기 계 화 시 공 기술위원회

Annual Technical Report

쉴드TBM 주요설비 및 옵션장치의 기능 검토

(A Review for function of Shield TBMs major facilities and optional devices)

2020

사단법인 한국터널지하공간학회
Korean Tunnelling and Underground Space Association

기계화시공 기술위원회

출 처	서울시 도시기반시설본부. 2020. “쉴드TBM 활성화를 위한 경제성 확보방안 연구보고서”

1. 쉴드TBM 장비 및 부품 기본구성

1.1 토압식 및 이수식 쉴드TBM 장비 기본구성

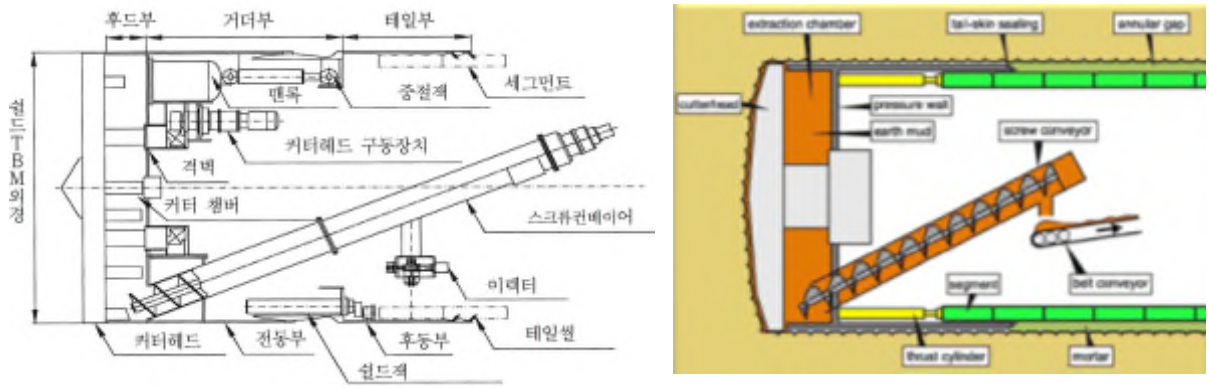
(1) 쉴드TBM의 굴착원리

○ 쉴드TBM은 막장과 쉴드TBM 내부를 분리하는 격벽(Bulkhead)을 가지며, 막장과 격벽사이에 설치된 챔버 내에 충만된 토사 혹은 이수 토압에 의해 막장에 작용하는 수압과 토압에 저항하는 것으로서 적극적으로 막장 안정을 도모하면서 굴착하는 기계장비이다.

○ 쉴드TBM은 챔버에 충진하는 가압매체를 이수 또는 공기압을 이용하는 이수식(SPB, Slurry Pressure Balanced)과 굴착토사로 하는 토압식(EPB, Earth Pressure Balanced)으로 분류한다.

(2) (이)토압식 쉴드TBM

○ 토압식 쉴드TBM은 챔버내 이토를 쉴드TBM 추진력에 의해 가압시켜 막장 안정을 도모하면서 지반을 굴착하고 굴착토사를 스크류 컨베이어로 배출할 수 있는 구조로 이루어져 있다.



[그림 2.3.1] 토압식 쉴드TBM의 기본구성

○ 굴착토사의 개량을 위해 첨가재 주입구가 설치된 이토압식 쉴드TBM과 첨가재 주입구를 장착하지 않은 토압식 쉴드TBM으로 분류되며, 최근에는 첨가재 사용유무와 상관없이 이토압식 쉴드TBM을 일반적으로 사용한다.

○ 토압식 쉴드TBM의 막장 안정 특징

① 굴착한 토사에 첨가재를 추가하여 커터헤드 및 교반날개에 의해 강제적으로 교반 혼합함으로써 소성유동성과 지수성을 가진 이토로 개량한다. 또한 토압식 쉴드TBM에서는 첨가재 사용 없이 교반만 수행한다.

② 이토를 챔버 및 스크류컨베이어 내에 충만 시키고 쉴드잭 추력으로 이토를 가압하여 막장의 토압 및 수압에 저항한다.

○ 이토압이 막장에 균일하게 작용하여 막장안정이 확보된 상태로 굴착토사가 부드럽게 배토되기 위해서는 적절한 소성유동성과 지수성을 확보할 수 있도록 이토의 상태를 관리할 필요가 있다. 굴착토사 중에 세립분이 함유되어 있으며 입도분포가 양호한 경우에는 교반만으로 이토의 소성유동성을 확보할 수 있으나, 모래나 자갈 등이 많은 경우나 균등계수가 작아 입도분포가 나쁜 경우에는 첨가재를 굴착토사 내에 주입하여 교반혼합, 입도분포를 조정하여 양호한 이토로 개량할 필요가 있다.

(3) 이수식 쉴드TBM

○ 이수식 쉴드TBM은 송니관을 통해 유체 운송펌프로 챔버내에 이수를 주입하고 펌프의 회전수 또는 공기압으로 이수를 가압하여 막장안정을 도모하면서 지반을 굴착하며, 굴착토사를 챔버내의 이수와 함께 배니관을 통해 배출할 수 있는 구조이다.

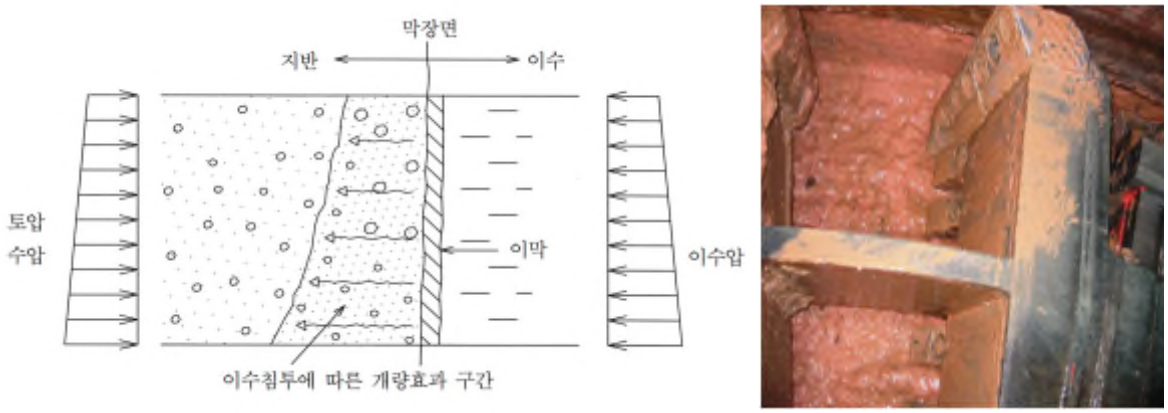
○ 이수식 쉴드TBM의 막장안정 특징은 다음과 같다.

