

풍화대 지반에서의 쉴드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

# Tunnelling Technology

## 풍화대 지반에서의 쉴드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

(서울지하철 7호선연장 703공구 건설공사를 중심으로)



**박준수**  
대정컨설턴트  
터널부 과장



**도덕수**  
대정컨설턴트  
터널부 부장



**김용일**  
대우건설  
토목기술1팀 부장



**정두석**  
대우건설  
토목기술1팀 부장

### 1. 서론

최근 2km 이상의 장대 터널에 대한 쉴드 터널 공법의 적용이 빈번함에 따라 장거리 굴착 및 굴진효율을 높이기 위한 커터도구의 형상, 규격 및 재질의 선정은 그 무엇보다도 중요하게 되었다.

1818년 쉴드공법 발명이래 일본을 비롯한 쉴드터널 선진 국가에서는 커터도구에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 암반지반에 대한 연구가 대부분이고 토사(풍화대) 지반에 대한 연구는 미진한 상황이다. 특히 토사지반에 대한 국내에서의 커터도구에 대한 연구는 전무한 상태이다.

본 사례연구 대상인 서울지하철 7호선 연장 703공구의 굴착지층은 풍화대 토사지반으로서 4개 구간의 쉴드터널로 구성되어 있으며, 각 구간의 굴착연장은 673m~921m

로 계획되었다. 이는 국내 토사지반에서의 최장거리 쉴드 터널로서, 굴착중 커터의 잦은 교체로 인한 비가동시간과 비용의 증가가 예상되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 굴착중 커터도구의 무교체 시공 및 굴착효율 향상을 위한 커터도구의 선정에 초점을 맞추었다. 국내 최초로 도입하는 토사 굴착용 커터도구의 형상, 규격, 재질 및 손상 원인에 대해 분석하였으며, 국내외로 연구가 미진하였던 토사(풍화대) 지반에서의 커터 마모량 평가방법을 제시하여 쉴드에 의한 굴착 계획의 타당성을 검증하였다. 특히 일본의 쉴드 TBM 제조사 및 전문 시공업체의 사례를 분석하여 커터 종류에 따른 지반별 마모계수를 제시하였다. 이를 통해 굴착대상 지반과 커터도구와의 상관 관계를 제시함으로써 토사(풍화대)지반에서의 쉴드터널 적용시 외국 장비회사에 대한 의존도를 줄이고, 국내 기계화 시공기술 및 장비제작 발전에 도움이 되고자 한다.



풍화대 지반에서의 쉴드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

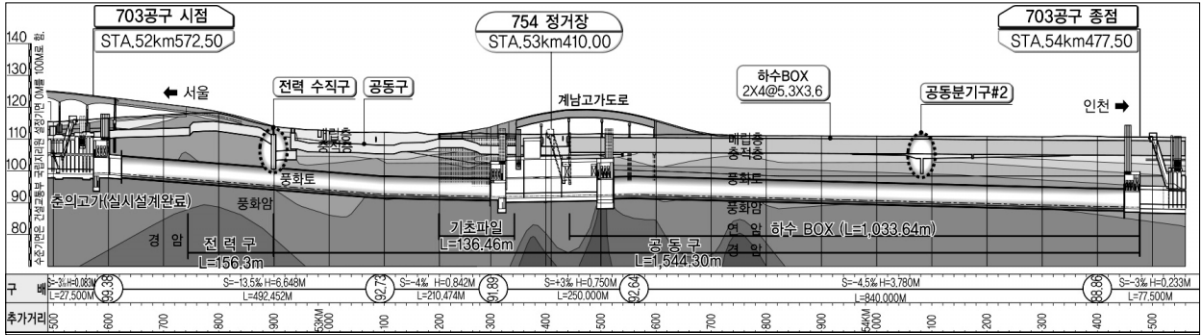


그림 2. 지층 개요도

- 비 가동시간의 증가
- 잦은 막장 보강 및 커터 교체
- 협소한 공간에서의 커터 교체
- 시공성이 저하되는 갱내 보강그라우팅

이와 같이 공기지연과 공사비 증대 그리고 안전성을 저해하는 협소한 공간에서의 커터 교체 문제점을 해결하기 위해서는 철저한 지반조사를 통한 커터도구 선정 및 마모량 평가를 사전에 수행하여 개착구간과 같이 교체 작업이 수월히 이루어질 수 있도록 계획하여야 한다. 당 현장의 쉴드공사는 지반특성에 따른 커터의 굴삭원리 및 파괴 원인을 분석하여 개착구간인 754정거장에서 커터교체가 이루어지도록 커터 형식, 규격 및 제원을 선정하였다.

