

## 한강하저터널의 쉴드TBM 적용시 디스크 커터 소모량 예측과 소모량 Disc Cutter Consumptions Prediction on Applying Shield TBM at the Han Riverbed Tunnel

최정명<sup>1)</sup>, Jung-Myung Choi, 정혁상<sup>2)</sup>, Hyuk-Sang Jung, 친병식<sup>3)</sup>, Byung-Sik Chun, 이용주<sup>4)</sup>, Yong-Joo Lee

<sup>1)</sup> (주)대우건설 분당선하저터널현장 대리, Assistant Manager, Boondang Railway Riverbed Tunnel Construction, DEAWOO E&C

<sup>2)</sup> 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.

<sup>3)</sup> 한양대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.

<sup>4)</sup> 국립서울산업대 건설공학부 조교수, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Seoul National Univ. of Technology

**SYNOPSIS** : This study was conducted to estimate the number of disc cutter consumption and to predict amount of disc cutters when a shield TBM(Tunnel Boring Machine) of the Han Riverbed Tunnel was applied. In fact, it is almost impossible to change the machine after starting the excavation using the shield TBM method. Therefore, it is important to design an appropriate equipment in the shield method - an efficiency choice of the operation equipment plays a key role in the shield tunnel processing. For the above reason, the disc cutter consumption prediction is quite important so that the detailed analysis is required. A number of disc cutter consumption was predicted by the three methods, viz. KOMATSU, MITSUBISHI and NTNU. In addition, the predicted results were compared with field data. The prediction of disc cutter consumption showed that 237 for KOMATSU, 501 for MITSUBISHI, and 634 for NTNU, respectively. However, a total number of 1,263 disc cutter consumption were investigated during the tunnel construction. It was found that there was a huge difference between the predicted and real values of the disc cutter consumption. The more detailed investigation showed that the disc cutter was worn out bluntly in the northbound tunnel, meanwhile it was worn out sharply in the southbound tunnel. In particular, the disc cutter consumption in the southbound tunnel was increased rapidly because of rear abrasion for remaining mucks in the chamber.

**Keywords** : Shield method, TBM, Disc cutter, The Han Riverbed Tunnel

### 1. 서론

우리나라는 국토가 좁고 70% 이상이 산악지역으로 구성되어 있어 도로나 철도 건설시 터널이 차지하는 비중은 상당히 크다고 할 수 있다. 또한 대도시로의 인구 유입이 가속화되어 지하철이나 지하도로의 수요도 늘어나고 있는 실정이다. 지금까지 국내는 대부분의 터널 굴착공법을 NATM으로 설계 및 시공하고 있으나 이는 작업환경이 열악하고, 발파 소음과 진동에 의한 민원발생이 잦아 최근에는 NATM 공법의 대안으로 쉴드공법이 많이 적용되고 있다.

국내에서는 1980년대 후반부터 전력구 공사를 시작으로 직경 5m 이하의 소구경 쉴드터널을 많이 시

공하였으나, 대구경 쉘드터널 시공실적은 광주지하철 TK-1공구, 부산지하철 230공구 등 손에 꼽을 정도로 미미하다. 최근 분당선 왕십리~선릉간 제3공구, 인천공항철도 2B-5공구를 비롯하여 서울지하철 703, 704, 909공구 등 대구경 쉘드TBM을 이용한 공사가 증가하고 있으나, 축적된 기술력 부족과, 장비 계획 및 선정에 외국 장비회사에 전적으로 의존하고 있어 공사에 많은 어려움을 겪어왔다.

쉘드공법은 지반조건 및 공사환경에 맞춰 제작된 장비가 투입되어 굴착공사가 시작되면 변경이 거의 불가능하기 때문에 적절한 장비설계가 무엇보다도 중요하며, 막장변화에 따른 장비의 효율적인 운영여부가 공사의 성패를 좌우하게 된다.

