

터널 기계화 시공의 공법변경 사례



노인호
한국건설관리공사 부장,
수도권1단계복선화 감리단장



최형규
한국건설관리공사 대리,
수도권1단계복선화 감리원

1. 사업개요

1.1 사업내용

서울시를 비롯한 인천시 등의 수도권 일원에 일일 1,200만톤의 생활·공업용수를 공급하기 위한 국가 주요 기간산업인 광역 상수도 관로 연장 55km 가운데 잠수교 횡단구간 180m와 한강 홍수 통제소~ 한강철교간 3,520m가 단선으로 부설되어 있다. 이 구간의 관로 사고가 발생하면 수도권 일원에 원수 공급이 중단되어 약 590,000 가구 2백만명이 용수공급을 받지 못하는 엄청난 피해를 당하게 되어 있으므로, 이에 대한 대책과 이 지역의 불편해소를 위하여 1열의 관로를 추가 시행하는 사업이다.

수도권 1단계 단선구간 복선화 사업의 TBM 터널 굴착 중 '99. 4. 6 지상이 함몰되는 붕락사고가 발생하였다. 특히, 잔여구간은 한강철교, 올림픽대로, 한강(갯강) 등 주요 시설물을 통과하고, 심한 지질 변화가 예상됨에 따라 이에 대한 안전대책이 요구되어 잔여 굴착구간에 대한 추가 지질조사를 시행하여 터널굴착공법을 NATM공법으로 변경하여 현재 순조로운 공사진척을 보이고 있어 터널기술자들이 참고가 될 수 있도록 내용을 소개코자 한다.

1.2 공사위치

서울특별시 서초구, 동작구, 영등포구 일원
(한강 홍수 통제소 ~ 여의도 63B/D앞)

1.3 공사기간

'96. 12. 23 ~ 2002. 12. 30 (72개월)

1.4 공사개요

가. 관로공사 : L = 814m (표 1 참조)

나. 터널공사 :

D = 3.4m(내경 2.8m), L ≒ 3.9km (표 2 참조)

다. 부대공사 (표 3 참조)

표 1. 관로공사 현황

구분	A-Line	B,C-Line	D-Line
관경(mm)	2,800	1,800~2,800	1,500
연장(m)	412	133	35
위치	홍수통제소 ~터널입구	터널출구 ~기존관	노량진정수장 연결관로
공법	추진공법: 151.5m 개착공법: 260.5m	개착공법	개착공법

표 2. 터널공사 현황

구분	연장(m)	굴착단면	단면형	공법
본터널	2,842	3.4	원형	TBM
	1,072	3.7	수정마제형	NATM
Pilot터널	20	4.0	포장형	NATM
보조터널	38	4.6	수정마제형	NATM

표 3. 부대공사 현황

구분	직경(m)	높이(m)	공법
수직구	입구	22.0	38.7
	출구	22.0(18.0)	38.05(44.45)
유지관리 맨홀	입구	8.2	41.7
	출구	8.2	39.55

2. TBM터널의 설계 및 시공

2.1 설계개요

수도권 1단계 단선구간 복선화를 위한 노선은 복선화 가능노선 검토와 관련기관 협의를 거쳐 종합적으로 검토한 결과 터널공법이 타 공법에 비해 경제적 측면에서 다소 불리 하나 시공, 유지관리, 각종 인·허가 및 향후 용수의 안정적 공급을 고려하여 터널 공법으로 결정하였다.

터널공법은 대상지반의 지질과 종단선형, 터널의 사용목적, 공사주변 환경 및 시공연장에 따라 적절한 공법을 검토하였으며, 굴진공법은 본 계획노선이 도심지를 통과함과 동시에 경제성, 사업의 시급성, 시공성 및 환경적인 측면을 감안하여, T.B.M(Tunnel Boring Machine)공법을 채택하였다. 터널이 통과하는 지점은 최대곡선반경 500m, 상향 경사 5/100, 터널 저면고를 기준으로 한 상부까지도피는 최소 29.1m, 최대 60m이며, 상시 지하수위는 지표하 약 12m이다. 터널단면은 직경이 3.4m로써 굴착 완료 후 터널 내에 강관(D2800mm/m)을 부설하고, 터널과 강관 사이는 콘크리트로 충전하도록 되어있다. 또한, 터널의 막장 암반 분류는 RMR방법을 적용하였

으며, 취약구간에는 록볼트, 슛크리트 및 강지보재를 부분적으로 설치하도록 설계되어 있다.

2.2 TBM장비의 총족조건

2.2.1 노선편차 및 터널구배

계획노선과 경사로부터 최대오차가 8cm/30m 이하의 범위에서 허용하고 경사 보정은 120m이하에서 수행하였다.

2.2.2 장비의 구비조건

- (1) 굴착구간 암반(질)과 경사에 적절한 장비
- (2) 지시된 구경으로 굴착할 수 있는 능력
- (3) 커터헤드 후면에 즉시 지보 설치가 가능한 설비
- (4) 굴착 막장에서 Fore Poling과 선진 시추조사 가능 및 작업공간 확보가 가능한 장비조합
- (5) 전기계통에 의한 누전방지 및 분진 집진장치 설비

2.2.3 현장투입 TBM장비의 제원

- (1) 기종 : A.T.B35HA
 제작사 : VOEST ALPINE(AUSTRIA)
 제작기간 : '91. 2~'92. 2(1년)
 장비가격 : 100억원(본체 60억, 백업설비 40억)
- (2) 장비제원 (표 4)

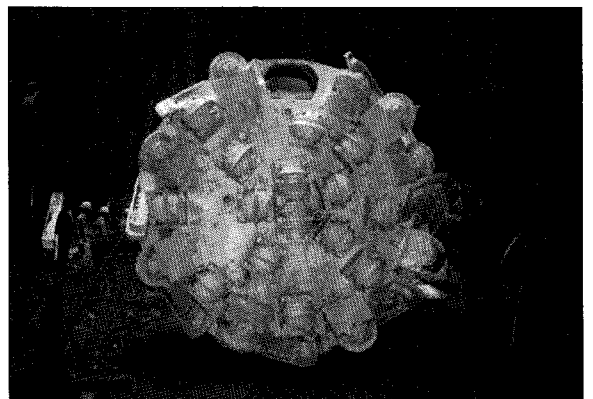


사진 1. TBM 본체 헤드부

표 4. 장비제원

구분	<ul style="list-style-type: none"> • TBM본체(Main Body) 길이14m, 중량 190톤 	<ul style="list-style-type: none"> • Back-up 길이 240m, 중량 230톤
제원	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착직경:3.5m • 회전수:12.5rpm • 굴착토오크:6,280(평균), 7,850(최대) • Stroke:1.5m • Cutter:26ea(C:4, F:15, G:7) → 사진1참조 • 구동모터:240Kw×4ea • 곡선반경:150m(Back-up:300m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Skid Undercarriage (L=48m, Wt=42ton) R/B드릴, 콘베이어, 집진장치, 운전실 • Supplyplatform (L=92m, Wt=74ton) 유압장치, 변압기, 케이블드럼 • Loading platform (l=100m, Wt=74ton) 버력장치, 송기팬, 스위치 램프

