

깡통으로 터널을 뚫는다

실드공법

차경호 / 특수기술개발부 대리

실 드 공법은 상·하수도, 전기·통신선로, 지하차도·철도 등의 도시기반시설을 지하공간에 구축하기 위한 굴착공법으로써 연약지반을 포함하여 토사지반에 적용한다는 점에서 암반을 기계 굴착하는 T.B.M 또는 Road Header 공법과 크게 구분된다.

19C 초 영국 템즈강 횡단 해저터널 공사이래 기술의 비약적인 발달로 거대 전석층, 암+토사의 복합지질구간도 굴착이 가능하게 되었으며 최근에는 굴진작업의 전자동화, 대구경화, 비원형 단면화, 단면변화기술 등의 신기술이 개발되어 있다.

본고에서는 실드 공법에 대한 개념을 이해할 수 있도록 남광 사상 통신구 현장의 실드 기종 선정시 기술 검토된 사항을 토대로 개괄적으로 소개하고자 한다.

실드공법의 소개

원리

실드라는 원통의 방어물에 의해 주변지반이 붕괴되는 것을 막으며 그 속에서 굴착을 하여 터널 구체를 만들어 가는 공법이다.

좀 더 구체적으로 설명하면 터널 외경 단면보다 약간 큰 실드라는 강제 원통(Skin Plate라 일컬음)을 지중으로 추진시키면서 그 전면에 각종 Cutter를 부착한 Cutter Header를 회전시켜 지반을 굴착한다.

굴착후 연속작업으로 후방부(Tail이라 일컬음)에 복공(일반적으로 PC Segment) 축조를 반복작업해 가는 공법이다. 지반조건에 따라 막장의 안정을 유지하기 위하여 각종 보조공법(압기, 지하수위 저하, Pilot

Tunnel, 주입, 동결공법등)이 실시된다.

〈그림 1〉참조

구조 및 특징

외형

- Skin Plate : 실드 프레임을 덮고 있는 강제 원통
- Hood부 : 지반굴착
- Ring Girder 부 : 실드전체 구조의 지탱 및 보강
- Tail 부 : 복공 작업

내부

- 추진 Jack : Power Unit, 유압 Jack
- Erector : Segment 조립
- 부속설비 : 자세 제어 설비, Tail Seal

1) 본체 외각부

① Skin Plate

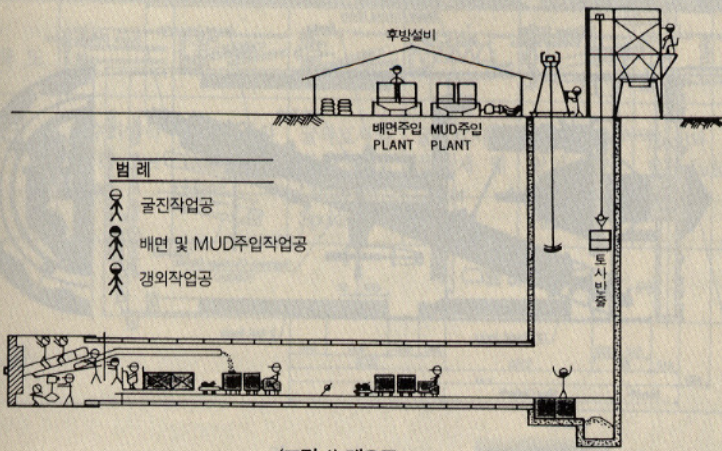
실드 내부에서 안전하고 쉽게 작업할 수 있도록 외부로 부터의 토압에 저항하여 내부를 보호하기 위한 강제 원통이다.

② Hood부

실드 전면에 위치하며 토류 Jack(기계굴착인 경우 Cutter Head)을 장착하여 굴착 작업하는 부분이다.

③ Ring Girder부

토압에 의한 Skin Plate의 변형을 방지하고 Hood부와 Tail부를 결합하는 부분이다. 내부에서 조립된 Segment를 반력으로 유압 Jack에 의한 추진력을 실드 Flame에 전달하는 역할을 하며 Skin Plate에 용접에 의해 설치된다.



〈그림 1〉 개요도

위한 장비이다.

실드공사에서는 Segment 조립 시간 단축이 시공 Point이므로 Erector 선정시에는 작업의 능률화를 꾀할 수 있도록 배려하는 것이 중요하다.

④ Tail부

Erector에 의해 Segment를 조립하는 부분이다. 판 두께가 필요이상 두껍게 되면 Segment 외경과 굴착된 터널 내경과의 간극이 크게되어 지반침하 우려 뿐 아니라 뒷채움 주입재의 양이 많이 소요되므로 외압에만 견딜수 있는 적정 두께로 결정해야 한다.

