

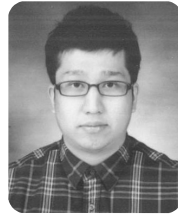
“TBM 핵심 기술 소개” - 현대건설 연구개발본부



김대영
현대건설
연구개발본부
인프라지반연구팀
부장



송명규
현대건설
연구개발본부
인프라지반연구팀
차장



현기창
현대건설
연구개발본부
인프라지반연구팀
과장



Ebrahim Farrokh
현대건설
연구개발본부
인프라지반연구팀
전문과장



이재원
현대건설
연구개발본부
인프라지반연구팀
대리

1. 개요

경제발전과 함께 삶의 질 향상을 위한 안전하고 친환경적인 건설이 대두되면서 터널 건설에 있어서 기계화 시공법의 사용이 증가하고 있다. TBM(Tunnel Boring Machine) 장비가 적용되는 기계화 시공법의 경우 터널연장의 장대화 추세와 소음진동 등의 환경영향 요소가 작은 점, 그리고 기계화 시공으로 인해 인건비를 절감할 수 있다는 점에서 TBM 공법의 적용성은 더욱 증가할 것으로 예측되고 있다.

특히 최근 해외에서 발주되는 장대 터널의 대부분은 TBM 공법으로 설계·시공되고 있으며, 도심지 지하철 터널 공사에서도 상부 구조물의 안정성을 확보하기 위해 TBM 공사가 크게 증가하고 있다. 해외 TBM 선진국의 경우 축적된 풍부한 시공경험과 기술개발로 인해 TBM 분야에 큰

경쟁력을 확보하고 있다.

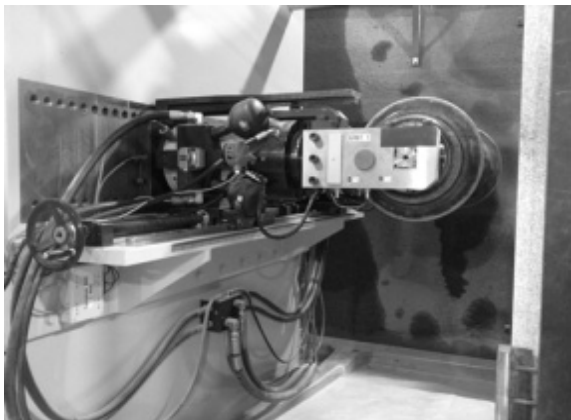
반면, 국내 TBM 설계·시공 기술의 상당부분이 외국기술에 의존하는 실정이며 지반조건에 따른 TBM 운영기술 미숙으로 인하여 기계화 굴착공법의 장점 중의 하나인 고속굴진의 장점을 활용하지 못하고 있다. 이에 현대건설 연구개발본부는 회전식 암석절삭 시험기(RCM, Rotary Cutting Machine), Small Scale EPB TBM(SSET, Small Scale Earth Pressure Balanced Tunnel Boring Machine), 새로운 디스크 커터 마모 시험 장치(NAT, New Abrasion Tester) 등 다양한 시험 장비를 구축하여 기존 기술의 한계를 극복하고 현장에 적용 가능한 TBM 기술을 개발하기 위해 노력하고 있다. 본고에서는 이들 장비에 대한 간략한 소개와 시험 성과를 다루고자 한다.

2. 회전식 암석절삭 시험기 (RCM, Rotary Cutting Machine)

암반 지반에 최적화된 TBM 장비 설계인자를 도출하고 TBM 굴진성능을 예측하기 위해 회전식 암석 절삭시험기 (RCM, Rotary Cutting Machine)를 구축하였다. RCM은 실대형 회전식 암석절삭 시험기로 기존의 선형 암석절삭 시험기(LCM, Linear Cutting Machine)와 달리 실제 TBM이 굴착하는 메커니즘에 따라 디스크 커터가 회전하면서 절삭할 수 있도록 설계한 장비이다. 실대형 암석시



