

한강하저터널 공사현장을 가다

- 지하철 5호선, 마포~여의도 구간 -

On The Job-site Survey for Han River Under-River Tunnel

김진영°, 신태균°°

Kim, Chin Young, Shin, Tae Kyoon



1. 머리말

토목인은 물론 우리 나라 국민이면 누구나가 국내 건설사상 최대 난공사중 하나로 꼽히는 지하철 5호선의 일부구간인 한강 밑을 관통하는 한강하저터널 공사현장(여의도~마포간, 총연장 길이 1,580m 중 하저터널구간은 1,288m)의 방문을 원할 것이다.

우리 나라에서 최초로 시도하는 공사이니만큼 항간에 나도는 말도 많을 수 밖에 없으며, 직위고하를 시도하는 공사이니만큼 항간에 나도는 말도 많을 수 밖에 없으며, 직위고하를 막론하고 방문도 잦고 비평도 수없이 나돌고 있다. 늘 그래왔듯이 관심이 많은 곳은 드나드는 사람들로 줄을 잇고, 이들을 위해 공사개황브리핑이다, 공사장안내다 하는 일로 인해 공사가 중단되어 공정에 큰 차질이 빚어지는 사례가 어제 오늘의 이야기가 아니지 않는가?

서울특별시 지하철건설본부 신태균과장과 함께 본인(김진영)은 현장을 찾지 않는 것이 공사를 도와준다는 사실을 알면서도 조심스럽게 현장방문계획을 알리니 다행히 현장감독(우종태, 정홍범) 및 삼부토건주식회사 현장소장(김제원)이 기꺼이 허락하여 공사진척에 차질이 없도록 한다는 다짐을

받고 현장감독의 안내를 받아 여의도 고수부지에 마련된 작업장에 도착했다.

원효대교와 마포대교를 지나칠 때마다 한강가운데 설치한 『인공섬』을 바라보면서 우리 나라 토목의 대역사가 이루어지는 곳이구나 하고 생각만 하던 곳을 직접 와보니 현장이 아무리 여건이 좋은 고수부지라 하더라도 1일 350명이 작업하는 현장 같지 않게 잘 정돈되고 조용한 분위기에 작업을 하고 있는 모습을 보니 『부실시공방지』란 프랭카드가 무색할 정도다. 90년 12월에 착공하여 현재까지 큰 사고가 한 건도 발생하지 않았다고 하는 것도 당연하다고 본다.

95년 2월 3일에 현장에 도착하자마자 종합상황실에서 브리핑을 받고 1,288m에 달하는 하저터널을 우리의 힘만으로 건설한다는 것이 순간이나마 우리 나라 토목기술의 발전상을 새삼 느끼게 했으며 마침 지난 1월 17일을 기하여 양쪽 터널이 완전 관통된 것을 다행스럽게 생각했다.

현장설명을 듣고 하저터널공사장으로 가기 위해 안전모를 쓰고 방수복과 방수화를 착용한 후 15톤 이상의 덤프트럭이 오르락거리는 대형 엘리베이터를 타고 하저 35m까지 내려가니 사방이 철빔으로 버팀을 하여 안전하다고는 하지만 얼마나 으시시한지 온몸에 소름이 돋는 기분이 들었다.

내려가는 도중에 벽면을 관찰해 보니 방수처리를

* 내부부 방재국 재해대책 담당
* * 서울특별시 지하철건설본부 공사과장

어찌나 잘했는지 물기를 찾아 볼 수 없었고 안전관리 및 안전시공에 얼마나 전력하고 있는지를 알 수 있었다.