① 막장면에 난투수성 이막을 형성하여 이수압을 막장면에 유효하게 작용시킨다.

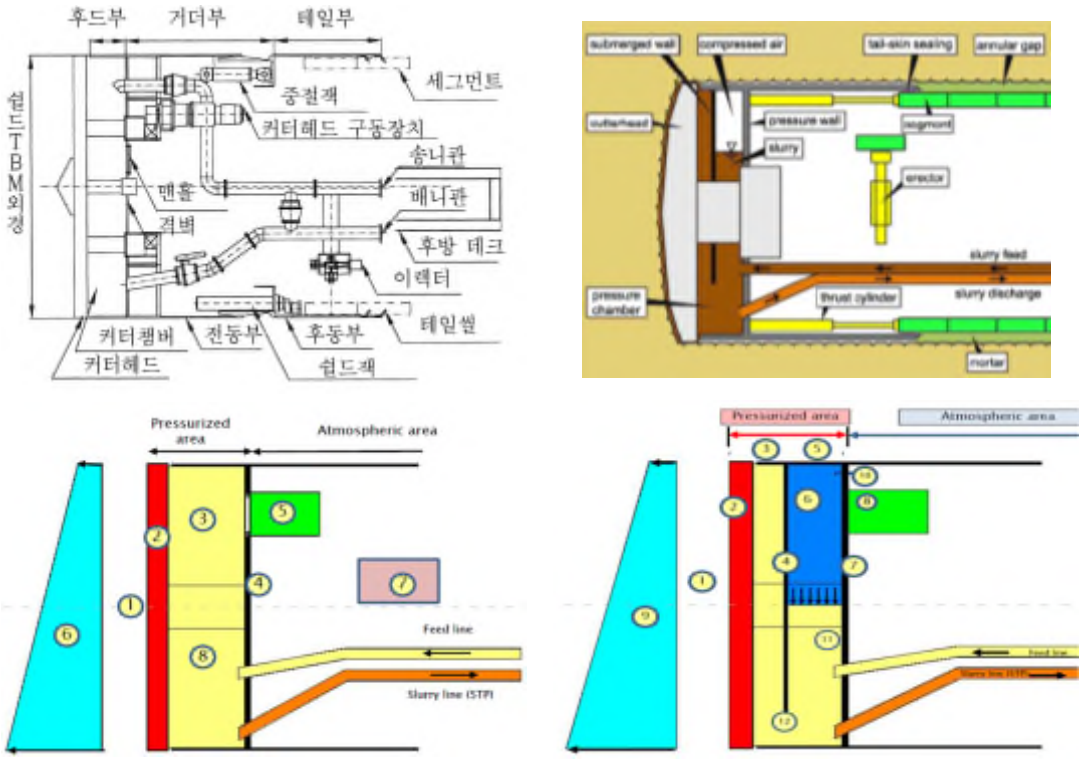
② 지반에 이수의 침투와 함께 이수중에 모래, 실트와 같은 세립분이 지반의 간극에 스며들어 지반강도를 증가시킨다.

③ 유체 이송펌프의 회전수를 조정 또는 공기를 이용하여 챔버내 이수에서 막장에 작용하는 토압과 수압보다 다소 큰 압력을 가하여 막장 안정을 도모한다.

○ 막장 안정을 확보하기 위해서는 지반조사를 바탕으로 적절한 막장 이수압을 설정하고 이 압력이 유효하게 작용하도록 이수의 품질을 적절히 관리할 필요가 있다.



[그림 1.1.1] 이수식 쉴드TBM에서 이수의 거동



(1) 싱글 챔버형 (2) 더블 챔버형

[그림 1.1.2] 이수식 쉴드TBM의 기본구성

(4) 토압식/이수식 쉴드TBM의 주요설비

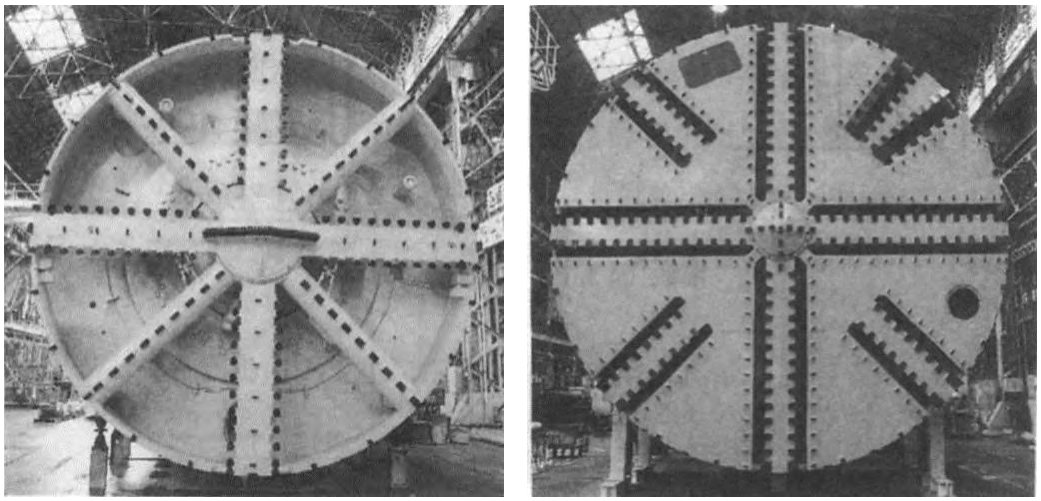
(1) 굴착

① 커터헤드

커터헤드는 쉴드TBM 전면에 디스크/비트 커터라고 하는 굴착도구가 굴착단면의 전단면을 커버하도록 다수 배치되어 있어 정·역회전 작동을 통해 지반을 동심원 형태로 절삭한다. 커터헤드의 형상, 구조와 적용되는 쉴드TBM 형식은 다음과 같이 분류할 수 있다.