2.3 TBM 시공

2.3.1 보조공법의 설계

터널 막장 상부는 굴착과 동시에 삼축응력 상태가 일축응력 상태로 변화되면서 이완현상이 발생하기 쉬운 지점 이므로, TBM 굴착도중에 불량 지층구간이 출현할 경우에 지보재 설치 전까지 막장의 자립성을 향상시키기 위하여 다음과 같은 보조공법의 적용이 필요하다.

(1) 선진 그라우팅

암반의 강도 및 변형 등 역학적 성질을 개량하고, 암반 내 침투류의 억제 목적으로 터널 굴착시 파쇄대나 대수층에 이르러 누수가 예상될 때 막장 전방에 굴착 이전에 미리 시행하는 주입공법이다

(2) 휘폴링

막장 전방의 지반을 보강함으로써 국부적인 과대굴착(붕락)을 방지하기 위해 강지보공을 지지점으로 하여 막장 상부에 강관 파이프를 방사상으로 삽입(정점을 중심으로 120° 범위)한 후 모르타르를 주입 또는 록볼트를 경사지게 설치하여 막장 천단부를 보호하는 지반보강공법이며, 당 현장에서는 강관 파이프를 사용하였다.

2.3.2 선진 시추조사

(1) 문제점

국내에 반입되어 있는 TBM장비에는 선진 시추조사용 드릴(Prove Drill)의 장착이 곤란하거나 장착되었던 경우도 코어 회수의 곤란 등 전방의 지질분석에 대해 신뢰성과 시공성이 결여되고 있다.

(2) 개선대책

1) 굴착 중 Head 직후방의 트레일러에 이송되어 나오는 암 버력의 편석 상태 및 강도 등을 관찰하고 TBM 조종실의 각종 계기판 (Advance Cylinder Pressmeter)에 의한 굴착압력과 굴착속도, 숙련공의 경험에 의한 판단 등의 자료를 종합하여 막장전방의 암질 상태를 분석해야 한다.

2) 암질 불량구간의 규모가 클 것으로 예상될 때 터널 굴진 방향으로 퍼져나가는 음파신호가, 파쇄대 지역과 지층변화로 인하여 일어나게 되는 일련의 암강도의 변화에 따라 반사되는 과정을 음파회수기로 회수하여 소프트웨어로 분석함으로써 진동속도의 변화에 암질 상태 추정이 가능한 TSP(Tunnel Seismic Prediction) 탐사법 적용이 필요하다.

2.3.3 보조공법 적용

(1) 선진 그라우팅 및 휘폴링

TBM 장비구간의 공간 협소로 부피 큰 고성능 장비의 진입이 어렵고, 선진 시추조사용 드릴(Prove Drill) 장착 등이 곤란하므로 별도의 우회 터널을 굴착하지 않는다면, 소형 인력굴착장비(Leg Drill 등)에 의존할 수밖에 없으며, 이 경우에도 막장부근에서 작업수행 공간의 부족으로 효과적 선진보강 효과를 기대하기가 어렵다.

(2) 대체공법 적용

1) 와이어매쉬 및 슛크리트 보강

■ 기대효과

터널 굴착직후의 낙반 발생을 방지하고, 연암이나 토사구간에서는 휨응력 및 축력에 대한 저항성을 증가시켜 지반 강도의 약화를 방지, 요철부위를 충전하여 응력집중방지, 연약층의 보강 및 공동부분 파

복으로 풍화를 억제, 용수와 미립자 유출방지 등의 효과가 있고 주변 틈이나 균열 등에 전단저항을 부여함으로써 터널벽면 부근에 아칭 효과를 기대할 수 있고, 또한 주변의 틈이나 균열 등으로 지반의 자립성이 없는 지층으로서 다른 지보재와 병용하여 자립성 확보에 매우 효과가 높다고 판단하여 표 5와 같이 TBM터널의 슛크리트 타설계획을 수립하였다.

2) 낙반발생 상황별 대처방안

표 5. TBM터널의 슛크리트 타설계획

적용 Type		Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
Wire- Mesh	설치범위	국 부 적	천단에서 좌우 50° 범위	전단면
	타설범위	국 부 적	상부 반단면	전단면
Shotcrete	타설두께	낙반, 여굴충진	5Cm	10Cm

표 6. TBM 터널의 낙반발생 시 대처방안

구분	1안	2안	3안	4안	
시행 방법	TBM 후진 ↓ 막장면 S/C ↓ TBM굴착	TBM후진 ↓ 막장면 S/C ↓ 낙반상부천공 ↓ Backfill Grouting ↓ TBM굴착	TBM후진 ↓ 낙반상부보강 (강지보, R/B, S/C) ↓ TBM굴착	TBM후진 ↓ 우회갱 굴착 ↓ Steel Rib설치 ↓ S/C 타설 ↓ TBM통과후 굴착	
	적용 대상	소규모 낙석, 단층 파쇄대 통과시 적용	대규모 붕락 발생시 적용	T.B.M Jamming 시 적용	
	비고	소규모 낙반시 효과적		시공성 저하	우회갱 굴착시 지반이완에 따른 추가낙반 우려
	※ 1. 헤드컷터의 정비(Bit교환 등)통로를 통해 헤드전방 작업시 환기 및 버력처리의 곤란 및 사고 시의 응급조치가 어려워 별도의 안전관리 대책이 필요. 2. 장비를 후진해야 할 경우 기 설치된 Steel Rib에 대한 훼손 방지 대책을 수립.				

불안정한 지층구간 굴착 시 발생할 수도 있는 낙반 및 대량용수 유출 등으로 TBM 굴진에 장애발생 시에 대비하여 표 6과 같이 낙반 양상에 따른 대처계획을 사전수립했다.