지하 최저인 바닥까지 도달하여 터널 속을 현장 감독의 설명을 들으면서 걸어가는중에 터널라이닝을 만져보니 콘크리트 타설을 정교하게 하여 땀방울도 스며나오지 못하도록 하였으며, 또한 일반터널 시공에서는 2차 라이닝을 무근 30cm 두께로 콘크리트 타설을 하는데 비해 본 터널에서는 복철근을 깔고 50cm 두께로 콘크리트로 타설함으로써 강도면에서도 최고에 달하고 수압에 대비 상하좌우 균등압력을 받고 터널에 제일 강한 원형 철근콘크리트 방수터널로 시공하는 등 안전건설에 최우선하고 있었다. 터널을 거쳐 중앙까지 도착하여 다시 엘리베이터를 타고 인공섬으로 올라와 보니 직경 15m에 달하는 수직터널이 웅장하게 뚫려 있었고 밖으로 나오니 한강 가운데 각각 41m의 폭으로 견고하게 섬을 만들어 한강홍수 수방대책에 만전을 기하고 있었다.

엘리베이터입구 바닥의 높이는 7,000CMS 수위에 맞게 설계되었으나 홍수를 대비 200년 빈도의 홍수에도 견딜 수 있도록 수문(GATE)처리하여 만약의 사태에도 잠기지 않도록 되어 있었다.

2. 공사현황

공사 여건

- 한강바닥에서 낮은 깊이로 터널이 건설되며 지반 조건이 취약
 - 지반변화가 심하고 단층, 파쇄대가 발달
 - 지하수가 많이 용출되어 터널 안전시공 곤란
- 국내 최초의 장대 하저터널로 안전한 지반보강공사에 애로
- 지반보강공사 시행에 공기 추가소요
 - 막장당 일평균 0.6m(육상구간은 1.2m)

공사개요

- 연장 : 1,580m(여의도 밤섬정거장~마포 환기

구)

- 정가장 165m(터널 93m, 개착 72m)
- 본 선 1,415m(터널 1,366m, 개착 49m)
- 단면 : 원형(D=6.3m) 쌍굴터널
 - 숏크리트 두께 : 15~25cm
 - 철근콘크리트 라이닝 : 50cm
- 심도 : 15.6~30m(강바닥~터널천정)
 - 강바닥~터널바닥 : 21.5~35.9m
 - 평수위~터널천정 : 19.6~34.0m(홍수위시 : 31.8~46.2m)
- 공법 : N.A.T.M
 - 보조공법 : 그라우팅(L.W), 강관다리(Mimi Pipe Roof)등
- 공사기간 : '90. 12.~'95. 12.
- 공사비 : 897억원
- 공 정 : 73%('95. 1 현재)

안전시공 대책

- 수압에 안전하도록 원형 철근콘크리트로 설계
- 굴착 시행전 터널전방 수평지질조사(지질조사 전담자 상주)
 - 전방 25m까지 수평보링하여 지반분석
- 굴착 전 연약지반 보강 완료 후 안전상태 확인하고 굴착
 - 전방 25m까지 수평보링하여 지반분석
 - 터널상부($\theta=120^\circ$)에 강관보강(D=50mm, 13~26개)후 굴착
- 굴착시 주변지반 안전을 위해 기계식 굴착공법 채택
 - Road Header, I.T.C등(부득이한 경우는 제어 발파)
- 터널굴착후 지반변형상태 정밀계측 지속시행
 - 내공변위, 천단침하, 지중변위, 숏크리트 응력 측정, 락볼트 축력측정 등
- 감독, 감리 강화
 - 감독(4인), 감리(5인)원의 증가배치(일반 공구의 2배)
 - 외국인(오스트리아) 감리 집중투입

건설효과

- 교량가설시 예상되는 문제점 해소
 - 전동차의 소음, 진동으로 인한 시민 생활환경 피해예방
 - 강남·북측 지상, 지하 접속구간 도로기능 저하방지
 - 시설물 유지관리비용 절감
- 전천후 안전성이 확보되는 한강 횡단노선 확보
- 대하천 하부 천층터널 건설기술 축적