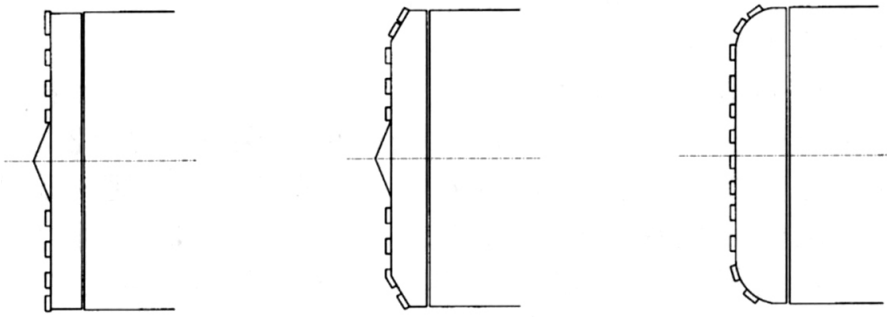
표 1.1.1 커터헤드의 형상, 구조와 적용

구분		종류	적용지반	적용 쉴드TBM 형식
커터헤드	측면 형상	플랫 타입	점성토·사질토·모래자갈	이수식·토압식
		세미 돔 타입	큰 자갈·옥석·암반	
		돔 타입	큰 자갈·옥석·암반	
	구조	면판형	점성토·사질토·모래자갈·옥석·암반	이수식·토압식
		스포크형	점성토·사질토·모래자갈·옥석	토압식



(a) 스포크형 (b) 면판형

[그림 1.1.3] 커터헤드의 정면구조

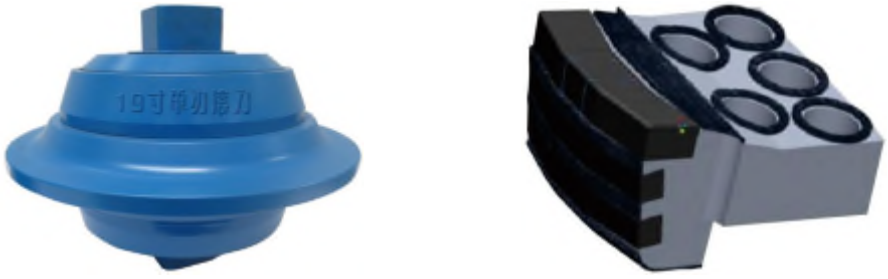


(a) 플랫 (b) 세미 돔 (c) 돔

[그림 1.1.4] 커터헤드의 측면형상

② 디스크/비트 커터

암반용으로는 디스크커터, 토사용으로는 비트커터를 주로 사용한다.



(a) 디스크커터 (b) 비트커터

[그림 1.1.4] 커터의 종류

③ 커터헤드의 구동(Motor)

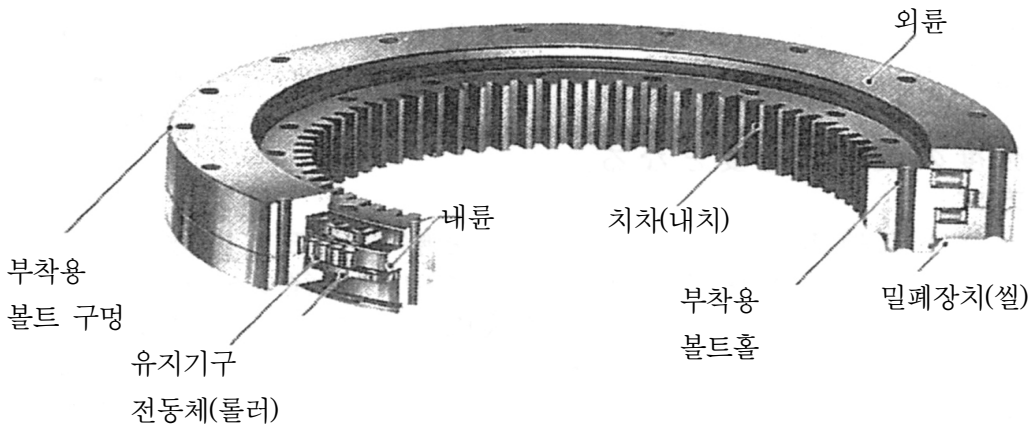
커터헤드의 회전구동기로는 전동모터와 유압모터의 2종류가 있다.

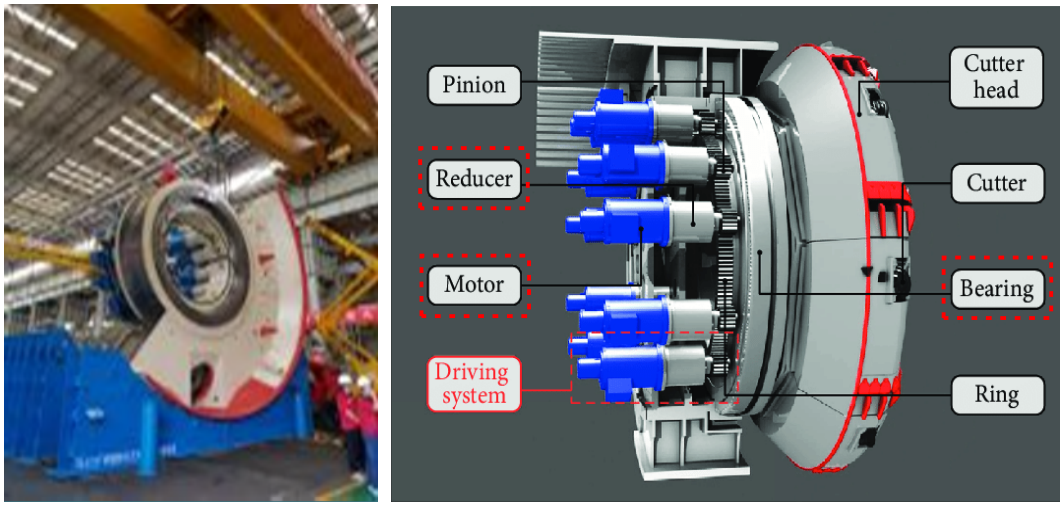
전동모터는 양호한 에너지 효율과 소음이나 발열량 저감의 사유로 많이 이용되고 있으며, 유압모터는 과부하에 대한 대응성이 양호하며, 회전속도 제어가 용이한 장점이 있다.

④ 베어링 및 토사씰

커터헤드 샤프트의 베어링에는 슬라이딩(Sliding)타입과 롤링(Rolling)타입이 있으나 다음과 같은 이유로 롤링(Rolling)타입을 적용하는 경우가 많다.

- 베어링 정밀도가 높고 축의 흔들림이 적어 베어링용 토사씰의 기능을 확보하기 쉽다.
- 베어링 마찰손실이 적다.
- 베어링 지지부의 구조가 단순하여 기기의 길이를 짧게 할 수 있다.





