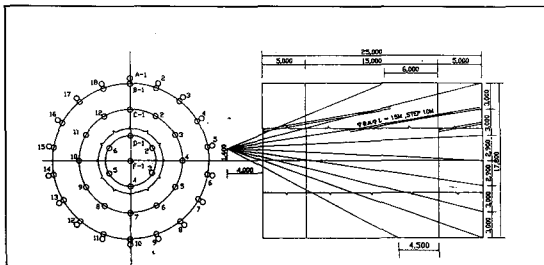
□ B - Pattern. 경암우세(부분적 연암)

- 주입범위 5.0m, 주입공수 42공.
- 암반분류(RMR) Ⅱ ~ Ⅲ등급 (평균 78~54). 막장 압박이 경암이 우세하나 부분적으로 연암이 포함되고 파쇄대가 분포되지 않은 구간의 그라우팅 패턴으로써 주입범위 5m 로 상부 반단면만을 주입하는 방식이다.



□ C - Pattern. 연암우세(부분적 경암)

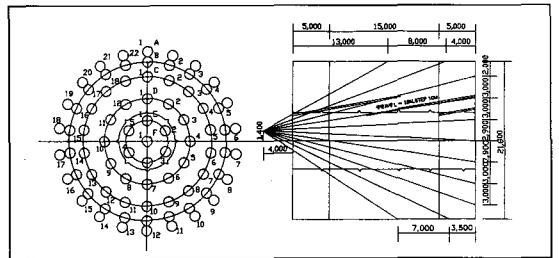
- 주입범위 5.0m, 주입공수 55공.
- 암반분류(RMR) Ⅱ ~ Ⅲ등급 (평균 76~34)



연암,경암 혼재 구간의 그라우팅 패턴으로써 폭 1m 이상의 파쇄대가 협채된 구간에서 시공된 주입범위 5m 상하부 전단면을 주입하는 방식이다.

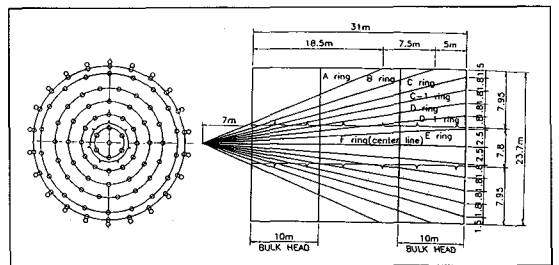
□ D - Pattern. 파쇄연암(풍화암 혼재)

- 주입범위 7.0m, 주입공수 81공.
- 암반분류(RMR) Ⅲ ~ Ⅳ등급 (평균 48~20) 파쇄연암과 풍화암이 혼재된 구간의 그라우팅 패턴으로써 주입범위 7m의 상하부 전단면을 주입하는 방식이다. 그라우팅 완료후 굴착시에 출수량이 다소 발생하는 경우도 종종 있었으며 굴착후 즉시 막장 실링(sealing)을 함으로써 막장 압박의 이완을 방지하는 것이 중요했던 구간이다.



□ E - Pattern. 토사구간(부분적 풍화대)

- 주입범위 7.95m, 주입공수 111공.
- 암반분류(RMR) V등급 이하 (평균 20 이하) 단층점토를 포함하는 풍화토 구간에 해당한다. 막장의 변형 방지, 주입재 및 지하수의 유출 방지를 위하여 주입장 31m, 벌크헤드 10m로 하여 일반구간보다 겹침시공을 크게 하였다.



4.1.2 차수그라우팅 배합비

배합종류	주입량 (ℓ)	A 액 (규산소다)		B 액 (천탄액)			결타임 (초)	주입 비율 (%)
		물유리 (ℓ)	물 (ℓ)	시멘트 (kg)	물 (ℓ)	W/C (%)		
I	1,000	250	250	95	470	500	92	80
II	1,000	250	250	115	463	400	57	20
III	1,000	250	250	150	452	300	45	필요시

4.2 강관보강 그라우팅

강관보강 그라우팅 공법은 일명 미니파이프루프 (mini pipe roof) 공법이라고도 하며 터널막장 아치부에 전방으로 경사지게 천공을 한 후에 일정한 구멍을 뚫은 강관(φ50mm)을 천공구멍에 삽입하고 더블팩카 그라우팅을 시행하여 암괴의 전단 보강으로 단층파쇄대 및 파쇄절리의 이탈을 방지하며 굴착면의 안전성 확보와 차수 그라우팅의 2차적인 효율을 증대할 목적으로 시행한 공법이다. 주입 방식에 따라 강관 1단주입과 강관다단 주입 방식으로 구분되며 암반이 양호한 경우에는 강관 1단주입이 유리하나 주입대상 암반이 심하게 풍화되었거나 용출수가 있을 때는 강관다단 주입 방식이 적합하다.