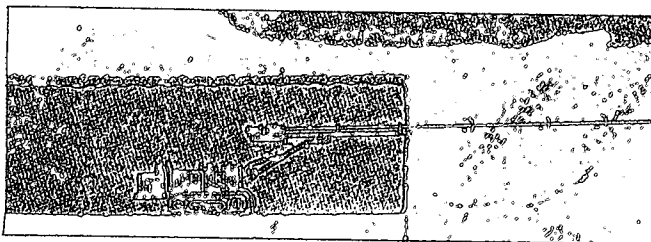
3. 굴착공법

여의도와 마포를 잇는 하저터널은 고수부지, 마포대교 인터체인지 내에 각각 수직구를 설치한 후 굴착직경 7.6M의 원형터널을 30m 간격으로 쌍굴을 NATM 공법으로 뚫고 있다.

하저터널 연장은 1,288m이며 토피는 강바닥에서 터널 천정부까지 16~23m가 된다. 한강의 수심은 제일 깊은 곳이 10.5m 정도이다. 이러한 하저터널이 어떠한 지반을 뚫게되고 어떠한 어려움이 있는지 알아 보았다.

한강은 하나의 커다란 구조선으로서 수천년동안의 지각 변동과 움직임으로 인하여 수많은 단층 파쇄대(Fault Zone)가 생기고 약한 골이 형성되어 자연히 큰 강이 만들어졌다고 볼 수 있다. 수백년 동안의 홍수범람으로 진흙, 모래, 자갈 등 충적층(Alluvium)이 상당히 두껍게 덮여 있다.

설계당시 지질조사는 수직보링조사를 하상 전구



1단계 : 수평지질 조사

간에 100m간격으로 20공, 전기비 저항탐사, 탄성과 탐사 등을 시행했으며 조사결과 선 캄브리아기의 편마암이 기반암으로 대부분 분포하고 있으며 다방향 단층 절리가 발달된 파쇄대가 다수 있을 것으로 예상되고 흑연(Graphite)층이 지속적으로 부존되어 있음은 물론 여의도측에서 마포 방향으로 300m 구간은 단층에 의한 변형작용을 가장 강하게 받아 RQD(암질표시율) 0%, TCR(코어회수율) 55%이 풍화대 및 연암층이 강바닥에서 40m 이하까지 분포되어 있다. 따라서 하저터널 공사구간은 대부분 구조단층 영향으로 절리면(Slickenside), 각력암(Brecciated), 압쇄암(Mylonite), 흑연층(Graphite)등으로 암반역학상 취약구간이 많았다.

지반이 불안정하고 지질변화가 심한 한강밑의 터널공사는 불량 등 사고발생시 한강물이 터널내로 유입 될 경우에 복구가 거의 불가능에 가까울 정도로 위험부담이 크기 때문에, 서울시와 시공회사(삼불토건(주))측은 수차례에 걸친 관계전문가의 자문과 외국기술자의 검토 등을 거쳐 터널공사를 진행하고 있었다.

본 하저터널은 상부단면 굴착 후 후방에서 하부반단면을 굴착하는 Bench-Cut굴착방식을 적용하고 있으며, 안전시공을 위하여 4단계의 작업공종을 거치게 되어 있다.

◦ 터널막장에서 수평보링조사를 실시한다. 수평보링은 NX(직경 75mm bottom bit 및 Double tube를 사용) 크기로 약 25m 길이의 천공을 하면서 코어를 채취한다. 수평보링을 통해서 터널막장 전방의 암질의 종류, 파쇄 정도를 확인한 다음 그라우팅의 범위 및 주입방식을 결정한다.

◦ 그라우팅 구멍(Grouting Hole) 천공시 5m, 10m, 15m, 20m, 25m 거리 별로 슬라임(Slime)을 채취하여 주입반

경 이내의 토질을 판단하고, 매막장별로 지질상태를 도면화(Mapping)하여

- Fore Poling의 필요여부, 원추형 내지 삼각형 봉락 가능여부를 판단하여 보강공법을 결정하고
- 암 시편의 강도 및 지질을 판단한 뒤 기계굴착(R-Header, ITC, POC Breaker) 또는 인력 굴착(분할굴착), 제어발과굴착 등 굴착공법을 결정하고
- 하단굴착시의 지질을 기존 Mapping 중평면도를 이용 지질을 사전예지하여 굴착방법, 보강방법 등을 판단한다.