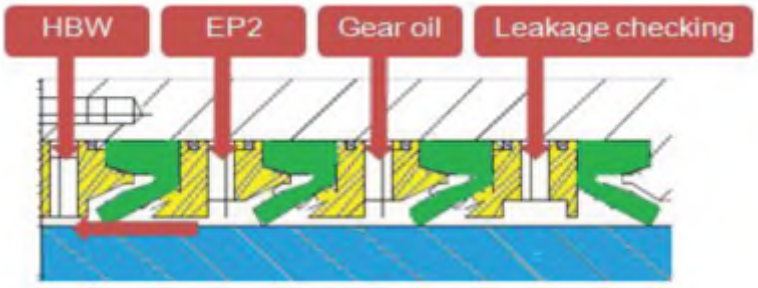
[그림 1.1.5] 원통 롤러 베어링

베어링의 씰에는 여러 가지 형태 및 치수가 있으나 다음과 같은 기능을 가져야 한다.

- 씰 본체는 립을 가진 구조일 것

• 외압에 의해 립이 급속면(닿는 면)에 압착되며, 외압의 크기에 따라 접촉압을 발생하는 셀프 씰 타입일 것

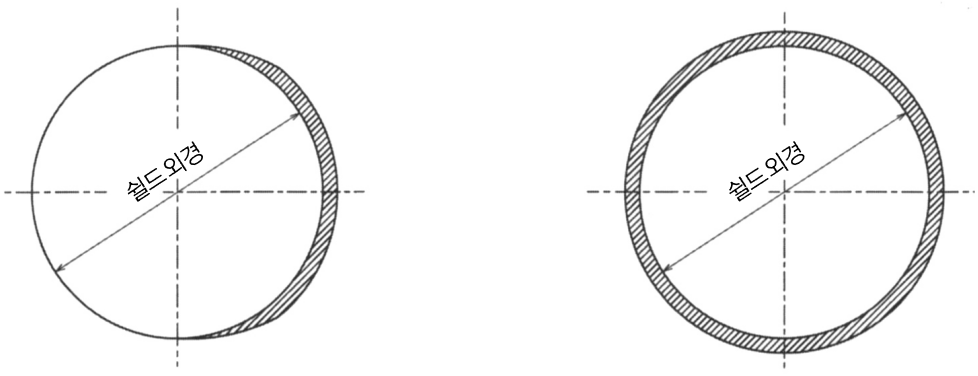
• 립과 립 접촉부의 윤활 및 외압에 의한 립의 국부적 대변형을 억제하기 위해 립 사이에 그리스를 간헐적으로 공급하여 봉입함으로써 압력을 유지시킬 수 있는 구조일 것



[그림 1.1.6] 베어링 씰 및 주입재

⑤ 여굴장치 (Over 커터, Copy 커터)

곡선시공이나 급격한 자세수정 시에 쉴드TBM 방향변화에 저항하는 토압을 경감하기 위해 굴착외경 이상으로 막장을 굴착하는 여굴장치가 필요하다. 여굴장치에는 전주 여굴장치(Over 커터)와 부분 여굴장치(Copy 커터)가 있으며, 양쪽 모두 커터헤드의 외주에서 유압잭으로 압출되는 특수한 커터이다.



(a) Copy 커터의 경우 (b) Over 커터의 경우

여굴범위

[그림 1.1.7] 여굴범위

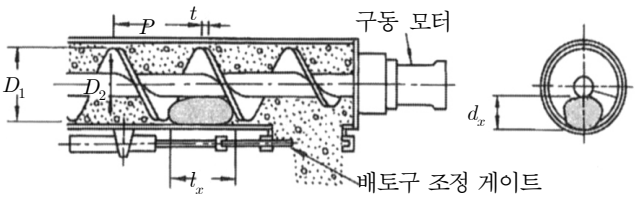
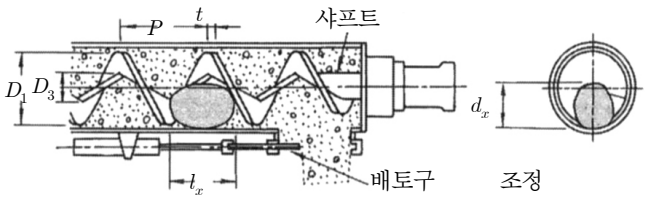
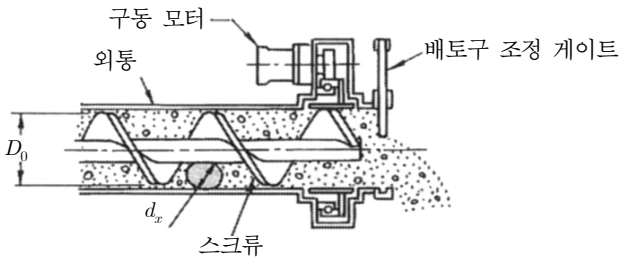
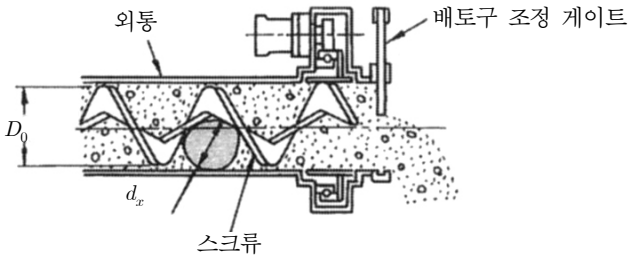
(2) 배토

① (이)토압식 쉴드TBM, 스크류컨베이어

스크류 컨베이어의 배토구조에는 샤프트식과 지수성은 약간 저하되나 큰 자갈의 방출에 유리한 리본식(축 없음)이 있다. 배토구조는 굴착지반, 지하수압, 굴착단면적 등에 따라 적절히 선정한다. 자갈 반출능력을 비교하면 스크류 직경이 동일한 경우 리본식 스크류

컨베이어가 샤프트식에 비해 보다 큰 자갈을 반출할 수 있다.

표 1.1.2 (이)토압식 쉴드TBM, 스크류 컨베이어 방식

구 분		구 조
축구동 방식	샤프트식	 반출 자갈직경(짧은측)) : $d_x = \frac{D_1 - D_2}{2}$
	리본식	 반출 자갈직경(짧은 측) : $d_x = \frac{D_1 - D_3}{2}$ 반출 자갈직경(긴 측) : $l_x = P - t$
외통구동방식	샤프트식	
	리본식	

② 이수식 쉴드TBM, 송/배니/바이패스관

송니관은 지상 플랜트에서 제작한 송니수가 이동하는 관로로, 배니 순환회로에 크러셔 등 처리설비나 순환 펌프를 설치하는 경우 배니 관경과 같은 직경으로 하고 있으나, 손실수두의 저감을 도모하기 위해 배니 관경에 비해 구경을 1~2인치 정도 크게 하는 경우도 있다.