(a) RCM 장비 전경



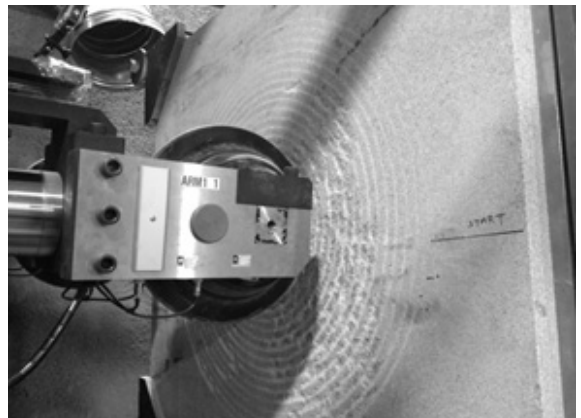
(b) 유압실린더와 디스크 커터

〈그림 1〉 회전식 암석절삭 시험기(RCM, Rotary Cutting Machine)

험편에 대하여 절삭시험을 수행함으로써 지반조건에 따른 최적 커터간격, 절삭 깊이뿐만 아니라 TBM의 굴진성능 등 TBM 설계관련 핵심자료를 산정할 수 있다.

본 시험을 실시하기 위해 암석 시편을 암석박스에 배치한 후 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 먼저, pre-conditioning의 과정으로 원하는 간격과 절삭 깊이를 조절한다. 현장에서는 연속적인 굴착으로 손상된 막장면을 굴착하므로 이와 비슷한 조건을 만들기 위해 pre-conditioning으로 초기 표면을 손상된 상태로 만든다.
- ② 그림 2와 같이 pre-conditioning pass가 형성 되면 본 실험을 시작한다. 절삭 횟수는 설정된 간격과 암반 표면 조건에 따라 다양하게 할 수 있다. 가장자리 절삭으로 인한 굴착 외측 손상을 최소화하기 위해서 절삭은 암석시편의 가장자리에서 적어도 15cm 떨어진 곳에서 이루어 져야 한다.
- ③ 절삭력(수직력, 회전력, 축력)의 결과값과 실린더의 스트로크는 설정한 RPM에 따라 기록한다.
- ④ 시험이 끝난 시험대 내부에서의 부서져 나온 chips은 조심스럽게 수집한다. 수집된 chips은 차후의 분석을 위해 질량을 재고 입도 분석을 한다.



〈그림 2〉 pre-conditioning 과정

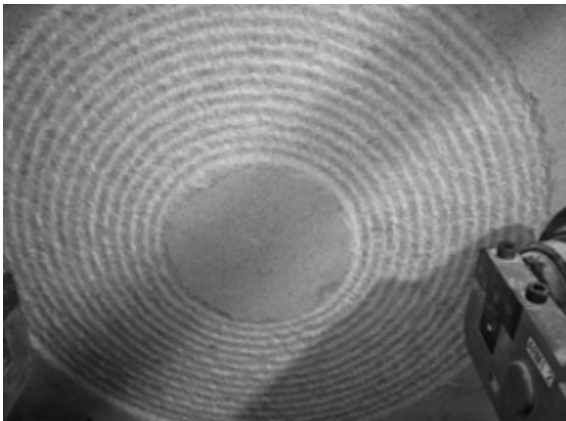
⑤ 특정 간격과 깊이에 대한 절삭이 모두 완료 되면 다른 변수를 두어 ①-④ 순서로 실험을 반복한다.

위와 같이 본 실험 준비 단계인 pre-conditioning 과정 후 암석의 일축강도, 커터헤드의 회전속도, 디스크 커터의 관입깊이, 절삭 간격, 크기 등을 고려하여 약 120 case의 실험을 계획하였다. 아래의 표 1은 계획된 디스크 커터의 관입깊이와 절삭 간격의 예시이며 절삭 간격에 따른 실험 모습은 그림 3과 같다.

