유 틸 리 티 터 널 기술위원회

Annual Technical Report

주요 활동사항

- **암반대상 밀폐형 쉴드TBM 선정**
- **유틸리티터널 쉴드TBM 최적 커터헤드 설계**
- **쉴드TBM 기본설계 프로그램 개발**

세부 활동내용

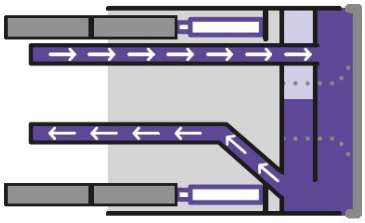
- **암반대상 밀폐형 쉴드TBM 선정 및 쉴드TBM 기본설계 프로그램 개발 관련 논의**
  - 독일 터널 협회(2022) 이수가압식 및 토압식 장비선정 기준 관련 논의
  - 암반대상 디스크커터 압압깊이 및 간격산정 기술 개발 관련 논의
  - 쉴드TBM 기본설계(추력, 토크, 동력) 프로그램 개발 및 사용자 편의성 확보 논의

2. 터널식 전력구 시공을 위한 TBM 선정 고찰

2.1 밀폐형 TBM 종류

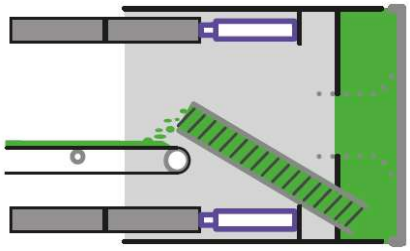
터널식 전력구 건설 중 약 43.7% 정도 시공실적이 있으며, 현재 사용빈도가 증가하는 추세이다. Slurry를 통해 굴착면에 투수성이 낮은 이수 membrane을 형성시켜 토·수압에 대응한다. 유럽식 TBM은 Mixshield가 대표적이며 2개의 챔버를 운영하여 slurry와 공기압을 통해 굴착면 토·수압에 대응한다. 하지만 전력구 건설의 경우 대부분 일본식 TBM이 주로 사용되어 1개의 챔버만을 운영한다.

독일 터널 협회(2022)에서는 암반에서의 Slurry와 EPB TBM의 선정기준에 대해 다음 Table과 같이 제안하였다. 가장 큰 차이점은 양호한 암반조건에서의 적용성과 Confinement pressure의 크기이다.



(a) Slurry TBM(German Tunneling Committe, 2022)

EPB 쉴드TBM의 챔버유지압은 스크류컨베이어의 회전속도, 굴진속도와 그리고 적절한 컨디셔너 주입에 의해 조절되게 된다.



(b) EPB TBM(German Tunneling Committe, 2022)

Table. Area of application and selection criteria in Rock(German Tunneling Committe, 2022)

UCS(MPa)	0-5	5-25	25-50	50-100	100-250	> 250
Slurry TBM	○	○	○	○	○	○
EPB TBM	○	○	○	-	-	-
RQD(Rock Quality Designation)	0-25		25-50	50-75	75-90	90-100
Slurry TBM	○		○	○	○	○
EPB TBM	+		○	○	-	-
RMR(Rock Mass Rating)	< 20		21-40	41-60	61-80	81-100
Slurry TBM	○		○	○	○	○
EPB TBM	+		○	○	-	-
Water inflow per 10m tunnel(l/min)	0		0-10	10-25	25-125	> 125
Slurry TBM	○		○	○	○	○
EPB TBM	○		○	○	○	○
Abrasivity(CAI)	0.1-0.5		0.5-1	1-2	2-4	4-6
Slurry TBM	+		+	○	○	○
EPB TBM	+		+	○	○	-
Swelling potential	none		poor	fair	high	
Slurry TBM	+		+	○	-	
EPB TBM	+		+	○	-	
Confinement pressure(bar)	0		1-4		4-7	7-15
Slurry TBM	○		+		+	+
EPB TBM	○		+		○	-

3. 터널식 전력구 시공을 위한 TBM 기본사양 산정

3.1 디스크커터 수량 산정방법 제시

터널식 전력구는 송전방식과 전압 및 회선 수에 따라 내경(2.6, 3.0, 3.8, 4.5m)이 결정되고, 내경크기에 따라 관련된 쉴드TBM의 기본설계 및 사양도 변경되게 된다. 쉴드TBM 장비의 외경과 굴착경을 산정하기 위해서는 터널식 전력구 세그먼트라이닝 설계두께와 터널식 전력구 종·평면 선형에서의 곡선구간 커브정보가 필수적이다. 본 연구에서는 설계된 쉴드TBM 외경과 굴착경에 대해서 굴착효율과 가압일정 달성을 위한 디스크커터 설계와 추력, 토크, 동력 등의 기본사양을 결정하는 방법에 대해 기술하고자 한다. 내경 3.0m의 터널식 전력구가 대표적으로 많이 건설되고 운영 중에 있다. 16개 터널식 전력구 건설에 사용되었던 쉴드TBM의 평균 기본사양을 다음 표.0와 같이 정리하였다.

