

서울지하철 7호선 연장 703공구 고가하부 정거장 및 실드 TBM에 관한 시공 및 감리사례 - ②



오길영
(주)유신전문이사

4. 실드 TBM 시공사례

가. 실드 TBM 개요 및 변천사

1) 실드(Shield) TBM

• 공법개요

- 실드(Shield)라고 불리는 강재의 통을 토사지반 속에서 추진시켜 토사의 붕괴를 방지하고 그 내부에서 안전하게 굴착작업이나 복공작업을 행하여 터널을 축조하는 공법
- 아래의 시공순서를 반복해가며 <척추벌레>처럼 터널을 파나가는 공법

• 시공순서

- ① Jack으로 실드를 추진시키면서, 실드 막장부에서 1Ring분의 굴착실시
- ② 1Ring분을 추진 후 실드 후방에서 Segment라고 불리는 PC구조물을 조립
- ③ 다음 Ring을 굴착하면서, 직전에 조립한 Segment와 지반의 공극을 주입하여 충전
- ④ ①~③을 계속 반복하면서 터널시공

2) 실드 TBM 특징

안전하고 확실한 공법	지반의 붕괴나 유출수가 적다
프리허브 공법	시공이 용이하고 빠르며, 품질관리도 확실하다
동일작업의 반복	성력화하기 쉽고, 공정관리도 확실하다
환경, 공해 대응공법	노면교통, 지상구조물, 지하매설물, 소음, 진동 등에 대응
여러 조건에 적용가능	해저, 하저횡단시공, 심부(높은토압, 수압), 다양한 지반조건에 적용

3) 실드 TBM 변천사

여명기 (1825~1959)	<ul style="list-style-type: none"> • 하저, 해저, 지상구조물 및 극히 한정된 곳에서의 특수공법으로 고안/적용 - 1825년 : 영국 M.L.BURJON, 템즈강 횡단도로 터널에 세계최초 적용 - 1886년 : 최초 압기 실드공사 - 1897년 : 회전굴착식 기계굴착 실드공사 - 1938년 : 일본국철 관문(關門) 터널공사(Ø 7.0m, 주철 Segment) - 1957년 : 일본 영단(英團) 지하철 4호선(Roof Shield, 현장타설콘크리트)
도입/발전기 (1960~1975)	<ul style="list-style-type: none"> • 수저, 도로 밑에서의 시공, 지하수/연약지반 대책으로서 일반화된 단계 • 개방형 인력굴착 실드가 주체로 부분개방형이나 기계화 실드도 채용, 지하수에는 압기로 대응 - 1961년 : 일본 나고야 지하철 1호선(Ø 6.57m, 인력굴착, RC세그먼트)
이행/안정기 (1976~1990)	<ul style="list-style-type: none"> • 개방형에 의한 지반변형 문제, 심부에서의 고수압 대응, 고정밀화, 자동화 추세 • 3대 기술혁신 : 밀폐형 실드, 즉시 뒷채움 주입공법(Back Fill Grouting), 수평창성 지수재
적용/발전기 (1991~2005)	<ul style="list-style-type: none"> • 민원 증가에 의한 사회적 비용 증대 • 탈(脫) 2차 복공, 연결볼트 다양화 등 • 도심지 구간에서의 실드공법 적용 긍정적 추세
개선/혁신기 (2006~)	<ul style="list-style-type: none"> • 지상시공이 점점 어려워지고 더욱 대심도화 • 복합지층에 대응 가능한 Cutter Head 개발, 동시주입공법 개발(Back Fill Grouting) • 경쟁의 격화 : Cost ↓, 작업구의 최소화, 장거리화, 환경대응

나. 터널 기계굴착공법 비교

1) 실드(Shield) TBM 공법 VS NATM

구분	실드 TBM	NATM
개요		

구분	실드 TBM	NATM
공법개요	• 실드TBM 기계굴착 → 프리캐스트 세그먼트로 구조물 형성	• 발파 및 브레이커에 의한 굴착 → 현장 타설 라이닝 콘크리트 시공
시공성	• 지반조건 및 주변여건에 대한 제약이 작아 보강공정 최소화 가능 • 완전 기계화 굴착으로 시공효율 우수	• 굴착 시 지반변형이 크게 발생 • 지반불량 시 보강대책 필요 • 반기계화 시공으로 굴착공정 복잡
안전성	• 굴착과 동시에 세그먼트 설치로 지반변형 최소화	• 굴착 후 슛크리트 타설 및 락볼트에 의한 지반 지보로 지반변형 다소 발생
환경성	• 소음·진동 영향 미미함	• 발파에 따른 소음·진동 영향 큼