2) 본체 내부

① 추진부

실드를 전진시키기 위해 본체 Frame에 설치된 추진용 Jack에 의해 Segment의 반력을 받아 추진시키는 구조이다. 이러한 Jack은 Ring Girder부의 내부에 배치되지만 소단면 실드의 경우는 내부 공간이 협소하여 굴착작업, 배토작업, Segment 조립작업에 지장을 주므로 가능한한 소형화할 필요가 있다. 1본당 Jack의 추진력은 60~150 ton이 일반적이지만 대형 실드에서는 200~300 ton도 사용된다.

Jack 1본당 추진력을 크게 하면 반력을 받는 Segment에 과대한 하중을 주어 파괴할 수 있으므로 허용가능한 범위의 추진력내에서 사용본수를 늘려 Segment에 주는 추진력을 분산시키는 것이 바람직하다.

② Erector

Tail부에 위치하여 Segment조립을 쉽고 급속하게 하기

③ 부속 설비

-자세 설비 제어

굴진중 롤링, 요잉, 피칭이 생길수 있으므로 사행수정 및 곡선시공을 위해 Jack을 주체로 방향제어가 필요하며 최근에는 자동화 설비에 의해 제어된다.

-테일 실

Skin Plate내면과 Segment 외면과의 간극 즉 Tail Clearance는 실드 공법에 있어서 불가피하며 이들 사이에 끼우는 것을 Tail Seal 이라 한다. 그기능은

- 뒷 채움 주입재의 갭내 누출 방지
- 압기 공법의 경우 원지반 공기 누출 방지
- 지하수 유입 방지 등이다.

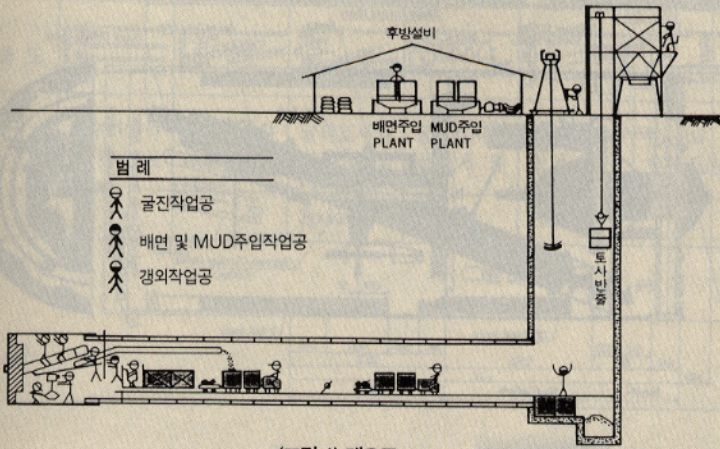
재질은 강판, 스테인레스, 고무, 우레탄 등이 있다.

교환주기는 보통 연장 200~400m 정도이며 자갈층의 경우 50m 정도에서 파손되는 예도 있으므로 시공 도중에 교환할 수 있도록 준비해야 한다.

〈그림 2〉, 〈표 1〉 참조

분류

- 단면 형상에 의한 분류 : 원형, 반원형, 마제형, 사각형
- 굴착 방식에 의한 분류 : 인력굴착식, Blind식, 반기계 굴착식, 기계굴착식, 토압식, 이수식



〈그림 1〉 개요도

위한 장비이다.

실드공사에서는 Segment 조립 시간 단축이 시공 Point이므로 Erector 선정시에는 작업의 능률화를 꾀할 수 있도록 배려하는 것이 중요하다.

④ Tail부

Erector에 의해 Segment를 조립하는 부분이다. 판 두께가 필요이상 두껍게 되면 Segment 외경과 굴착된 터널 내경과의 간극이 크게되어 지반침하 우려 뿐 아니라 뒷채움 주입재의 양이 많이 소요되므로 외압에만 견딜수 있는 적정 두께로 결정해야 한다.

2) 본체 내부

① 추진부

실드를 전진시키기 위해 본체 Frame에 설치된 추진용 Jack에 의해 Segment의 반력을 받아 추진시키는 구조이다. 이러한 Jack은 Ring Girder부의 내부에 배치되지만 소단면 실드의 경우는 내부 공간이 협소하여 굴착작업, 배토작업, Segment 조립작업에 지장을 주므로 가능한한 소형화할 필요가 있다. 1본당 Jack의 추진력은 60~150 ton이 일반적이지만 대형 실드에서는 200~300 ton도 사용된다.