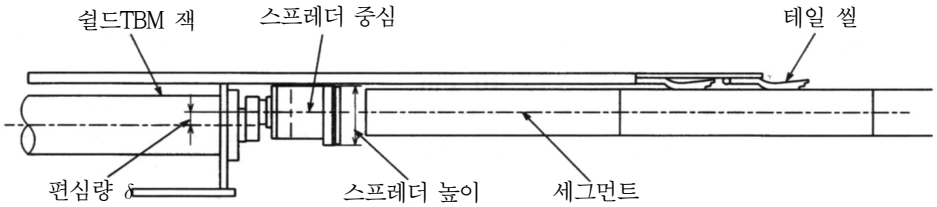
배니관은 이수와 혼합되어 굴착된 버력이 반출되는 관로로, 배니관경은 굴착단면, 송니농도, 굴진속도, 배니농도, 자갈직경 등을 고려하여 토사가 침강하는 한계속도

이상의 유속이 확보될 수 있도록 할 필요가 있다..

(3) 추진 및 중절

① 쉴드잭

쉴드TBM은 본체의 내부 원주를 따라 배치된 쉴드잭(유압잭)에 의해 추진한다. 쉴드잭의 배치, 장비 수 및 1본 당 잭의 장비추력은 세그먼트의 내력, 분할 수나 종방향 철근의 위치관계를 고려하여 결정해야 한다.

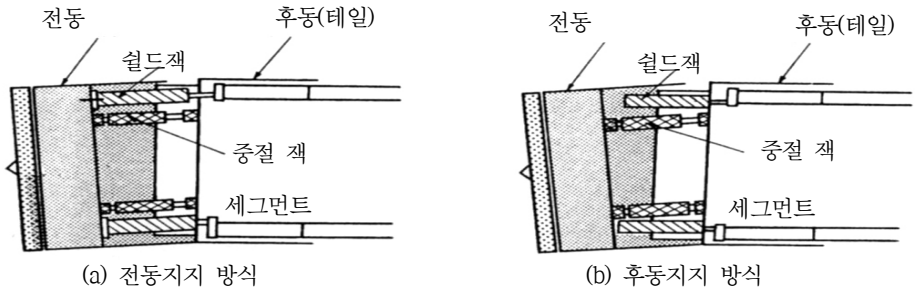


[그림 1.1.8] 쉴드TBM 잭의 구조

② 중절잭

중절장치는 곡선시공 시 쉴드TBM 본체를 전동부와 후동부로 분할하여 굴곡시키는 것으로서 곡선 진행 시 여굴량을 저감시키고 전동 외측에 지반반력에 의한 추진분력을 발생시켜 휘기 쉽도록 하는 장치이다..

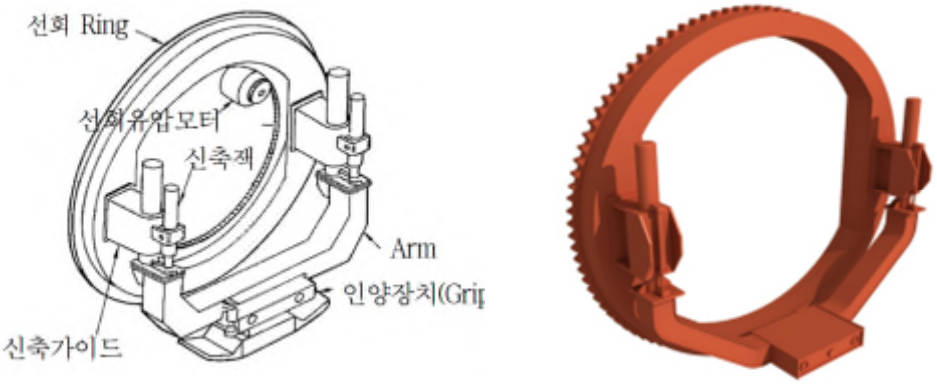
쉴드잭이 지지하는 위치에 따른 분류로서 [그림 2.3.11](a)와 같이 전동부에 쉴드잭을 지지시키는 방식(전동지지)과 [그림 2.3.11](b)와 같이 후동부에 지지시키는 방식(후동지지)이 있다.



[그림 1.19] 중절방식의 종류

(4) 세그먼트 조립 (이렉터)

세그먼트 운송용 견인장치에 있는 구멍에 핀을 찔러 넣는 방식, 세그먼트에 특수형상의 인양구멍을 설치하여 전용 인양장치를 그 구멍에 삽입함으로써 인양하는 방식, 진공장치를 사용한 인양구조가 많이 적용되고 있다.

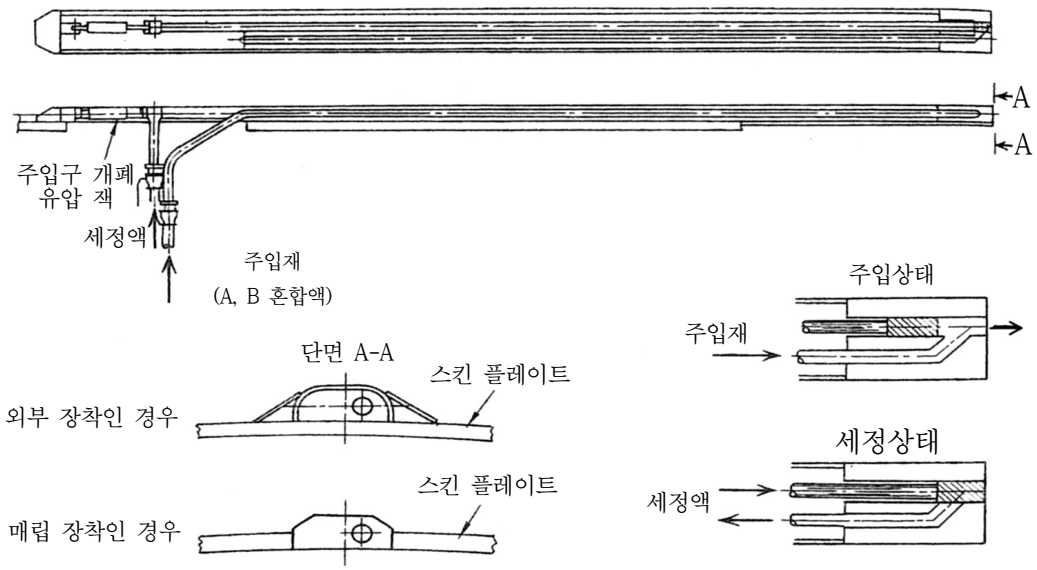


[그림 1.1.10] 세그먼트 조립장치(이렉터)