2) TBM 공법 VS 실드 TBM 공법

구분	TBM 공법	실드 TBM 공법
공법개요	• 전단면 기계굴착공법(암반용) • 굴진과 버력처리 자동화 • TBM 기계굴착으로 주변 암반자체를 지보재로 활용 • 장대터널이나 도심지 구간에서 유리	• 전단면 기계굴착공법(토사, 암반적용) • 굴착시 실드TBM 자체로 지반의 붕괴를 방지하고 지하수의 유입을 방지 • 전면부 : Cutter Head, 중앙부 : 유압잭, 후미부 : Tail Seal, 외부 : Skin Plate
굴착공정	• 굴착/버력처리 → 슛크리트 타설 → 락볼트 설치 → 강지보공 설치	• 굴착/버력처리 → 세그먼트 조립 → 뒷채움재 주입
시공성	• 전단면 기계굴착 : 속도 빠르고 정밀시공 • 굴착/버력처리 : 자동화 가능 • 암질변화가 심한 지반 : 시공성 저하 • 암질 불량구간 : 타공법 병행 불가	• 전단면 기계굴착 : 속도 빠르고 정밀시공 • 일정한 패턴으로 작업시행 : 속도연도 높음 • 구조물 근접 통과시 유리 • 장비에 따라 선행에 제한 • 지층변화가 심한 곳 : 시공성 저하 • 분할시공 불가능
안전성	• 기계굴착 : 낙반사고/지반이완 최소화 • 원형단면으로 구조적으로 안전 • 암질 불량구간의 사전예측이 어렵고, 조기보강공법의 적용이 어려움	• 실드TBM 자체 지지 : 낙반사고 없으며, 원지반의 이완을 최대한 억제 • 지반침하 및 유출에 대비한 보조공법 강구
경제성	• 비교적 고가, 여굴량 최소화 가능 • 지반자체를 주지보재로 활용 → 지보재 • 원형단면 → 라이닝 두께 ↓ • 보강량이 NATM에 비해 적음 • 부대시설 복잡, 갱의 작업장 부지 필요	• 비교적 고가, 여굴량 최소화 가능 • 토사/풍화암층 : 굴진 속도 빠름 • 장대터널인 경우 경제적 • 암질변화가 심한 곳은 강한 암질에 적합한 장비의 선택 : 초기 투자비
보강공법	• 지반자체 : 주지보재 역할 • 암반등급에 따라 보강공법 적용(락볼트, 슛크리트, 스틸립, 그라우팅)	• 세그먼트(철근콘크리트, 강재, 주철 등) • Back Fill Grouting
환경성	• 굴착분진 극소	• 굴착분진 극소
주변현황	• 무진동, 무발파로 주변피해 없으나 지반조건 불량시 함몰 가능성 있음 • 도심지 공사에 적합	• 무진동, 무발파 공법으로 주변의 피해 거의 없음 • 도심지 공사에 적합
단면형상	• 원형에 한함	• 원형이 일반적임
적용지질	• 풍화암, 연암, 경암, 중균질 암질에 적용 • 파쇄구간 및 암질 불량구간에서 불리 • 암질이 대체로 균질하고 터널연장이 긴 구간에 적합	• 토사, 풍화암층에 적합 • 지질변화가 많은 곳에서는 불리함 • 연약지반의 굴착과 동시에 안정성 확보가 필요한 곳에 유리 • 복합지층 적용가능(최대 일축압축강도 2,700kg/cm ²) • 소음, 진동 등 민원이 예상되는 곳에 유리
시공조건	• 기계사양에 따라 R=300m 이상 • 급구배 구간에서는 시공성이 극히 저하	• 기계사양에 따라 다르나 곡선반경이 큰 터널에 유리 • 굴착도 운반/배수 고려 : 상향구배 유리
주요검토사항	• 계획 노선의 정확한 지질상태 파악 • 기계사양에 따른 시공가능 노선 선정(R=300m 이상) • 장비반입 및 반출조건	• 지형, 지질, 지장물의 정확한 조사 • 기계사양에 따른 시공가능 노선 선정 • 지반안정공법 선정

