

❖ 기 계 화 시 공 기술위원회

Annual Technical Report

대구경 쉴드TBM 굴착도구 관련 기술 고찰

(A consideration on technologies related
excavation tools for large diameter shield TBM)

2023. 12

작성자	박진수
출처	한국터널지하공간학회지 23권 1호 Vol.25.No.1 p16~35



사단
법인 한국터널지하공간학회
Korean Tunnelling and Underground Space Association

1. 서론

현대(Modern)의 TBM터널은 직접적인 굴착에 관련된 토목 및 지반에 대한 설계와 시공 기술 발달은 물론 기계, 전기, 통신, 재료, 환기, 방재, 버력처리 및 운송, 지상설비 등 관련기술이 동반성장을 하면서 더욱 크고(대구경화), 길고(장대화), 똑똑해(스마트화) 지고 있다. 특히, 고수압조건의 해·하저터널이나 환경과 민원발생의 최소화를 위한 환경보호구역과 도심지 통과구간에 TBM적용은 더욱 가속화 될 것으로 판단된다.

대표적인 굴착도구(Excavation tools)인 디스크커터(Disc cutter)는 굴착과 동시에 필연적으로 발생하는 소모품으로 마모와 교체주기에 대한 정확한 예측이 수반되지 않으면, 공사비는 물론이고 공사기간에 막대한 영향을 주게 되므로, 디스크커터는 주어진 현장 지질여건에 맞게 신중하게 선택되고 적용되어야 한다(Park, 2022). 또한, 해·하저 구간에서 디스크커터 점검과 교체를 위한 CHI(Cutter Head Intervention)는 되도록 지반 및 지하수 조건이 좋은 곳에서 실행 할 수 있도록 계획하지만, 예기치 못한 곳에서 발생한 CHI는 챔버(Chamber)내 고수압 조건에서 작업자의 안전과 작업효율에 많은 영향을 미친다. 근래의 굴착도구 관련 기술은 CHI도 대기압 상태에서 할 수 있는 구조로 되어있으며, 굴착도구의 모니터링을 통해 더 나은 다운타임(Downtime)의 최소화가 가능 할 것으로 분석된다.

본고에서는 대구경 단면에 적용된 굴착도구(Excavation tools) 관련 기술에 대하여 아래와 같은 순서로 고찰하여 기술하였다.

- 설드 및 굴착도구관련 발전 요약
- 대표적인 굴착도구인 디스크커터(Disc cutter) 일반사항
- 디스크커터 마모예측모델 고찰
- 근래에 적용된 굴착도구 관련 기술 고찰
- 결론

본고는 국내 최초 적용된 굴착관련 기술에 대하여 소개하고, 향후 설계와 시공의 참고자료로 제공하고자 한다.

2. 쉘드 및 굴착도구 관련 발전 요약

쉘드의 탄생과정은 프랑스로 영국인인 마크 이잠바드 브루넬(Marc Isambard Brunel)이 여러 개의 셀(Cell)안에서 작업자가 독립적으로 작업 할 수 있는 쉘드를 이용한 터널링 공법의 원리를 발견하고, 그림 1과 같이 차츰 변형하고 개선하여 영국 템스(Thames)강 하부를 통과 하는 터널을 뚫는 프로젝트에 적용하였다(TBM터널 이론과 실무, 2022).

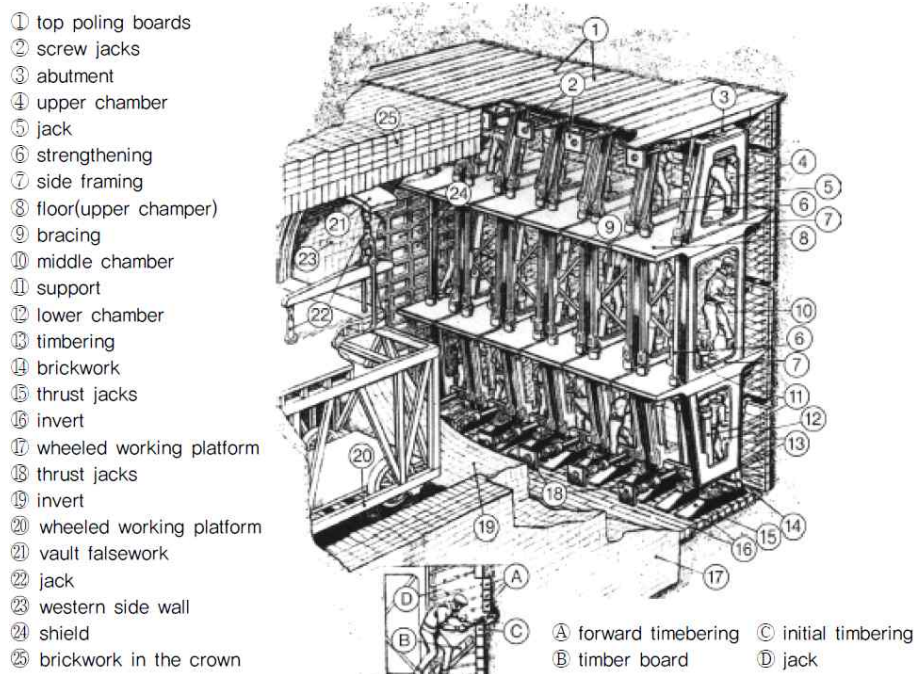


그림 1, 템즈강 아래를 지나는 브루넬의 쉘드(B.Maidl,2000)

이 당시 브루넬의 쉘드를 관찰해보면, 현대의 TBM에서 중요한 핵심요소인 커터헤드와 디스크커터는 인력굴착으로 당시의 기술력으로는 굴착도구는 아쉽게도 사람의 손을 이용한 수동 도구 였던것으로 분석되며, 단지 작업자의 안전을 위해 지반의 하중을 쉘드가 받아주는 역할이 가장 큰 특징으로 판단된다.

쉘드는 터널의 내부 둘레면을 따라 생기는 공간을 쉘드에 의해서 유지되는 동안, 터널 굴진 면을 안정화 시키는 방법으로, 지질 및 지하수 상태를 고려하여 그림2와 같이 크게 다섯가지 굴진면 지지방식으로 발전하였다(B. Maidl et al., 2000).

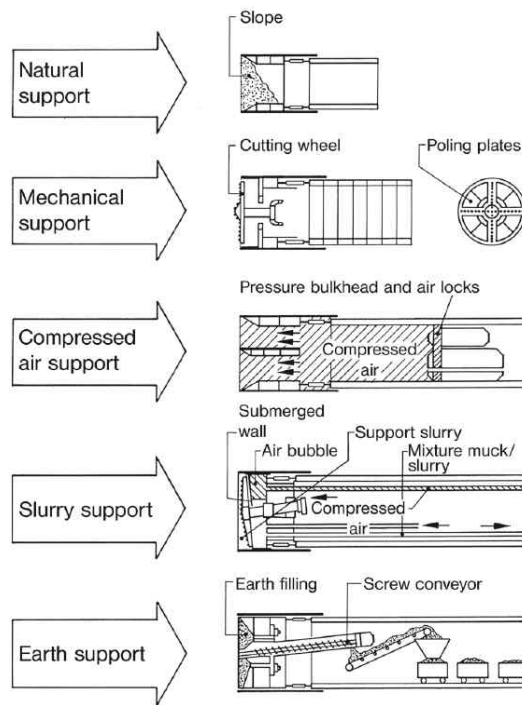


그림 2, 터널 굴진면에 대한 다양한 안정화방식(B.Maidl et al., 2000)

굴진면을 안정화 시키는 방법에 따라 굴착효율을 증가시키는 굴착도구는 손에 의존하는 팽이, 삽, 끌 등에서 수많은 경험을 통해 개발되고 변모되어 현재는 암반의 절삭효율을 높이는 디스크커터를 사용하고 있으며, 지금도 디스크커터는 다양한 방법으로 개선되어 TBM터널 공사에 널리 적용되어지고 있다(그림 3 참조).