Jack 1본당 추진력을 크게 하면 반력을 받는 Segment에 과대한 하중을 주어 파괴할 수 있으므로 허용가능한 범위의 추진력내에서 사용본수를 늘려 Segment에 주는 추진력을 분산시키는 것이 바람직하다.

② Erector

Tail부에 위치하여 Segment조립을 쉽고 급속하게 하기

③ 부속 설비

-자세 설비 제어

굴진중 롤링, 요잉, 피칭이 생길수 있으므로 사행수정 및 곡선시공을 위해 Jack을 주체로 방향제어가 필요하며 최근에는 자동화 설비에 의해 제어된다.

-테일 실

Skin Plate내면과 Segment 외면과의 간극 즉 Tail Clearance는 실드 공법에 있어서 불가피하며 이들 사이에 끼우는 것을 Tail Seal 이라 한다. 그기능은

- 뒷 채움 주입재의 갭내 누출 방지
- 압기 공법의 경우 원지반 공기 누출 방지
- 지하수 유입 방지 등이다.

재질은 강판, 스테인레스, 고무, 우레탄 등이 있다.

교환주기는 보통 연장 200~400m 정도이며 자갈층의 경우 50m 정도에서 파손되는 예도 있으므로 시공 도중에 교환할 수 있도록 준비해야 한다.

〈그림 2〉, 〈표 1〉 참조

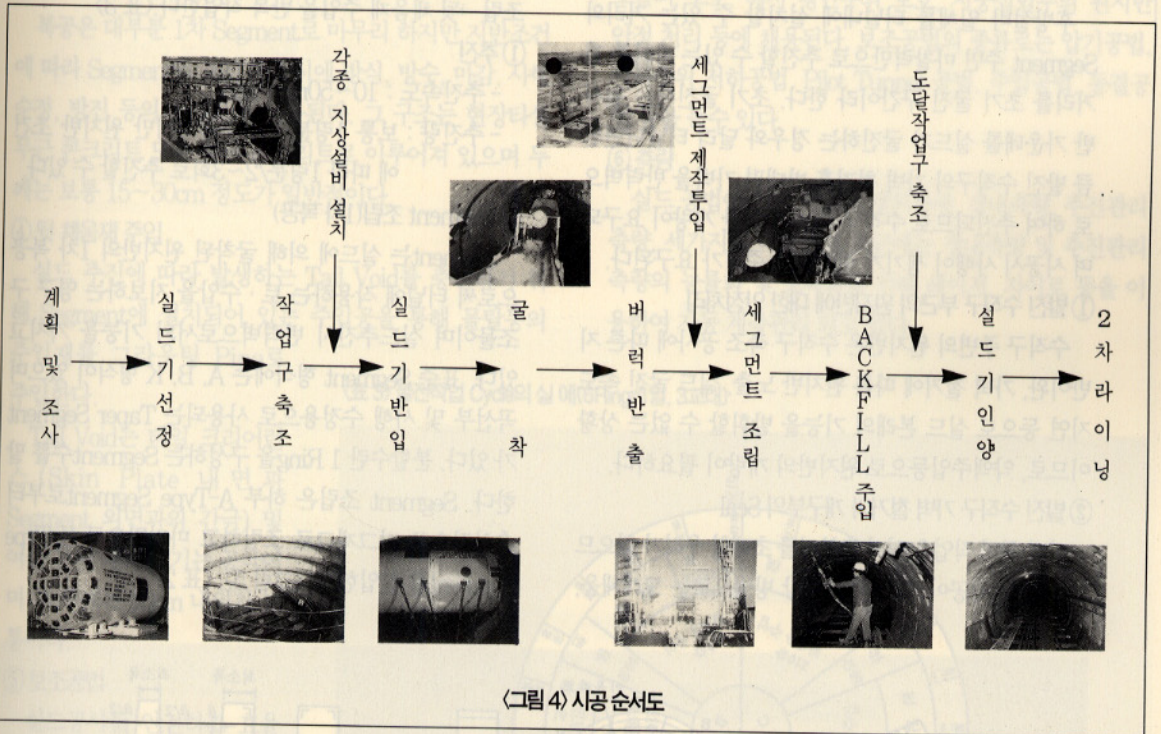
분류

- 단면 형상에 의한 분류 : 원형, 반원형, 마제형, 사각형
- 굴착 방식에 의한 분류 : 인력굴착식, Blind식, 반기계 굴착식, 기계굴착식, 토압식, 이수식