3) 이수식 쉴드공법 VS 토압식 쉴드공법

구분	이수식 쉴드공법	토압식 쉴드공법
공법 개요 / 특징	<ul style="list-style-type: none"> 이수에 소정의 압력(1~2kg/cm²)을 가하여 순환시킴으로서 막장의 안정을 유지하는 동시에 굴착토의 유체수송을 하는 공법 교반장치, 송/배니장치(이수순환), 압력제어장치, 조니(調泥)장치 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착토사의 유동화를 촉진시키는 첨가제를 주입하면서 커터헤드로 굴착한 토사를 기계적으로 교반하고, 막장과 실드격벽 사이에 충만시켜 실드의 추진력으로 가압하고, 그 토압으로 막장의 안정을 유지하면서 Screw Conveyor로 배토하는 공법
장점	<ul style="list-style-type: none"> Pipe를 통한 유체수송 → 작업공간/환경 ↑, 안정성 ↑ 굴착속도 빠르고, 막장관리/압력조정 용이 커터비트, 롤러비트 등의 마모가 적다 투수계수가 크고, 수압이 높은 지반에도 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착속도가 이수식보다 빠르다 Screw Conveyor에서 배출되는 토사를 관찰할 수 있어 막장면의 지반상태 확인 가능 이수식보다 저가
단점	<ul style="list-style-type: none"> 막장의 지반상태는 굴진관리 시스템에 의해 집중관리가 요구됨 지상에 처리플랜트 설치를 위한 부지가 필요하며, 소음과 진동이 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 배토를 위한 운반설비가 필요하며, 작업환경이 이수식보다 좋지 않음 Screw가 커서 작업공간이 좁다 이수식에 비해 시공성이 떨어짐
적용 지질	<ul style="list-style-type: none"> 모든 토질조건에 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> 점성토, 사질토, 전석층, 암반 등 광범위한 토질에 적용가능

4) 국내 시공 현황

연번	공사명	발주처	공사기간	시공자 (협력업체)	연장 (m)	굴착경 (m)	기계 형식	지 질
1	광주도시철도 1호선 1공구 (금남지하상가)	광주 광역시	'00.01~'02.06	성원건설 (경번)	1,425	7,500	EPB	복합지층
2	부산지하철 2호선 230공구 (수영강 하저)	부산 광역시	'00.11~'02.02	두산건설 (경번)	840	7,300	Slurry	복합지층
3	서울지하철 909공구 (여의도)	서울 특별시	'03.07~'08.12	두산건설 (동아지질)	3,614	7,800	Slurry	복합지층
4	서울지하철 7호선 연장 703공구	서울 특별시	'04.12~'11.03	대우건설 (경번)	3,179	7,370	EPB	풍화토 풍화암
5	서울지하철 7호선 연장 704공구	서울 특별시	'04.12~'11.03	삼성건설 (동아지질)	1,204	7,320	EPB	풍화토 풍화암
6	분당선 연장 3공구	철도 시설공단	'03.10~'09.09	대우건설 (경번)	1,692	8,060	EPB	연·경암
7	인천공항철도 2단계(2-5B공구)	인천국제 공항철도(주)	'04.11~'09.12	삼환기업 (동아지질)	1,966	7,850	EPB	풍화암 연·경암

5) 쉴드 TBM 제조사

국가명	제조회사	국내 납품 실적
일본	Kawasaki	서울지하철 909공구 인천국제공항철도 2-5B공구
	Mitsubishi	서울지하철 7호선 연장 703공구
	Komatsu	철도시설공단 분당선 연장공사 제3공구
	NKK	광주도시철도 1호선 1공구 부산지하철 2호선 230공구
독일	Hitachi	서울지하철 7호선 연장 704공구
독일	HerrenKnecht	
캐나다	Lovat	