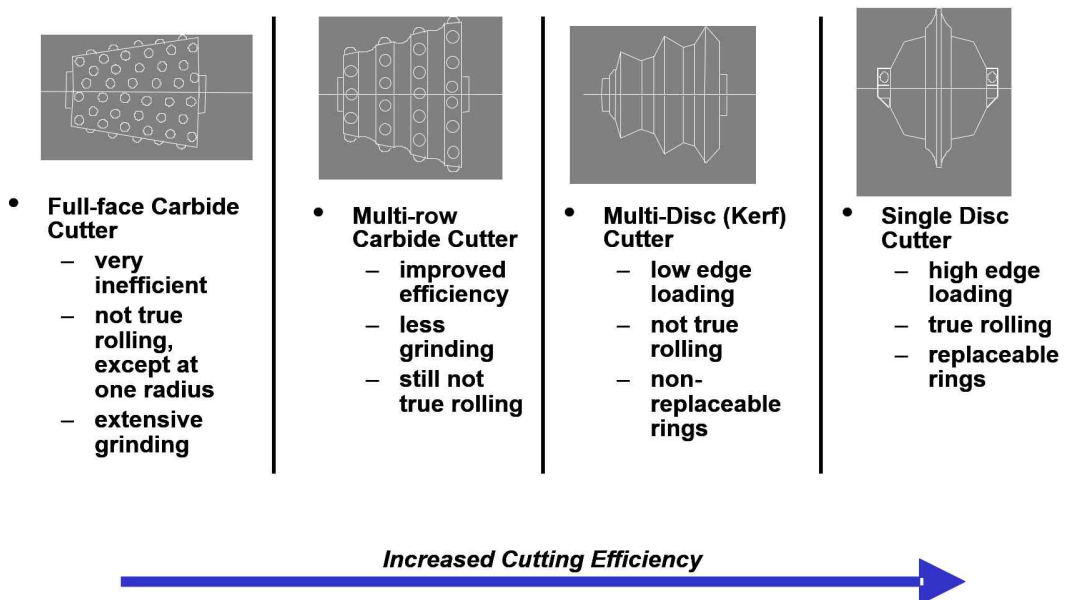


그림 3, 암반절삭용 커터의 발전과정과 디스크커터의 장점(기계화시공 설계편, 2008)

2. 대표적인 굴착도구인 디스크커터(Disc cutter) 일반사항

2.1 커터헤드와 디스크커터

커터헤드는 TBM의 가장 핵심적인 부분 중 하나로 암반을 굴착하는 디스크커터와 토사를 굴착하는 커터비트를 지반조건에 맞게 배치와 간격을 고려하여 조합·구성되며, 굴착된 버력이 커터헤드의 개구부분으로 통과하여 챔버 안으로 들어가게 된다. 디스크커터는 자체의 회전력을 갖지 않으나, 커터헤드는 쉴드잭의 추력이 커터헤드에 전달되고, 구동모터에 의해서 메인베어링을 시계방향 또는 반시계방향으로 회전시켜 발생된 회전력이, 지반을 직접 접촉하게 되는 디스크커터에 고스란히 전달하게 된다. 식 2.1 은 커터헤드와 디스크커터와 상호관계이다(Park, 2022).

커터헤드(쉴드잭 추력+메인베어링 회전력)

$$= \text{각 디스크커터 연직력} + \text{회전력} + \text{측력} \Rightarrow \text{지반굴착} \quad (2.1)$$

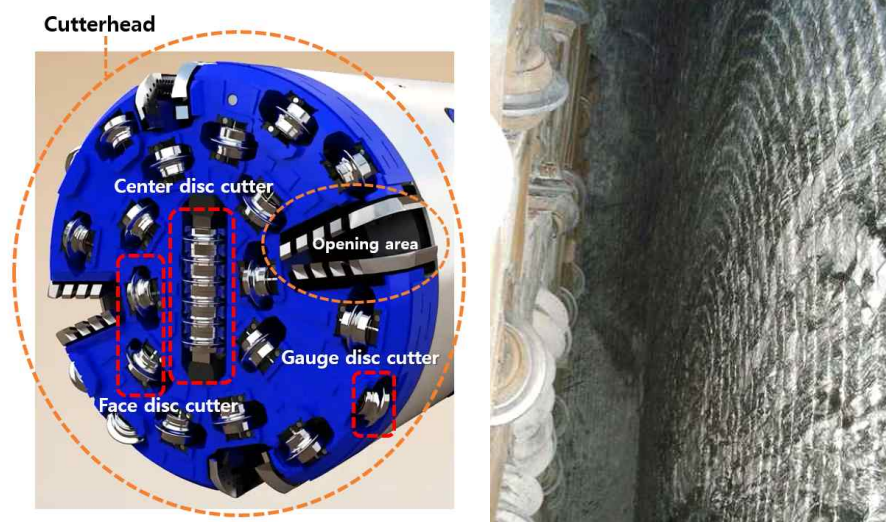


그림 4, 커터헤드형상과 암석에 새겨진 디스크커터 궤적(Park, 2022)

2.2 디스크커터 개요

디스크커터는 풍화암 이상의 지반에서 암반을 굴착하는 도구로서 일반적으로 12인치부터 19인치까지 크기가 다양한데 현재는 20인치까지도 적용이 가능한 상태이다. 중소형의 유틸리

티(Utility) 터널의 경우 15인치 이하의 디스크커터 사용이 일반적이지만, 대구경 교통터널로 갈수록 17인치 이상의 디스크커터가 적용되어 진다. 디스크커터의 간격은 절삭효율 및 에너지 효율을 극대화 하기 위한 방법으로 인접한 디스크커터와 동일한 궤적을 회전하기 않도록 하고 버력을 사이즈를 고려하여 커터헤드 설계에 적용된다. 디스크커터는 허브에 설치되는 커터 링의 개수와 설치방법에 따라 싱글 디스크커터(Single disc cutter), 더블 디스크커터(Double disc cutter), 트윈 디스크커터(Twin disc cutter), 트리플 디스크커터(Triple disc cutter) 등으로 구분한다(Bae et al., 2015).

표 1. 디스크커터의 종류

디스크커터		
싱글디스크커터 (페이스,게이지)	더블디스크커터 (페이스)	트리플디스크커터 (센터)
		

센터커터는 디스크커터의 궤적이 매우 작고 이에 따른 배치가 쉽지 않아 한 개의 샤프트에 다수의 커터링이 부착된 형태의 트리플 디스크커터가 많이 적용되고, 페이스커터 중 일부는 디스크커터의 배치와 간격의 문제로 더블디스크커터와 트윈디스크커터를 적용하기도 한다, 형상과 구조는 그림 5에 나타난 것처럼 차이가 있다.

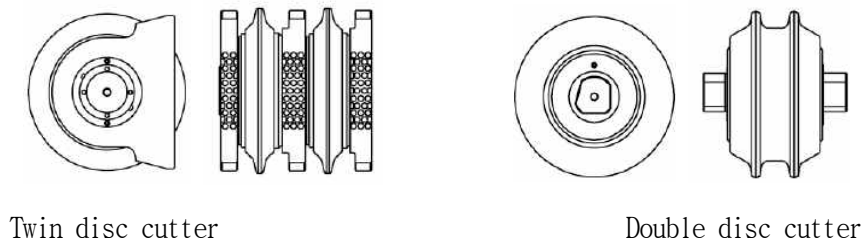


그림 5, 트윈디스크커터와 더블디스크커터의 형태

2.3 디스크커터 재질 특성

디스크커터는 단일지층 및 복합지층의 가혹한 조건 하에서 사용되는 굴착도구로, 특히 지반과 맞닿는 커터 링은 고강도와 고인성을 필요로 한다. 현재 국내 디스크커터의 커터 링 재질은 경도 HRC45 이상, 충격흡수에너지 40J 이상의 열간 공구강인 SKD61, 경도 HRC56 이상, 충격흡수에너지 10J 이상의 냉간 공구강인 SKD11이 사용되거나 그 이상의 강들이 사용된다. 국외 디스크커터의 경우, 제조사별로 차이가 있지만 일반적인 합금강보다 높은 인성, 열 피로 균열에 대한 저항성, 내마모성이 강한 공구강 재료를 사용한다(철드TBM 활성화를 위한 경제성 확보방안 연구, 2020).

표 2. 디스크커터 재료와 역할(철드TBM 활성화를 위한 경제성 확보방안 연구, 2020)

구분	역할	비고
C	강도와 경도에 영향	-
Si	페라이트 조직 강화	-
Mn	충격 및 내마모성 향상	-
Cr	열처리시 경화능력 증가	-
Ni	충격인성 향상	-
Mo,V,Cu,P,S	기타 개선 사항	-

철드TBM 활성화를 위한 경제성 확보방안 연구보고서(2020)에 따르면, 국내 디스크커터의 주재료인 SKD 강종과 국외 디스크커터의 내마모를 측정(Pin-on disc wear test)한 결과, 국외 디스크커터의 마모량이 0.0008g 으로 SKD강종에 비해 낮게 나타난다. 샤프트 충격흡수에너지 시험(U-notch)결과에서도 국외 디스크커터의 결과(9~10J)가 SKD강종의 결과(3J)에 비해 높게 측정된다. 따라서 국내에서 많이 사용하는 SKD11과 SKD61을 커터 링 재료로 사용할 경우, 열처리 공정을 통해 경도, 내마모, 내충격성을 향상시키는 작업이 필요한 것으로 분석하였다.