4.2.1 시공순서

1) 천공작업

- ① 천공장비 : RPD-65, 점보 드릴.
- ② 천공직경 : 강관 직경의 1.8~2배, φ75mm
- ③ 천공간격 : 횡방향 c.t.c 0.3~0.5m
- ④ 천공길이 : 15m

2) 강관삽입

- ① 강관외경 및 두께 : φ50mm, t=4mm
- ② 강관조합 : 6m+6m+3m(현장조건에 따라 조정)
- ③ 주입구멍(slit) : φ8mm, 4공/c.t.c 1m 지그재그

3) 천공 주입구 코킹

- ① 천공구멍 입구와 강관 사이에 지수발포재로 1차 코킹.

- ② 그라우팅 압력(20kg/cm²)에 견딜수 있도록 급결시멘트로 2차 코킹.

4) 강관 주변부 실링(sealing)

- ① 코킹재의 경화후 천공홀과 강관 사이에 실링재를 충전.
 - 주입방식 : 1.0 shot.
 - 주입재 : 벤토나이트.
- ② 실링재 주입압력 : 3kg/cm²

5) 주입시공

- ① 주입압 : 10kg/cm²내외(정수압의 3~4배)
- ② 주입방법
 - ※ 암반구간 : 1단 주입(one step grouting)
 - ※ 파쇄대 및 토사구간 : 다단주입(back step grouting)
- ③ 팩카 사용
 - ※ 고무팩카(φ42mm) 또는 에어팩카.

4.2.2 주입재 배합비

- ① A액 : B 액 = 1 : 1
- ② 주입압력 변화에 따라 상기 3가지 배합비를 탄력 적용함.

배합	주입량 (ℓ)	A 액		B 액		
		규산소다	물	물	시멘트	W/C(%)
I	400	100 ℓ	100 ℓ	181 ℓ	60 kg	302
II	400	100 ℓ	100 ℓ	175 ℓ	80 kg	219
III	400	100 ℓ	100 ℓ	168 ℓ	100 kg	168

4.3 하저터널 굴착 순서

하저터널은 특별한 경우를 제외하고는 다음 그림과 같이 4단계의 작업을 반복 시행하였다. 터널을 굴착하기 전에 막장에서 수평으로 코어(길이 25m)를 채취하여 암반의 취약함 정도와 용수량을 조사하여 굴착방법과 주입공사의 범위를 결정하였다. 주입공사는 터널 전방 25m를 주입한 후 굴착은 20m를 하여 5m의 벌크헤드를 유지하였다. (4.1.1항 참조) 강관보강은 길이 15m의 강관을 휘폴링식으로 설치한 다음 10m 굴착을 2회 반복하면 주입공사 스텝과 균형을 맞추었다. 굴착 작업은 파쇄대가 없는 경암구간에서는 발파작업을 하였지만 기타구간은 로드헤더(road header)를 이용한 기계굴착을 시행하였다.

I 단계 : 수평 지질조사



II 단계 : 주입공사



III 단계 : 강관보강



IV 단계 : 굴착작업(기계, 발파, 인력 등)



4.4 연약대 구간 통과

4.4.1 개요

'93년 8월 한강 하저터널 시점측 우측 터널 막장(갱구에서 172m 이격)에서 굴착 예정구간의 암반을 조사하기 위하여 수평으로 시추조사를 하던 중 막장에서 10m까지는 RQD 20~25%, TCR 70% 정도의 연암 코어가 채취 되다가 단층각력암(fault breccia)이 출현하고 그 후 3~4m 구간의 풍화대를 지나서부터는 1,200 l/공/min의 지하수가 용출하면서 코어를 채취할 수 없었다. 기존에 사용하던 더블바렐을 트리플바렐로 바꾼후 코어를 채취할 수 있었으며 본 구간의 시추조사는 (표 3)과 같으며 공내재하시험과 실내 시험 결과는 표4, 표5, 표6과 같다.