5. 서울지하철 703 적용현황

가. 공사개요

1) 쉴드 터널 공사개요

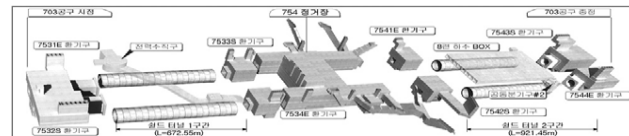


그림 43. 쉴드터널 공사 개요도

구분	터널 1 구간	터널 2 구간
터널연장	672.6m	921.5m
터널공법	EPB 쉴드(풍화대용)	EPB 쉴드(풍화대용)
평면선형	직선, R=700, 직선	직선
종단경사	-3%, -21%, -4%	+3%, -4.5%, -3%
주요 현황	<ul style="list-style-type: none"> 시점부 준의사거리 : 교통 혼잡 전력수직구와 쉴드터널 이격거리 : 128m 꿈마을 아파트 및 옥산초등학교 인접 계남고가 기초파일과 이격거리 : 6.5m 	<ul style="list-style-type: none"> 8련 하수BOX 및 공동구와 쉴드터널 이격거리 : 7.0m ~ 11.0m 공동분기구#2와 이격거리 : 3.5m 부천시청, 백화점 및 고층건물 밀집

2) 쉴드설비 배치

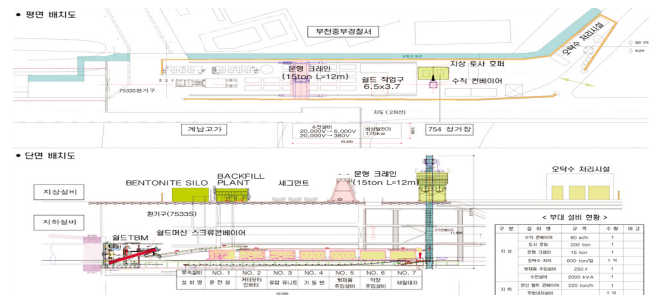


그림 44. 쉴드설비 배치

3) 쉴드 TBM 본체 개요

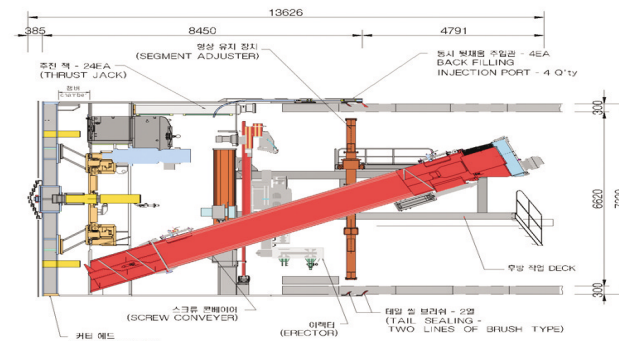


그림 45. 쉴드 TBM 본체 개요

4) 버럭처리설비(연신 벨트컨베이어) 개요

- 배터리 기관차를 사용하므로 매연이 없고 친환경적
- 열차의 운행이 세그먼트 및 자체 운반만 되어 안전성이 높음
- 굴진 사이클로부터 토사 운반이 제외되어 결과적으로 공기 단축

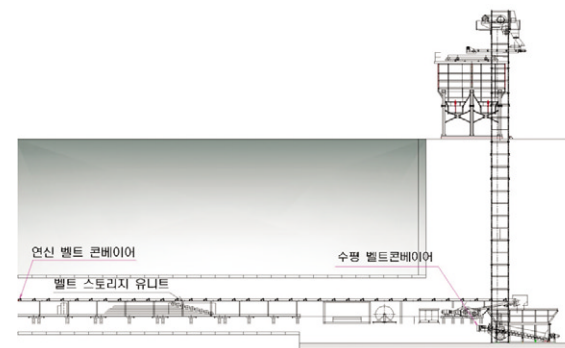


그림 46. 연신 벨트컨베이어 개요도

5) 쉴드터널 시공순서

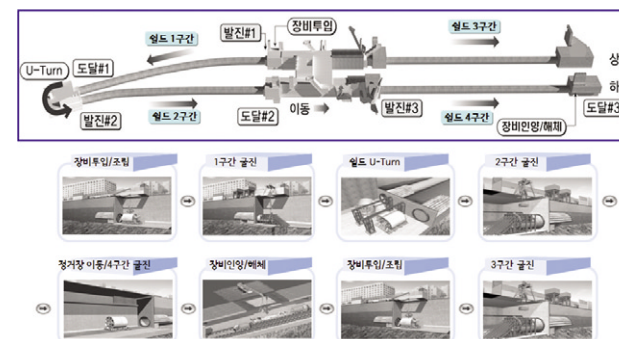


그림 47. 쉴드터널 시공순서

6) 세그먼트 개요



그림 48. 세그먼트 개요도

7) 갱구부 보강방안(강관단단 그라우팅 + 고압분사공법)