지하 용출수의 대책으로 터널주변의 3.5~7m

소다용액(규산원액+물)이고 이는 1:1의 비율로 배합된다.

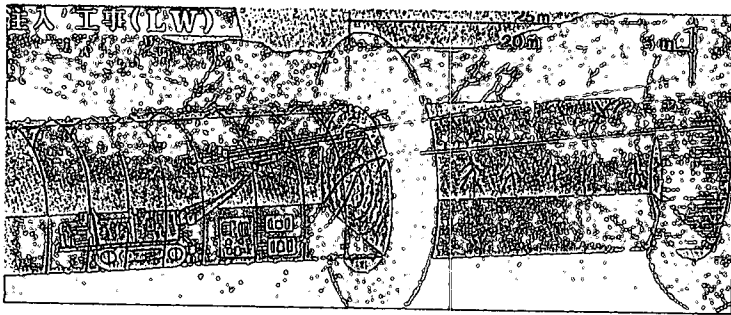
이들 A, B용액은 A액의 농도에 따라 Gel-Time이 형성되며 A액의 농도가 짙어 질수록 GEL-TIME은 빨라진다. A액은 1~4까지의 배합이 가능하며 주입상태 및 지반의 상태 등에 따라 1배합부터 4배합까지 단계적으로 주입하여 주입의 효과를 극대화할 수 있다.

굴착중 누수량이 3-5L/mm/공 이상이면 재 그라우팅을 실시하면서 반복한다.

3단계로 강관 보강공법을 시공한다. 강관보강은 터널상부 아치부에 두께 4mm, 직경 50mm 길이의 강관을 횡간격 50~60cm 간격으로 설치한 다음

굴착공사를 한다. 이 방법은 터널을 굴착하면서 막장 전방에 어떠한 악조건의 나쁜층을 만나더라도 굴착할 주변을 강관으로 폐쇄놓은 상태가 되어 봉락사고를 방지할 수 있는 안전한 시공방식으로 일명 Mini PipeRoof 공법이라고 한다.

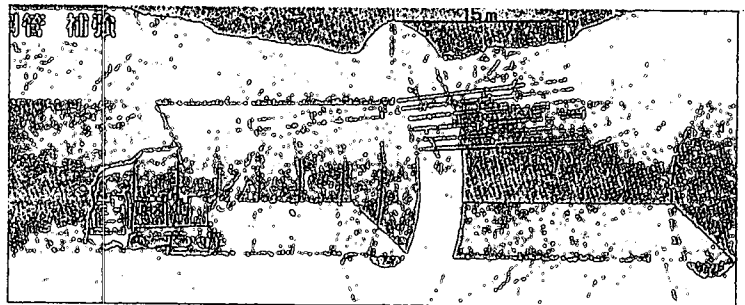
안전시공을 위한 이러한 3단계의 준비작업을 한 다음 본격적



2단계: 천공 및 L/W 주입

두께에 주입공사를 한다. 주입공사는 한 작업단위를 25m로 하고 있으며, 20m굴진 후 다시 25m을 주입하는 반복작업이 되풀이 된다. 주입재료는 일반 시멘트와 규산소다(물유리)가 혼합된 시멘트 밀크이며 일명 LW 공법이라고 한다.