4.4.2 지반보강 및 굴착공법

실트.모래층이 확인됨에 따라 굴착중에 지하수 용출의 과다와 지반 지지력이 낮은 막장의 자립시간이 매우 불리함에 따라 터널의 변위 발생이 커지고 변위의 수렴이 지연될 것으로 예상되어 치밀한 치수 그라우팅을 과 막장 보호를 위한 강관보강(미니파이프루프)을 채택하였으므로 굴착은 벤치카트에서 링컷트로 변경 시공하였다.

(1) 그라우팅

- 주입공법 : LW
- 주입패턴 : 4.1.1의 E-Pattern 참조
- 주입율 : 21%

$$\lambda = \eta \cdot \alpha (1 + \beta) \quad \text{여기서 } \lambda : \text{주입율}$$

η : 간극율

α : 충전율

$\eta = e / 1 + e$
 $e = G_s \cdot W_n / S$

β : 손실율
 e : 간극비
 G_s : 비중(2.66)
 W_n : 자연함수비 (23.3%)
 S : 포화도(1.0)

(표 3) 수평 시추조사 현황

구 간	연장 (m)	경사 (%)	작업내용	출수량 (l/min)	비 고
20k 501.4 ~ 20k 571.4	70	5	0.0~30.0m: Non coring 30.0~42.0m: Slime check 42.0~55.5m: Coring 55.5~70.0m: Slime check	300 400	22m지점에서 용출수 급격히 증가.
20k 501.4 ~ 20k 521.6	21.2	0	더블바렐로 코어채취불가 트리플바렐로 코어채취가능		

(표 4) 공내재하시험 결과

층 질	시험심도 (m)	정지토압 P _o (kg/cm ²)	항복압 P _y (kg/cm ²)	파괴압 P _f (kg/cm ²)	반력계수 K _m (kg/cm ²)	탄성계수 E _m (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 5) 실내 토질시험 결과

Sample	Horizontal depth(m)	W _n (%)	G _s	Atterberg		Unconfined compression test		Direct shear test		USCS
				LL	PL	Q _u (kg/cm ²)	S _t	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

(표 6) 지반조사 결과

구 분	점착력(C) (kg/cm ²)	내부마찰각(ϕ) (°)	단위중량(γ) (g/cm ³)	변형계수(E) (kg/cm ²)
범 위	0.19~0.35	29~35	1.984~2.039	458.08~488.4847
평균치	0.26	32	2.014	3.67

○ 그라우팅 시공결과

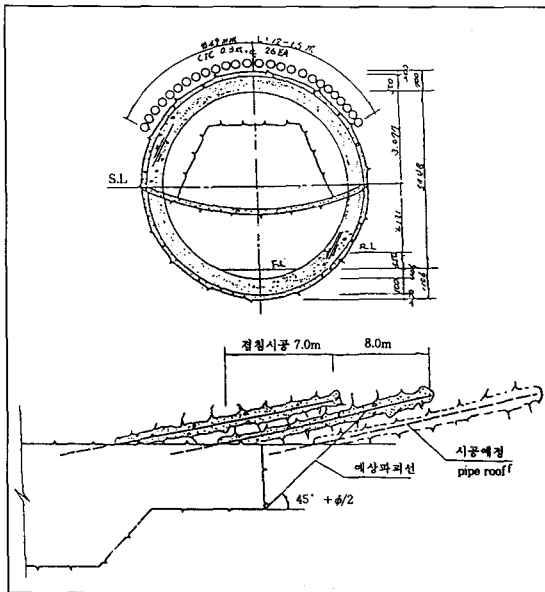
주입구간	시공기간	주입공수	주입량 (m ³)	주입압력 (kg/cm ²)	주입율 (%)	특수시험(cm/sec)	
						전	후
20k 501.4 ~ 20k 432.4	33일 ('93.10.04 ~ '93.11.06)	111	1,708	3~25	23.4	-	-
20k 522.2 ~ 20k 553.2	22일 ('94.01.01 ~ '94.01.23)	111	1,448	7~23	19.8	-	-
20k 546.2 ~ 20k 577.2	20일 ('94.03.22 ~ '94.04.11)	111	1,421	7~20	19.5	용수량 과다로 시험불가	k=1.33×10 ⁻⁶

□ 주입공당 평균 시공량

- 주입량 : 15.38m³/공(최대 주입량 : 39.68m³/공)
- 시멘트 : 59포/공
- 주입시간 : 308분/공
- 천공시간 : 78분/공
- 용수량 : 55 l /min/공
- 천공장 : 27.85m/공

2) 강관보강

본 구간의 강관보강(미니파이프루프)은 터널막장 크라운부에 그림13과 같이 횡방향 30cm 간격으로



(그림 13) 강관보강 및 굴착패턴도

26공을 시행하였다. 상세한 내용은 4.2 항 참조.