2.4 디스크커터 주요 구성

디스크커터는 그림 6과 같이 분해하여 살펴 볼수 있으며, 주요구성은 커터링(Cutter ring), 허브(Hub), 베어링(Bearing), 플로팅셀(Floating seal), 리테이너(Retainer), 샤프트(Shaft)로 되어 있다.

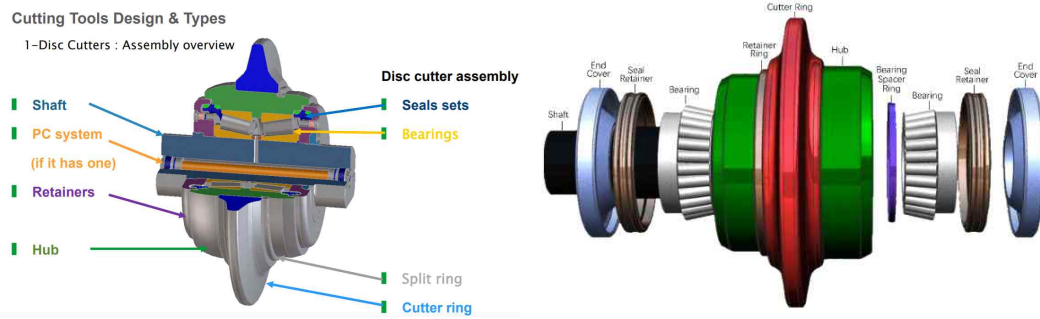


그림 6, 디스크커터 주요 부분(Herrenkencht, 2008)

굴진면과의 직접적인 접촉은 커터링이 하지만 커터링에 작용하는 수신톤의 연직하중을 극복하고 디스크커터를 회전하게 해주는 것은 베어링으로 디스크커터에서 핵심적인 부품으로 분류된다. 디스크커터의 정격하중(Load rating)은 베어링에 최대 하중용량 의해 결정된다(표 3 참조). 베어링은 디스크커터의 허브 내측에 설치되므로, 디스크커터의 내부로 수분 및 토사가 유입될 경우 베어링의 회전 문제가 유발되므로 이를 막아주는 플로팅셀의 성능과 연관이 있다.

표 3. 생산시기별 디스크커터 직경과 정격하중(Roby et al., 2008)

직경(mm)	정격하중(kN)	생산시기(년도)
279 mm(11")	85	1961
305 mm(12")	125	1969
330 mm(13")	145	1980
355 mm(14")	165	1976
394 mm(15.5")	200	1973
413 mm(16.25")	200	1987
432 mm(17")	215	1983
483 mm(19")	312	1989
508 mm(20")	312	2006

3. 디스크커터 마모 예측 모델 고찰

3.1 디스크커터의 마모 형태

디스크커터의 마모형태는 암석과 연속적인 마찰에 의해 발생하므로 디스크커터를 구성하는 재질과 암석의 광물 조성, 일축압축 강도, 석영함유량 등에 따라 다양하게 발생하며 그림 7에 정리하였다. 정상마모는 대상암반에 대하여 균등한 마모를 보이는 형태로, 디스

크터의 마모예측모델도 정상마모를 기준으로 한다. Tapering/Grooving 마모형태는 디스크크터의 경도가 일부 암반의 강도가 위치에 따라 낮게 작용됨에 따라 홈이 남듯이 뿔뿔하게 남은 형태이며, Mushrooming은 높은 강도의 암반을 상대적으로 낮은 경도를 가진 디스크크터가 굴착하게 될 때 나타나는 형태이며, Blockage는 단단한 암석의 높은 응력으로 인해 디스크크터가 조각으로 탈락하게 될 때 나타나는 형태이며, Brittle fracture는 대상 암석이 균질하지 못한 경우에도 발생하지만, 내부부품의 다양한 원인으로 취성파괴가 발생하기도 한다(Park, 2022). 디스크크터의 마모형태는 대상지반에 직접적인 접촉으로 인한 마찰에 의해 다양한 마모형태를 발생시키지만, 디스크크터가 여러 가지 부품들로 이루어진 바, Bae et al.(2015)은 디스크크터의 내부적인 손상원인은 씰(Seal)부의 손상으로 인한 윤활유의 부족, 토사 및 수분의 침투, 과부하, 과열, 조립문제, 소재문제 등이 있으며, 디스크크터의 회전 가능 여부는 손상정도에 따라 결정되며 이는 베어링의 손상과 밀접한 관련이 있는 것으로 분석하였다.

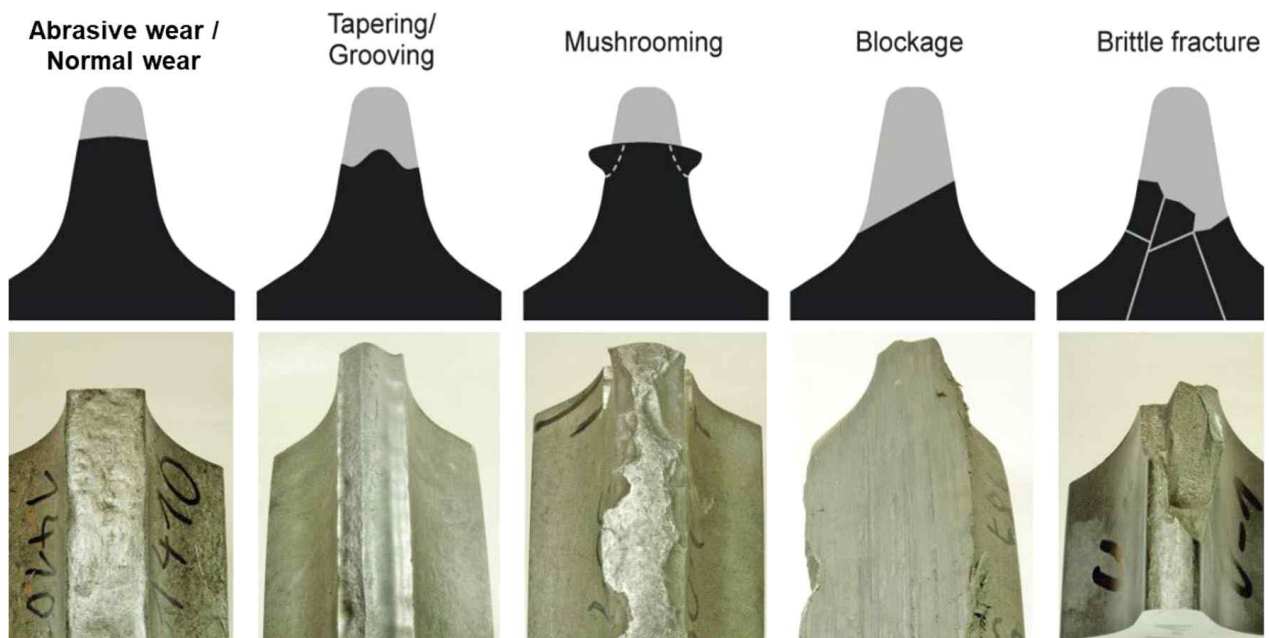


그림 7, 디스크크터 각종 마모형태(Ellecosta et al., 2018)

3.2 디스크크터의 마모예측 모델

(1) CSM 모델

CSM모델은 미국 콜로라도 광산대학(Colorado School of Mines, CSM)에서 30년 이상 축적

된 현장자료와 실험 결과를 근거로 만들어진 모델로 세르샤 마모시험(CAI)를 이용하여 디스크커터의 수명을 예측하였다. CSM모델에는 커터헤드 설계모델, 굴진성능 예측 모델이 포함되어 있다. 하지만, 커터헤드의 설계, 최적 굴진속도 산출 및 커터 수명 예측 등에 관한 세부 근거를 제공하지 않지만, Ko et al.(2014)은 Rostami et al.(2005)와 Frenzel(2011)의 연구결과를 이용하여 추정하였다. CSM모델에서 디스크커터가 회전하여 절삭 할 수 있는 최대 선형거리(CL) 형태로 식 3.1과 같이 제시하였다.