- 자립지반형성으로 갱구부 막장면 지보재 철거시의 지반붕괴 및 지표침하 방지
- 지하수 유입방지 및 쉴드 TBM 장비의 사행방지
- 터널천단부 : 강관단단 그라우팅(지반붕괴방지)
- 터널막장면 : 고압분사 공법(자립지반형성, 지하수 유입방지 및 사행방지)



그림 49. 강관단단 그라우팅 + 고압분사공법

나. 쉴드 TBM 구조 및 장비사양

1) 쉴드 TBM 구조

- 쉴드형식 : EPB Type
- 면판형식 : 스포크, 플랫타입, 특수고강도 비트 (30Mpa)
- 막장안정제 주입(기포제)
- 비트교체 3회

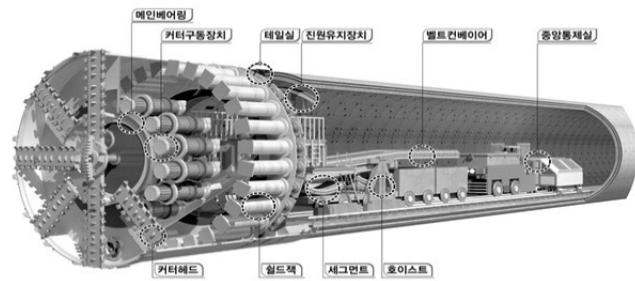


그림 50. 실드 TBM 본체 정면 개요도

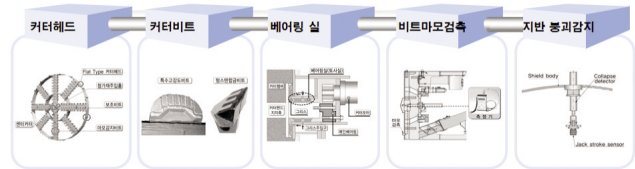


그림 51. 본체 정면 주요장비

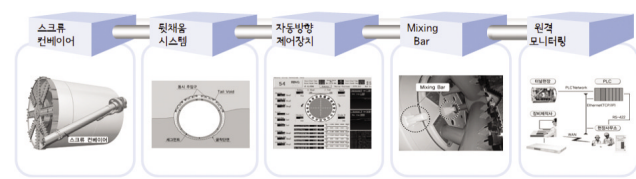


그림 55. 본체 후면 주요장비

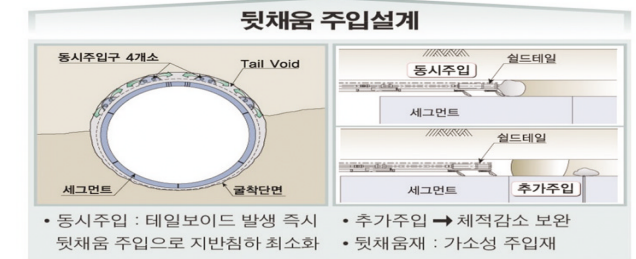


그림 56. 장비의 주요특징(3)

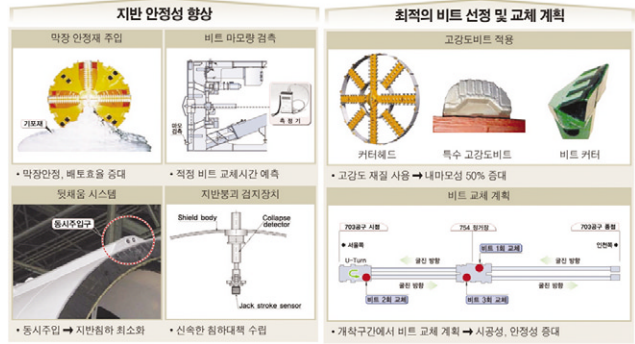


그림 52. 장비의 주요 특징(1)