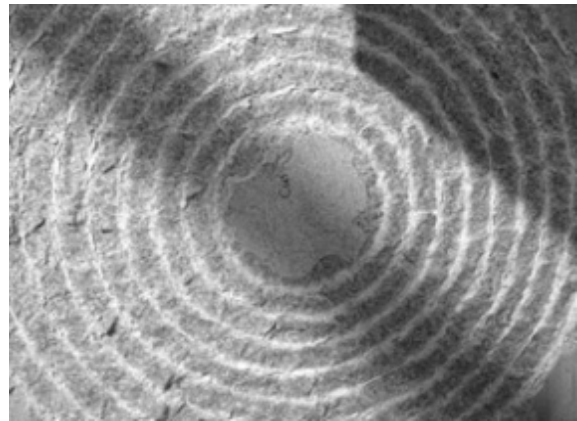
계획된 120 case에 대하여 총 1000회 이상의 실험이 수행

〈표 1〉 디스크 커터의 관입깊이와 절삭 간격별 RCM 시험 계획

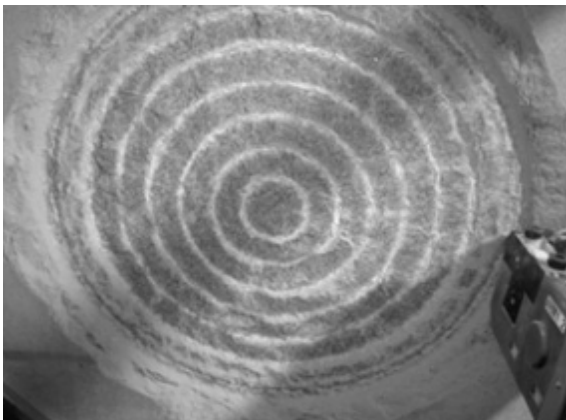
	S (절삭 간격, mm)			
	25	50	75	100
p (관입깊이, mm)	S/p			
1	25	-	-	-
2	12.5	25	37.5	50
3	8	17	25	33
4	6	12.5	19	25
5	5	10	15	20
6	-	23	12.5	17
pass당 절삭 횟수	15	9	7	5



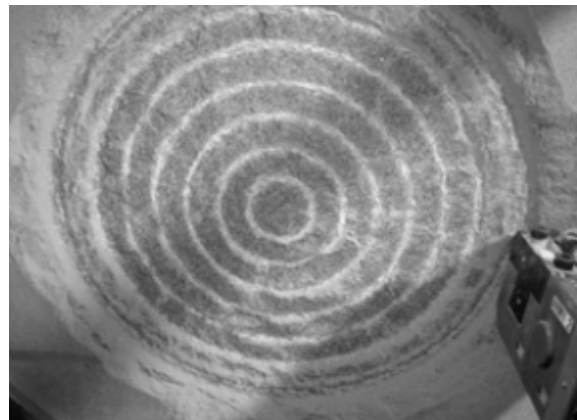
(a) S=25mm



(b) S=50mm



(c) S=75mm



(d) S=100mm

〈그림 3〉 절삭 간격에 따른 실험 모습

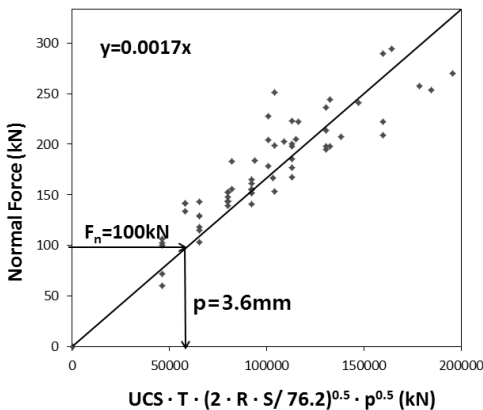
되었으며 수행된 실험 결과와 차원 분석 방법(Dimensional analysis)을 바탕으로 다양한 영향인자의 상관관계를 파악하여 아래의 식 1~6과 같이 TBM 굴진을 예측 모델을 도출하였다. 도출된 TBM 굴진을 예측 모델의 신뢰성을 확인하기 위하여 싱가포르 TBM 현장을 대상으로 검증하였으며 아래의 그림 4와 같이 기존의 예측 모델인 CSM(Colorado School of Mines, 미국), NTNU(Norwegian University of Science and Technology, 노르웨이)에 비하여 제안된 예측 모델의 정확성이 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 이와 같이 실제 TBM이 암반을 굴착하는 굴착 메커니즘을 반영한 TBM 굴진을 예측 모델을 개발함으로써 보다 정확하게 현장의 공기를 산정하고 TBM 장비의 최적 추력, 토크, 동력 등의 TBM 커터헤드 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