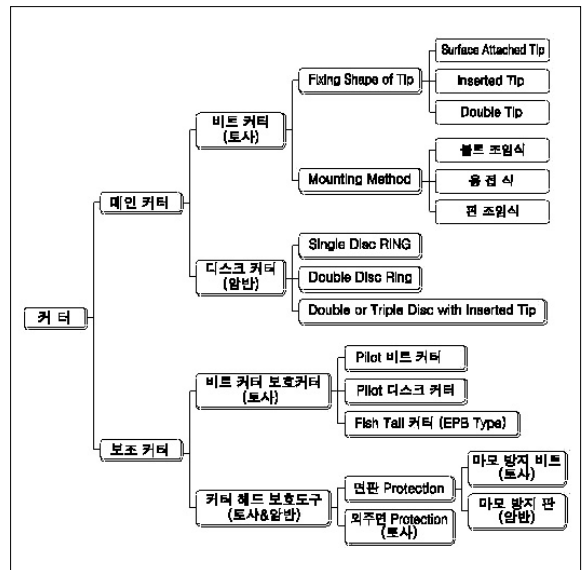


그림 3. 지반 및 기능에 따른 커터 분류

### 3. 커터 형식 및 제원 선정

쉴드 TBM의 굴착능력은 TBM의 추력, 회전력 및 커터 도구에 의해 결정된다. 따라서 커터 설계는 쉴드 TBM 설계시 중요한 요소로서 지반특성 및 주변여건에 적합한 커터를 선정하여야 한다.

#### 3.1 지층 및 기능별 커터 분류

커터도구는 1818년 TBM 발명 이후 계속 발전되어 왔

으며, 지반 및 기능에 따른 분류는 그림 3과 같다. 커터는 메인 커터와 보조 커터로 대분되며, 메인 커터는 대상지반에 따라 비트 커터와 디스크 커터로 구분된다. 또한 보조 커터는 메인 커터 및 커터 헤드의 부하경감을 위한 비트 커터 보호용과 커터 헤드 보호용으로 분류 된다.

##### 3.1.1 메인 커터

(1) 토사 굴착용 비트 커터

비트 커터는 평날형상을 한 토사굴착용 기구로서 모재

표 1. 팁의 부착형태에 따른 분류




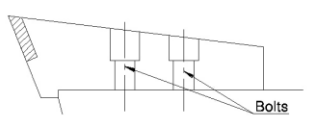
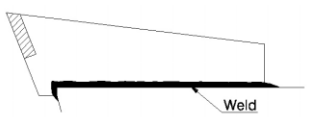
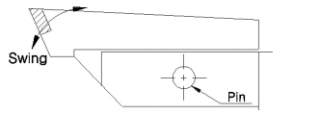
구분	Stick (표면 부착형)	Single Insert	Double Insert
개요도			
부착형태	· 모재부 표면에 설치	· 모재부 외측 속에 삽입 설치	· 모재부 내 · 외측 속에 삽입
굴삭능력	· 날에 어느 정도의 경사각이 있어 높은 굴삭력을 가짐	· 날의 경사각이 거의 0°로 굴삭력이 표준형에 비해 낮다	· 날의 경사각이 거의 0°로 굴삭력이 표준형에 비해 낮다
특징	· 자갈 및 옥석이 다수 포함된 지반 적용시 충격에 의한 팁 탈락 및 모재부 파손	· 모재부 내의 팁 삽입으로 자갈 및 옥석등의 충격에 대응 가능	· 자갈 및 옥석과의 충격에 강하며, 2매 팁 삽입으로 내구성 및 내마모성 우수
적용지반	· 점토, 실트 및 모래와 같이 비교적 강성이 약한 지반	· 비교적 소량의 자갈 및 옥석 등이 혼재된 강성지반	· 자갈층과 같이 마모성 큰 강성지반 및 장거리 구간