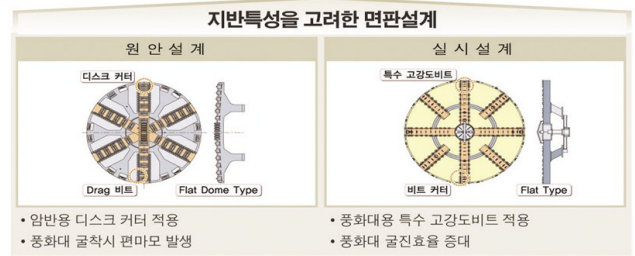


그림 53. 장비의 주요 특징(2)

• 실드 TBM 본체 후면 개요도

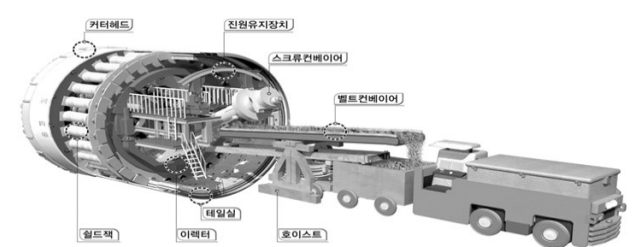


그림 54. 실드 TBM 본체 후면 개요도

2) 실드 TBM 장비사양

분류	항 목	단 위	제작사양	비 고	
Shield	외경	mm	7,370		
	전체 길이	mm	13,626		
	Skin Plate 길이	mm	8,000		
	Shield Jack	추력	kN	2,000	총 48,000ton
		유압력	MPa	35	
		Stroke	mm	2,250	
		개수	개	24	
		신장속도	mm/min	60	25~30
	Power Unit	토출량	l/min	86.0	
		전동기출력	kW	55	
Tail Seal	대수	대	1		
	장비수	열	2		
Tail Grease Pump	장비수	대	1		
	굴착경	mm	7,400		
Cutter Head	100% Torque	kN-m	6,051		
	120% Torque	kN-m	7,261		
	회전수	rpm	0.7~1.4		
	구동 전동기 (커터모터)	출력	kW	90	
		대수	대	10	
Bit 마모 검지장치	형식		초음파 검지식		
	장비수	조	3		
봉괴 검지장치	장비수	대	3		
	토압계	최대검출압력	MPa	2.0	4개소
		추력	kN	20	
		유압력	MPa	6	
	Power Unit	Stroke	mm	200	
			Copy Cutter와 공용		
Screw conveyor	직경	mm	1,000		
	최대 배토량	m ³ /Hr	300		
	회전 Torque	kN-m	211		
	회전수	rpm	1~9		
	유압 Motor	출력 Torque	kN-m	25.54	
유압력		MPa	16		
대수		대	2		
Power Unit	토출량	l/min	250		
	전동기출력	kW	90		
	대수	대	3		

다. 실드 TBM 제작/조립 추진경위

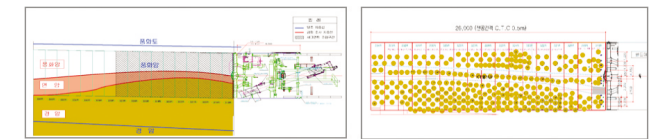


그림 59. 경암돌출부 종단면도 및 지상부 천공 전경



경암돌출 전경(막장내부)

손상비트 현황



지상부 천공 전경

비트 교체

그림 60. 경암제거 모습(1)

라. 실드 굴진 간섭사항

1) 실드 굴진 간섭사항

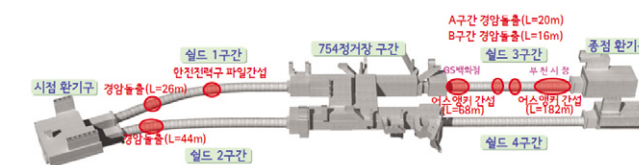


그림 57. 실드 굴진 간섭사항

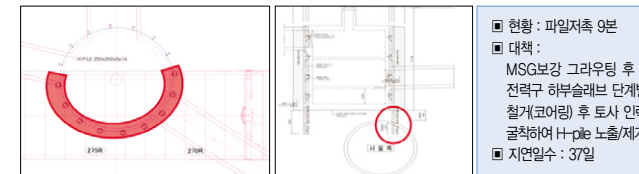


그림 58. 한전 전력구 파일 간섭

2) 실드터널 1구간 경암출현

- 현황 : 예상치 못한 경질암반 출현(L=26m, 강도 185MPa)
- 대책 : 지상부 대구경 + 소구경 천공(288공)
 - 저속굴진 + 비트교체(4회)
 - (갑작스런 조우로 실드장비가 인접하여 발파 등 경암 제거 공법 적용한계)
- 지연일수 : 173일
- 재발방지계획 : 경질암반 풀현이 예상되는 구간에 대해 추가 보링 실시
 - 실드2구간 경암 발견