2.3.4 TBM 굴착시공

당 공사구간의 터널 총 연장 3,900m 중에 당초 기계굴착으로 설계된 3,914m를 TBM으로 순조롭게 2,842m를 굴착하여 월 평균 278m의 굴진 속도를 보였으나, '99. 4. 6 지상부가 함몰되는 붕락사고가 발생하여 잔여구간에 대한 추가 지질조사 후 터널 굴착공법을 변경하기에 이르렀다.(사진 2)

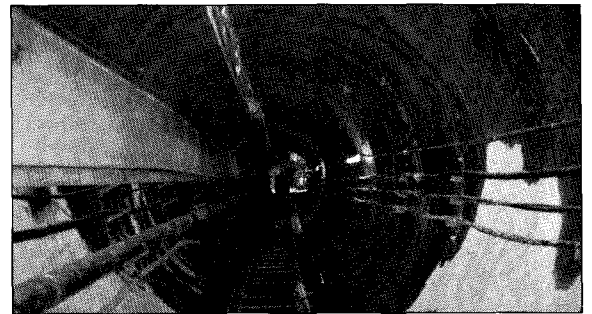


사진 2. TBM으로 굴착한 터널전경

3. 터널 굴착공법 변경

3.1 터널 상부 지반함몰 발생

3.1.1 함몰발생 개요

(1) 발생 위치 :

현충로 노량진 수원지에서 한강철교방향 한강대교와 연결된 우회류 연결(램프)도로 종로 지점 (터널 총연장 3.9km중 2.8km지점)

(2) 발생 원인

투수성 큰 하상 충적층의 심도가 깊고 지하수위가 매우 높아 상재하중의 영향이 크게 작용할 뿐만 아니라 붕락구간의 압질은 흑운모 편마암 층으

로써 터널의 안전성을 저해시키는 불연속면의 방향성이 어게인스트 딥(Against Dip)을 보이고 막장에서 관찰할 수 없는 터널 천단 지층내부의 판상절리 등이 복합되고, 한강주변 지층에서 자주 보이는 단층파쇄대와 불연속면 틈새에 협재되어 있는 흑연층 등이 경면(Slicken Side) 역할을 하여 자립성이 저하되어 순간적으로 붕락이 발생된 것으로 추정된다.

표 7. 복구공사 현황

구분	지반보강	갱내보강	도로
보강 범위	<ul style="list-style-type: none"> 터널상부(암반구간) B10.5m×L10m×H10m 도로하부(지표구간) B10.5m×L10m×H6m 	<ul style="list-style-type: none"> 붕락부 보강 이완부 보강 L≒8m 	<ul style="list-style-type: none"> 도로복구 옹벽복구 L≒8.4m
보강 방법	<ul style="list-style-type: none"> 차수 및 보강그라우팅 -우레탄 차수(14공) -이중관(급결)차수(14공) -지반보강(34공) 	<ul style="list-style-type: none"> 갱내 낙반제거 강지보설치 -ctc.0.5m×16조 모르타르 채움 압밀그라우팅시행 	<ul style="list-style-type: none"> 도로포장 옹벽설치 가드레일 설치 L형측구 설치

3.1.2 단계별 복구공사 수행

(1) 응급복구(지상부)

- 1) 피해현황 파악 및 보고
- 2) 도로부 그라우팅 및 아스콘 재 포장
- 3) 붕락부 지질조사 시행 및 원인분석
- 4) 조사결과 분석에 따른 복구대책 수립
- 5) 복구공사 시행 (차수 및 보강 그라우팅)

(2) 터널내부 복구공사

- 1) 복구 1단계 (처리공사)
 - 가) 버력 일부 제거 및 Steel Rib 반단면 설치 (Anchor고정)
 - 나) S/R 상부에 철판(50×50×4.5) 부착
 - 다) 붕락 압편 1 단계(50cm) 제거
 - 라) Rock Bolt설치 및 2번째 Steel Rib 설치
 - 마) 상기 과정을 반복하여 붕락 구간을 통과
- 2) 복구 2단계 (보강공사)
 - 가) 천단부의 철판과 지반과의 틈은 모르타르 채움을 시공
 - 나) 붕락부위 그라우팅 실시
 - 다) TBM 이동 후 하부 반단면 보강 시행

각에서 15m 이상 터널을 이격(그림 1, 그림 2 참조) 시키고, 터널 상부의 암반 최소두께 7m(소요두께 5m, 여유 2m)를 확보하여 터널의 안전성을 도모하고 터널 상부의 퇴적 자갈층내 한강하저 지하수 유입방지를 위한 지반보강공사를 할 경우 필요한 토피고를 확보하기 위하여 표 8과 같이 노선을 일부 조정하였다.

표 8. 터널노선 조정결과

구분	기준	노선조정		대책
		당초	조정	
한강철교의 안정성	터널과 15m 이격	8.0	16.5	안전성 확보
터널상부 최소암반 두께 확보	터널상부 암반두께 7m 확보	1.5	2.0	터널상부 보강 터널천단 경사조정

3.2.2 잔여구간 지질조사 결과

터널 잔여구간에 대한 추가 지질조사(시추조사 14공, BIPS 7공, TSP 1개소) 결과(표 9 참조) 터널 잔여구간 전역이 한강변에 위치하여 터널굴착이 불리한 조건으로서 당초 조사결과에 비해 수많은 불연속면(단층, 절리, 파쇄대)과 지층의 기복이 심하고, 특히 2-1구간(한강철교~노량진 2수원지 부근)은 대단층에 기인한 함몰대로서 터널 및 상부 주요 구조물(한강철교 및 올림픽대로)의 안전성 확보를 고려할 때 터널 노선의 일부 조정과 TBM터널을 NATM터널로 변경하는 등 터널굴착공법의 재검토가