본 논문에서는 한강하저터널의 쉘드TBM 적용시 디스크 커터 소모량 예측과 소모량에 관한 연구를 다루었다. 디스크 커터 소모량 예측은 KOMATSU 예측, MITSUBISHI 예측, NTNU 기법 예측 등 총 3가지 분석법에 의해 실시하였으며, 이들 결과와 실제 시공시 조사된 디스크 커터 소모량과 비교 분석하였다. 또한 디스크 커터 소모량이 예측치에 비해 많이 발생한 원인에 대해 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 NATM과 쉘드TBM공법

NATM(New Austrian Tunneling Method)은 지반자체를 주지보로하고 락볼트, 숏크리트 등의 보조지보재를 활용하여 주변지반의 변위를 억제하며 터널을 굴착하는 공법이다. 인력 및 기계굴착과 발파굴착으로 나눌 수 있으며, 굴착시 수시로 막장 관찰이 가능하므로 지반변화에 신속하게 대응할 수 있는 장점이 있다. 하지만 작업환경이 열악하고, 위험요소가 많아 안정성이 떨어진다는 단점이 있다. 해외에서는 1950년대 이후 많이 사용해 왔으나, 국내에서는 1980년 초반부터 지하철 공사에 본격적으로 적용하여 대부분의 터널을 NATM 공법으로 시공하였다.

쉘드공법은 터널 외경보다 약간 큰 단면을 갖는 전단면 터널 굴착기를 지반속에 추진시켜 막장의 붕괴를 방지하면서 굴착 및 라이닝 작업을 수행하여 터널을 굴착하는 방법이다. 굴착은 기계의 추력과 커팅툴(디스크 커터, 비트)을 장착한 커터 헤드의 회전에 의해 이루어지며, 모든 작업이 원형 강재통 안에서 이루어져 안전한 공법으로 각광받고 있다. 하지만 밀폐형 쉘드TBM은 막장을 직접 관찰할 수 없어 암질의 변화에 빠르게 대처할 수 없다는 단점이 있다. 표 1에 NATM과 쉘드TBM공법 전반적이 개요를 표로 정리 하였다.

표 1. NATM과 쉘드TBM공법의 개요(계속)



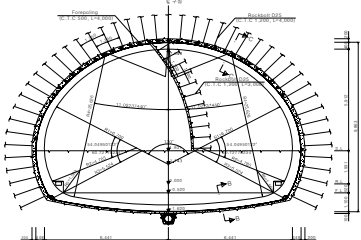
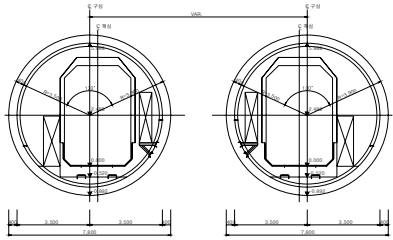
구분	NATM	쉘드TBM공법
개요도		
표준 단면도		

표 1. NATM과 쉴드TBM공법의 개요

구분	NATM	쉴드TBM공법
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 주변지반 자체를 지보로 활용</li> <li>· 락볼트, 슛크리트 등의 보조지보재를 활용하여 지반변위를 억제</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 쉴드장비 자체로 지반 붕괴와 지하수 유입을 방지하며 안정성 도모</li> <li>· 쉴드 내부에서 세그먼트 라이닝을 설치해 이를 지지점 추진력을 가해 굴착</li> </ul>
시공성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 암질이 불량한 구간에서 분할굴착</li> <li>· 암질변화에 유연한 대처 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 토목, 기계적 시공능력 필요</li> <li>· 암질 변화가 심하면 시공성 저하</li> </ul>
안정성	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 발파, 낙반에 의한 사고가 빈번히 발생</li> <li>· 계측에 의해 터널 안정성 예측</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 쉴드장비의 지지효과로 안전</li> <li>· 원지반 이완 최소화</li> </ul>
경제성	· 비교적 저렴	· 초기투입비가 많음
주변현황	· 도심지 구간 시공시 소음, 진동으로 인한 민원 발생	· 소음, 진동이 미약하며, 인근구조물에 영향이 적음

## 2.2 쉴드기의 분류

### 2.2.1 Open(gripper) TBM

Open TBM은 터널 주면을 지지하고 내부 작업공간을 보호하기 위한 쉴드가 없으며, 굴착 벽면에 대한 그리퍼의 지지력으로 추진력을 얻고, 굴착 후 터널 안정성을 확보하기 위해 지보재가 활용된다. 경암에서 고속 시공이 가능하나, 굴진면의 자립이 불량하거나 그리퍼의 반력을 기대할 수 없는 지반에서는 시공성이 매우 저하된다. 특히 자립도가 낮은 지반이나 균열성 지반이 존재하는 경우 붕락이 발생할 위험이 있어 최근에는 경암에서도 쉴드TBM이 적용되고 있다.