형식	이수식	밀 폐 형			전 면 개 방 형				부분개방형
		토 압 식			거락파쇄식	인력굴착식	반기계굴착식	기계굴착식	
		토 압 식	이토가압식	이 장 식					
외 관									
개 략 도									
막장안정 기구	이수가압력과 Cutter Head	굴착토사와 Cutter Head	굴착토사와 첨가재 및 Cutter Spoke	굴착토사와 첨가재 및 Cutter Head	굴착토사와 첨가재 및 Cutter Head	Hood와 토류 Jack	Hood와 토류 Jack 및 굴착기	Cutter Head와 Slit	간벽 Slit

(그림 3) 개념도

시 공



(그림 4) 시공순서도

1) 수직구(작업구) 축조

① 발진 수직구

실드의 반입 및 조립, 각종 기자재(복공, 레일, 침목, 기계기구류 등)의 반입, 굴착토사의 반출, 작업원의 출입등에 이용한다.

실드 후방 설비는 작업구의 공간이 부족하므로 지상에

설치하며 필요 용지 면적은 $\phi 2,000 \sim 6,000 : 1,000 \sim 2,000\text{m}^2$, $\phi 6,000 \sim 10,000 : 1,500 \sim 2,500\text{m}^2$ 정도가 필요하다.

② 중간 수직구

터널 연장이 길게되면 굴착토사의 반출, 복공재의 반입 등의 거리가 길게 되어 작업 능률이 저하되므로 보통 터널 길이가 1km이상일 경우 필요하다. 시공시기는 실드 통과

후 시공하는 편이 공기 및 공사비 측면에서 유리하다.

③ 도달 수직구

터널 종점에 축조되고, 실드의 해체, 반출 등에 사용된다.

④ 방향전환 수직구

급곡선 구간에서 각종 보조공법을 실시하여도 실드 자체에 의한 방향 전환이 불가능할 경우나 1대의 실드로 U-Turn하여 Double 터널을 평행하게 축조할 경우 사용된다.

2) 초기굴진

후방설비 일체를 터널내에 설치할 수 있는 거리와 Segment 주면 마찰력만으로 추진할 수 있는 거리중 긴 거리를 초기 굴진 구간이라 한다. 초기 굴진시는 원지반 가운데를 실드가 굴진하는 경우와 달리 터널단면만큼 발진 수직구의 가벽 철거후 반대편 가벽을 반력벽으로 하여 추진되므로 수직구 주변의 지반 개량이 요구되며 시공시 사행이 생기기 쉬우므로 주의가 요구된다.

① 발진 수직구 부근의 원지반에 대한 안정처리

수직구 주변의 원지반은 수직구 축조 공사에 따른 지반이완, 가벽 철거에 따른 원지반 노출, 실드 굴진 속도 지연 등으로 실드 본래의 기능을 발휘할 수 없는 상황이므로, 약액주입등으로 원지반의 개량이 필요하다.

② 발진 수직구 가벽 철거와 개구부의 Seal

가벽 철거 작업은 원지반 붕괴를 초래할 우려가 있으므로 신중한 시공이 필요하다. 보강 방법으로는 모래채움,

Column Jet 그라우팅, Entrance Con'c 방식 등이 있다. 또 개구부 주변에는 토사 또는 뒷채움 주입재의 유출을 방지하기 위해 고무 패킹 등의 실링재를 설치해야 한다.

③ 반력벽이

가설 Segment 또는 H 형강등의 강재를 사용하여 실드의 추진력을 반력벽에 전달하는 목적과 Segment 조립위치를 결정하는 역할을 한다. 초기 굴진이 완료되면 후속작업에 지장이 없도록 즉시 철거한다.

3) 본굴진

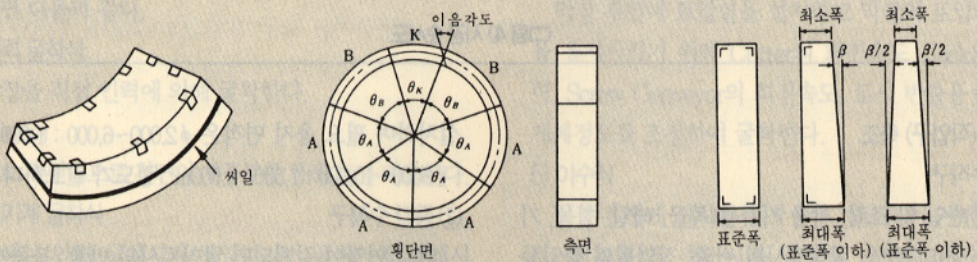
시공 순서는 굴착→실드 잭에 의한 추진→Segment 조립→뒷 채움재 주입을 반복 작업한다.(표 3)

① 추진

- 추진속도 : 10~50mm/min
- 추진량 : 보통 1링분/1회 추진하지만 원지반 조건에 따라 1링분/2~3회로 추진할 수 있다.