3) 굴착 및 지보패턴

- 굴착방법 : 링커트
- 굴착장비 : 백 호우 및 인력굴착
- 1회 굴진장 : 0.8m
- 1일 평균 굴진장 : 0.33m/day
 - 연약대연장 : 74m. (20k 501 ~ 20k 575)
 - 공사기간 6개월('93. 10. 1 ~ '94. 6. 30)
- 지보패턴
 - ① 슛크리트 두께 : 25cm (와이어매쉬 $\phi 5 \times 100 \times 100$, 2회 설치)
 - ② 막장 슛크리트 두께 : 5cm
 - ③ 강지보공 규격 : H-125×125×9×12
 - ④ 가인버트 슛크리트 두께 : 20cm
 - ⑤ 상부반단면 코어 유지길이 : 4스팬(3.2m) 이상.

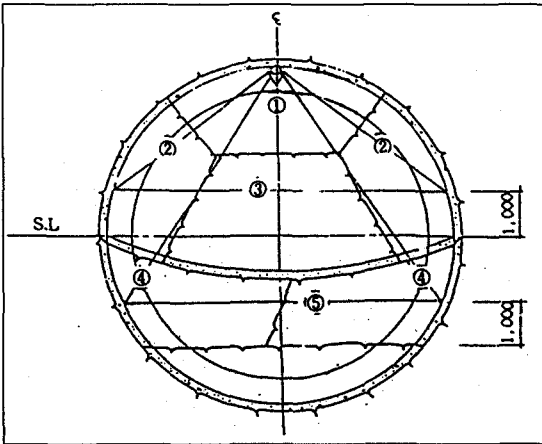
4.4.3 일상관리 계측

터널의 천단침하와 내공변위를 측정하기 위한 계측단면은 그림14와 같으며 그림14의 단면중 ①번 위치의 최종 천단침하량과 ③번 위치의 내공변위량은 표7, 표8과 같다.

4.5 구조물 시공

4.5.1 콘크리트 라이닝 구조물

한강 하저터널은 비배수 방식 터널로서 계획 홍수위(수두 41m)를 고려한 수압과 라이닝 콘



(그림 14) 일상관리 계측단면도

(표 7) 일상관리 계측결과

측정위치 (station)	최종 변위량(mm)	
	천단침하	내공변위(수위)
20k 505	24.0	45.4
20k 507	22.0	41.8
20k 515	32.0	63.2
20k 520	14.0	54.7
20k 527	10.0	10.6
20k 534	14.0	23.5
20k 551	6.0	22.9
20k 567	5.0	4.4

(표 8) 계측치와 해석치의 비교

구분	터널 변위량					
	계측치 (mm)			해석치 (mm)		
	상부굴침	하부굴침	최종변위량	상부굴침	하부굴침	최종변위량
내공변위	49.0	54.7	54.7	2.5	3.5	3.5
천단침하	11.0	16.0	14.0	17.3	17.4	14.7

크리트의 자중을 하중 조합하였다. 또한 장기적인 안전성 확보를 위하여 라이닝에 미치게될 불확정 요소들(다양한 지질조건의 변화, 연약대 출현, 향후 전동차 운행에 따른 진동 등)을 감안하여 50cm 두께의 복철근콘크리트 구조로 설치되

었으며 콘크리트의 설계기준강도(σ_{ck})는 210kg/cm^2 를 채택하였다.

4.5.2 방수시공

연장이 긴 하저터널을 관통하고나서 제한된 공기내에 라이닝 구조물을 끝내기 위해서는 여러 세트의 스틸폼을 투입하여야 하며 비배수 방식으로 계획된 하저터널은 터널 전주변(全周邊 360°)에 방수쉬트를 설치하게됨에 따라 방수쉬트를 통과하지 못하는 터널주변의 지하수가 여러 구간으로 나누어서 라이닝 콘크리트를 타설할 때 인접구간끼리 접속되는 구간마다 방수쉬트를 밀어내듯이 블록블록 솟아오르게하는 일이 발생한다. 그렇게 될 경우 콘크리트의 설계두께를 확보하기 어렵게 되므로 시공성을 고려하여 터널 주변의 지하수를 터널바닥 중앙 트랜치에 유공관을 매설하여 유도하였다. 따라서 방수쉬트를 터널 전둘레에 설치 폐합함으로써 구조물 내부로는 누수가 전혀 없도록 하였고, 부직포(fleece)를 통해 유공관으로 유입된 물은 한강 중앙 집수정으로 모아서 마포측 수직구를 통하여 지상으로 양수 처리하고 있다.