$$CL = \frac{2054}{CAI} \frac{D_c}{432} [km] \quad (3.1)$$

여기에서, D_c 는 디스크커터의 직경(mm)이다. 커터헤드가 한번 회전 할 때 평균회전거리(\bar{sr})와, 디스크커터가 교체될 때까지의 회전수(U_c)를 식 3.2와 3.3으로 제안하였다.

$$\bar{sr} = \frac{0.6D\pi}{1000} [km] \quad (3.2)$$

$$U_c = \frac{CL \cdot \bar{k}}{\bar{sr}} \quad (3.3)$$

여기서, \bar{k} 는 디스크커터 위치에 관련된 마모 보정계수이다. 위와 같은 식으로 하나의 디스크커터가 마모되어 교체될 때까지의 굴착 할 수 있는 부피를 디스크커터의 수명(H_f)로 제안한 식은 3.4와 같다.

$$H_f = \frac{D^2\pi}{4} \cdot U_c \cdot \frac{\rho}{1000} \cdot \frac{2S}{D \cdot 1000} [m^3/C] \quad (3.4)$$

(2) Gehring 모델

Gehring(1995)은 디스크커터의 1m 회전 거리당 중량 손실을 세르샤 마모지수(CAI)를 활용하여 표현하며, 비커터 마모(Specific cutter ring wear, V_s)로 mg/m 단위를 사용한다.

$$\nu_s = 0.74CAI^{1.93} \quad (3.5)$$

Gehring은 그림 8과 같이 디스크커터의 크기와 커터의 틱에 따라 마모질량을 나타냈으며 17인치, 커터팁 19.05mm 디스크커터의 경우, 3,500g의 중량손실이 발생했을 때 교체가 필요할 것으로 판단하였으며 이를 각 디스크커터의 회전 거리 형태로 제시한다.

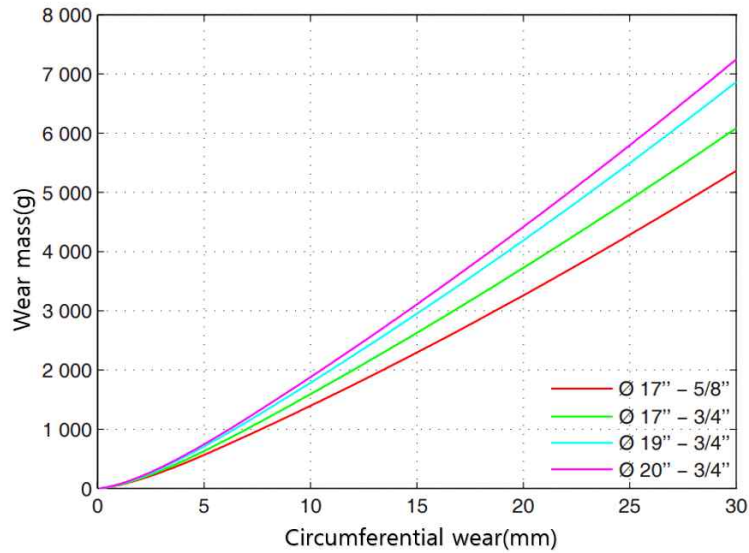


그림 8, 디스크커터 마모깊이와 마모질량과의 상관관계(Simttunnel pro 2.0, 2013)

디스크커터의 수명(H_f)은 3.6과 같이 제안하였다.

$$H_f = \frac{\Delta G \cdot \rho \cdot D^2}{4 \cdot \bar{D} \cdot v_s \cdot N} [m^3/c] \quad (3.6)$$

여기서, ΔG 는 디스크커터의 마모질량(g), ρ 는 커터헤드 1회 회전했을때의 디스크커터의 관입깊이(mm), D 는 커터헤드 직경(m), \bar{D} 는 디스크커터의 평균 회전직경으로 일반적으로 $0.6D$ 이며, N 은 디스크커터의 개수이다.

(3) NTNU 모델

노르웨이 과학기술대학(NTNU:Norwegian University of Science and Technology)에서 개발된 모델로써, 35개 TBM터널에서 약 250km 이상의 현장 굴진자료 및 지질자료를 통계

적으로 분석하여 체계화한 모델이다. 1976년 최초의 모델이 발표된 이후 수차례 보완 및 수정을 거쳤으며 2016년 보완된 모델이 현재의 모델이다. NTNU모델은 크게 굴진속도 예측과 커터의 평균수명으로 구분할 수 있으며, 이 평가를 위해 3가지의 시험, 즉, Brittleness test, Siever's J-value test, AVS(Abrasion Value Steel)를 실시하여야 하고, 이상의 실험실 시험으로부터 얻어진 결과로 DRI(Drilling Rate Index, 천공속도지수)와 CLI(Cutter Life Index, 커터수명지수)를 산정한다. NTNU모델은 TBM의 핵심사항들을 산출하여 주로 암반용 TBM에 적용이 가능하다는 점의 한계를 가지고 있지만, 그 예측모델의 산정과정 및 관련된 시험법이 공개되어 있다는 점에서 활용도가 높다고 평가 할 수 있다.

천공속도지수인 DRI는 S_{20} 과 S_J 값으로부터 그림 9와 같이 결정되며, 커터수명지수 CLI는 S_J 와 AVS로부터 식 3.7같이 제안하였다.

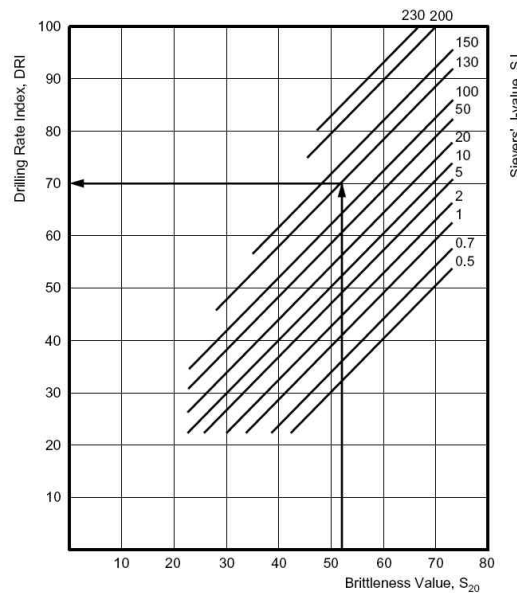


그림 9 DRI의 산정(NTNU, 1998)

$$CLI = 13.84 \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (3.7)$$

그 외 NTNU모델은 커터의 수명은 암석의 석영함유량에 따라 달라지는 것으로 분석하여 석영함유량에 대한 보정계수 k_Q 를 구분하였고, 기타 기계적인 요인에 대해서는 커터헤드 직경, 커터헤드 RPM, 디스크커터 개수, 재질, 타입등에 영향을 받는 것으로 분석하였으며, 식 3.8과 같은 디스크커터의 굴착부피를 산정하였다.

$$H_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{RPM} \cdot k_N}{N} \cdot \rho \cdot RPM \cdot \frac{60}{1000} [m^3/C] \quad (3.8)$$

여기에서, H_0 는 평균커터 위치에서 한 개의 커터링 수명, k_D 는 커터헤드에 직경에 대한 보정계수, k_Q 는 석영함유량(Q%)에 대한 보정계수, k_{RPM} 은 커터헤드 회전에 대한 보정계수이다.

위와 같은 대표적인 마모예측모델은 많은 현장에서 적용되어 검증되었으며, 설계 단계나 시공전 단계에서 디스크커터의 마모량을 계산하여 전체 소모수량을 산정할 수 있다. 하지만, 커터헤드의 원형특성에 따라 각각의 디스크커터 위치별 굴착부피(마모량)의 산정은 어려운 실정으로 시공현장에서는 전문시공회사가 보유하고 있는 경험식을 적용하여 디스크커터의 교체주기를 산정하는 것이 현실이다.

3.3 CHI가 터널공사에 미치는 영향

디스크커터 교체를 위한 CHI가 TBM터널공사에 미치는 영향에 대하여 Wang은 TBM에서 커터헤드 및 굴착도구의 유지보수 및 교체비용은 터널건설의 총 시간 및 공사비의 20~40% 차지하는 것으로 분석하였으며(2017), Zhaouang은 중국의 Qinling 터널에서 디스크커터를 주기적으로 검사, 교체 및 수리하는데 필요한 시간은 전체 터널건설 시간의 1/3 이상인 것으로 검토하였다(2007). 디스크커터의 마모는 암반의 강도, 구성하는 광물의 성분, 터널막장의 지반구성, TBM 장비의 형식과 주요 사양 등의 요인으로 마모율이 다르게 나타날 수 있으며, 복합지반의 경우 장비의 굴진면에 토사와 암반이 동시에 접촉하여 다양한 조건의 영향으로 정상마모와 비정상마모가 다수 발생하여 굴진효율이 저할 될 수 있다. 또한 디스크커터의 위치에 따라 디스크커터 궤적이 각기 달라 마모율에 대한 정확한 산정이 매우 어려운 실정이다(Park, 2022). 또한 해·하저구간의 경우 굴착심도에 따라 챔버에 작용하는 고수압을 적응하기 위한 맨락(Man-lock)과 안전장치를 통해 단계적으로 접근해야 하며 여러 가지 작업제한 조건을 준수해야 한다. 그림 10은 맨락을 통한 압력상태에서 CHI에 대한 작업 현황이다.