### 2.2.2 Single Shield TBM

Single Shield TBM은 굴진면에 대한 지지 시스템이 없는 전면개방형 단일 쉴드TBM을 통칭하며, 추진 반력을 얻는 방법에 따라 Gripper Shield TBM과 Segmental Shield TBM으로 구분된다. Gripper Shield TBM은 그리퍼와 결합된 실린더 쉴드가 장착되어 있다는 점을 제외하면 Open TBM과 거의 동일하며, 추진시에도 터널 주면을 지지하며 후방에서 세그먼트를 설치할 수 있다는 특징이 있다. 비교적 불량한 암반에서도 적용이 가능하나, 굴진면의 안정성을 확보하기 위한 별도의 장치가 없기 때문에 연약지반에서는 사용이 불가능하다. 반면 Segmental Shield TBM은 그리퍼가 없기 때문에 커터 헤드 추진과 세그먼트 설치가 동시에 이루어질 수 없다. 굴진면에 대한 지지기구가 없다는 점을 제외하면 일반적인 토압식, 이수식 쉴드TBM과 거의 동일하다.

### 2.2.3 토압식(E.P.B, Earth Pressure Balanced) 쉴드TBM

토압식 쉴드TBM은 커터 헤드 후면의 챔버(Chamber)를 굴착 토사 또는 버력으로 가득 채워서 굴진면을 지지하면서 굴진한다. 일반적으로 스크류 컨베이어의 회전력에 의해 굴진면에 주동 토압이 발생하지 않도록 해야하기 때문에, 굴진면 토압이 확실하게 스크류 컨베이어에 전달되도록 소성유동화한 굴착토를 챔버에 가득채우게 된다. 굴진면의 지지압력은 굴진속도와 스크류 컨베이어의 회전수에 의해 제어되며, 추진력에 의해 챔버 내에서 가압된 굴착토의 토압이 굴진면 전체에 작용해 막장의 안정을 확보한다. 토압식 쉴드TBM은 별도의 보조공법 없이 광범위한 지반조건에 적용이 가능하고 이수식에 비해 지상 플랜트 부지가 적게 소요되어 최근에 많이 활용되고 있다.

### 2.2.4 이수식(Slurry) 쉴드TBM

토압식 쉴드TBM이 굴착토를 이용해 굴진면을 지지한다면, 이수식 쉴드TBM은 굴착토 대신 이수를 가압 순환시켜 굴진면을 안정시킨다. 다시 말해서, 막장의 수압과 토압에 대항해서 챔버 내에 소정의 압력을 가한 이수를 충전해 굴진면의 안정을 도모하고, 동시에 이수를 순회시켜 굴착토를 유체 수송해 배토하는 공법이다. 토압식과 달리 펌프와 파이프를 사용해서 송·배니하고, 굴진면을 완전히 밀폐시키므로 시공환경이 양호하다. 하지만 지상에 이수 처리를 위한 대규모 플랜트 부지가 필요하다는 점이 큰 단점이다.



(a) Single Shield TBM      (b) Open TBM      (c) E.P.B Shield TBM      (d) Slurry Shield TBM  
 그림 1. 각종 TBM 장비

## 2.3 디스크 커터 소모량 예측

### 2.3.1 KOMATSU 예측

본 과업에 적용된 일본 KOMATSU사의 쉐드TBM의 디스크 커터 소모량 예측은 그림 2와 같은 터널 연장과 디스크 커터의 소모량 관계 아래 그래프로부터 예측할 수 있다.