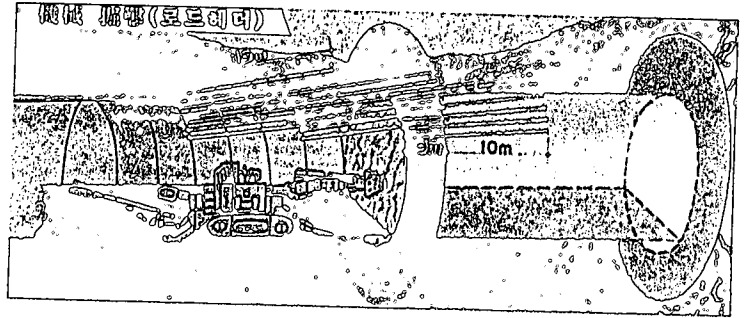
L/W(Labile Wasser Glas란 독일어의 약자)는 불안정화 한물유리용액의 약자로서 주입되는 주입재에 따른 분류이다. 주입액은 A액과 B액으로 나누어지고 A액은 시멘트 현탁액(시멘트+물), B액은 규산



3단계: 강관보강

으로 터널굴착을 하게 되는데 일련의 작업 과정이 25m마다 반복시행되며 4단계에 터널 굴착을 하게 된다.

굴착을 할 때 발파공법으로 시공할 경우 터널 주변의 약한 지반을 흔들어 이완 시키게되고 차수를 위한 주입공사의 효과가 반감될 것으로 예상되어 발파공법 대신에 터널 주변에 진동과 충격을 주지 않는 기계굴착 공법을 채택하고 있었다. 굴착기계인 Road Header는 여의도측 터널



4단계 : 터널굴착

에 일제 (Misuimike사) 2대(S-200 : 45Ton, S-300 : 95Ton)마포측 터널에 독일제 (Paurat) 1대(자중 95Ton), ITC-312 1대가 투입되어 시공 중에 있었다.

또한 특수굴착장비 이외에도 그라우팅공사를 위해서 유압충격식 회전 천공기인 RPD-65 2대를 현장 조건에 맞게 일본에서 특수주문 제작하여 사용 중에 있었고 잠보드릴 2분, 로봇트 샷크트리기, 무공해 로우더, 레이저 빔 발상기 12대, 막장마다 CCTV를 설치하여 사무실에서 터널의 공사 진행 상황이나 위험여부를 알 수 있도록 하고 있어 공사 기술면에서 투입장비면에서 국내토목 건설기술의 상징물이 될 것으로 보인다.

4. Slime Check를 통한 지질조사

4.1 Slime Check의 필요성

터널막장 전방의 지질을 조사하기 위해서는 Core Barrel을 사용하여 수평 시추조사를 하여야 정확하지만 시간과 경비가 소요되어 하저터널과 같은 특수 한 경우가 아니면 전 구간에 대해서 수평 시추를 하기는 어렵다. 터널을 굴착 하면서 막장에 수발공을 설치하거나 지수를 위한 주입공사를 할 경우 반드시 천공을 하게 된다.

이때 발생하는 천공수의 색상과 Slime을 자세히 관찰하면 암쇄설물(岩碎屑物) 토성분, 운모, 장

석, 석영대 등을 구분할 수 있다. 그렇게 판단할 수 있기 위해서는 어느 정도의 암석에 대한 상식을 갖추어야 하지만 Slime의 색상과 내용물을 보고 간단히 암구간과 토사구간을 구분할 수 있어 터널의 안전시공에 적절히 대처할 수 있으므로 적극적으로 활용하여야 한다.

4.2 조사방법

천공 Rod별로(1.5m 또는 3.0m) 고운 체를 이용하여 천공수(穿孔水)와 함께 쏟아져 나오는 Slime을 받아 시료채취 병에 담아 공번(孔番)과 Rod번호를 기입한다. 여기에 덧붙여서 Rod별 천공속도와 용수량을 조사해 놓으면 많은 참고 자료로 활용할 수 있다.

대체적으로 Slime과 천공수가 열린 희색은 암반, 짙은 희색은 파쇄암, 황토색은 토사층으로 보면 된다. 현장에서는 Boring기 조정원을 교육시켜 천공 Hole Log를 작성케 하여 그림 1, 2, 3, 4와 같이 토질예상도를 Plotting하고 그림 5와 같이 지질조사도를 작성한다.