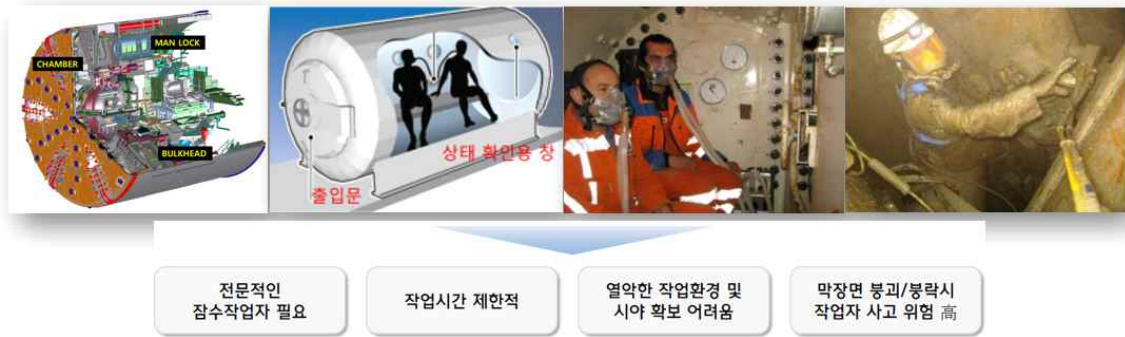


그림 10 맨락(Man-lock)을 통한 압력상태에서 CHI 작업 현황

4. 근래에 적용된 굴착도구 관련 기술 고찰

4.1 Accessible cutterhead(고수압조건 접근가능 커터헤드)

TBM터널에서 직경의 증가는 원의 특성으로 인하여 굴착면적과 굴착부피는 비례하는 것보다 훨씬 더 많이 증가한다. 즉, 3.5m의 전력구터널과 14.01m의 도로터널은 직경면에서 약 4.0배의 차이가 나지만, 1링당 굴착면적은 약 16.0배 굴착부피는 약 26.7배 차이가 난다(그림 11 참조).

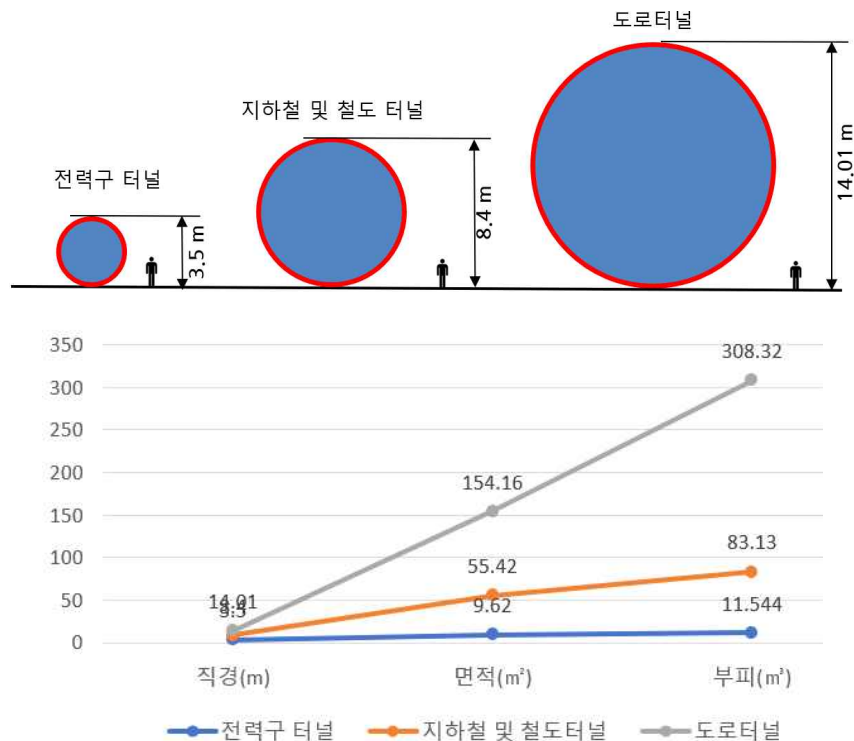


그림 11 터널직경에 따른 굴착면적과 굴착부피와의 관계

이는 TBM의 장비사양과 기타 부대설비의 용량에 대한 재산정을 필요로 하게 한다. 하지만, 장점을 포함하기도 한다. 전력구와 같은 유틸리티 터널은 소단면으로 인한 공간 제약으로 설치가 불가능했던 부분들이 가능해지기도 하며, 일부 구조를 변경함으로써 공간활용이 개선되어지기도 한다. 그런 부분중의 하나가 Accessible cutterhead이다. 그림 12는 이수식 쉘드TBM에 작용하는 압력구성요소를 나타냈으며, ②의 굴착챔버(Excavation chamber)는 이수로 가득 채우는 영역이며 ④의 작업챔버(Working chamber)는 영역의 40~60%까지 이수를 채우게 되고 ③의 영역에서 공기압(Air bubble)을 조정하여 굴진 면압을 관리한다.

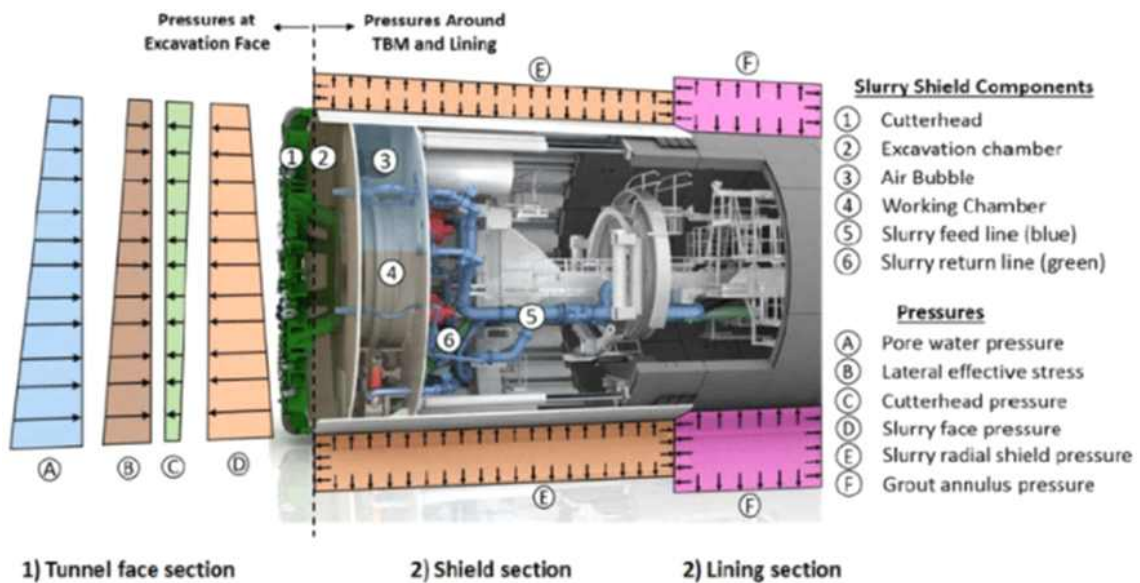


그림 12, 이수식 쉘드TBM에 작용하는 압력구성 요소(Le et al., 2015)

기존 커터헤드에서 CHI를 수행할 경우 ②,③의 영역의 이수를 배출한 뒤, 맨락을 통해 일정 시간 적응한 뒤 ②의 영역으로 진입하여 CHI를 수행한다. 하지만 Accessible cutterhead는 커터헤드에 각각의 메인암(Main arm) 후방에 공간을 만들어 작업자가 대기압 상태에서 CHI 및 기타 유지보수를 가능케 한다.