(5) 뒤채움주입 및 테일씰

① 뒤채움주입

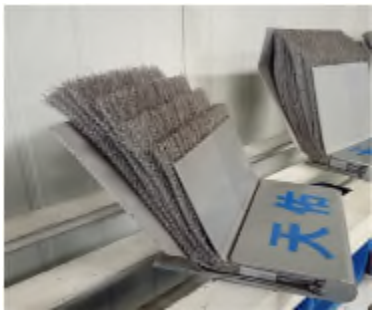
동시 뒤채움 주입장치는 쉴드TBM 통과 후에 발생하는 테일 보이드에 테일 보이드 발생과 동시에 주입재를 충진하여 지반의 후속침하를 방지하기 위한 장치이다. 쉴드TBM 테일의 외측에 뒤채움 주입용 배관을 설치하여 굴진하면서 주입재료를 주입한다. 뒤채움 주입재는 주입관 내에 부착하여 고결되기 쉬우므로 세정장치가 필요하다. 일반적인 세정방법은 물에 의한 것으로서 굴진종료 후 유압 잭에 의해 개폐할 수 있는 플러그로 뒤채움 주입구를 닫고 물세척한다. 그래도 뒤채움 주입관이 폐색하는 경우가 있으므로 배관의 유지관리가 가능하도록 테일 스킨 플레이트 내측에 점검 청소구를 설치하는 경우도 있다.



[그림 1.1.10] 동시 뒤채움 주입장치

② 테일씰

와이어 브러쉬재의 테일 씰을 사용하는 경우, 브러쉬의 선재간 간극 및 와이어 브러쉬 속에 조립되어 있는 메시 시트의 틈을 기타 재료로 채울 필요가 있다. 이를 위해 사용되는 것이 테일씰 충진재이며, 채움이 용이한 섬유계 등을 포함한 고점성의 유성 혹은 수지계 재료가 사용된다.

테일씰 브러쉬	테일씰 장착전경	초기 테일씰 그리스주입
		

[그림 1.1.11] 테일씰 현황

1.2 리스크에 따른 주요옵션 장치 구성

가. 공통사항

(1) 전방보강 그라우팅장치

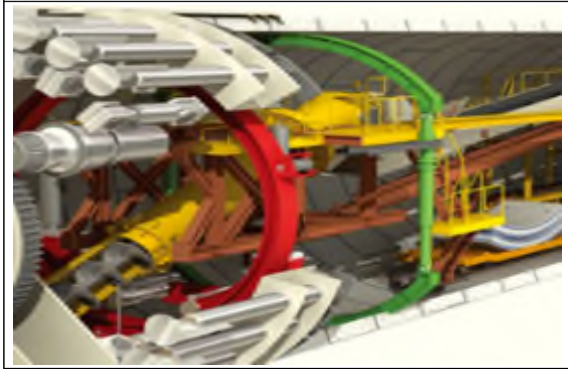
세그먼트 이렉터에 천공장치를 설치하고 그라우팅 설비를 후방에 준비한 후 터널 내에서 직접 지질이상대 보강하거나, 커터교체시 막장안정성을 확보하기 위해 특정범위에 대한 전방보강 그라우팅과 시스템을 계획하는 경우가 있다

그라우팅 개요	장치전경

[그림 1.2.1] 그라우팅 장치 현황

(2) 정원유지장치

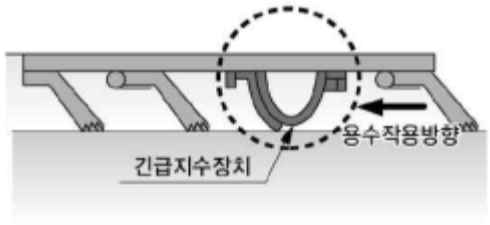
외경 ϕ5m 정도 이상 쉴드TBM에서는 테일부 내에서 기설치한 세그먼트 링의 변형을 가능한 한 작게 억제하여 다음 세그먼트의 조립을 용이하게 하기 위해 정원유지장치를 장착하는 경우가 있다.

장치 개요	정원유지장치
	

[그림 1.2.2] 정원유지장치 현황

(3) 긴급 지수장치 또는 긴급 테일씰 그리스

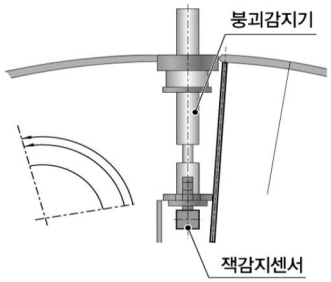
수압 및 뒤채움 그라우팅의 역류를 방지하기 위해 충분한 테일씰을 설치하고 있으나, 고수압 또는 과다 유입수가 예상되어 설치된 테일씰로는 부족하다고 판단될 때 긴급지수창치의 설치 또는 물과 반응하여 경화하는 긴급 테일씰 그리스를 검토하는 경우도 있다.

긴급지수장치	긴급 테일씰 그리스 (Emergnecy Seal)
	

[그림 1.2.3] 긴급 지수장치 및 긴급 테일씰 그리스

(4) 막장붕괴 검지장치

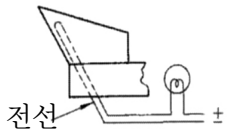
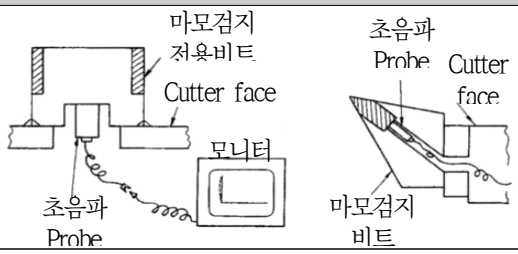
막장의 붕괴검지장치는 막장 상부의 붕괴 유무를 검출하기 위한 것으로서 롯드를 유압잭으로 막장근방의 지반에 압입시켜 지반에 대한 관입이 시작되는 위치(허물어지지 않은 영역)를 유압의 변화로 파악하는 방법이 일반적이다. 또한 롯드 선단에 토압계를 장착하여 관입에 의한 계측값 변화로부터 검토하는 방법도 있다. 암반용 터널에서는 설치 제외가 가능할 수 있다.

장치 개요	막장붕괴 검지장치
	

[그림 1.2.4] 막장붕괴 검지장치

(5) 마모검지장치

장거리시공이나 경질지반의 시공에 있어서 커터의 마모상황을 계측하기 위한 마모검지장치는 여러 개의 비트커터를 선별하여, 마모계측용의 특수한 비트커터를 장착, 마모량을 검출하는 방법이 일반적이며, 여러 가지 형식으로 제작되어 제작사별 형식이 다르다.