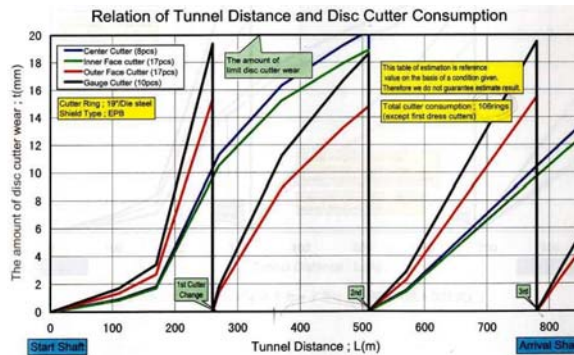


그림 2. 터널 연장과 디스크 커터 소모량

### 2.3.2 MITSUBISHI 예측

MITSUBISHI사에서 제안하는 디스크커터의 소모량은 아래 식 (1)에서 유도되며 이는 디스크커터의 크기, CLI(cutter life index), TBM 직경과 커터 헤드의 보정계수, 커터 헤드의 직경과 커터 헤드의 회전 속도외의 보정계수, 디스크커터의 수량과 보정계수 등으로 표현할 수 있다.

$$L_h = (H \cdot K_\phi \cdot K_{rpm} \cdot K_n \cdot K_{min}) / N \text{ (Hr/cutter)} \quad (1)$$

$$L_m = L_h \cdot V_h \text{ (m/cutter)} \quad (2)$$

$$L_f = L_m \cdot \frac{\pi D^2}{4} \text{ (m}^3\text{/cutter)} \quad (3)$$

여기서,  $L_h$ ,  $L_m$ ,  $L_f$  : Disc Cutter Life

$V_h$  : Excavation speed

$H$  : Standard disc cutter life time depending on the cutter life index CLI and cutter size

$K_\phi$  : Correction factor of TBM diameter and shape of cutter head

$K_{rpm}$  : Correction factor of cutter head diameter and cutter head rotation speed

$K_n$  : Correction factor of mineral content of rock

$N$  : Quantity of disc cutter

### 2.3.3 NTNU 예측

NTNU(Norwegian University of Science and Technology) 예측은 노르웨이 과학기술대학에서 개발된 방법으로, 노르웨이 지반조건에 대해 수십년간 축적된 자료에 근거해 얻어진 경험적인 TBM 설계·평가 기술이며(NTH, 1995), 모든 활용과정과 시험방법들이 공개되어 있다는 점에서 활용성이 매우 높다.

$$H_h = (H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{RPM} \cdot k_N) / N_{tbn} \quad (\text{hr/cutter}) \quad (4)$$

$$H_m = H_h \cdot I \quad (\text{m/cutter}) \quad (5)$$

$$H_f = H_h \cdot I \cdot \pi \cdot d_{tbn}^2 / 4 \quad (\text{m}^3/\text{cutter}) \quad (6)$$

여기서,  $H_h$ ,  $H_m$ ,  $H_f$  : 평균 커터 링 수명

$H_0$  : 기본 평균 커터 링 수명

$k_D$  : TBM 직경에 따른 커터 링 수명의 보정계수

$k_Q$  : 석영 함유량에 따른 커터 링 수명의 보정계수

$k_{RPM}$  : 커터 헤드 RPM에 대한 보정계수

$k_N$  : 커터 개수 차이에 따른 보정

$N_{tbn}$  : 커터 헤드에 장착된 커터 개수

$I$  : 단위 관입률(m/hr)

$d_{tbn}$  : TBM 지름

## 3. 현장 개요

### 3.1 공사개요

과업구간은 분당선 왕십리~선릉간 제3공구로서 한강하저를 관통하는 현장이며 총 1,660m중 쉘드 TBM구간은 846m에 해당된다. 굴착경은 8.06m(세그먼트 외경 7.8m / 내경 7.0m)이며, 콘크리트 세그먼트의 압축강도( $f_{ck}$ )는 45Mpa이고, 분할 6+1Key, 세그먼트폭은 1.5m이다. 경사볼트(33EA/Ring) 체결방식으로 이루어져있다. 그림 3에 분당선 왕십리~선릉간 제3공구 조감도를 나타내었다.