$$F_n = 0.0017 \cdot UCS \cdot T \cdot (2 \cdot R \cdot S / 76.2)^{0.5} \cdot p^{0.5} \text{ (kN)} \quad (1)$$

$$F_r = 0.03803 \cdot (216/R)^{0.5} \cdot p^{0.5} \cdot F_n \text{ (kN)} \quad (2)$$

$$M = 0.275 \cdot N_{tbn} \cdot D_{tbn} \cdot F_r \text{ (kN)} \quad (3)$$

$$P = M \cdot RPM / 9.55 \quad (4)$$



〈그림 4〉 TBM 굴진을 예측 모델의 예측 결과 비교

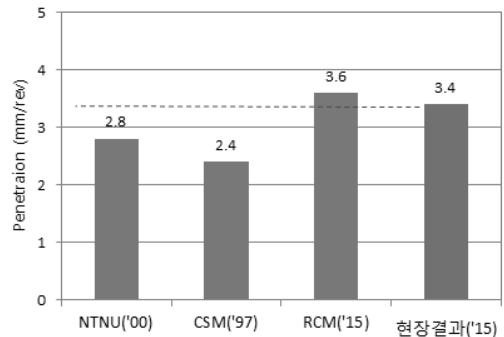
$$F_{nm} = F_n \cdot RPM^{0.0798} \quad (5)$$

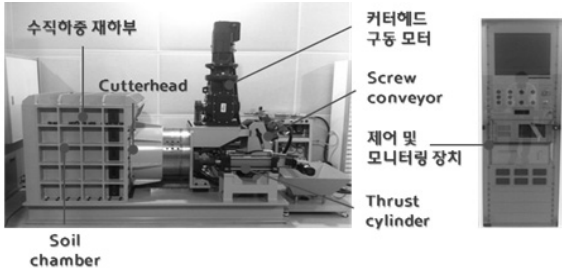
$$F_{rnm} = F_r \cdot RPM^{0.2148} \quad (6)$$

여기서, F_n : RPM=1 일 때 수직력, F_r : RPM=1 일 때 회전력
 M : TBM 커터헤드 토크, P : TBM 커터헤드 파워
 F_{nm} : RPM 영향을 고려한 수직력,
 F_{rnm} : RPM 영향을 고려한 회전력
 UCS : 일축압축강도, T : 디스크 커터의 tip 두께
 R : 디스크 커터의 반지름, S : 디스크 커터의 설치간격,
 p : 관입깊이
 N_{tbn} : 디스크 커터의 갯수, D_{tbn} : 커터헤드의 직경

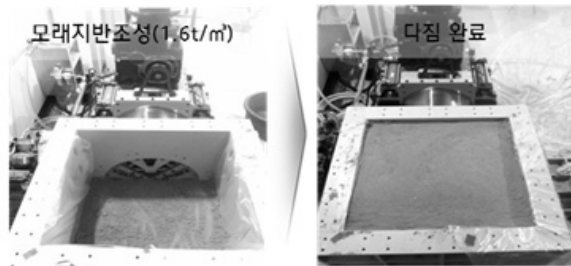
3. Small Scale EPB TBM (SSET, Small Scale Earth Pressure Balanced Tunnel Boring Machine)