이 기술이 최초 적용된 것은 1997년 독일의 Rohre Elb도로터널로 연장 2.56km, 터널 직경 14.2m의 이수식 쉘드TBM이었다. 그림 13은 Rohre Elb터널에 적용된 커터헤드 현황과 디스크 커터 교체 모식도이다.

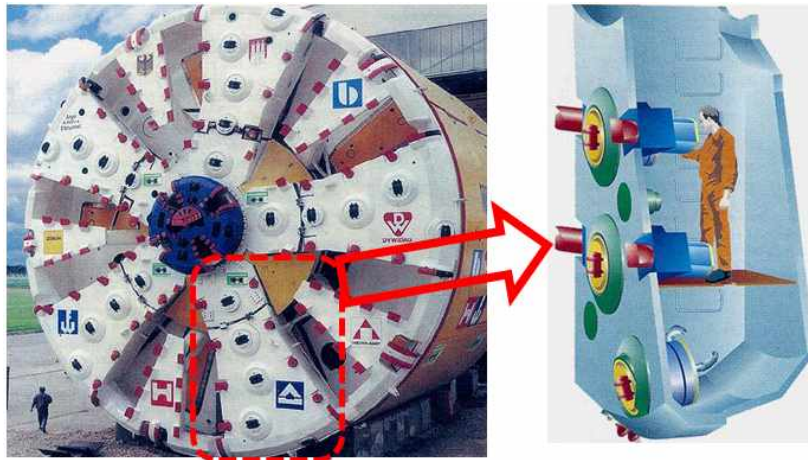


그림 13, Rohre Elb터널(L=2.56KM, Ø14.2m)

그림 14는 국내 최초 적용된 고속국도 제 400호선 김포~파주간 고속도로 2공구에 적용된 커터헤드 형상이며, 이 고속도로터널은 터널 연장 2.86km, 터널굴착경 14.01m의 이수식 쉴드 TBM으로 Rohre Elb터널과 단면크기가 유사하고 장비형식은 동일하다.

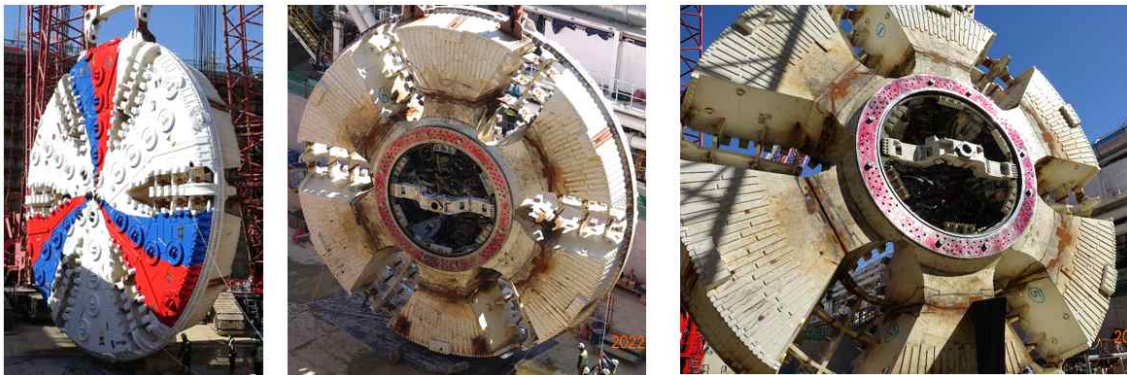


그림 14. 고속국도 제400호선 김포~파주간 고속도로 제2공구 (L=2.86km, Ø14.01m)

1997년 최초 적용된 이후 다수의 프로젝트에 사용된 Accessible cutterhead는 최신기술로 표현하기는 어렵다는 것이 필자의 판단이다. 그림 15는 대기압상태에서 디스크커터 교체를 하는 모식도이며, 그림 16은 디스크커터의 실린더를 후방으로 빼낼 때 굴진면의 버력이나 이물질 미 지하수가 침투하지 않도록 하는 게이트(Gate)의 자동 개폐시스템에 대한 사진이다.

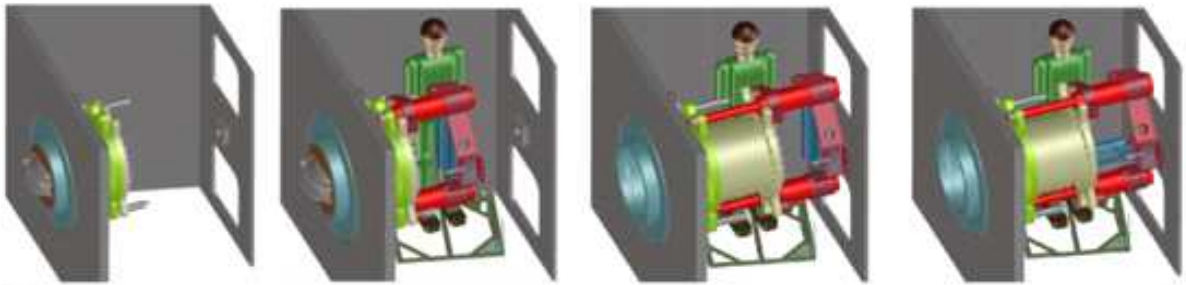


그림 15, 대기압상태의 굴착도구 교체(Schaub, 2014)



그림 16, 디스크커터 교체시 게이트 개폐

그림 17은 Accessible cutterhead에서 대기압 상태의 디스크커터 교체 모습이며, 그림 10 과 비교하면 확연한 차이를 알수 있다.



대기압 조건하 작업으로
전문 잠수부 불필요

작업시간 제약 無

유압장비, 호이스트 등
작업환경 양호

막장과 분리된 챔버내
작업에 따른 안전 확보

그림 17, 대기압상태의 CHI

4.3 DCRM(Disc Cutter Rotation Monitoring, 디스크커터 회전 모니터링 시스템)

(1) DCRM 시스템의 개요

3.2절의 마모예측모델에서도 기술하였지만, 마모예측모델은 장착된 다수의 디스크커터 중에서 디스크커터 1개의 굴착부피를 산정한다, 커터헤드에 장착된 디스크커터의 개수는 지반조건에 따라 선정된 커터 간격(cutter spacing 또는 cutting groove spacing) S와 TBM 직경 D에 좌우된다. 커터헤드에 한 종류의 디스크커터만을 장착하고 커터간격이 모두 동일한 경우에 디스크커터의 개수는 식 3.9와 같이 계산할 수 있다(기계화시공 설계편, 2008).

$$n \approx \frac{D}{2S} \quad (3.9)$$

2차로 도로터널의 차로폭과 시설한계 등을 감안할 때, 약 13~14m의 터널단면이 작도되며, 여기에 장착되는 디스크커터는 약 60~80개 사이로 산정 될 수 있다. 약 60~80개의 디스크커터가 위치별 궤적과 작용하는 하중이 다르기 때문에 각각의 디스크커터에 대한 마모 상태 확인은 현실적으로 매우 어렵다. 만약 각각의 디스크커터에 대한 모니터링이 가능하다면 상태확인 및 마모예측이 가능해져 CHI에 투입되는 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 검토되며, 이를 활용한 것이 DCRM(Disc Cutter Rotation Monitoring, 디스크커터 모니터링)시스템이다.

DCRM 시스템은 터키 유라시아(Eurasia)터널(2013)에서 최초 적용되었고, 국내에는 도로터널 현장(고속국도 제400호선 김포~과주간 건설공사 2공구)에 처음 적용되었다.

표 4는 DCRM 시스템이 가능한 장비타입과 조건에 대하여 나타낸 표이다.

표 4. DCRM 적용가능한 장비타입과 조건

구분	장비 타입	장착 조건
암반용 DCRM	Open TBM, Singl 쉘드TBM, Double 쉘드TBM	-
복합지반용 DCRM	Slurry 쉘드TBM	Accessible cutterhead

표 4을 살펴보면 DCRM 시스템은 각종 센서와 통신선이 버력과 이수의 간섭으로부터 분리되어 있거나 커터헤드 배면이 양호한 조건에서만 가능한 것으로 검토된다.

(2) DCRM 시스템의 구성

DCRM 시스템은 센서를 통해 디스크커터의 회전을 모니터링 함으로써 마모를 사전 예측하여 점검에 따른 다운타임(Downtime)을 최소화하여 커터 교체를 할수 있는 시스템이다. 그림 18은 DCRM의 시스템에 구성에 대하여 나타낸 것으로 각각의 디스크커터에 장착된 DCRM유닛은 회전과 온도 정보를 작업챔버 배면의 수신기로 보내고 수신기는 데이터 케이블을 통해 프로세서간 통신(IPC)으로 운전실의 모니터에서 모니터링을 할 수 있는 구성으로 되어 있다.