② Segment 조립(1차 복공)

Segment는 실드에 의해 굴착된 원지반의 1차 복공으로써 터널에 작용하는 토·수압을 지보하는 영구 구조물이며 실드추진시 반력벽으로서의 기능을 가지고 있다. 표준 Segment 형식에는 A, B, K 형식이 있으며 곡선부 및 사행 수정용으로 사용되는 Taper Segment가 있다. 분할수란 1 Ring을 구성하는 Segment수를 말한다. Segment 조립은 하부 A-Type Segment로부터 순차적으로 지그재그로 조립하고 마지막으로 K-Type Segment를 삽입한다. (그림 5), <표 2>



(a) 세그먼트 외관

(b) 표준세그먼트(A,B,K 세그먼트)

(c) 표준세그먼트와 테이퍼세그먼트의 비교

<그림 5> Segment 외관

〈표 2〉 Segment 종류

종 류	장 점	단 점
강제 Segment	<ul style="list-style-type: none"> ○중량이 가볍고 취급 용이 ○외경 4,000mm 이하에서는 강도적으로 만족하고 실적다수, Cost 절감 ○용접에 의한 제작이므로 가공이 쉽고 정밀도 충분히 기대 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○약간의 강성 부족 때문에 뒷채움 주입 압력 등의 편심 하중에 대하여 변형 소지 ○방청문제 때문에 2차 복공 불가피
철근 콘크리트 Segment	<ul style="list-style-type: none"> ○추진력에 대하여 충분한 강성 보유 ○고강도 설계 가능하며 외경 3,000mm 이상 실적 다수 ○방수처리 가능 할 경우 2차 복공 거의 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○중량이 무겁고, 형고가 높기 때문에 운반 불편 ○흠집, Crack 발생 우려가 있으므로 취급 주의 요함 ○콘크리트 관리, 철근조립 등 제작공정 복잡
주철제 Segment	<ul style="list-style-type: none"> ○고강도 설계 가능 ○복잡한 형상 제작 용이 	<ul style="list-style-type: none"> ○고가 ○제작상 단면을 얇게 할수 없고, 강성이 필요이상 큼

③ 2차 복공

복공은 대부분 1차 Segment로 마무리 하지만 지반조건에 따라 Segment의 보강과 동시에 방식, 방수, 마감, 사형수정, 방진 등의 목적으로 사용된다. 그 구조는 현장타설 무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트로 이루어져 있으며 두께는 보통 15~30cm 정도가 일반적이다.

④ 뒷채움재 주입

실드 추진에 따라 발생하는 Tail Void를 충전하기 위해 Segment에 설치되어 있는 주입공을 통해 몰탈등의 주입재를 그라우팅 Pipe로 주입한다.

Tail Void는 테일 크리어런스 (Skin Plate 내 면과 Segment 외면과의 간극) 및 여굴 등에 따라 생기는 공극이며 그 두께는 10cm 내외가 보통이다.

⑤ 보조공법

실드공사를 안전하고 효율 좋게 시공하기 위해서는 막장 안정을 확보하는 것이 중요하다.

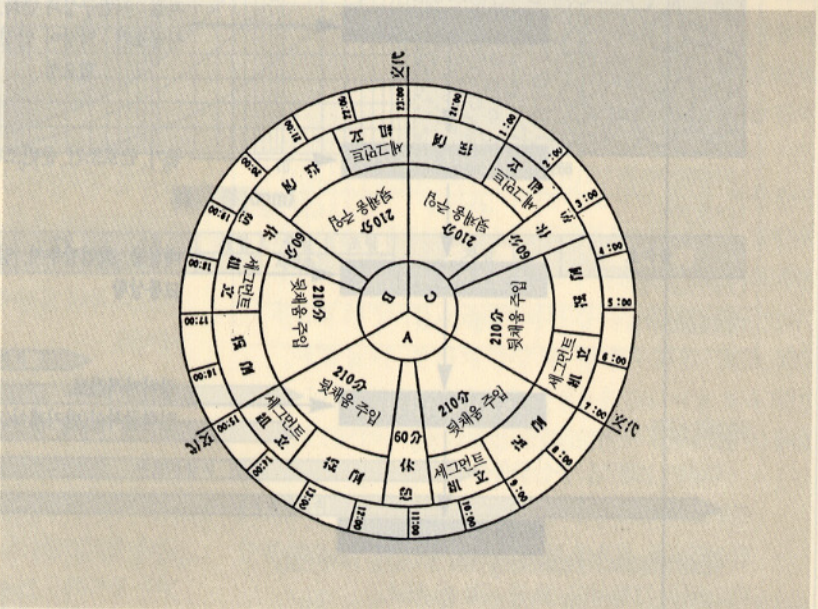
보조공법은 적절한 실드기종의 선정과 신중한 굴진작업 등에 의해서도 막장안정이 곤란할 경우 또는 지하·지상 구