3) 실드터널 2구간 경암출현

- 현황 : 추가보링조사를 통해 경암구간 사전발견(L=44m)
- 대책 : 실드터널 도달 전 개착공법(강관버팀)을 토안 암반제거 및 되메우기 후 실드 굴진
- 결과 : 실드도달 전 경암제거 및 되메우기 후 실드굴진 완료
- 지연일수 : 0일

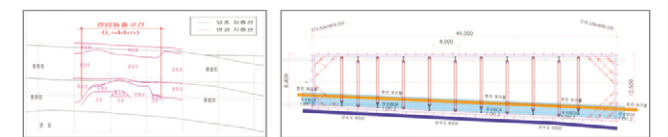


그림 61. 경암돌출부 종단면도 및 가시실 평면도



가시실 단면도

토공/가시실, 발파전경

그림 62. 경암제거 모습(2)

4) 실드터널 3구간 어스앵커 간섭

- 현황 : 실드터널 3구간에서 연도변경물(롯데백화점, 부천시청) 신축당시 매설된 영구식 어스앵커 간섭
- 대책 : 확폭 NATM 시공 후 어스앵커 강선을 제거하고 실드 TBM 굴진/세그먼트 조립
- 추진경위

• 09.5.20 : 설계사 선정	• 09.8.21~9.07 : 보완/승인
• 09.6.24 : 중간보고회 개최	• 09.9.31 : 업체선정/계약
• 09.8.04 : 보고서 초안 납품	• 09.12.1 : 확폭NATM 착수
• 09.8.20 : 설계심의 예정	• 10.6.30 : 확폭NATM 완료예정

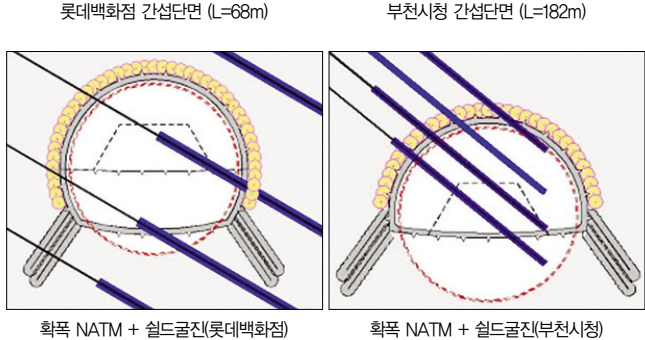
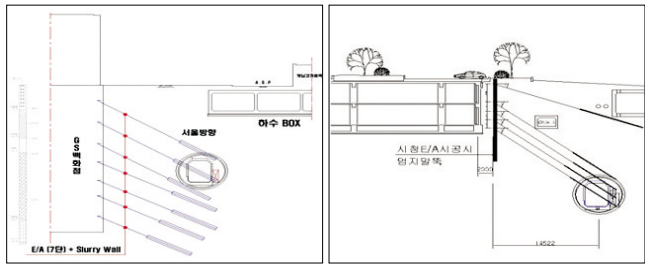


그림 63. 실드터널 3구간 어스앵커 간섭

마. 새로운 기술 방향 소개

1) 개요

- 다양한 단면현상 : 멀티페이스 실드, Parent-Child 실드, 사각형 실드, 기타 특이형상 실드
- 실드터널 공사규모 확대
 - 큰 규격, 보다 깊은 심도, 보다 긴 연장, 설비자동화, 최첨단 기술이용