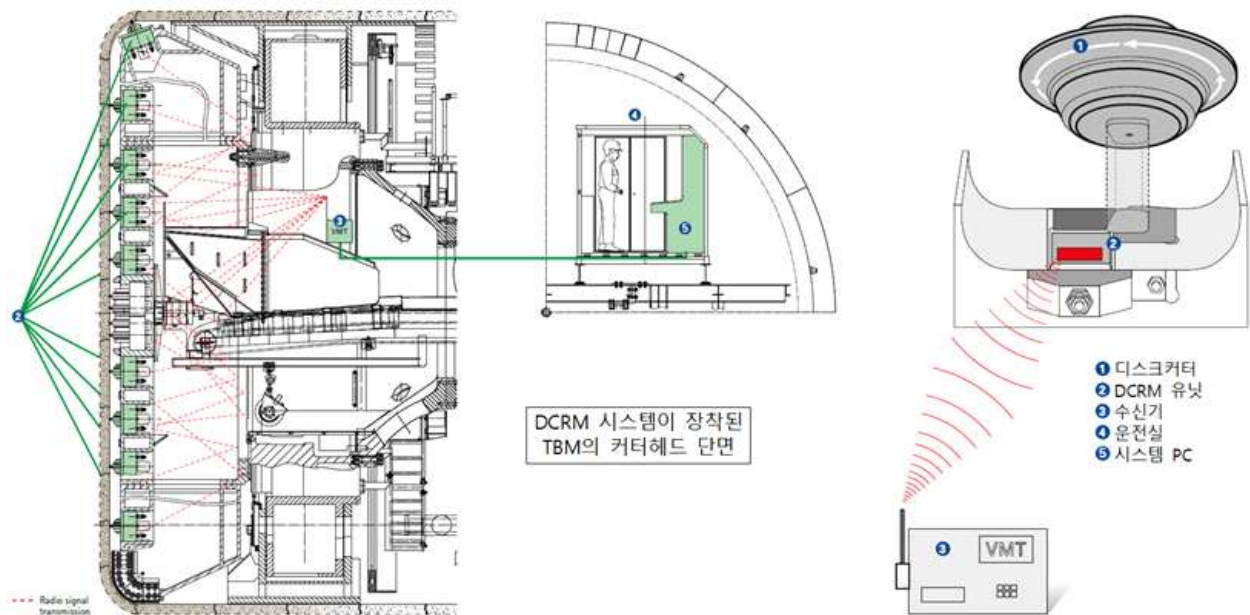
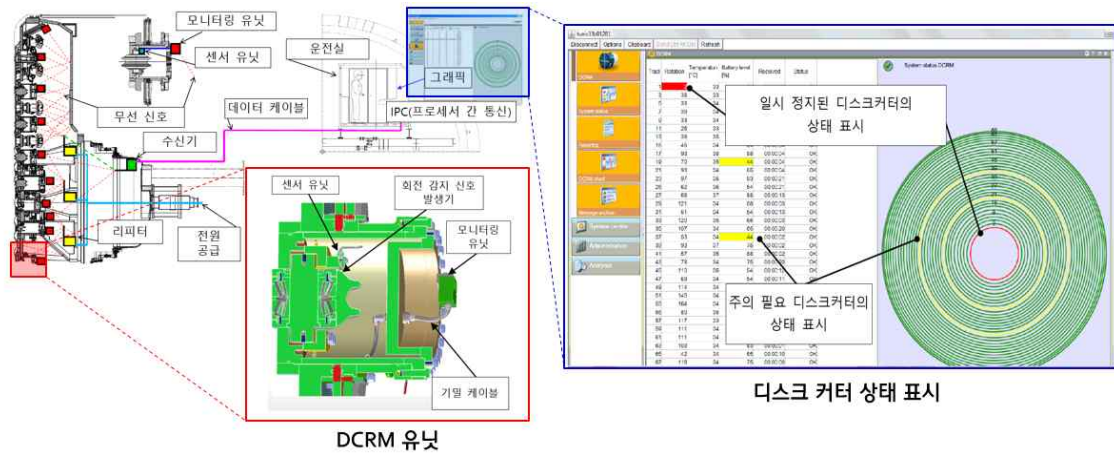


그림18, DCRM 시스템 구성

그림 19는 DCRM 시스템에 대한 구성에 대한 그림을 확대한 그림으로 운전실 화면에 나타나는 화면구성에 대한 것이다.

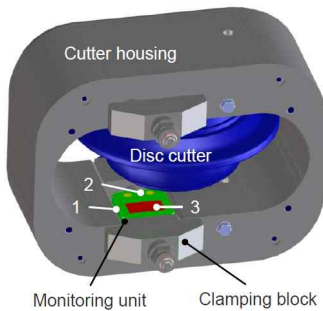


DCRM 유닛

그림 19, DCRM 시스템과 모니터링

(3) DCRM 시스템의 세부 구성

DCRM은 시스템은 암반용과 복합지반용으로 나눌수 있고 암반용 DCRM 시스템의 세부구성은 그림 20과 같다. 그림 20의 (a)는 디스크커터를 잡아주는 커터하우징과 센서와 송신기를 포함한 모니터링 유닛과 모니터링 유닛을 고정해주는 클램핑 블록으로 구성되며, 1. 하우징, 2. 센서, 3.송신기에 대한 모식도이다.



(a) 암반용 DCRM 모식도



(b) 모니터링 유닛



(c) 리피터1 (repeater)



(d) 리피터2 (repeater)



(e) 신호 수신기



(f) 배터리 충전기

그림 20, 암반용 DCRM 시스템 모식도와 세부 구성

복합지반용 이수식 DCRM 시스템의 세부구성은 그림 21과 같다. 센서 유닛은 디스크커터 내에 삽입되어 있는 자석을 통해 회전상태를 모니터링하고 온도센서를 통해 디스크커터에 발생하는 온도를 측정하여 모니터링 유닛으로 보내지고 데이터 케이블을 통해서 운전실로 전송된다.

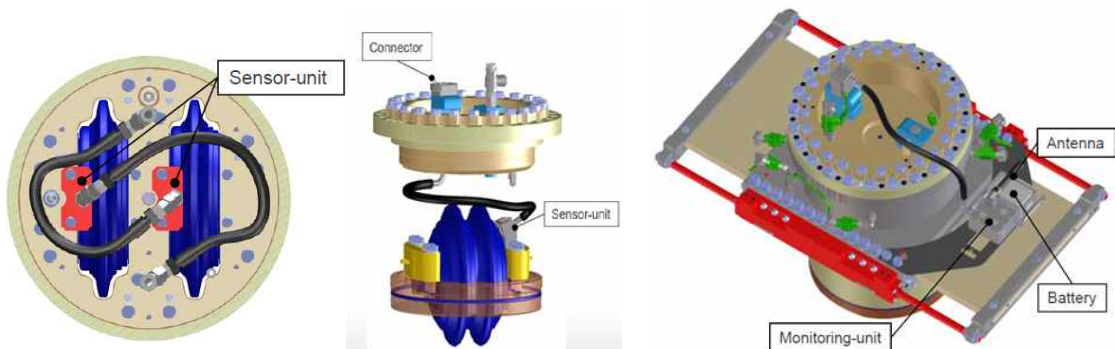


그림 21, 복합지반용 DCRM 시스템 세부 구성



그림 22, DCRM 시스템의 디스크커터에 삽입된 자석(좌) 및 온도 센서(우)

DCRM 시스템에 의한 데이터는 운전실 모니터에서 그림 23과 같은 형태로 확인이 가능하다. 디스크커터의 번호(Track), 회전상태(Rotation), 온도(Temperature), 배터리 상태(Battery level), 송신기 상태(Transmit power)를 모니터링 할 수 있다. 각각의 데이터는 숫자와 색깔로 구분하여 디스크커터와 주변기기의 상태를 파악 할 수 있는데 주요 색상별 구분은 표 5와 같다.