Small Scale EPB TBM(SSET, Small Scale Earth Pressure Balanced Tunnel Boring Machine)은 토사지반에 적용되는 토압식 TBM의 굴진 성능을 예측하고 폼(Foam) 배합 성능을 평가하기 위하여 토압식 TBM의 굴착~배토 전





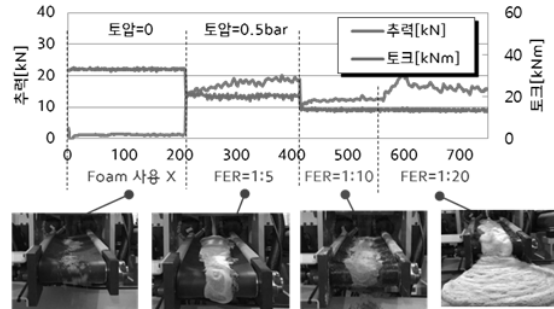
〈그림 5〉 Small Scale EPB TBM(SSET, Small Scale Earth Pressure Balanced Tunnel Boring Machine) 시험 장비



〈그림 6〉 Soil Chamber내 모래지반 조성

과정을 그대로 모사할 수 있는 시험 장비이다. 직경이 6m인 실제 토압식 TBM의 1/10 스케일로 설계하였으며 Soil chamber, 수직하중 재하부, 커터헤드, 스크류 컨베이어 등으로 구성되었다. 이 시험 장비를 통하여 실제 토압식 TBM과 같이 커터헤드의 지반 굴착, 폼 주입 및 버력 배토를 모니터링 할 수 있으며, 실시간으로 토크, 토압, 배출 버력 무게를 측정할 수 있어 폼 배합에 따른 토사지반 TBM의 굴진상태를 분석 할 수 있다.

고무 튜브의 공기압을 조절하여 6bar(=6.12kg/cm²)까지 연직토압을 구현할 수 있는 Soil Chamber 내에 그림 6과 같이 모래지반을 조성하고 다짐한 후 폼 배합에 따른 토크와 추력값을 비교하였다. 우선, 폼 발포 비율(FER, Foam Expansion Ratio)에 따른 굴착 효율을 확인하기 위하여 폼의 농도와 폼 주입 비율(FIR, Foam Injection Ratio)은 2.0%, 60%로 고정하고 FER를 1:5, 1:10, 1:20, 1:30으로 변화시키며 시험을 수행 하였다.



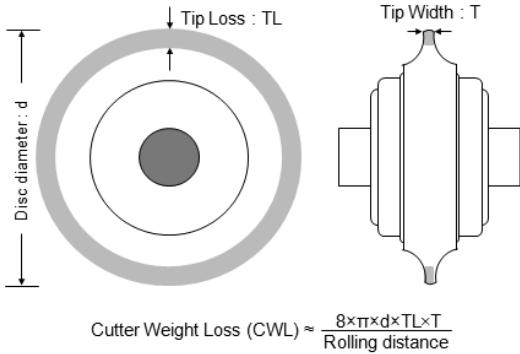
〈그림 7〉 폼 배합에 따른 굴진 및 배토성능 시험

다음 그림 7과 같이 조성된 모래지반에 대하여 일정한 굴착속도(10mm/min)로 연속 굴착하면서 폼 배합비를 변화시켜 배출 버력의 상태 변화를 확인하였다. 시험 대상인 모래지반 조건에서 TBM Chamber의 압력이 0.5Bar, FER=1:10인 경우, 해당 시험장비의 추력 및 토크가 가장 적게 산정되었다. 향후, 실제 지반조건과 구속압에 따른 시험을 반복 수행하여 다양한 조건에 따른 TBM 굴진상태를 분석하고 EPB TBM에서의 폼 배합 설계 가이드라인을 제시 할 수 있을 것이라 판단된다.