3.2 터널 노선 조정

3.2.1 노선조정 필요성

한강철교(교각, 교대)의 안전성을 확보하기 위하여 교

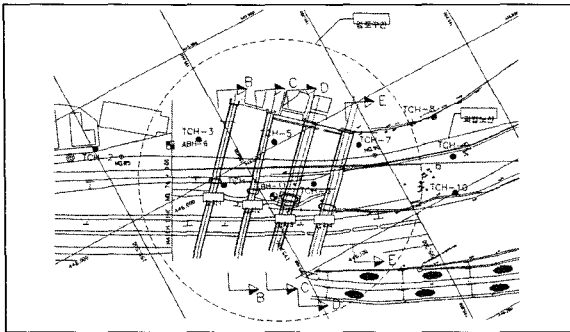


그림 1. 한강철교(교대, 교각) 안전성 검토구간 평면도

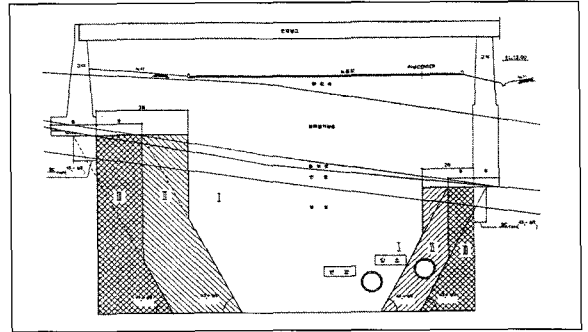


그림 2. 한강철교(교대, 교각) 안전성 검토구간 단면도

표 9. 잔여구간 지질조사결과 요약

구분	1구간		2구간		
	(현위치 ~한강철교)	2-1구간 (한강철교)	2-2구간 (올림픽도로)	2-3구간 (여의도생강)	
조사공:14공	6	4	-	4	
지질현황	· 전역에 하상 총적층(미고결 퇴적층)이 분포				
	· 주단층대인 한강과 인접하여 형성된 수많은 소규모 단층대를 따라수계발달(전구간이 대체적으로 불량)				
	· 호상 편마암이 기반암으로 전역에 걸쳐 분포하고 부분적으로 안구상 편마암과 성영맥이 존재				
	매립토	0.3~2.8	1.0~8.3	올림픽도로	0~3.9
	퇴적층	10.0~18.7	1.22 ~ 28.7	교통차단	10.3~16.5
	풍화토	0~6.7	2.3~4.3	불가로	0~2.8
	풍화암	0~9.9	1.5~21.3	미시행	0~6.0
연암	1.0~8.0	0.4~14.2		0~13.9	
경암	0~17.3	0~1.3		2.0~17.5	
RMR	Ⅲ~Ⅳ~Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅱ~Ⅴ	
조사공:7공	4	3	-	-	
BIPS 조사	절리방향	N16-66E37 -68NW	N14-53W 140-54NE	-	-
	절리와 터널 노선과의 방향평가	Fair	Fair	-	-
TSP 탐사	탐사범위	200m	-	-	-
	Event	14개소	-	-	-
탐사	암질상태	불량구간3개소 (약100m)	-	-	-

표 10. 구간별 시공여건 검토

구 간	굴착 공법	종단 선형	검 토 내 용
① STA2842-3170 (L=328M)	TBM	0.9%	· T.B.M 굴착이 가능한 경사를 고려 ②구간과의 종단선형을 위하여 하향 경사 · 기존 터널보다 STA.3170에서 3.0M 깊다.
② STA 3170-3240 (L=70M)	NATM	4.5%	· 터널굴착이 가능한 지질조건을 고려하여 종단 선형을 6M 하향조정 · 기존터널 선형보다 6M깊다.
③ STA 3240-3904.3 (L=664.3M)	NATM	0.15%	· 출구 수직구가 NATM 터널의 시점부 이므로 터널굴착시 배수등을 고려하여, ②구간 Level 보다 약 1M하향 구배 적용 · 기존터널 보다 종단고가 7.6M정도 깊어짐. · 기존 수직구에 7.6M정도 추가 굴착이 필요

필요하다고 판단되었다.

3.3 터널 잔여구간 굴착공법 검토

3.3.1 검토내용 일반

터널 잔여구간의 지층조건 및 시공여건을 고려한 검토 내용은 표 10과 같다.

3.3.2 상부보강 방안

(1) 현황

터널의 중심선형이 노들길 녹지축 도로 끝에서 약 9.8m자리에 위치하고 있으며, 추가지질조사 결과에 의하면 Sta.No.85+00 지점은 연·경암층이 7m이하로서 터널상부 지층이 취약하고, 한강철교~올림픽대로 램프진 입구구간으로서 녹지 내 6개의 대형 상수도 관로와 5개의 변실 및 선형확인이 안된 우·오수관이 매설되어 있으며, 지질조사결과 대단층에 의한 함몰대로서 터널 굴착 심도 하부까지 풍화대 지층이 분포되어 있어 자립성이 불량하며 상부 미고결 퇴적층(모래 자갈층)을 통한 대량 출수가 우려되어 다음과 같이 보강공법을 검토하였다.

(2) 보강방안

1) 지상부에서 그라우팅 시행검토

- 지상부에서 그라우팅 시행 시는 노들길 전 차로를 일시 점용하여 구간별 천공 및 주입작업이 이루어져야 하므로, 이로 인한 교통체증으로 관계기관 협의가 곤란하다.
- 지표에서 13~17m구간에 조립의 자갈모래층에 분포되어 있어 천공 시 Rod의 선형 굴곡발생이 예상되며, 더욱이 지장물을 피해 천공 각 약 30° 정도로 경사천공의 실시가 불가피하여 터널의 보강범위를 벗어날 우려가 있어 보강효과가 미흡하다.
- TCH-2지점은 과거 하상(Channel) 모서리부로서 하천측 경사각이 약 30°를 이루는 것으로 추정되어 실제 터널 중심에서의 풍화토 분포층은 지질조사

결과보다 심도가 더 깊어져서 주입범위 및 주입심도의 재검토가 필요하다.

2) 현장타설 말뚝에 의한 지표보강 검토

- 직경 약1m정도의 천공을 하기 위해서는 천공비가 고가인 특수장비가 필요하나 일반적으로 사용되는 T-4를 이용할 경우 최대 굴착 경은 500m/m로서 약 6열 천공이 필요하여 비경제적이다.
- 대구경 천공장비의 경우 경사 천공이 불가능하다.
- 지장물 저촉부위(약 60m정도 예측)는 경사 천공이 안되므로 콘크리트 파일체 형성이 불가하며, 1구간에서 검토한 바와 같이 경사 그라우팅에 의한 보강 효과 기대도 곤란하므로 1구간에 대한 지표보강은 적용이 곤란한 것으로 판단되었다.