4.5.3 터널 2차라이닝

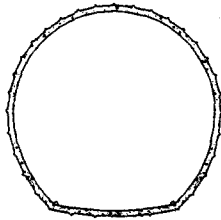
(1) 본체 콘크리트 타설

하저터널에 2차라이닝 타설용 스틸폼은 길이 10m짜리 7조를 투입하여 94년 8월에 착수하여 96년 2월 완료하였다.

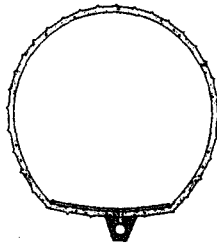
- 시공단위 물량 : 10m 1스판당 콘크리트 120m^3 , 철근 8ton.
- 작업 소요시간 : 1스판당 39시간
 - 콘크리트 타설 10hr - 스틸폼 이동 1hr
 - 양생 20hr - 스틸폼 설치 3hr
 - 스틸폼 탈형 3hr - 마무리판 설치 2hr

(2) 라이닝 시공순서

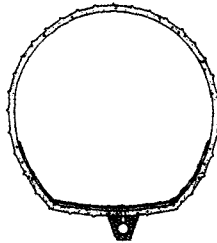
① 굴착완료, 내공검측
숏크리트 면정리



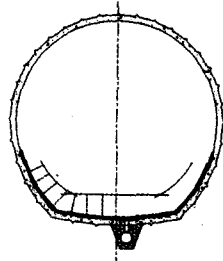
② 유공관 및 종횡단
배수관 설치



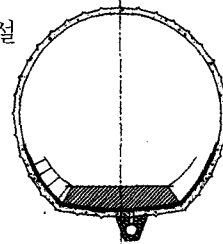
③ 인버트 방수



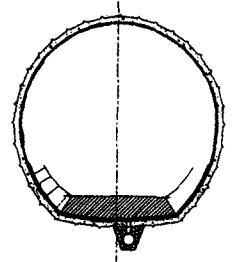
④ 인버트 철근배근



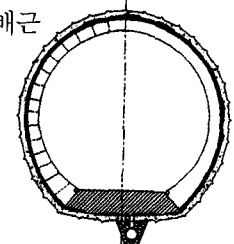
⑤ 인버트 콘크리트 타설



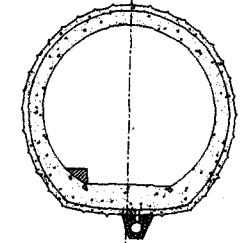
⑥ 측벽, 아치부 방수



⑦ 측벽, 아치부 철근배근



⑧ 측벽, 아치부
콘크리트 타설,
보도현치 시공



5. 콘크리트 라이닝 배면공동 채움 그라우팅

5.1 개요

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

5.2 채움 그라우팅

5.2.1. 1차 주입시행

라이닝 배면공동 채움주입을 위하여 콘크리트 타설전에 길이 10m짜리 스틸폼 크라운부에 직경 50mm 파이프를 5m 간격으로 2개를 설치하였다. 주입공사는 격공(隔孔)으로 우선 홀수번 주입공을 통하여 주입재(기포몰탈)가 유출될때까지 주입하고나서 짝수번 주입공을 통해서는 3~5kg/cm²의 압력으로 주입하는 과정을 2회 반복 시공하였다.

- 주입량 : 0.09m³/m
- 주입재 배합비(m³당)

시멘트(kg)	기포제(kg)	물(kg)	W/C(kg)
1,299	5.84	584	45

5.2.2. 2차 주입시행

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

- 주입재 배합비

A액(규산소다 용액)			B액(시멘트 밀크)			비 고
물	규산소다	계	물	시멘트	계	
100 l	100 l	200 l	18 l	19 l(60kg)	200 l	200 l 기준

5.2.3 인버트측부 채움주입 시행

콘크리트 라이닝의 본체와 인버트 접속부의 균열 및 누수에 따른 열화요인을 방지하기 위하여 인버트 양측부에 주입관(φ16mm 포리에틸렌재질, 1스판당 L=10.3m)을 매설하였다. 본 주입관에는

지그재그 20cm간격으로 φ5mm의 주입구멍을 뚫고 비닐테이프로 감았다. 본체 배면공동 채움주입 완료후 본주입관을 이용하여 인버트측부 채움주입을 시행하였다.