그림 3. 분당선 왕십리~선릉간 제3공구 조감도

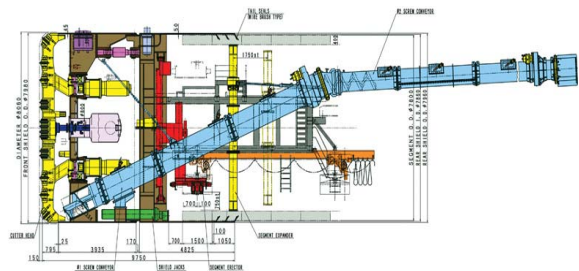


그림 4.  $\Phi 8.06\text{m}$  E.P.B 쉘드TBM 단면도

### 3.2 쉘드TBM 장비제원

쉘드TBM은 일본 KOMATSU사에서 제작하였다. 장비제원으로서 외경은  $\Phi 8,060\text{mm}$ , 기계길이는 9,750 mm, 추진속도는 0~5.4cm/min이며, 총 추진력은 72,000kN, 회전속도는 0.8~4.0rpm(양방향 회전), 디스크 커터는 19"(Single 36EA, Double 8Set)로 이루어져 있다. 그림 4는  $\Phi 8.06\text{m}$  E.P.B 쉘드TBM 단면도를 보여주고 있다.

### 3.3 지반조건

과업구간은 고지형도와 선구조를 분석한 결과 선캠브리아기 경기 변성암 복합체와 제4기 충적층이 부정합

으로 분포하여 있으며, 호상편마암을 기반암으로 하며 북측에 편마암을 관입한 주라기 서울화강암과의 암경계가 존재하여 소규모 단층이 존재할 것으로 판단되었다. 또한, 방향제어시추(DCD, Directional Core Drilling) 및 3D 전기비저항 탐사결과 2km900~2km960(L=60m)에 터널을 가로지르는 단층대가 발견되었다. 하상구간은 비교적 신선한 경암반(평균 일축압축강도 170MPa)으로 구성되어 있으며, 강북구간에 60m 폭의 단층과쇄대 1개소와 강남구간에 2개소의 연약대가 분포하고 있는 것으로 파악되었다. 하상구간의 저수로 폭은 710m, 하폭은 773m이며, 평수위는 2.95m, 최대홍수위는 16.68m로 조사되어 터널상부에 미치는 평시 수압은 310kPa, 최대홍수위시 수압은 470kPa로 예측되어 굴진중 막장면을 통한 고수압 발생 가능성을 내재하고 있었다.

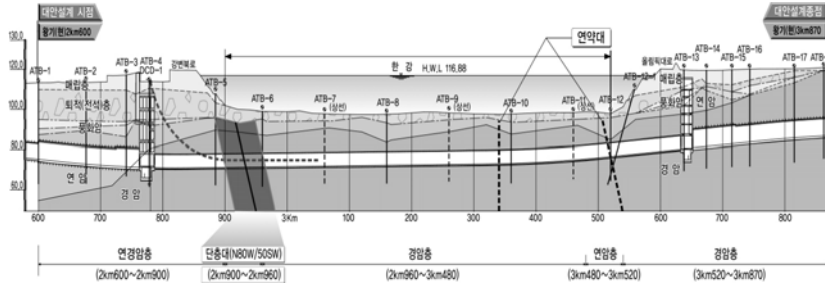
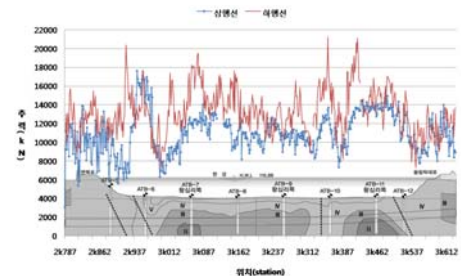