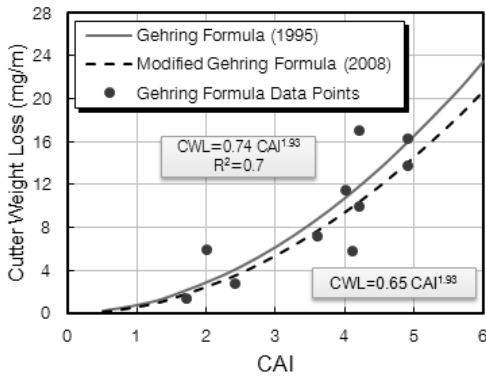
4. 새로운 디스크 커터 마모 시험 장치 (NAT, New Abrasion Tester)

기존의 커터수명 평가법 중 Gehring 모델은 그림 8, 그림 9와 같이 세르샤 마모 지수(CAI, Cerchar Abrasivity Index)값으로부터 디스크 커터가 1m 회전할 때 커터링(Cutter ring)의 질량 손실량을 예측한다. 이 모델은 디스크 커터의 마모도를 예측하기 위해 CAI 값에 따른 질량 손실량을 산정하고 디스크 커터의 직경, 형상, Tip폭 변화 시에도 범용적으로 적용이 가능한 장점이 있으나, 사용된 Data point 수가 다소 적다는 한계가 있다.

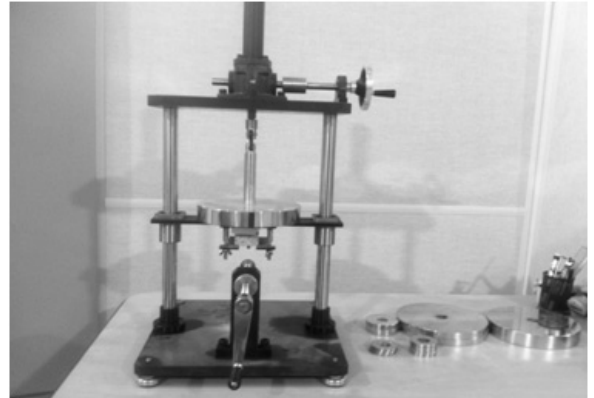
디스크 커터의 이동거리에 따라 마모도를 예측한 Gehring 모델의 메커니즘에 착안하여 TBM 디스크 커터의 마모율



〈그림 8〉 질량 손실량 산정 개념



〈그림 9〉 Gehring 모델



〈그림 10〉 새로운 디스크 커터 마모 시험장치 (NAT, New abrasion tester)

을 예측할 수 있는 새로운 시험장치를 설계, 제작하였다. 새로운 디스크 커터 마모 시험 장치(NAT, New Abrasion Tester)는 추를 적재하여 암석에 수직으로 일정 하중을 재하 하는 동시에 원형 디스크가 회전하면서 마모된 질량 손실량을 측정하는 장비이다. 그림 10과 같이 개발된 NAT는 기존 방법과 달리 시료의 별도 가공이 필요하지 않고, 단일 시험 수행으로 단순화됨으로써 시험 시간이 획기적으로 감소되었으며 이로부터 단기간에 풍부한 현장 데이터를 추적 할 수 있게 되었다. 또한 금속 Pin으로 10mm 암석을 긁어내어 마모도를 평가하는 세르샤 마모 시험법에 비해 원형 Disc를 사용함으로써 긁힘 거리가 증대 되어 시험결과의 변동성을 최소화 하고 정확성을 향상

〈표 2〉 디스크 커터 마모 시험장치의 제어변수 및 선정 사유

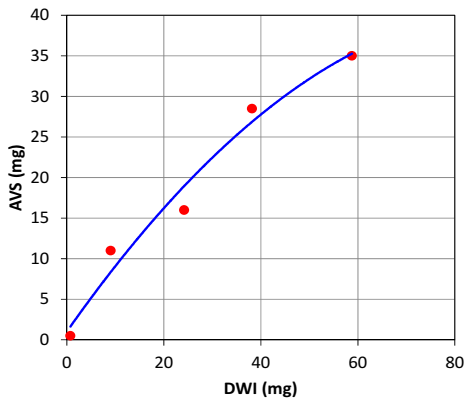
제어변수	선택값	선정사유
Disc 경도	HRC 54~56	실제 커터와 유사한 경도
하중	25kg	적절한 질량 손실 발생
Disc 직경	50mm	직경이 커짐에 따라 표면영향 적어짐
Disc 회전수/이동거리	50회/7.5m	정규화 시킨 DWI-NTNU 연관성 높음

시킬 수 있도록 개발되었다.