6. 영구계측기 설치 및 측정

6.1 개요

지하철 구조물의 과학적이고 합리적인 유지관리를 위하여 영구계측 시스템을 도입 설치하였다. 영구계측기는 대표단면 계측으로서 토압계, 수압계, 변형률계와 일상관리 계측으로서 계측핀, 반사경, 전기저항식 및 광섬유센서로 구분 설치하여 구조물 관리에 참고하고 있다.

6.2 영구계측 계획

6.2.1 계측위치 선정기준

- 대표단면 계측
 - 지반이 취약하거나 지질 변화가 심하여 과다한 변위가 예상되는 구간
 - 주요 구조물 인접구간 또는 향후 구조물 신축 예상 구간
 - 구조해석 선정 구간(FEM 등) 등
- 일상관리 계측
 - 갱구부, 횡갱접속부, 단면변화 구간
 - 대표단면 계측 구간 등

6.2.2 계측항목

- 대표단면 계측 : 토압계, 간극수압계, 변형률계, 지하수위계 등
- 일상관리 계측 : 내공변위, 천단침하 등

6.2.3 계측기 기종선정

- 기종선정 기준 : 국내외 사용 실적이 많고 내구성이 우수하여야 하며 진동, 습도, 온도, 먼지, 전기, 침수 등에 장애가 없는 기종

으로써 향후 지하철 계측관리의 광역화에 따른 호환 가능한 기종을 선정토록 노력하였다.

- 예상 문제점 : 계측기 성능 및 내구년한 등에 대한 검증이 곤란하고 계측기기의 설치기술 수준에 따라 계측값의 편차가 발생할 수 있으며 계측 위치 선정부터 측정분석 결과까지 장기간에 걸쳐 일관성있는 관리가 필요하다.

6.3 계측빈도

6.3.1 정기계측

- ① 계측기 설치 : 설치 즉시 초기치 측정
- ② 준공후 1년간 : 종합 측정
- ③ 준공후 2~3년간 : 년 4회 계절별 측정
- ④ 준공후 4~5년간 : 년 2회 측정
- ⑤ 준공후 5년째 : 종합 측정
- ⑥ 준공후 6년 경과 : 매 2년마다 1회 측정
- ⑦ 준공후 10년 경과 : 매 5년마다 1회 측정

6.3.2 특별계측

지진, 홍수, 화재, 사고 등이 발생하거나 터널구조물에 근접하여 굴착공사가 시행될 경우 계측빈도를 조정 시행한다.

6.4 영구계측기 설치현황

□ 대표단면 계측기(3단면)

위치	계	광심유 센서			설치 사유
	계	6개소 L=51m	터널단면내	인버트 위	
하행선 A궤	20k 550	2개소 L=17m	3개소 L=39m	3개소 L=12m	지반취약구간(SM층) FEM해석구간
	21k 380	2개소 L=17m	1개소 L=13m	1개소 L=4m	한강 최심부
	21k 462	2개소 L=17m	1개소 L=13m	1개소 L=4m	강변도시고속도로 교각 근접지점

□ 일상관리 계측기

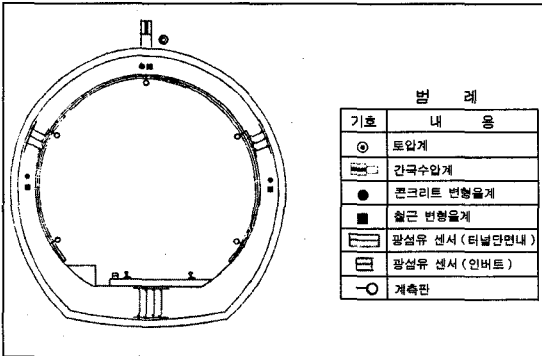
- 전기저항식 변위센서(23단면)

연번	구분	측점	단면 (개소)	수량 (개)	설치 사유
	계		23	69	
1	단선병렬터널 (육상구간)	20k 110	2	6	단선과 twin터널 연결부 FEM해석구간
2	3-Arch터널	20k 200	2	6	지반 취약구간
3	단선병렬터널 (하저구간)	20k 312	2	6	개착과 터널 연결부
4	"	20k 420	2	6	횡갱 연결부
5	"	20k 550	1	3	SM층 구간, FEM해석구간
6	"	20k 640	2	6	횡갱 연결부
7	"	20k 900	2	6	횡갱 연결부
8	"	21k 070	2	6	절리 발달 과다구간
9	"	21k 240	2	6	횡갱 연결부
10	"	21k 390	1	3	한강 최심부
11	"	21k 462	1	3	강변도시고속도로 교각 근접 지역
12	"	21k 540	2	6	지반 취약구간
13	"	21k 611	1	6	개착과 터널 연결부