조물의 보호, 해저 횡단부의 보호, 지중접합부의 원지반 안정 처리 등에 채용된다. 보조공법의 종류로는 압기공법, 지하수위 저하공법, Pilot Tunnel 공법, 주입공법, 동결공법 등을 들수 있다.

⑥ 측량

실드 공법에 있어 측량은 갱의측량, 갱내측량, 추진관리측량, 세가지로 대별되며 최근에는 갱내측량 및 추진관리측량의 능률화 및 고속화를 위해 레이저, 자이로 등을 이용하여 자동 계측관리 되고 있다.

〈표 3〉 굴진작업 Cycle의 실 예(6Ring/1일, 3고대)



- 갱외 측량

시공에 앞서 지표면에서 중심선 및 종단 측량을 실시하여 계획시의 측량 결과를 재확인함과 동시에 시공상 필요한 기준점을 설치하는 측량이다.

또한 지표 침하의 실태와 발생 메카니즘을 확인하여 침하 방지대책을 세우는 기초자료가 되도록 기록 유지가 필요하다.

- 갱내 측량

실드 투입전에 지표면에 설치한 중심선 및 수준점을 수직구내에 도입하여 이것을 기준으로 하여 실드위치를 측량하면서 굴진합과 동시에 순차 갱내의 측점 및 기준점을 설치해 나간다. 터널 관통후 전노선에 대하여

종단측량 및 중심선측량을 실시하고 터널내공 확보 여부를 확인한다. 소정의 단면을 이루고 있을 경우 필요에 따라 중심선을 이설할 수 있다.

- 추진 관리 측량

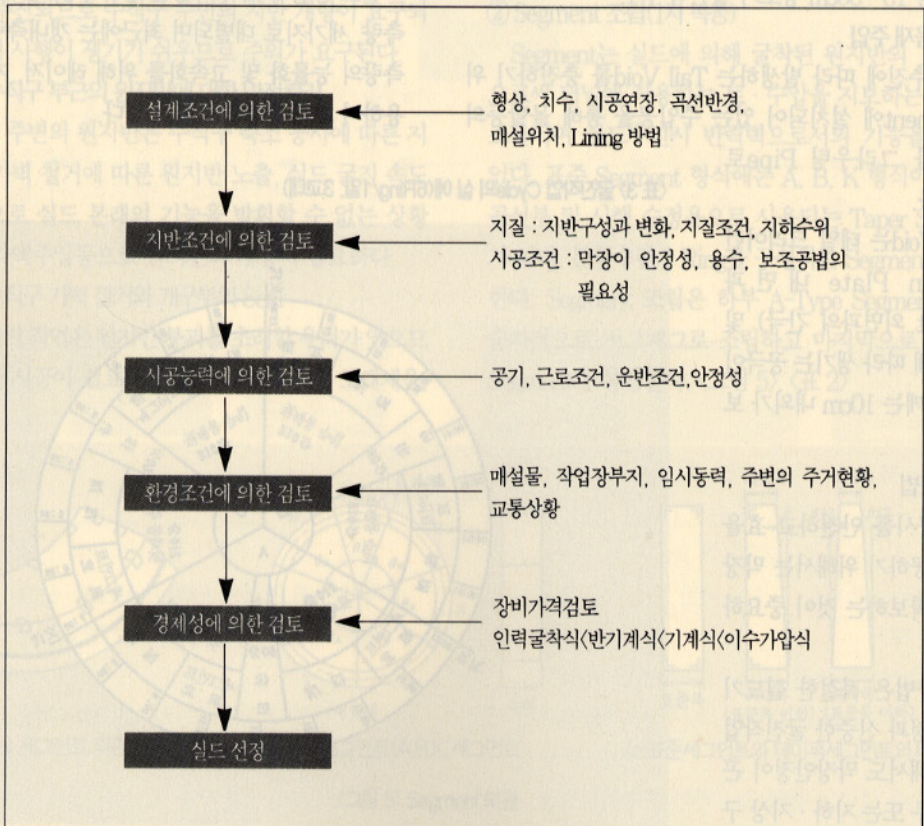
추진시 Segment Ring에 대한 상대위치, 실드자세(요잉, 피칭, 롤링)를 파악하기 위한 측량이다.