3.3.3 굴착공법 변경검토

TBM에 의한 터널굴착 중 발생된 지반함몰원인 분석 및 잔여구간의 정밀조사 결과 한강과 인접한 준 하저구간으로 압피복이 얇고 암질 상태도 불량하며, 특히 잔여구간 중에는 한강철교, 올림픽대로, 유원아파트 등 주요 시설물들의 밀집구간으로 기존 TBM공법에 의한 굴착가능 여부 및 공법변경을 검토하였다.

(1) TBM 방식

기 투입된 TBM 굴착장비를 이용하여 잔여구간 중 742m를 1방향으로 굴착하고, 320m는 인력 확폭한다. 이것은 풍화토 지역을 통과하는 측벽부를 인력으로 확폭하여 강지보재(간격 50cm)를 설치하고 터널 상부에 찬널 또는 강판으로 보강한 후 TBM으로 굴착하는 것으로 필요시 막장부에서수평천공 후, 선진 그라우팅을 실시한다.

이 방식의 장점은 한강철교구간 및 올림픽대로 구간 등 암질이 양호한 구간의 굴착이 용이한 반면, 경제성 및 소요 공기 면에서 NATM보다 불리하고, TBM 선단부 보강이 곤란하며, 지반불량구간 통과 시 터널보강(확경, 천공)에 따른 시간경과로 터널 및 상부 구조물 안정성에 불리한 단점이 있다. 또한, 하향 구매에서 TBM 후진이 곤란

하여 용출수 유출시 장비 침수의 우려가 있고, 버력반출용 대차 제동장치의 보완이 필요하다.

(2) TBM+NATM 혼용방식

이 방식은 양방향으로 TBM과 NATM을 혼용하는 방식으로 굴착하고, 굴착길이는 TBM이 160m, NATM이 755m, 인력 확폭이 150m이다. TBM 장비해체 및 반출(확개)은 한강철교의 안정성을 고려하여 터널 출구 수직 구로 반출한다.

이 방식의 장점은 한강철교구간의 안정성이 확보되고 암질이 양호한 TBM구간 굴착이 용이하며, NATM구간의 지질변화에 따른 대응이 용이하고 암질이 불량한 구간의 조속한 보강이 용이하다. 그러나, TBM을 NATM구간으로 반출하기 위한 NATM구간 단면확대(D=3.4m~4.2m)에 따른 공사비가 증가되고, TBM 선단부 보강 난이 및 지반불량구간 통과 시 터널보강(확개, 천공)에 따른 시간 경과로 터널 및 상부 구조물 안정성이 불리하다. 또한 NATM구간 암질이 양호한 구간의 발파굴착에 따른 진동 및 소음으로 민원발생의 우려가 있다. 마지막으로 이 방식은 터널 관통 시까지 TBM 장비 대기로 관리비가 증대(16개월)되는 단점이 있다.

(3) NATM 방식

NATM방식은 TBM장비를 해체하여 반출하고 잔여구간을 양방향으로 NATM굴착하는 것이다. 이 방식의 장점은 경제성 및 소요공기 면에서 유리하며 지질변화에 따른 대응이 용이하고, 암질이 불량한 구간에 대한 조속한 보강이 용이하다. 반면, 한강철교구간 무진동 굴착 공사비가 증가되고, 암질이 양호한 구간 발파굴착에 따른 진동 및 소음으로 민원 발생이 우려되는 단점이 있다.

(4) 쉴드(Shield) 방식

1) 굴착 가능 토질

기존 Shield 공법은 연약지반에서 주로 사용되어 왔으나, 최근 복합지질에서의 쉴드 사용이 보편화되면서 현장 토질여건 변화에 따른 적용이 가능한 전 지질 대응형(토사~암) 쉴드가 많이 보급되어 쉴드 기종에 따

라 암 구간에서도 적용 가능하다. (최대 1800kg/cm²)

2) 굴착경 및 쉴드 본체길이

국내에서 보유중인 쉴드 중 경암까지 굴착이 가능하고 타현장에 투입되지 않은 직경 D=3.55m, 장비 보유중이며 본체길이는 7.2m로 조사되었다(표 11 참조).

3) 쉴드의 반출방법 검토

가) 쉴드 굴착구간으로 분해 반출

- 쉴드 굴착직경은 3.5m이나 굴착과 동시에 설치되는 후방 세그먼트의 내경은 2.9m로서 반출이 불가하여 TBM을 기 굴착구간으로 반출해야 한다.

- 기존 굴착단면이 3.5m이고 Shield TBM의 외경이 3.55m로서 기 굴착된 터널단면의 추가 굴착이

표 11. 국내의 Shield 보유 현황

보유회사	규격	제조 회사	수량	사용여부	비고
동아지질	3.55M ASAKI	KAW	2	-	일본, Hard Rock
동아지질	3.25M	LOVAT	1	사용중	캐나다, Soft Rock
동아지질	4.41M	KAW ASAKI	1	-	일본, Soft Rock
동아지질	2.30M	KAW ASAKI	1	사용중	일본
한국중공업	3.51M	HERREN KNECHT	1	사용중	독일
남광토건	3.65M	LOVAT	1	-	캐나다
남광토건	3.65M	HITACHI	1	-	일본
대림산업	5.00M	LOBBINE	1	사용중	미국
범양건영	3.25M	LOVAT	1	-	캐나다
삼성물산	4.35M	MITSU BISHI	1	-	일본
삼성물산	5.03M	KOM ATSU	3	사용중	일본
선경건설	3.55M	VOEST ALPINE	3	-	
죽림건설	3.30M	KOMA TSU	1	사용중	
범양건영	3.55M	LOVAT	1	사용중	
동양 굴착산업	3.05M	LOVAT	1	사용중	

불가피 하다.

- 터널 내 가설물(배선, 급배수관, 송풍관 등)의 해체 및 재설치가 필요하다
- 쉘드 터널 굴착 후 약 2,800m를 추가 굴착하면서 진행해야 하므로 반출에 소요되는 공기가 추가 소요되어 강관부설 공중이 지연된다.

나) 수직구로의 반출

- 쉘드 본체가 2개로 분리가 가능하므로 직경 약 5m정도의 수직구 굴착 후 크레인으로 반출이 가능하나, 수직구 굴착가능 위치를 선정하기 위해서 터널 노선의 추가변경이 필요하다.

4) 쉘드 터널 굴착시 상수관 부설 시공성 검토

- 세그먼트 설치 후 굴착 내경이 약 2.9m로서 2,800m/m 상수도용 강관삽입 불가하다.
- 강관을 삽입하지 않고 세그먼트 자체를 도수관으로 이용 가능성 검토가 필요하다.