○ 광섬유센서(3단면)

위 치		계		광섬유 센서		설 치 사유
계		6개소 L=51m	터널단면내	인버트 위		
하행선 A궤	20k 550	2개소 L=17m	3개소 L=39m	3개소 L=12m		지반취약구간(SM층) FEM해석구간
	21k 380	2개소 L=17m	1개소 L=13m	1개소 L=4m		한강 최심부
	21k 462	2개소 L=17m	1개소 L=13m	1개소 L=4m		강변도시고속도로 교각 근접지점

□ 영구계측기 설치단면도



7. 비상수문 제작 및 설치

7.1 개요

한강 하저터널 구간에서 지하철 운행중 지진 또는 지각변동 등과 같은 예상치 못한 대형 재난 발생 시 하저터널 내부로 한강물이 유입될 경우 서울 시내의 지하철 대부분이 물에 잠기는 재해를 예방하기 위하여 해외의 시공사례를 참고하여 여의나루역과 마포수직구에 비상수문을 설치하였다.

비상수문의 제작 및 설치공사는 토목, 기계설비, 전기, 신호, 통신, 궤도등이 복합공종으로 이루어져있음에 따라 운영체계의 유지와 정밀시공을 위하여 각 분야별로 관리 방안을 수립하여 종합 검토하였다. 한강변에 설치된 기존의 수문들은 설계

수두가 낮아 수문에 작용하는 수압이 적으므로 설계가 단순하고 수밀부가 취약하고 구조물과의 접촉부에서 마찰이 적기때문에 수문설비가 소규모이다. 한강 하저터널에 설치된 비상수문은 41m(계획홍수위 기준)의 설계수두를 적용하였고 현장조작과 원격조작이 가능하도록 설치하였다.

7.2 비상수문의 설치

7.2.1 설계기준

(1) 설계수두

최대 홍수위에서도 수문이 수압에 견딜 수 있도록 설계할 경우 여의도와 마포측의 수두차이가 다소 있으나 설계조건이 불리한 여의도 지역의 수두를 기준으로 설계하고 양측 전부 동일한 사양으로 제작하였다.

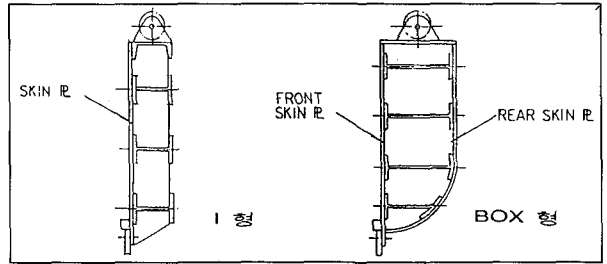
- 최대홍수위 : E.L + 114.730m
- 정상수위 : E.L + 103.500m
- 본선하단고 : E.L + 73.130m
- 설계수두 : 41.60m(4.16kg/cm²)=114.70-73.13

(2) 수문본체 재료

- Skin plate : SS400, KSD3503 일반 구조용 압연강재
- Guide frame : STS304, KSD3705 열간압연 스테인레스 강판
- Rubber seal : 합성고무(KSM6518에 준하는 재료)

7.2.2 수문형태

일반적으로 수문의 단면 형태는 I형과 Box형의 두 가지가 주종을 이루는데 설계대상 수문이 중량 형임을 감안하여 자기 배수식으로 부력을 최소화 하고 침투수의 충격수압의 작용시에도 수문이 하강할 수 있도록 I형으로 채택하고 충분한 자중을 갖도록 하였다.