그림 5. 단면도 및 지질도

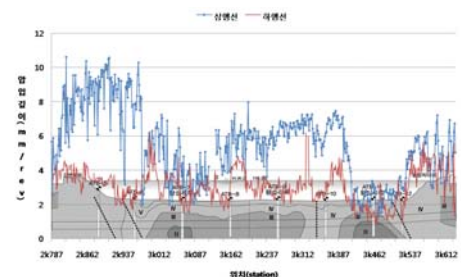
#### 4. 굴진자료 분석

##### 4.1 상·하행선 계측결과 비교

셸드TBM 계측관리의 목적은 굴진중 직접 관찰하기 어려운 지반상태를 파악하여 막장의 안정을 안정시키고 굴착속도를 향상하는 데에 있다. 추력은 암반의 강도를 판단할 수 있는 가장 기본적인 기준이 된다. 일반적으로 약한 암반에서는 낮은 추력으로 굴착이 가능하지만, 암반의 강도가 높아질수록 높은 추력을 가해야 한다. 셸드TBM의 순굴착속도 PR(mm/min)은 디스크 커터 압입깊이  $P_c$ (mm/rev)와 커터 헤드 회전속도 N(rpm)의 곱으로 산출되므로, 순굴착속도 향상을 위해 적절한 압입깊이의 확보는 무엇보다도 중요하다. KICT-SNU 모델을 통해 예측한 과업구간의 최적 압입깊이는 6.0mm/rev였으며, 상·하행선의 평균 압입깊이는 각각 4.55mm/rev, 2.72mm/rev를 기록했다. 상·하행선의 최대 이격거리가 6m에 불과한 점과 계측값의 거동으로 미루어 볼 때 암질은 거의 동일한 것으로 보인다. 하행선의 추력이 상행선보다 20% 정도 높았음에도 불구하고 순굴착속도가 저하된 이유는 압입깊이가 매우 낮았기 때문인 것으로 분석되었다. 그림 6은 굴착중 추력 및 압입깊이 계측 결과를 그래프로 나타내었다.



(a) 추력



(b) 굴착중 압입깊이 계측

그림 6. 추력 및 압입깊이 계측 결과

##### 4.2 상·하행선 순굴착속도

상행선의 순굴착속도는 평균 0.88m/hr인 반면 하행선은 평균 0.49m/hr에 그쳤으며, 거의 모든 구간에서 하행선의 순굴착속도가 상행선보다 매우 낮았다. 표 2에 상·하행선의 순굴착속도 비교를 표로 나타내었다.

##### 4.3 디스크 커터 소모량 예측 결과

한강하저터널 총연장 1,691m를 굴착시 KOMATSU 예측은 총 237개, MITSUBISHI(2004) 예측은 501개, NTNU(1998) 예측은 634개로 분석되었다. 디스크 커터 소모량 예측값과 실제 교환수량은 많은 차이를 나

타내었다. 가장 근접한 NTNU 기법조차 2배가량 차이를 보여 직접 적용은 어려울 것으로 판단되었다. 표 3에 디스크 커터 소모량 예측 결과와 실시공시 소모된 디스크 커터의 양을 도표로 나타내었다.

표 2. 상·하행선의 순굴착속도 비교표

구 분	상행선	하행선
최고 순굴착속도	1.73m/hr	1.12m/hr
최저 순굴착속도	0.29m/hr	0.14m/hr
평균 순굴착속도	0.88m/hr	0.49m/hr

표 3. 디스크 커터 소모량 예측 결과

구 분	상행선	하행선	합 계
KOMATSU 예측	106	131	237
MITSUBISHI 예측	179	322	501
NTNU 예측	227	407	634
실시공 조사 결과	378	885	1,263

#### 4.4 디스크 커터 소모량 조사 결과

한강하저터널 1,691m를 굴착하면서 총 1,263개의 디스크 커터가 소모되었으며, 이중 정상마모된 커터의 비율은 78%였다. 구간별 커터 교환수량을 살펴보면 연경암 및 경암 구간보다 파쇄대 및 극경암 구간에서 교환 횟수가 잦고 교환 수량이 많았다. 상행선 굴착에 사용한 커터는 378개였고, 하행선은 885개로 상행선의 234%에 이르렀다. 잦은 커터 점검 및 교환으로 편마모 수량은 줄었지만, 하향굴착으로 인해 파손된 디스크 링과 비트가 챔버안에 잔류하며 디스크 링에 충격하중을 주어 크랙과 탈락 비율은 여전히 높았다. 그림 7은 마모 유형별 디스크 커터 소모량을 그림 8은 구간별 디스크 커터 교환 수량을 그래프로 나타내었다. 또한 일반적인 디스크 커터의 마모 유형을 그림 9에 나타내었다.