5) 쉘드 공법 검토 결과

쉘드 TBM 장비는 토질 및 계획심도 등에 따라 주문 제작되어지는 1회용 개념의 장비로서 신규 구입 시 설계·제작 반입되는데 약 6개월이 소요되므로 신규 제작이 곤란하고, 현재 국내 보유 장비 중 잔여굴착구간과 주변여건 굴착경 및 지질 상태가 유사한 현장에 적용되었던 장비를 선정하는데 한정적이며, 세그먼트 설치 후 강관을 삽입이 곤란하여 강관 미부설시 터널 내부의 최대 수압이 약 14kg/m²로서 세그먼트

자체의 지수 방법으로는 수압에 견디지 못하므로 누수가 발생하므로 적용이 곤란할 것으로 판단되었다.

(5) 공법 채택

수도관 복선화 현장은 한강하저를 통과하며 상부에 주요 시설물(한강철교, 올림픽대로)이 시설되어 있고, 지질변화가 심한 지형임을 감안하여 지질변화에 따른 대응이 용이하고 암질이 불량한 구간에 대한 조속한 보강이 가능할 뿐 아니라, 시공경험이 많고 경제성 및 시공성 면에서도 유리한 NATM공법을 채택하였다. 공사장부근의 민원해소와 63빌딩의 수족관에 대한 진동억제 등을 감안하여 SUPEX-cut발파공법을 적용하여 안전하게 수정마제형 단면으로 굴착하고 있다.(사진 3 참조)

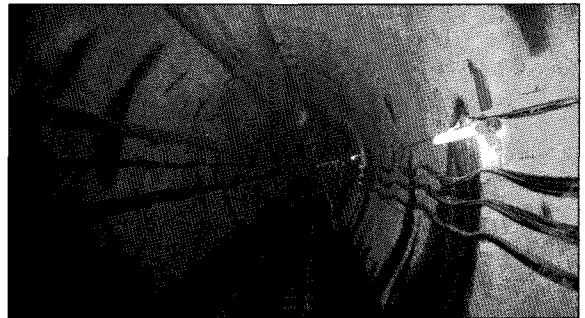


사진 3. 수정마제형 터널 단면

4. TBM장비의 반출 방법

4.1 수직구 설치에 의한 반출 검토

표 12. 굴착공법 변경에 따른 지보패턴

지보체계 Rock Bolt	TYPE-I Random	TYPE-II System	TYPE-III System	TYPE-IV System	TYPE-V System
(ϕ 25, L=2,500mm)		2-3개/1.2m	3-4개/1.2m	5-6개/1.0m	4-5개/0.8m
Steel Rib(100×100)	-	-	-	1Set/1.0m	1Set/0.8m
Fore-poling (ϕ 31×4500)	-	-	-	-	○
Pre-Grouting (L=4500)	-	-	-	○	○

4.1.1 설치 가능 위치

(1) 봉락구간 이전 녹지측

녹지폭이 약 10m로서 수직구를 설치할 경우 올림픽대로 및 노들길 점용이 불가피하고, 녹지내에 3개의 대형 상수관로 및 우·오수 암거의 지장으로 수직구 설치가 불가하다.

(2) 한강대교~올림픽대로구간의 녹지측

- 6개의 대형 상수도관로 및 기타 우·오수 암거가 산재하여 매설되어 있어, 수직구 설치를 위해 지장물 저축이 최소화되는 올림픽대로 진입 램프 측에만 설치 가능하다.
- 올림픽대로 진입 램프측에 설치할 경우 도로를 약 10m정도 점용하게 되어 노들길에서 여의도 및 올림픽대로 진입차선이 폐쇄되어 교통소통에 지장을 주므로 도로 점용 허가 관련 협의가 곤란하다.
- 우기시 하천수의 범람으로 인한 굴착작업의 지장을 최소화하기 위해 한강 계획 홍수위인 EL.16m까지 부지 성토가 필요하며, 1단계 광역상수도 관로의 경우 현 지반고가 EL.14m 관로 토피고가 10m로서 부지계획고인 EL.16m까지 성토시 관로 토피고가 12m가 되어 토압에 따른 소요 관 두께를 검토한 결과 최소 $t=15m/m$ 이상이 되어야 하나 현재 매설된 상수도관의 관두께는 14m/m로서 추가성토 없이도 관이 노후화 된 것을 고려할 때 중장비의 운행(수직구에서 TBM장비 반출시 250톤 크레인의 운행과 TBM장비 부품의 중량으로 인한 상재하중 증가 및 진동으로 지중에 매설된 지장관로의 안정성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단)으로 인해 관로 파손사고 발생이 우려된다.

4.1.2 수직구 흠막이 공법

모래 자갈층이 분포되어있고, 한강 인근의 지하수 영향을 고려하여 치수효과와 흠막이벽 소요 강성을 기대할 수 있는 지중연속벽(Diaphragm Wall) 공법의 적용이 필요하다.

4.1.3 설치 규모

- (1) TBM반출시 TBM본체는 Gripper의 전진동작에 의해 헤드부에서 10m지점의 Gripper Unit 및 후미부의 컨베이어 벨트가 반출위치인 수직구까지 Gripper 가동 완료상태에서 도달되어 있어야 하므로 TBM본체길이인 15~16m가 필요하다.
- (2) 수직구내에서 부품해체 시 반출소요시간이 장기화되고 인양을 위한 중장비의 효율이 저하되어 주요 세트별 분리반출 후 부품해체는 지상에서 분해하는 경우를 고려하면 부지 소요면적 2,000㎡가 필요하다.

4.2 우회갱 굴착에 의한 반출 검토

- (1) 우회갱 굴착 시 TBM 장비의 손상을 방지하기 위해 인력굴착에 의해 우회갱을 설치해야 하므로 공기지연 및 공사비가 증가한다.
- (2) 장비의 진출입을 위한 우회갱 단면을 확보하지 못할 경우 인력에 의한 NATM 굴착이 이루어져야 하므로 비경제적이다.
- (3) 터널 봉락 복구구간이 우회갱 굴착부위에 포함되므로 터널의 안정성에 유해하다.
- (4) 전원공급 설비를 추가투입하기 위해서는 기 굴착구간 강관 부설을 시행할 수 없으므로 NATM 굴착을 양방향으로 시행하여 공기 최소화가 필요하다.