5. 한강 인공섬 축조

국내에서 최초로 건설되는 장대 하저터널은 92년 11월 1일 본격적으로 착수하여 93년 6월 15일 현재 총연장 1,288m중 여의도쪽에서 130m, 마포쪽에서 140m를 굴착하여 일일평균 굴진속도

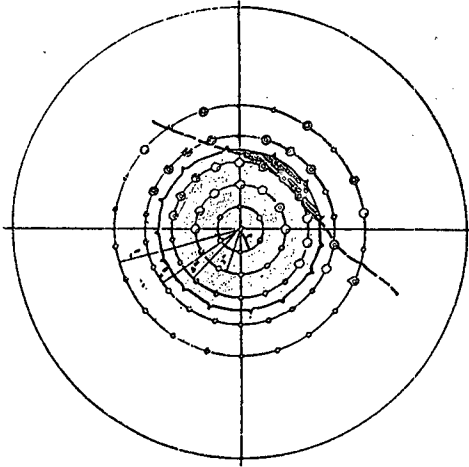


그림 1 지질단면도

위치 : 여의도 하저 B갱 STA 20km 488.6 막장에서 5m 전방
(주) 사선부 : 풍화대 ◎ : 천공시행, ○ : 천공예정

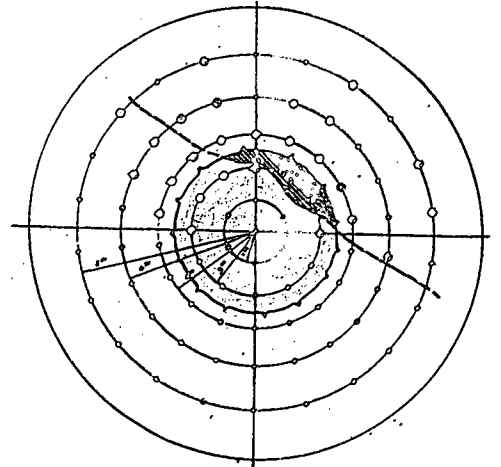


그림 2 지질단면도

위치 : 여의도 하저 B갱 STA 20km 493.6 막장에서 10m 전방

는 0.58m로 공사진척이 부진하였다.

터널굴착 결과 지반상태는 호상 혹은 모 편마암이 기반암으로 발달·분포하고 있으며 암반층의 공학적 성질이 불량하였고, 여의도 고수부지에서 마포쪽으로 약 300m 구간은 단층에 의한 변형작용을 심하게 받아 풍화암 및 연암층이 강바닥 40m 이하까지 분포되어 있었고, 구조단층의 영향등으로 경면(Slicken Side) 각력암(Brecciated), 압쇄암(Mylonite), 흑연(Graphite)층 등이 혼재되어 있어 암반역학적 취약할 뿐만 아니라 용수량이 많아 터널자립성이 약하여 상당구간에 대한 지반 보강공사의 추가시행이 불가피 하였다.

하저터널을 뚫기 위한 수직구는 2개소(여의도 고수부지 1개소, 마포대교 북인터체인지내 1개소)뿐으로서 터널 막장당 절대작업량이 과다하며 당초 예상했던 것 보다 훨씬 연약한 지반층으로 인하여 추가 보강공사 등으로 공사추진이 늦어짐에 따라 개통시기에 맞추기 위해서는 별도의

공사단축 방안 검토가 필요하였으며 효율적인 굴착과 공기단축 방안으로 인공섬을 축조하게 되었다.

인공섬은 폭과 길이가 각각 14m의 소규모로서 한강의 평상시 수위보다 3m 높게 설치하였고, 15m 직경의 원형수직구를 44m 깊이를 굴착하였다.