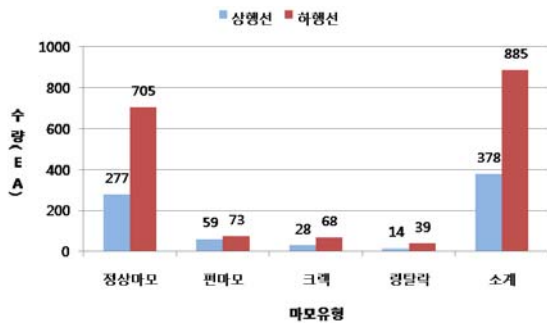


그림 7. 마모 유형별 디스크 커터 소모량

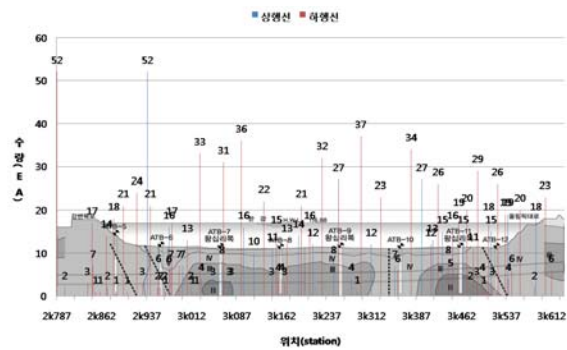
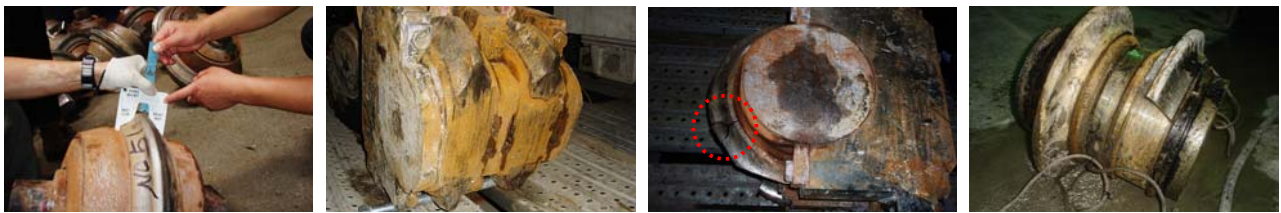


그림 8. 구간별 디스크 커터 교환 수량



(a) 정상마모

(b) 편마모

(c) 디스크 링 크랙

(d) 디스크 링 탈락

그림 9. 디스크 커터의 마모 유형

#### 4.5 디스크 커터 소모량 증가 분석

디스크 커터의 소모량 예측은 지반조건이 동일하다는 가정에서 이루어지지만 과업구간의 지질은 파쇄대부터 극경암까지 다양한 암종이 분포하여 소모량이 증가한 것으로 분석되었다. 디스크 커터는 암반의 특성에 따라 베어링의 토크 설정치, 디스크 링의 경도와 열처리 등을 바꿔줘야 하지만 암질 변화를 정확하게 예측하기가 어려우므로 동일한 규격으로 굴착공사를 수행할 수밖에 없어 소모량이 급증한 것으로 보인다.

셸드TBM장비가 현장에 반입되면서 커터 헤드에 장착된 디스크 커터와 예비 커터 1Set(52EA)는 장비 제작사인 KOMATSU사에서 제작한 제품이었고, 이후에 사용된 커터는 국내에서 제작한 제품이었다. KOMATSU 제품을 모두 교환하기까지 312m를 굴착했으며 교환하지 않고 남은 커터가 마모율을 50%로 가정했을 때, 커터 1개당 굴착 거리는 2.33m/cutter로 나타났다. 이후 533m 구간은 커터당 굴진거리는 2.18m/cutter로 약간 저하됐지만, 극경암이 있었다는 점을 감안하면 커터의 품질 차이는 거의 없는 것으로 분석됐다.

예측모델 중 가장 많은 소모량을 도출한 NTNU기법에 의한 예측량과 비교하면 상행선은 167%, 하행선은 217%의 디스크 커터 소모량을 보였다. 하행선의 마모율이 상행선에 비해 높은 이유는 커터의 마모 형태로 찾아볼 수 있다.