4.3 NATM 굴착구간으로의 반출 검토

- (1) NATM 시공구간의 TBM 반출통과를 위하여 전 구간(예상 NATM 시공구간 거리 : 700M)의 터널 바닥에 TBM이 슬라이딩 전진이 가능하도록 터널 바닥의 잔류 버력을 제거 후, 레일과 슬라이퍼를 용접 설치한 다음 콘크리트를 타설 보강하여 컷터 헤드의 슬라이딩 전진 시 레일사이 가 벌어지지 않도록 조치하여야 한다.
- (2) NATM 시공구간의 매35m 간격마다 터널의 좌우양

측 벽체에 TBM 견인용 디비닥 바(Diwidag Bar) 설치용 브라켓트를 제작 설치하여야 한다.

(3) TBM 이동에 필요한 전원이 이동구간 내에서 계속 공급될 수 있어야 한다.

(4) TBM 이동시 수압 시스템 가동이 필요하므로 수압 오일 클러에 계속적인 냉각수 공급을 필요로 한다.

(5) NATM 시공구간에 설치되는 강지보의 크기는 시공 오차를 감안하여 TBM의 Cutter Head 통과 시 충분한 여유로 통과할 수 있는 크기의 것이라야 한다.

4.4 터널 확장에 의한 반출 검토

4.4.1 확개 단면 규격

(1) 높이 (H)

터널 본체에 부착된 부속설비를 해체하여 후방의 부속 설비 운반용 대차에 적재하기 위하여 종방향 이동이 가능한 호이스트 크레인(15ton×4대)을 설치 및 TBM 상부 H형강 지지대 하부공간의 여유가 크레인의 길이 1.0m, TBM 해체에 따른 작업공간 0.7m를 포함하여 1.7m가 필요하므로 상부 H형강의 높이 1.0m를 고려하면 H=2.8m가 소요된다.

(2) 연장 (L)

TBM의 본체길이가 약 12m로서 해체된 부속설비 운반

을 위한 대차진입을 위하여 대차진입구간 3m을 고려 시 L= 15m가 소요된다.

(3) 폭 (B)

TBM 가동을 위한 동력 공급설비는 약 120~130m후방의 Back-up 설비용 대차에 설치되어 있으며, 터널 확개 위치는 검토결과에 의해 TBM 후방 70m지점에 설치가 가능함에 따라 TBM본체의 해체를 위해서는 동력공급을 위하여 TBM의 가동에 의한 후진이 불가피하므로 터널 진행방향의 좌측 확폭 구간에 케이블 드럼 및 변압기를 임시 가설하였다.

TBM 본체의 해체를 위해서는 본체의 부속설비가 콘베이어 벨트하부에 위치하고 있어 콘베이어 벨트를 우선적으로 해체하여야 하나, 운반용 대차가 확개부로 진입이 3m밖에 되지 않으므로 콘베이어 벨트의 반출이 곤란하므로 터널진행방향의 우측 확폭부에 임시 적치하였다가 본체 부속설비 해체 완료 후 반출되어야하고, 작업인원의 출입을 위하여 확폭이 필요하다. 또한, 동력설비의 임시 가설적치, 콘베이어 벨트의 적치, 작업인원의 진출입 통로 확보를 위하여 좌·우측 각각 1.8m 정도의 확개가 필요하므로 B=8.0m 소요된다.

4.4.2 확개 위치

표 13 참조

표 13. 확개 위치 검토

구분	1안 Sta.No. 77	2안 TBM커터헤드 후방	3안 TBM커터 헤드 전방
개요	현막장 후방 160m지점에 확개후 Back up 설비 후진시키면서 해체	현위치에서 본체와 프롬 드릴사이 공간에 확개	현위치에서 TBM후진 후 커터헤드 전면에서 확개 굴착
검토의견	<ul style="list-style-type: none"> 터널봉략부 TBM 헤드통과시 Steel Rib 및 Rock bolt 철거 및 헤드전면부에서 Steel Rib 재설치 (50cm간격) TBM추진시 터널봉략 보강구간 측면에 Gripper를 지지해야 하므로 봉략부 터널안정검토가 필요 기 굴착구간중 확개 위치까지 약 200m Rock bolt 해체 및 재설치 	<ul style="list-style-type: none"> 본체 부속설비 지장으로 작업 공간이 협소하므로 부속설비 해체가능 여부에 대하여장비 소유자와 협의 필요 확개부 인력굴착 및 인력 버력처리로 공기 지연 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착에 따른 작업공간 확보는 가능하나 TBM 헤드부 버력 반입구로 버력을 인력처리해야 하고 대차적재장소까지 인력운반하므로 공기 지연 TBM반출구로 버력처리를 위해서는 암버력 소할

4.5 검토 결과

TBM 장비 반출을 위해 수직구를 설치하는 것은 공기나 공사비로 비교시 비경제적이며 NATM 굴착을 위한 장비 진출입을 위해 우회갱 설치시 기존 터널붕락 보강구간에 우회갱이 설치되어야하나 붕락이 발생했던 단층파쇄대 구간임을 고려할 때 굴착으로 인한 추가 붕락 발생우려가 있고, NATM구간으로 장비반출시 NATM굴착기간인 약28.5개월 동안 TBM장비가 방치되어야 하므로 확갱 후 TBM장비를 반출하는 방법이 가장 타당할 것으로 판단된다.

5. NATM터널 보조공법

5.1 지반보강공법 설계

NATM 터널 굴착시 지반 압질에 따라 유입유량이 과다한 구간이 예상되며, 특히 지하수 유입시 토사 또는 가오지(Gouge) 등의 유출에 따른 주변지반의 이완영향 등, 터널 안전성에 문제가 예상되므로, 시공 시 터널의 안전성을 확보하기 위하여 그라우팅으로 지반을 보강하도록 계획하였다.

그라우팅을 이용한 지반보강범위의 산정은 시공 시 지반굴착에 따른 지하수의 유입량에 대한 허용치(5.0ℓ/min)를 기준으로 하여, 시공 시 터널 막장의 안전성이 확보될 수 있는 지반보강범위를 검토하였다. 지하수유입의 변화정도와 유입량에 대한 해석은 수치해석 프로그램인 “SEEP/W” Version3.3을 사용하였으며, 해석에 적용된 지반에 대한 투수특성은 사전 지반조사 내용 중 현장 수압시험 결과를 참조하였다.