기종선중

지반조건에 대한 실드 기종 선정이 잘못된 경우 시공이 곤란할 수 있으므로 공정 및 경제성 측면에서 비교 검토, 적합한 시공법 및 기종선택을 해야 한다.

〈표 4〉, 〈표 5〉, 〈표 6〉 참조

〈표 4〉 기종선정의 순서



(표 5) 선정기준비교표

토 질		기준 선정기준	인력식			Blind식			반기계식			기계식			이수가압식			토압식		
			(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
점 성 토	연 약 점 성 토		△			○	○	○		×			×		○	○	○	○	×	○
	굳 은 점 성 토	○	○	○			×		○	○	○	○	○	○	*	*	○	○	*	△
모 래 층	이완된 사질토		△				×			△			△		○	○	○	△	△	○
	다져진 사질토	○	○	○			×		○	○	○	○	○	○	*	*	○	○	○	△
사 력 층	이완된 사력층	△	△	△			×			△		△	△	△	○	○	○		△	○
	다져진 사력층	○	○	○			×		○	○	○	○	○	○	*	*	△		○	△
자갈, 전석층		○	○	○			×		○	△	○		△	△	*	△	△		×	△
연 압			*				×		○	△	○	○	○	△	*	*	△		*	△

주) 선정기준 (1) 일본 토목학회와 동경 하수도국 (2) 일본철도시설협회 (3) 일본 터널 기술협회

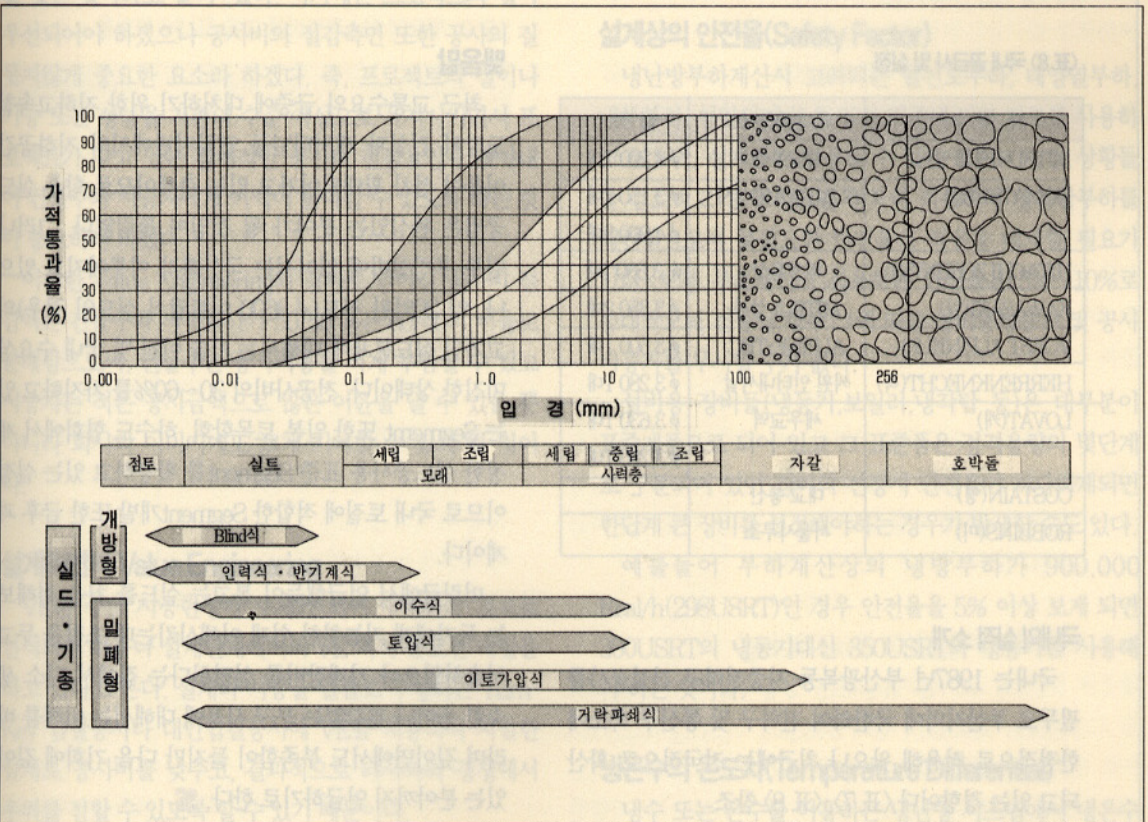
○ : 원칙적으로 조건에 적합(보조공법 포함)