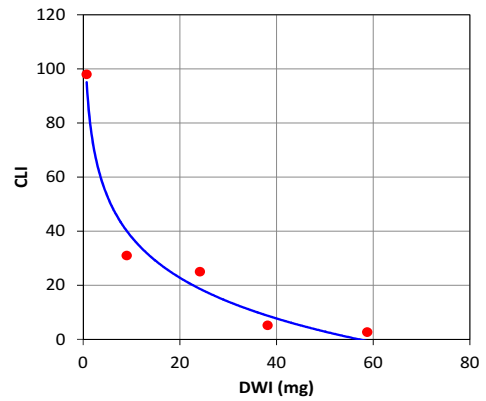
초기 시험을 통해 표 2와 같이 시험장치의 제어변수를 선정하고 결정된 디스크의 이동거리 및 기본회전수를 바탕으로 질량 손실량을 정규화 하였으며 이를 DWI(Disc cutter Wear Index)로 선정하였다. 초기 시험을 통하여 결정된

〈표 3〉 암종에 따른 NAT 시험 결과와 DWI

암종	디스크 직경(mm)	실제회전수	이동거리(m)	질량 손실량(mg)	DWI(mg)
화강암	47.68	144	21.6	169	59
화강섬록암	47.56	50	7.5	38	38
편마암	47.60	110	16.4	53	24
사암	47.68	100	15.0	18	9
응회암	47.68	20	3.0	<1	0.7



(a) DWI vs AVS



(b) DWI vs CLI

〈그림 11〉 DWI와 AVS, CLI와의 상관관계

DWI는 다음의 식 7을 이용하여 계산된다.

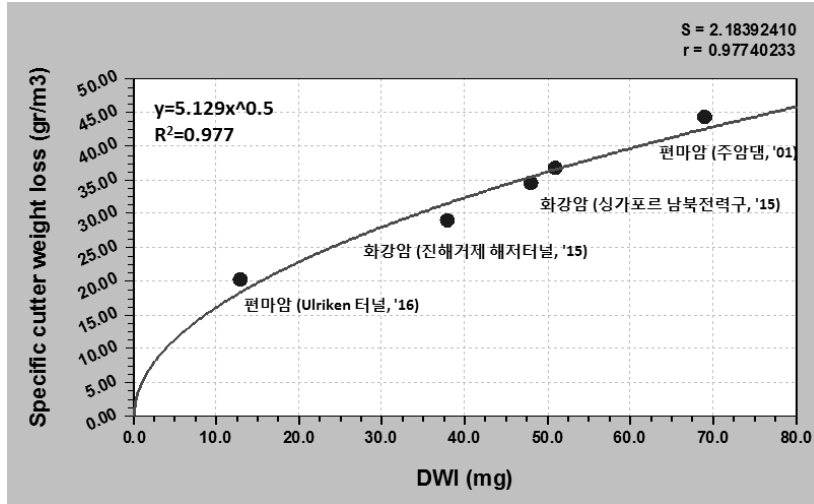
$$DWI(Disc\ cutter\ Wear\ Index) = \text{질량손실량} \times \frac{\text{기본회전수}}{\text{실제회전수}} \quad (7)$$

새로운 마모 시험 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 NTNU 마모지수가 제시 되어 있는 5개의 암석으로 시험을 수행하여 각 암석별 DWI를 산출하였다. 표 3은 각 암석에 따른 시험 결과를 나타낸다.