한강의 유수현황은 여의도지구 평균수심이 3.5~4m로서 평상시 유속은 6cm/sec 홍수시 유속은 2.5m/sec를 보고, 교각 등과 같이 유수 저항지장물이 있을 경우 강바닥의 세굴깊이는 7~8m가 발생한다. 강우가 없는 평상시에도 조류의 단만차로 인하여 60cm의 수위변동이 있고 보름마다 삭망시에는 120cm의 수위차가 발생된다.

인공섬 축조는 I, II 단계로 나누어서 I 단계는 우기전 시공으로서 가로, 세로 각 41m의 사각형의 섬구축 작업으로 평수위 보다 1.5m 높이까지 슈트 파일을 향타한 다음 주위 강바닥을 준설하여 댐비성토하고 슈트파일의 밀림을 방지하

기 위하여 슈트파일 바깥주변에 사석(0.0015~0.03m³급)을 경사지게 쌓아 슈트파일을 보호토록 하였다.

Ⅱ단계는 수직터널을 굴착하는 것으로서 터널 직경을 15m로하고 15m 주변을 1500mm 원형 Casing(철재동공법)을 RCD(Reverse Circulation Drill) 공법으로 37공을 박고 원형과 원형빔 사이는 400mm 원형으로 천공을 한 후 RCD공법으로 36공으로 끼워 연결을 한 후 내측을 굴착해 내려가면서 높이 2m마다 20cm의 두께의 역타콘크리트를 치면서 암층까지 내려가고 암층부터는 숏크리트를 쳐 굴착하여 완성시키므로써 하저터널 굴착공사를 10개월 이상 단축시키는 효과를 가져왔다.

또한, 홍수시 수위상승으로 인한 터널 내의 침수를 방지하기 위하여 수문(Gate)을 최대홍수위보다 2m 더 높게 설치하였고, 선박대피 계선주 3개소, 수전설비대 타워, Car Lift 원치대 타워를 설치함으로써 수방대비에 만전을 기하고 있었다.

6. 맺는 말

국내 최초로 한강바닥을 지나는 한강하저터널이 95년 1월 17일 완전 개통되므로써 본격적인 굴착과 라이닝 콘크리트 작업이 한참 진행중이고, 금년내에 완공목표로 모든 현장관계관들의 철약작업이 계속되고 있다.

본 하저터널 공사가 국내에서 처음 시도하는

것인 만큼 현장소장과 감독을 비롯한 모든 관계관들은 토목인중에서 최우선에 서 있다는 자긍심을 갖고 기술을 축적하고 있는 모습을 볼때 우리나라 토목의 장래가 밝게만 느껴진다.

여의도 고수부지에 설비된 작업장도 가제방을 홍수위 200년 빈도로 설치하고 각종 가건물을 이동식으로 설치하여 수방대비에 우선하는 등 안전에 만전을 기하고 있는 모습만을 보아도 본 공사는 아무탈없이 마무리 되리라고 본다.

타 육상터널공사와는 달리 본 하저터널공사는 공사진행중에 만의 하나라도 하천수가 유입되거나 하는 사고 발생시는 복구가 불가능하고 공사 또는 포기 해야 하는 단 한 번의 실수도 용납되지 않는다.

단 한치의 오차도 없이 무사히 완공되어 지하철 공사는 물론 국내 토목사에도 새로운 장이 열리길 바랄뿐이다.

또한 한강가운데 가설된 인공섬은 하저터널 완공과 동시에 철거 시킨다고 하는데 이 또한 홍수시 수리계산을 정확히 실시하여 홍수흐름에 지장이 없다고 판단되면 하저터널굴착 기념탑이나 분수대 등을 만들어 한강을 지나가는 시민들과 공사에 종사한 관계관들의 기념물이 되도록 다각도로 활용 방안을 강구하는 것도 바람직하다고 본다.

현장탐방을 마치고 떠나 올때는, 휴일도 없이 묵묵히 일하고 있는 시행청 및 시공자 관계관들의 앞날에 행운이 깃들기를 바라는 마음이 가슴속에 짝 차 있었다.