배선절단방식	유압배선절단방식	초음파검지방식
		

[그림 1.2.5] 마모검지 장치

(6) Air/Man Lock (또는 Hole), Material Lock 또는 Hole

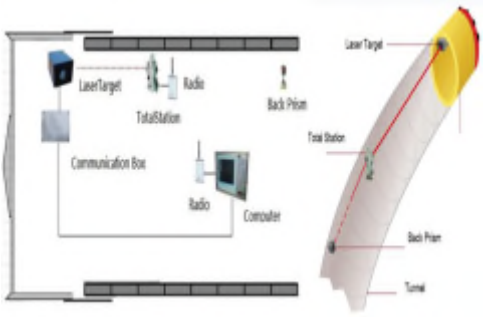
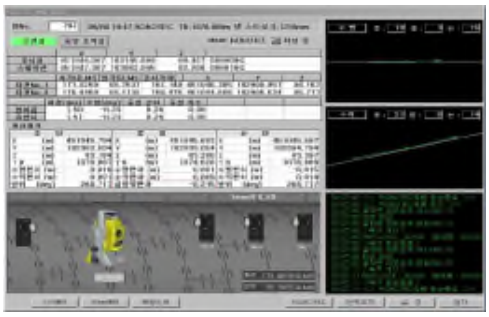
커터교체 또는 챔버내 장비 보수 및 유지관리 작업을 위해 터널막장으로 작업원의 진출입, 자재의 반출입을 위해 막장조건에 따라 선택적으로 적용하는 경우가 있으며, 국내 EPB 쉴드에서는 적용 실적이 없다.

Air/Man Lock	Man/Material Hole

[그림 1.2.6] Air/Man Lock 및 Man/Material Hole 현황

(7) 가이던스시스템

가이던스 시트템 현황은 다음과 같다

Automatic Guidance System	Monitoring
	

[그림 1.2.7] 이던스시스템 현황

(8) 세그먼트 이렉팅 (핀 · 진공)

세그먼트를 인양하는 구조로서 세그먼트의 그라우트홀에 핀 또는 전용 인양장치를 삽입하여 인양하는 핀방식, 진공장치를 이용하는 인양구조가 선택적으로 적용되고 있다.

핀타입	진공타입

[그림 1.2.8] 세그먼트 이렉팅 방식

(9) (롤링방지용) 잭그리퍼

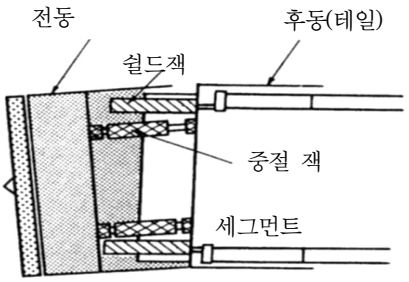
굴진 중 쉴드TBM 롤링, 피칭, 요잉 등 자세를 제어할 목적으로 중절잭과 별도로 설치하는 경우가 있다.

전통부 하단에 설치된 잭그리퍼	전통부 상단에 설치된 잭그리퍼

[그림 1.2.9] 잭그리퍼

(10) 중절장치

곡선시공 시 쉴드TBM 본체를 전동부와 후동부로 분할하여 굴곡시키는 것으로서 곡선진행 시 여굴량을 저감시키고 외측에 지반반력에 의한 추진력을 발생시켜 선회하기 쉽도록 하는 장치이다.

중절기구 및 중절잭	전동 또는 후동방식
	

[그림 1.210] 중절장치 구조

나. 토압식 쉴드TBM

(1) 프론트게이트

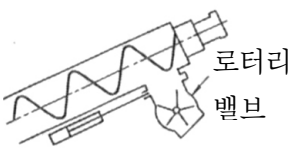
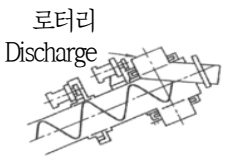
막장에서의 지하수 용수가 많거나 이상 지질대에 조우하여 스크류컨베이어측으로 유입되는 유입수을 차단하기 위한 목적으로 설치하는 경우가 있다.

프론트게이트 설치 전경	작동시 스크류 구동축의 이동

[그림 1.2.11] 프론트게이트

(2) 로터리피더

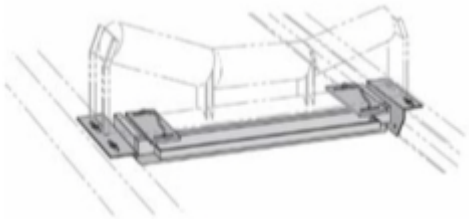
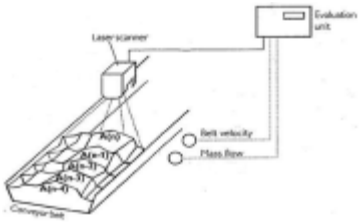
막장에서의 지하수 용수를 로터리 게이트측에서 차단하기 위한 장치로서 로터리밸브 또는 스크류 Discharge타입 등 다양한 설비와 목적으로 준비하는 경우가 있다.

로터리 타입 방식	스크류 Discharger 방식
	

[그림 1.2.11] 로터리피더

(3) 벨트스케일 · 먹스캐너

스크류컨베이어에서 배출되어 벨트컨베이어로 이동하는 과정에서 반출버력의 무게 또는 부피를 측정하는 방법으로서 측정목적에 따라 선택적으로 적용되는 경우가 있다. 또한 지하수 등 토질에 따라 변수가 생길 가능성이 있으므로 참고용 목적으로 사용 될 수 있다.

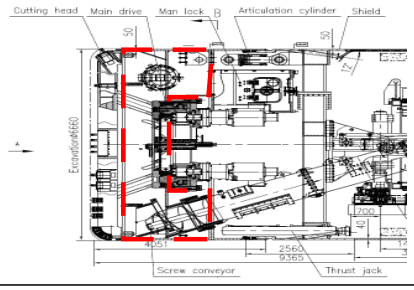
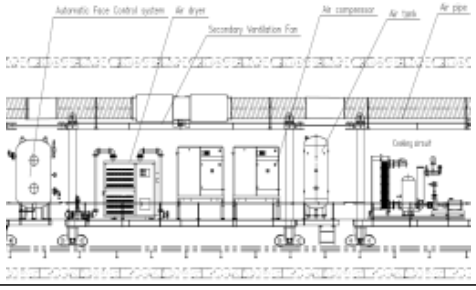
벨트스케일 (Belt Weigh)	먹스캐너 (Muck Scanner)
	

[그림 1.2.12] 벨트스케일 · 먹스캐너

(4) 기타 지질리스크에 대한 옵션

- AFS System (Automatic Face control System)

이토압식에서 막장압관리를 위한 챔버내 압력이 부족하거나 제어하기 어려운 경우 공기압을 부가적으로 가압 또는 감압하여 챔버압을 조정하는 장치이다.