그림 11은 5종의 암석에 대한 새로운 디스크 커터 마모 평가 결과인 DWI와 AVS, CLI의 상관관계를 도시화한 그래프이다. 산정된 DWI는 암석 파우더에 의한 Anvil의 질량 손실을 의미하는 AVS와 비례관계, 커터 수명을 나타내는 CLI와는 반비례 관계를 보이며 지수들 간의 긴밀한

상관관계를 보인다. 이는 새로운 커터 마모 평가 시험법으로 고안된 DWI가 NTNU 시험법에 비해 매우 간단한 시험으로도 NTNU 모델의 지수들과 유사한 결과를 도출할 수 있음을 나타낸다. 따라서 개발된 시험장비는 세르샤 마모시험의 변동성과 NTNU 마모 시험의 시간적인 문제와 복잡성을 보완할 수 있는 새로운 시험 장비 및 분석 기술로써 향후 다양한 현장 측정 자료와 연계하여 디스크 커터의 소요 수량 및 교체시기를 독자적으로 평가할 수 있는 시험법으로 TBM 커터 마모도 평가에 대한 기술력을 제고 할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 그림 12와 같이 실제 TBM 현장의 CHI(커터헤드 인터벤션, Cutterhead Intervention) Data로부터 굴착 부피(m³)당 평균 커터 질량 손실량(mg/m³)을 산정한 후 개발된 디스크 커터 마모 시험장치의 결과인 DWI와 비교



〈그림 12〉 현장 실제 디스크 커터 마모 측정 결과와 비교

분석하였다.

DWI(실험 결과), 굴착 부피당 평균 커터 질량 손실량 (측정 값) 관계를 회귀 분석한 결과에서 상관계수가 0.977로 나타나 높은 수준의 신뢰성을 확인하였다. 이러한 분석결과로부터 다음의 식 8과 같은 새로운 디스크 커터 수명 예측 모델을 개발하게 되었다. 개발된 모델 식은 기존 모델과 비교하여 정확하고 시험방법이 간편하여 활용도가 높을 것으로 기대한다. 향후에는 더 많은 암종에 대해서 추가 실험 및 현장자료를 수집하여 모델의 신뢰성을 높일 계획이다.

$$CWL(\text{Cutter Weight Loss, mg/m}) = 5.129 \cdot DWI^{0.5} \quad (8)$$

5. 결론

현대건설 연구개발본부는 TBM 굴진 성능 평가 기술, 커터헤드 설계 기술, 디스크 커터 마모 예측 기술 등을 개발하여 기계화시공 분야에 있어서 핵심 기술들을 확보해

나가고 있다. 뿐만 아니라 TBM 분야의 선진 연구기관인 CSM과의 지속적인 기술 교류를 통해 TBM 선진 기술 동향을 모니터링 하고 있으며 올해부터는 NTNU와의 공동 연구를 통해 협력하고 있다. 특히 토사지반에서의 TBM 굴진 성능과 커터 비트 수명을 예측할 뿐만 아니라 TBM 챔버 내의 압력 상태를 고려하여 폼 배합 설계가 가능한 혁신적인 실험 장비를 세계 최초로 개발하여 향후 토사용 실드 TBM 프로젝트에 적용할 계획이다. 단순히 새로운 기술을 연구하는 것에 그치지 않고 개발기술을 국내 TBM 현장인 진해-거제 주배관, 주암댐 도수터널, 대곡-소사 복선전철이나 싱가포르의 전력구, 지하철 터널 현장 등에 실제 적용하고 있으며 고품질 시공, 공사기단 단축 및 공사비를 절감할 수 있도록 기술의 상용화에도 주력하고 있다. 향후 TBM 장비로부터 수집되는 방대한 기계 데이터들을 수집하고 분석하여 실시간으로 TBM 장비를 운영할 수 있는 미래형 스마트 TBM 기술에 대한 연구도 시작함으로써 세계 최고 수준의 TBM 핵심 기술을 선도해 나가 고자 한다.