(그림 15) 비상수문 단면형태

7.2.3 설계사양

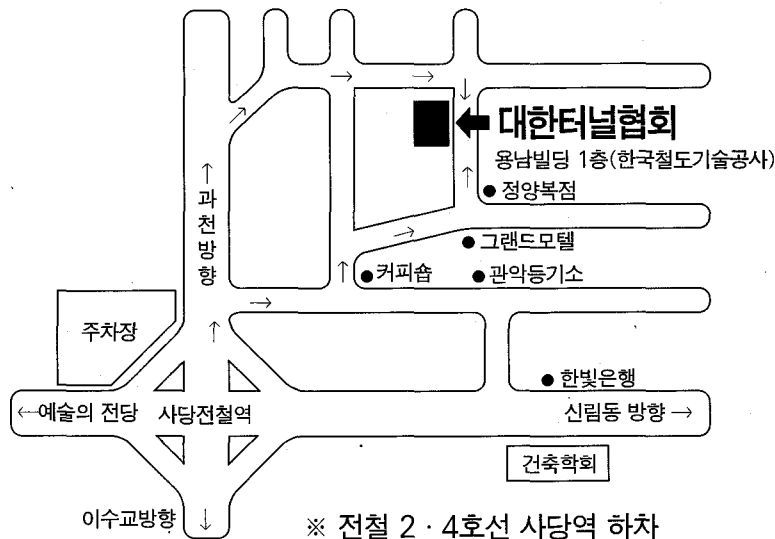
번호	항목	여의나루역		마포 수직구		비고
		하행선(A갱)	상행선(B갱)	하행선(A갱)	상행선(B갱)	
1	설치위치	Sta20k 309.5	Sta20k 309.5	Sta21k 603.1	Sta21k 611.3	
2	설계수위	E.L+114.73m	E.L+114.73m	E.L+114.73m	E.L+114.73m	계획 홍수위
	궤도면고 (R.L)	E.L+73.65m	E.L+73.65m	E.L+77.32m	E.L+77.45m	
	Sill Level	E.L+73.60m	E.L+73.60m	E.L+77.27m	E.L+76.40m	
3	수문형식	연직식(VERTICAL lift)		연직식(VERTICAL lift)		
4	수문폭	4.7m	5.2m	4.7m		
5	수문높이	4.8m	4.9m	4.8m		
6	수문자중	44 ton	46 ton	44 ton		
7	수밀방식	전면 사방수밀 방식 상부 및 측면 : P형(φ50) 하부 : 판형 20ton		전면 사방수밀 방식 상부 및 측면 : P형(φ50) 하부 : 판형 20ton		
8	설계수두	41.129m		42.129m		
9	권양장치속도	급강하시 : 1.0m/min 평상시 : 0.5m/min		급강하시 : 1.0m/min 평상시 : 0.5m/min		
10	권양장치	1motor, 2drum wire rope. 권양장치(급강하,수동장치) Inverter Type		1motor, 2drum wire rope. 권양장치(급강하,수동장치) Inverter Type		
11	전원공급방식	3φ, 4W, 380V, 60Hz		3φ, 4W, 380V, 60Hz		
12	운전방식	현장 조작 : 단독운전 원격조작 : 단독 또는 일괄 운전 방식		현장 조작 : 단독운전 원격조작 : 단독 또는 일괄 운전 방식		
13	비상장치	전원차단 및 전동기 고장시 수동으로 수문 개폐 가능		전원차단 및 전동기 고장시 수동으로 수문 개폐 가능		
14	안전장치	평상시 비상수문을 Rest arm에 거치		평상시 비상수문을 Rest arm에 거치		

8. 맺음말

서울 지하철 5호선 건설구간중 여의도와 마포를 잇는 길이 1,288m의 한강 하저터널을 성공적으로 마무리하여 1996년 12월 30일 개통하여 많은 시민들이 궁금함과 호기심 속에 편리하게 이용하고 있다. 한강과 같이 계절적으로 여름철에 홍수가 집중됨에 따른 급격한 수위변동과 간만의 차가 심한 인천앞 바다의 영향으로 비우기철에도 공사구간의 한강 수위가 평상시와 삭망시에 0.6~1.2m의 수위 변동을 보인다. 따라서 한강 중앙에 설치한 인공섬을 이용하여 터널을 굴착할 때는 바지(Barge)선 운행과 수방대책에 철저한 관리를 해야만 했다.

한강 바다의 암반은 매우 교란되어 있고 불규칙하다. 여의도에서 마포쪽으로 뚫는 우측 터널에서는 실트,모래층을 만나 악전고투하고 있는데 같은 지점 좌측 터널에서는 파쇄암층을 로드헤더를 이용한 기계굴착과 일부는 발파를 할 정도로 암반의 분포 상태의 변화가 심하다. 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. 많은 우여곡절 끝에 공사를 완공했지만 또 다시 다른 곳에 한강 하저터널을 뚫는다면 새로운 긴장감 속에 나날을 보내게 될 것이다.

● 대한터널협회약도



(사)대한터널협회

우 151-080 서울특별시 관악구 남현동 602-25
Tel: (02) 598-3138 FAX: (02) 598-3139