커터 헤드 전면 암반과의 마찰로 인한 경우 디스크 커터가 뭉툭하게 마모되는 반면, 챔버에 정체된 버력으로 인해 배면 마모가 발생하면 날카로운 형태로 마모되게 된다. 상행선은 정상 마모된 디스크 커터 팁의 모양이 뭉툭한 반면, 하행선은 날카로운 형태로 마모된 점으로 볼 때, 하행선 마모의 원인은 순굴착속도 저하 원인과 마찬가지로 스크류 컨베이어를 통해 빠져나가지 못하고 챔버내에서 정체된 버력으로 인한 것으로 분석되었다. 그림 10은 디스크링의 마모 형태를 보여주고 있다.

최근들어 우수한 냉각효과로 인해 커터 베어링의 내구성을 증가시키고, 커터의 온도를 낮춤으로써 커터 마모율을 감소시키는 막장주입재의 사용이 시도되고 있다. 스페인 Guadarrama 고속철도 터널에 막장주입재를 적용한 결과 마모성이 높은 지반조건(CAI=5.66, Extremely Abrasive)에서도 커터 마모율을 15% 감소시키는 효과를 얻었다.

따라서 커터의 온도를 낮추며, 버력의 소성유동화를 도와 커터의 마모율을 저감시키는 막장주입재에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.



(a) 뭉툭하게 마모된 디스크링

(b) 날카롭게 마모된 디스크링

그림 10. 디스크링의 마모 형태

## 5. 결론

본 연구에서는 한강하저터널 시공시 셸드TBM적용의 디스크 커터 소모량 예측과 마모량에 관한 연구를 다루었으며 연구 결과를 종합적으로 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) KICT-SNU 모델을 통해 예측한 과업구간의 최적 압입깊이는 6.0mm/rev였으며, 상·하행선의 평균 압입깊이는 각각 4.55mm/rev, 2.72mm/rev를 기록하여 상·하행선의 최대 이격거리가 6m에 불과한 점과 계측값의 거동으로 미루어 볼 때 압질은 거의 동일한 것으로 사료된다. 그러나 하행선의 추력이 상행선보다 20%정도 높았음에도 불구하고 순굴착속도가 저하된 이유는 압입깊이가 매우 낮았기 때문인 것으로 분석되었다.
- 2) KOMATSU는 디스크 커터 소모량을 237개로 예상하였으며, 굴진정보를 MITSUBISHI와 NTNU의 예측모델에 적용한 결과 각각 501개, 634개를 소모될 것으로 예측되었다.
- 3) 실제 굴착중 소모된 디스크 커터의 양은 1,263개에 이르렀으며, 하행선의 소모량은 상행선의 2.3배에



달했다. 디스크 커터는 암반특성에 따라 일부 사양을 변경해야 하지만, 동일한 사양의 커터로 파쇄대에서 극경암에 이르는 다양한 암종을 굴착하여 마모량이 급증한 것으로 보인다.

- 4) 예측모델 중 가장 많은 소모량을 도출한 NTNU기법에 의한 예측량과 비교하면 상행선은 167%, 하행선은 217%의 디스크 커터 소모량을 보였다. 상행선은 디스크 커터가 뭉툭하게 마모된 반면 하행선은 날카롭게 마모된 점으로 보아 챔버에 정제된 버력에 의해 디스크 커터의 배면 마모 발생이 하행선 디스크 커터 소모량 급증의 주원인으로 분석되었다.
- 5) 막장주입제는 커터 베어링의 내구성을 증가시키고, 마모율을 감소되는 것으로 보고되고 있으며, 마모성이 높은 지반조건에서도 커터 마모율을 감소시키는 효과적이라는 국외 연구 결과가 보고되고 있어 국내에서도 막장주입제에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2007), 쉘드TBM 굴진성능 평가 보고서, pp.15~63.
2. KAWASAKI Heavy Industries, LTD.(2003), *8.16m $\Phi$  E.P.B. Dual Mode(Open/Close) Type Tunnel Boring Machine*, p.14.
3. MITSUBISHI Heavy Industries, LTD.(2004), *Estimation Of Disc Cutter Consumption( $\Phi$ 8100mm EPB Shield TBM)*, pp.1~6.
4. NTH(1995), "Hard Rock Tunnel Boring", Project Report, pp.1~94.
5. NTNU(1998), *Advance Rate and Cutter Wear*, Hard Rock Tunnel Boring, Vol.3, p.10.