- 국내(분당선 하저터널 Ø 8.06m), 유럽(스페인 Ø 15m), 일본(Ø 17m)
- 적용범위 확대 : 초창기 연약지반 → 암반층까지 확장

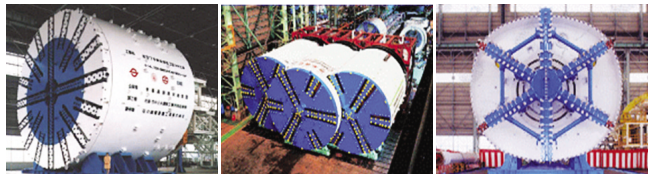


그림 64. 새로운 실드 종류

2) 모자(Parent-Child) 실드

- 하수터널 등 단면변화 터널에 적용
- 굴착 중에 Child 실드머신이 Parent 실드머신으로부터 분리되어 다른 직경을 갖는 터널 시공 가능
 - Parent 실드 : Child 실드의 발진구(반력대) 역할
 - 중간 작업구(수직구) 불필요, 실드머신 내부 시스템은 공동 사용
 - Parent와 Child 경계에서 지하수 및 토사유입 방지역할의 Earth Seal 장착

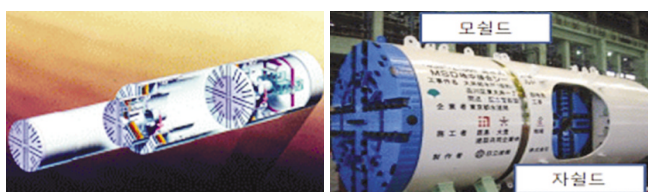


그림 65. 모자(Parent-Child) 실드

3) 사각형 실드

- 도로, 지하차도 등 굴착
- 원형굴착 시스템을 사각형 실드머신에 부착
- 회전축을 사각형 단면 중심에서 편심에 위치 : 3개의 Spoke Cutter 편심
- 사각형 세그먼트 조립을 위한 세그먼트 거치장치 필요

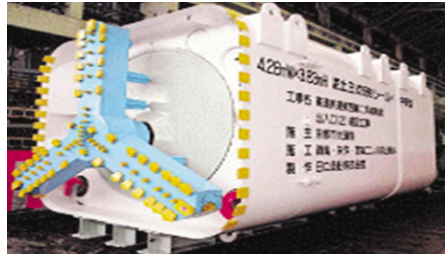


그림 66. 사각형 실드

4) Side Docking 실드

- 기존에 완공된 터널 추가 굴착
- 철근 콘크리트를 굴착할 수 있는 Cutter Bit 개발

5) 굴착토 이송 수직 스크류 컨베이어

- 현행 : 압송 또는 연속적 Bucket 시스템 → Screw Type 이송시스템 개발

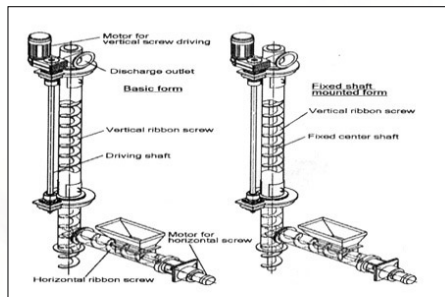


그림 67. 수직 스크류 컨베이어

6. 맺는말

- 지하철 정거장은 공사 완료 후 시민들이 편리하게 사용할 수 있도록 위치를 선정하여야 하며, 불가피하게 고차로에 위치함으로써 고가도로 등 기존의 도로교통 시설물과 간섭을 피할 수 없게 된다. 이 경우 기존의 고가시설물 하부에서 기존 구조물에 직접적인 영향을 최소화 할 수 있도록 설계 및 사공관리하여야 하는바 제한적인 조건하에서 흙막이 가시설 공법을 선정하여야 한다.

• 실드터널은 토질이 균질할 경우 토사, 기반암 등에 관계없이 시공성과 경제성이 우수한 공법이나 설계, 계획 시 예상하지 못했던 지층이나 지장물을 만났을 때 이에 대한 대처 방법에 한계가 있으며, 원가 및 비용 상승의 주요 요인이 될 수 밖에 없다. 지층변화가 있다면 단순 토사용이나 경암용이 아닌 혼합형 실드로 설계하는 등 실드공법이나 장비 선정 시 설계, 계획 단계에서 정밀한 지반 조사 및 지장물 조사를 실시하여 현장조건과 일치하는 최적의 실드공법을 채택하여야 한다.

◆ 참고자료
 1) 서울지하철 703 실시 설계 보고서
 2) 지하공간 개발의 Shield Tunnel Method 건설지(박완석 편저)