5.1.1 경암지반 검토

(1) 일반적인 경암지반 검토

현장 수압시험결과- 경암지반의 투수계수는 평균 6.4×10^{-5} cm/sec 정도로 저투수성의 지반으로 확인되었으며, 이에 따른 지하수 유입량에 대한 수치해석결과, 시공 시 터널내부로 유입되는 지하수 유입량은 2.0ℓ/min 정도로, 별도의 지반보강 그라우팅이 불필요한 것으로 검토되었다.

(2) 투수계수가 큰 경암지반 검토

현장 수압시험결과, 일부 경암지반의 투수계수가 2.4×10^{-4} cm/sec 정도로 비교적 투수성이 큰 것으로 확인되어, 그라우팅 보강이 필요한 것으로 검토되었다. 적절한 그라우팅의 범위를 산정하기 위하여 수치해석을 이용한 보강범위에 따른 유입량 정도를 해석하였으며, 수치해석을 이용한 지하수 유입량 해석결과, 그라우팅 지반보강이 없는 원지반 상태(투수성이 큰 경암지반)에서 터널 내부로 유입되는 지하수 유입량이 약 7.3ℓ/min 정도로 검토되어 허용치 5.0ℓ/min를 만족시키지 못하였다.

따라서, 별도의 지반보강 Grouting이 필요한 것으로 검토되었으며, 보강범위가 2.0m 이상인 경우 지하수의 유입량이 2.3ℓ/min 정도로 현저히 감소하여 허용치를 만족하는 것으로 검토되었다.

5.1.2 연암 및 풍화암 지반 검토

당 현장의 연암 및 풍화암 지반의 투수계수는 파쇄된 경암지반 정도로 예상되어 터널굴착에 따른 지하수의 유입이 과다할 것으로 평가된다. 또한, 지반이 취약한 관계로 지하수 유입 시 암석입자 및 절리 틈의 토사 유출로 인하여 유입수가 증대되어 전반적인 터널의 안전성에 대한 문제가 예상된다. 따라서, 이에 적합한 그라우팅 지반보강이 필요한 것으로 판단되며, 지반보강범위별 수치해석에 의한 지하수 유입량의 평가는 다음과 같다.

수치해석을 이용한 지하수 유입량 해석결과, 지반보강이 없는 원지반 상태에서는 지하수의 유입이 과다한 것으로 평가되어, 이에 적합한 지반주입공사가 필요한 것으로 검토되었으며, 보강 범위가 2.0m 이상인 경우 지하수의 유

입 량이 1.3ℓ /min 정도로 현저히 감소하여 허용치를 만족 하는 것으로 검토되었다. 별도로, 연암 및 풍화암 지반에 대한 지반보강범위는 해석상 2.0m 정도로 유입량에 대한 허용치를 만족하나, 지반이 취약한 것을 고려하여 3.0~ 4.0m 정도로 지반보강 범위를 적용하도록 계획하였다.

5.2 터널보강의 수행단계

터널공사 수행에 있어 굴착의 진행에 따라 자립시간 내에 서의 조속한 보강공사가 이루어질 수 있도록 하기 위하여 보 강타입 변경의 세부 시행요령을 작성하고, 이를 준수하여 합 리적이고 안정된 공사를 수행하여야 할 필요가 있다.

5.2.1 현장막장 보강체계 구축

일반적 관리한계를 벗어나 야간이나 기타 불가피하게 감독관의 즉각적인 판정을 받지 못하는 상태에서 돌발적 으로 불량 암질이 출현할 경우 신속한 대처가 필요하며, 이와 같이 긴급을 요하는 구간의 보고전 선 시공이 현장막 장보강이다.

- ▶ 구두지시에 의해 응급조치를 실시하며, 선 시공 후 시 공도면과 사유서를 작성하여 익일 감리단에 제출하여 야 하며, 감리단에서는 이를 검토하고 그 결과에 따라 Round 보강을 포함한 보강작업 지시서를 발부한다

5.2.2 작업지시(Order)에 의한 보강

일반적인 소정의 절차에 의해 시행되는 보강이다.

- ▶ 굴착의 진행에 따른 암질 상태를 조사하고 그 결과에 따라 작업 지시서를 발부하며, 시공자는 발부된 작업 지시서에 의거 현장시공 후 검측을 받는다.

5.2.3 추가 보강

보강공사 완료구간에 대한 이상징후 또는 위험발생 가 능성이 발견될 경우 작업지시에 의해 추가로 실시하는 보 강이다.

6. 결 언

터널현장에서 TBM 등을 이용한 굴착공사의 수행은 굴 착단면의 안전성, 여굴 및 라이닝 물량감소, 지보재의 최 소화, 그리고 굴진 효율의 증대와 버려처리 양호 등 많은 잇점을 가지고 있음에 따라 수로터널, 통신구, 전력구 등 소규모 터널현장에서 활발히 적용되고 있다.

그러나, 암질변화에 대한 적응성이 매우 결여된다. TBM설계를 위해서는 사전지질조사를 충분히 수행하여 불량 암질구간이나 특히 암강도의 변화가 심한 지역에는 적용을 신중히 검토하여야 한다.

본 현장은 사전지질조사 결과를 기초로 TBM터널로 설 계되어 실제 3904m 터널연장 중 2,842m를 TBM에 의해 무난히 수행하였으나, 충적층이 두꺼운 암질 취약구간에 서 붕락사고가 발생하여 잔여 구간에 대한 추가 정밀지질 조사를 하였다. 조사결과 잔여구간은 대단층대와 연약지 반이 상존하며 암질 상태가 매우 불량하고, 지상부에는 한강철교, 올림픽대로, 아파트, 상수도관로 등 주요 시설 물이 있어 안전시공 상 불가피하게 NATM공법으로 변경 을 하게되었다.

여기서, 우리는 한 가지 교훈을 얻을 수 있다고 생각한 다. “뜬은 굳어도 산은 굳지 않다.” 기계화 시공의 터널기 술자들은 위의 교훈을 항시 잊으면 안 된다고 생각한다.

[약 력]

노인호

- 충남대학교 토목공학과 졸업
- 한국수자원공사 합천댐, 주암댐 참여, 한국건설관리공사 수도권 5 단계 3공구 감리단장, 수도권 1단계 복선화공구 감리단장
- e-mail : kcmcb010. chollian.com

최형규

- 충남대학교 지질학과 졸업
- 한국수자원공사 감리공단 보령댐, 용담댐 참여
- 서울 시립대학교 석사과정
- 현장전화 : 02)536-8482