AFS System의 가압 또는 감압	후방대차 설치개요
	

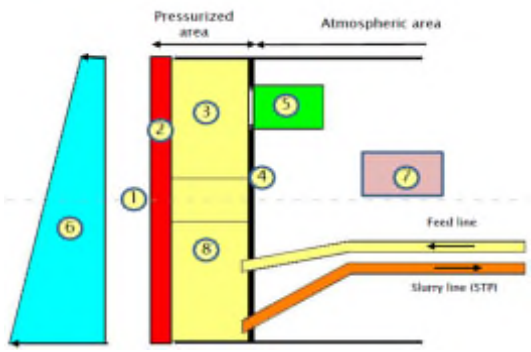
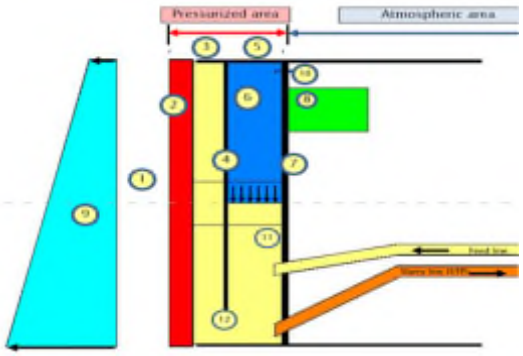
[그림 1.2.13] AFS System (Automatic Face control System)

다. 이수식 쉴드TBM

(1) 싱글 · 더블 챔버

막장이수압의 관리 및 조절방법에 따라 싱글챔버, 더블챔버로 구분할 수 있다.

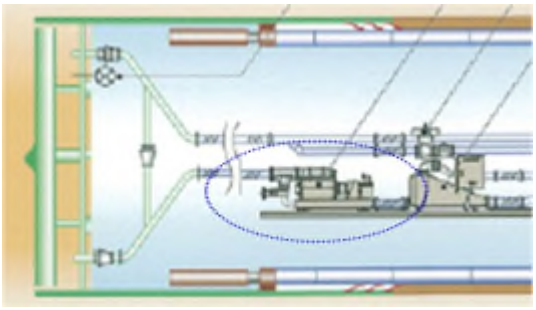
싱글챔버는 막장에 주입되는 송니수의 펌프회전수를 제어하며, 더블챔버는 후방의 압력실에서 공기압을 주입하여 제어하는 방식이다.

싱글챔버	더블챔버
	

[그림 1.2.14] 이수식 쉴드TBM 챔버구조

(2) 전방 · 후방 크러셔

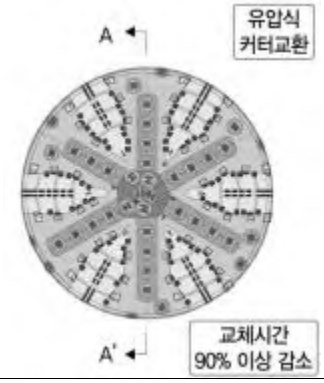
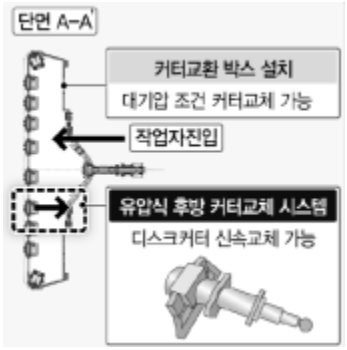
암반 또는 자갈 · 핵석 · 호박돌이 토사와 혼합된 복합지반에서는 배니관의 폐색과 마모를 저감시키기 위해 크러셔를 설치하는 경우가 있다. 전방크러셔는 배니관 앞에서 파쇄하는 방식이며, 후방크러셔는 배니관을 통해 유입된 버력을 파쇄하는 방식으로, 두가지 모두를 적용하는 경우도 있다.

전방크러셔	후방크러셔
	

[그림 1.2.15] 크러셔 구조

(3) 유압식 후반 커터교체 시스템

대구경 이수식 쉴드TBM에서 해 · 하저구간 통과 시 커터교체가 필요할 경우 작업원의 안전과 커터 교체시간을 효율적으로 줄여 줄 수 있는 시스템으로 대기압 상태에서 디스크 커터의 교체가 가능한 방식이다.

전면 면판 형상	유압식 후방 커터 교체 시스템
	

[그림 1.2.15] 유압식 후방커터 교체 시스템

1.3 장비 타입별 주요 옵션 장치

○ 장비타입별 옵션장치 분규 및 주요 기능은 다음과 같다.

표 1.2.1 장비 옵션장치 및 주요 기능

구분	명칭	주요기능	주요 분류			
			안전	기능	편의	기타
공통	전방보강 그라우팅장치	터널내에서 막장안정성 확보	○			
	정원유지 장치	세그먼트 진원유지		○		제작사별 상이
	긴급지수장치, 긴급 테일씰 그리스	지하수, 그라우팅 역류 방지	○			제작사별 상이
	막장붕괴 검지장치	막장 붕괴 예측	○			
	마모 검지장치	커터마모량 예측		○		제작사별 상이
	Air/Man Lock	챔버를 통한 막장 유지보수	○			제작사별 상이
	가이던스 시스템	선형관리		○		제작사별 상이
	세그먼트 이렉팅	세그먼트 조립		○		제작사별 상이
	잭그리퍼	선형유지(롤링 방지)		○		
	중절장치	여굴량 감소 및 선형관리		○		
EPB	프론트 게이트	유입수 일부 차단		○	○	
	로터리피더	막장 유입수 일부 차단		○		
	벨트스케일, 먹스캐너	버력량 예측			○	컨베이어 방식일 경우 적용
	막장가압시스템(AFS)	토압식에서 막장압 관리		○		제작사별 상이
Slurry	싱글 · 더블 챔버	막장압 관리		○		제작사별 상이
	전방 · 후방 크러셔	버력 효율 관리, 폐색 관리		○		

※ TBM은 첨단 굴착 장비로 굴착 효율을 극대화 시키기 위해서는 다양한 옵션장치가 필요하다. 또한 옵션장치는 제작사별 가격과 성능이 상이 할 수 있으며, 쉴드 본체에 장착되어 제작 될 수도 있다.
본 연구에서 옵션장치를 분류한 것은 편의상 분류이며, 발주처가 장비 발주시 지반조건과 현장상황에 맞게 옵션장치를 제안 할 수 있으나, 안전, 기능, 편의사항은 유기적으로 연관되어 있다.