표 2. 설치방법에 따른 비트 커터 분류

구분	볼트 조임식	용접식	핀 조임식
개요도			
설치방법	· 커터헤드에 볼트로 장착	· 커터헤드에 직접 용접	· 비트 Folder에 Pin으로 장착
연결강도	· 볼트의 크기 및 강도에 의해 커팅 저항력 결정	· 용접 면적에 의해 저항력 결정 (타방식에 비해 큼)	· Pin과 Folder의 강도에 의해 결정 (볼트식보다 강도 큼)
교체방법	· 막장면에서의 볼트 해체로 커터교체 비교적 용이	· 가스 화염에 의한 절단 및 용접으로 굴착중 교체 곤란	· 챔버 안에서의 핀 제거로 커터교체 용이
적용지반	· 연결 강성이 비교적 약하여 강성이 작은 지반에 적용	· 강성이 큰 지반에서의 단거리 굴착	· 강성이 큰 지반 및 장거리 굴착
설치비용	· 매우 저렴	· 볼트식에 비해 고가	· 용접식과 거의 동일

부(母材部)와 팁(Tip)으로 구성되어 있으며, 팁의 부착형태 및 비트의 설치방법에 따라 구분된다. 이는 지반조건 및 주변여건(굴착연장 및 비트교체 가능여부 등)에 따라 분류된 것이며, 그 특징 및 적용지반은 표 1, 2와 같다.

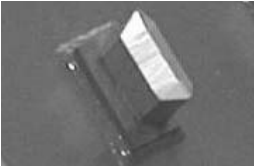
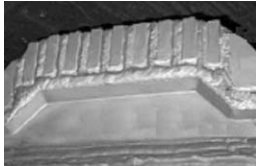

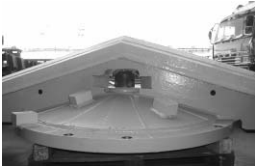
(2) 암반용 굴착용 디스크 커터

암반 및 복합지반 굴착을 위한 디스크 커터는 디스크

날(링)이 TBM의 추력 및 회전에 의해 암석으로 관입되고 이로 인해 암반에 높은 응력이 발생하여 균열의 생성 및 전파, 연합으로 암석을 파괴된다.

이러한 디스크 커터는 암반조건에 따라 크기 및 형상이 달라지며, 일반적으로 그림 4와 같이 Single Disc Ring, Double Disc Ring 및 Disc with Inserted Tip 형태의 디스크 커터로 구분된다. 메인 베어링으로부터 전이된 굴삭

표 3. 비트 커터의 보호커터 종류 및 특징

구 분	Pilot 커터 Bit		Pilot 디스크 커터	Fish Tail 커터
	Knife Edge Bit	Special Knife Edge Bit		
개 요 도				
형 상	· 판 형상의 비트로 Tip은 외측 날에만 부착	· 조개 형상의 비트로 Tip은 모재 내 · 외부에 전부 삽입	· 디스크 커터와 동일한 형상이며 Ring에 일정한 간격으로 팁 삽입	· 물고기 꼬리 형상으로 선단부에 Tip 삽입 및 Knife Edge Bit 장착
대상지반	· 비교적 강성이 큰 토사지반 · 중 · 장거리 굴착	· 옥석 및 암편을 포함 한 토사지반 및 풍화대 · 장거리 굴착	· 기반암이 혼재된 복합 지반 및 거대 옥석이 포함된 지반	· 토사지반 · 대부분 EPB Type에서만 적용
설치높이	· 비트 커터 보다 20~50mm 이상 높게	· 비트 커터 보다 20~50mm 이상 높게	· 비트 커터 보다 약 20mm 이상 높게	· 비트 커터 보다 약 300mm 높게
설치목적	· 대상지반 선 굴착을 통한 지반강도 저하 → 비트 커터의 굴삭 저항력 감소	· 대상지반 선 굴착을 통한 지반강도 저하 · 30MPa이하의 강성 지반 굴착	· 대상지반 선 굴착을 통한 지반강도 저하 · 30MPa 이상 강도의 기반암 및 옥석 굴착	· TBM 중앙부로 굴착 토사의 집중현상 방지 → 원활한 배토 및 막장압 관리 용이

Single Disc Ring	Double Disc Ring	Disc with Inserted Tip
		

그림 4. 디스크 커터의 종류

능력을 하나의 링 끝단에 집중되게 하여 암반 파쇄능력을 가장 효과적으로 나타나게 하는 단일 디스크 커터는 단단한 암질에 대한 TBM 커터도구로 널리 이용되고 있다.