Table . 터널식 전력구 건설에 활용돈 쉴드TBM 평균 사양

Machine Type	Driving Type	Power (kW)	Torque (kN·m)	Cutterhead	Thrust force(kN)	Open ratio(%)
EPB 56%, Slurry 44%	유압식 44%, 전기식 56%	568.7	1,221	8.7	12,118	16

3.1.1 압입깊이 산정방법 제시

쉴드TBM 설계의 시작은 디스크커터의 설계(설계하중 및 규격)와 암반특성과의 상관관계 결과인 압입깊이 산정이다. 디스크커터의 설계 연직력에 따라 식(1)을 통해 압입깊이가 산정되게 된다. 기본관계식(1)은 균질한 일축압축강도(27, 57, 70, 99MPa)에서 쉴드TBM의 운전조건(추력 및 면판 회전속도)을 바탕으로 수행한 실대형 굴진시험의 연구결과를 통해 도출되었다(Kim et al., 2020; Kim Kim). 실대형 굴진실험 결과들을 바탕으로 최소자승법을 이용하여 NTNU 모델(Bruland, 2000)의 기본관계식(1)을 통해 곡선을 피팅하여 제안하였다. 압입깊이 산정식 (1)은 [디스크커터 당 연직력, F_n]을 [1mm/rev을 압입하는데 필요한 임계 연직력, F_1]으로 나눈값에 지수함수 형태를 나타내기 위한 압입지수 b의 거듭제곱 형태로 도출되었다. 압입지수 b는 해외모델에서 굴착 용이성과 TBM의 효율을 대표하지만 본 압입지수는 3.6m급 실대형 굴진실험의 결과를 통해 산정식의 형태를 결정하는데 활용하였다.

$$P = (F_n / F_1)^b \quad \text{식(1)}$$

여기서, P는 압입깊이(mm/rev), F_n는 디스크커터에 작용하는 연직력(kN), F_1는 1mm/rev을 압입하는데 필요한 임계 연직력(kN), b는 지수함수 형태를 나타내는 압입지수이다.

식(2)와 같이 1mm/rev을 압입하는데 필요한 임계 연직력(F_1)과 압입지수(b)를 암석의 일축압축강도로 표현하여 제시하였다.

$$P = (F_n / 0.8\,UCS + 27)^{-0.0014\,UCS + 1.69} \quad \text{식(2)}$$

여기서, UCS는 암석의 일축압축강도(MPa)이다.

3.1.2 디스크커터 간격 산정방법 제시

Fig.와 같이 쉴드TBM 커터헤드의 굴착경 안에서 빨간색 영역은 센터 디스크커터가 배열되고, 녹색 영역은 페이스 디스크커터가 배열된다. 파란색 영역은 게이지 디스크커터가 위치되고 최적으로 배열된다. 각 디스크커터 위치에 따라 최적 굴착효율을 달성하기 위해서는 디스크커터 종류에 맞는 설계사항이 고려되어야 한다.

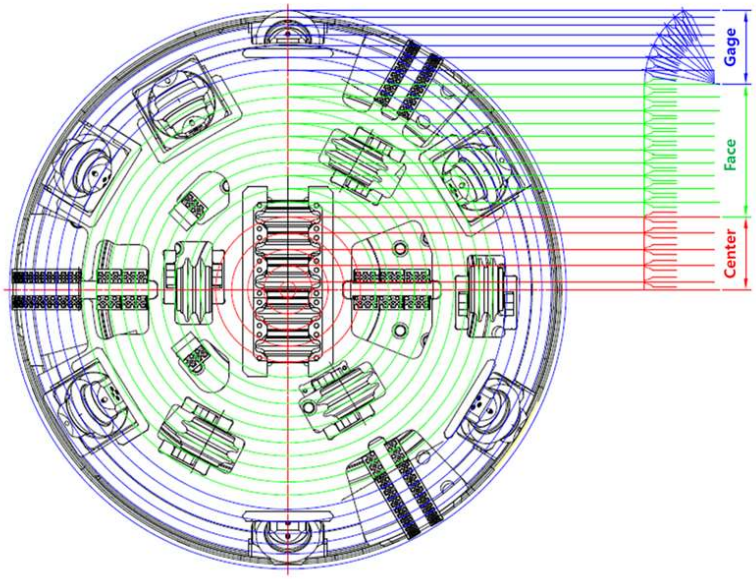


Fig. 커터헤드에서의 센터, 페이스, 게이지 디스크커터 설계영역

① 페이스 디스크커터 설계

계산된 압입깊이와 암석의 일축압축강도를 바탕으로 페이스 디스크커터간 간격을 산정하기 위하여 3차원 개별요소법(PFC 3D 프로그램)을 활용하여 암반의 일축압축강도 50, 70, 100, 150, 200MPa에서의 압입깊이를 4, 6, 8mm, 디스크커터 간 간격을 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180mm 선형절삭시험을 수행하고, 최적 S/P를 분석하였다(Lee et al., 2020). 선행연구의 결과를 활용하여 암반강도 및 압입깊이를 독립변수로 다중회귀분석을 수행하여 종속변수인 디스크커터 간격에 대한 다중회귀분석을 수행하였다. 피어슨 상관 계수를 분석하여 결정계수를 계산해 본 결과, 결정계수 R^2는 0.906으로 계산되었다. 결정계수의 경우 일반적으로 1.0에 가까울수록

강한 양적 선형관계를 보이는 것으로 해석하며, 이러한 결과는 앞서 도출된 회귀식을 이용하여 예측한 커터간격과 수치해석을 통해 선정된 최적 디스크커터 간격이 강한 상관관계를 보이는 것을 의미한다.

$$S = -0.08UCS + 2.2P + 85.47 \quad \text{식(0)}$$

여기서, S는 디스크커터간 간격(㎜)이다.

3.1.3 쉴드TBM 기본설계 프로그램 개발

쉴드TBM 기본설계 프로그램 화면