△ : 적용시 검토 요함

× : 원칙적으로 보조공법적용만으로 곤란

* : 적용가능하지만 경제성을 고려하면 검토대상 불가

(표 6) 토질 입도분포와 실드의 적용범위



〈표 7〉 설계 및 시공 연혁

연도	공사명	설계용역	실 드				시 공 사		Segment 제작사	비고
			직경(m/m)	연장(m)	기종	제작사	원도급	하도급		
'87	부산 광복동 전력구	유신설계	3,150	1,033	이토압식	KOMATSU	한국중공업	죽림건설	태명실업	
'89	부산 법원앞 통신구	대우 ENG	3,150	416	이토압식	KOMATSU	한국중공업	죽림건설	태명실업	
'92	부산구포 전력구	유신설계	4,900	6808	이토압식	KOMATSU	삼성건설	-	동서산업	시공중
			4,200	953		mitsubishi				
'92	부산 용호동 차집관로	삼우기술단	3,350	4,298	복합지결형	KAWASAKI	대우,반석건설	-	태명실업	시공중
'93	부산 사상 통신구	우성 ENG	3,630	905	이토압식	HITACHI ZOSEN	남광토건	-	한국실업	시공중
'94	남천안 통신구	금호 ENG	3,630	1,100	이토압식	LOVAT	범양건설	-	한국실업	시공중
'94	안산 통신구	동일기술	3,280	880	이토압식	LOVAT	국제종합	반석건설	태명실업	시공중
'95	마산 전력구	동신 기술개발	3,280	2,016	이토압식	HERRENKNECHT	한국중공업	-	태명실업	'95.9. 반입예정
							반석건설			
'95	한남동 전력구	동명기술단	3,500	3,880	TBM식 실드	VOEST ALPINE	선경건설	-	한국실업	'95. 11 반입예정
'95	마산 통신구	우성 ENG	3,280	600	이토압식	-	-	-	-	'95. 8. 입찰예정
'95	부산 엄궁동 전력구	신성 ENG	4,330	700	이토압식	-	-	-	-	'95. 9. 입찰예정

〈표 8〉 국내 공급사 및 실적

제 작 사	국내공급사	실 적
mitsubishi(일)	대교통산	φ4,200 1대
KOMATSU(일)	SUMITOMO상사	φ3,150 1대
		φ4,900 3대
HITACHI ZOSEN(일)	리영통상	φ 3,630 1대
KAWASAKI(일)	mitsui 상사	φ 3,350 2대
VOEST ALPINE(오)	ALPINE-TEC	φ 3,500 1대
HERRENKNECHT(독)	씨원 인터내셔널	φ 3,280 1대
LOVAT(캐)	세우교역	φ 3,630 1대
		φ 3,280 1대
COSTAIN(영)	대교 통산	-
ROBBINS(미)	서울사무소	-

국내의 실적 소개

국내에는 1987년 부산광복동 지중전력구 건설공사를 필두로 부산지역에 국한하여 전력구 및 통신구 축조에 한정적으로 적용해 왔으나 최근에는 전국적으로 확산되고 있는 경향이다.〈표 7〉, 〈표 8〉 참조

맺음말

최근 교통수요의 급증에 대처하기 위한 지하고속철도망의 건설과 해저터널등 연약지반에서의 지하공간 이용이 점차 확대되어가고 있는 추세이므로 향후 실드 공법은 관심있는 분야가 될 것임이 틀림없다. 그러나 일부 후방설비에 있어서는 국산화가 이루어지고 있으나, 약 20억원 정도(φ3600 이토압식 실드인 경우)의 고가인 실드본체에 대해서는 기술 이전 및 국내 수요상 미진한 상태이다. 전공사비의 30~60%를 차지하고 있는 Segment 또한 일본 토목학회, 하수도 협회에서 제정한 실드공사용 표준 Segment를 활용하고 있는 실정이므로 국내 토질에 적합한 Segment개발 또한 급후 과제이다.

머릿글에서 언급했듯이 본고는 실드를 처음 접해보는 독자에게 가능한한 쉽게 이해시키는데 초점을 두고 서술하였으나 기계장비를 설명한다는 점에서 다소 생소한 용어나 질감없는 문구 사용에 대해서는 이해를 바라며 깊이면에서도 부족함이 들지만 다음 기회에 깊이 있는 분야까지 언급하기로 한다. S