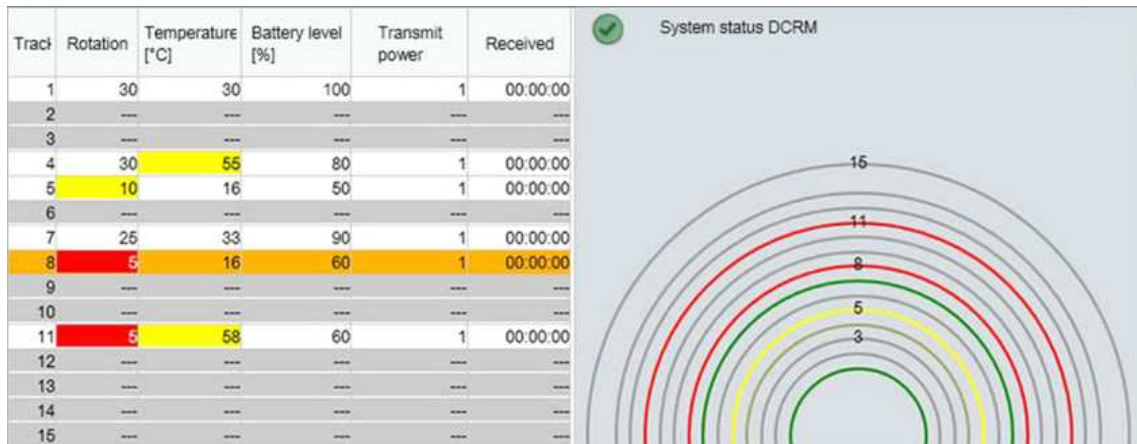


그림 23, 운전실 모니터에 DCRM 시스템의 데이터 확인

표 5 DCRM 적용가능한 장비타입과 조건

셀의 구분	회전 (Rotation)	온도 (Temperature)	배터리상태 (Battery level)	송신기상태 (Transmit power)
흰색	회전중	이상없음	충전상태 정상	충전상태 정상
노란색	관찰요망	현재온도>제한온도	충전 필요	충전 필요
빨간색	회전중지	-	-	-
오렌지색	여러 가지 복합적인 요인으로 강조의 표시			

그림 23에 나타난 Rotation의 숫자는 회전수가 아니며 0~255까지의 범위를 가진다. 이는 디스크커터의 회전을 나타내는 자기장 척도인 센서의 “Hall value”에 대한 범위로 회전수로 변화되지 않는다. 예를들면, Track 5번의 Rotation 값 10의 경우를 보면 디스크커터가 매우 느리게 회전하고 있고 회전이 중지되는 상태로 되고 있음을 의미하며 셀의 색상도 노랑색셀로 바뀐다. Track 8, 11번의 Rotation 값 5의 경우는 디스크커터가 회전하고 있지 않은 경우를 나타내며, 셀의 색상도 빨간색으로 바뀐 것을 알 수 있다.

또한, Temperature의 경우 디스크커터의 직접적인 온도는 아니며 온도센서에서 감지하는 온도로 Track 4, 11번의 55° c와 58° c는 높은 온도로 냉각을 필요로 하는 것으로 모니터링 한다. 배터리상태의 경우는 잔량을 표기 한 것이며, 송신기상태는 1이상의 경우 전력에 문제가 없음을 나타낸다.

DCRM 시스템의 경우 제작사마다 다른 시스템을 보유하고 있는 것으로 검토되며 위의 시스템은 국내에 적용된 회사의 시스템을 기준으로 검토할 수 밖에 없는 상황으로 다양한 DCRM 시스템의 종류별 분석이 아쉬운 부분이다.

DCRM 시스템의 적용은 사전에 디스크커터의 문제점을 발견하여 굴착수명을 최적화하며, 유지보수 작업을 최소화 할 수 있고, 디스크커터에 작용하는 하중을 간접적으로 유추하여 커터헤드 회전속도나 추력을 조정할 수 있는 장점이 있는 것으로 기존 사례를 통하여 검토하였다,

5. 결론

대구경 쉴드TBM 굴착 도구 관련기술에 대하여 고찰한 결과 아래와 같은 검토 및 분석결과를 도출하였다.

1) Accessible cutterhead는 Rohre Elb도로터널(1997)에 최초 적용되었으며, 고수압 대응이 우수한 이수식 쉴드TBM에서 기존 재래식 굴착도구 교체방법 보다 작업자가 안전하고 원활한 교체와 유지보수가 가능하도록 설계된 커터헤드 구조로 검토된다.

2) Accessible cutterhead는 구조 특성상 최소 10m급 이상 단면에서 공간 활용이 가능 할 것으로 검토된다.

3) 기존 디스크커터 마모 예측모델은 디스크커터의 굴착부피(마모량)를 대표적인 위치의 m^3/C 로 산정하는 반면, DCRM은 위치별 디스크커터의 회전상태를 파악 할 수 있어 굴착도구 관련 Downtime 최소화가 가능 할 것으로 검토된다.

4) DCRM은 암반을 굴착하는 TBM(Open, Single 쉴드, Double 쉴드)에서 설치가 가능하며, 챔버를 가진 쉴드TBM의 경우, Accessible cutterhead의 구조가 필요한 것으로 분석된다. 이는, 챔버내 각종 버력과 이수(이수식 쉴드TBM), 폼재(토압식 쉴드TBM)의 접촉과 간섭으로 커터 하우징에 장착되어 있는 센서와 송신기의 고장을 유발할 가능성이 매우 크기 때문으로 분석된다.

5) 하지만, DCRM은 국내에 처음 적용되는 것으로 아래와 같은 사항에 대한 조치가 필요할 것으로 검토된다.

- 배터리 소모로 인한 교체 시간 최소화 및 타작업 대체 시간 활용 필요

- 각종 센서, 송수신기 및 IPC등 H/W와 S/W에 대한 유지 및 연계 관리 철저

아쉬운 점은 Accessible cutterhead와 DCRM 시스템 모두 국내에는 최초 적용되는 기술로 적용 결과에 대한 분석이 이루어지지 못했다. 향후 기회가 주어지면 적용결과에 대한 면밀하고 정량적인 분석결과가 다루어지길 기대해 본다.

참고문헌

1. 고태영, 윤현진, 손영진, TBM디스크커터 마모예측 모델 비교 연구, 한국터널지하공간학회 논문집, 2014
2. (사)한국터널지하공간학회, TBM터널 이론과 실무, 2022
3. (사)한국터널지하공간학회, 터널공학시리즈3 터널기계화시공 설계편, 2008
4. 서울시 도시기반시설본부, 쉴드TBM 활성화를 위한 경제성 확보방안 장비 및 부품편, 2020
5. 박진수, TBM 시공기초, 한국터널지하공간학회 학회지, 2021
6. 박진수, 송기일, 대구경 이수식 쉴드TBM 현장의 데이터 분석을 통한 디스크커터의 마모 및 교체 특성 연구, 한국터널지하공간학회 논문집, 2022
7. 박진수, 현장 데이터 분석을 통한 대구경 쉴드TBM 디스크커터 마모 및 교체 특성에 관한 연구, 인하대학교 박사논문, 2022
8. 배규진, 최순욱, 장수호, 이규필, 송봉찬, 김갑부, 현장적용 디스크커터의 내부부품 분석, 한국터널지하공간학회 논문집, 2015
9. 포스코건설, 세계의 TBM터널, 2018
10. B.Maidl, M. herrenknecht, Mechanised Shield Tunnelling 2nd Edition_B. Herrenknecht, 2000
11. Bruland, A., (1998). "Hard rock tunnel boring. advance rate and cutter wear.", Vol. 3, Doctoral Thesis at NTNU 81.
12. Ellescosta, P., Kasling, H., Thuro, K., (2018), "Tool wear in TBM hard rock drilling—backgrounds and special phenomema.", Geomech Tunnel 11, 142-148
13. Frenzel, C., (2011). "Disc cutter wear phenomenology and their implications on disc cutter consumption for TBM.", Proceedings of 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, San Francisco, U.S.A.

14. Herrenknecht (2007). "Herrenknecht cutter tools." Herrenknecht AG.
15. Herrenknecht (2016). "Disc cutter Rotation Monitoring"
16. Roby, J., Sandell T., Kocab, J., Lindberg, L., (2008). "The Current State of Disc Cutter Design and Development Directions.", Proceedings of 2008 North American Tunnelling Conference(NAT2008), Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 36-45.
17. Rostami, J., Ozdemir, L., (1993). "A new model for performance prediction of hard rock TBMs.", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston, U.S.A., 793-809.
18. SIMTUNNEL PRO 2.0, (2013). "Einführung & Hilfe.", Germany, 33.
19. Wang, L. H., Kang, Y. L., Zhao, X. J., & Zhang, Q., (2015). "Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis.", Tunnelling and Underground Space Technology, 324.
20. Zhaohung, Z., Muhammad, A., Cong, L., & Fei, S., (2019). "Theoretical prediction of wear of disc cutters in tunnel boring machine and its application.", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11, 111-117