연속된 두 개의 링에 의해 버력의 크기를 최소화한 Double 디스크 커터는 개구율이 적은 암반용 TBM에 배토효율을 증진시킨 것이다.

또한 내마모성을 증진시킨 팁 삽입용 다중 디스크 커터는 토사지반내 큰 옥석 및 암편의 혼재로 커터의 마모량

이 크게 예상되는 지반에 사용되어 왔으나, 굴착중 충격으로 인한 삽입된 팁의 분리 및 파손에 의해 최근에는 사용실적이 감소되고 있다. 오늘날 암반 굴착을 위한 디스크 커터의 설계는 커터별 특징을 지반특성 및 TBM의 역학적 구동에 맞춰 가장 큰 외력을 받는 외곽부에는 단일 디스크 커터를 배치하며, 파쇄된 버력이 집중으로 모이는 중심부에는 이중 디스크 커터를 배치하여 굴착성능 및 배토 효율을 높이고 있다.

### 3.1.2 보조 커터

TBM의 굴착능력 향상을 위한 보조용 커터는 그 용도와 형태에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으나 크게 메인 비트 커터보다 대상지반을 선굴착하여 비트 커터의 부하 경감 및 마모량을 감소시켜주는 비트 커터 보호 커터(선행커터)와 커터헤드의 마모방지를 위한 커터 헤드 보호 도구로 구분된다.

#### (1) 비트 커터 보호커터

메인 비트 커터의 굴삭력 향상을 위한 선행커터는 커터의 마모량이 크게 예상되는 지반과 장거리 굴착을 위한 용도로 개발되었으며, 커터와 커터 사이의 Spoke 면에 설치된다. 형상 및 크기에 따라 표 3과 같이 Knife Edge Bit와 Special Knife Edge Bit로 구분되며, 높이는 비트 커터 보다 약 20~50mm이상 높게 설계된다. Special Knife Edge Bit는 Knife Edge Bit보다 내구성 및 굴착 능력 향상을 위해 조개형상으로 하여 크기를 증대시킨 것이 특징이다.

#### (2) 커터 헤드 보호도구

커터 헤드 보호도구는 표 4와 같이 커터헤드의 보호 부

분에 따라 커터 Face 보호와 Outer Surface 보호로 구분되며, 커터 Face 보호는 지반 강도 특성에 따라 Abrasion Protect Bit(토사용)와 Abrasion Protect Plat(암반용)으로 대별된다.

## 3.2 비트 커터와 디스크 커터의 굴삭 원리

### 3.2.1 토사용 비트 커터의 굴삭 원리

비트 커터는 굴착지반에 비트의 팁을 관입하여 지반의 수동저항력보다 큰 커터헤드의 회전력으로 지반의 전단파괴를 유발시키며, 이때 지반의 전단파괴는 비트 커터의 주행방향과 동일하다. 굴삭 이론은 지반의 파괴 메커니즘에 따라 표 5와 같이 Evans 인장파괴 이론, Ernst-Merchant의 전단 파괴 이론 및 Nishimastu의 한계평형 이론 등이 있으나, 이는 수학적 모델에서 나온 이론식으로 Bit에 작용하는 힘들 중 일부에 국한되어 있어 실제 비트 커터에 작용하는 주요 변수 전부를 반영하지는 못하고 있다.

비트 커터의 굴착 효율을 얻는데 필요한 주요 변수로는 Bit Rake angle( $\alpha^\circ$ ), Clearance angle( $\beta^\circ$ ), Bit Width(mm), 절삭심도(d), 지반과 Bit 사이의 마찰각

표 4. 커터 헤드 보호도구의 종류 및 특징


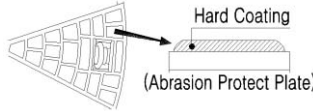

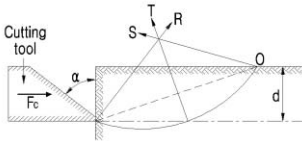
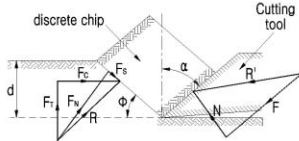
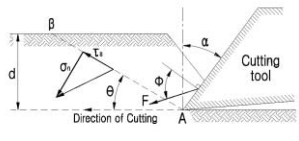
구분	커터 Face 보호 (전면부 보호)		Outer Surface 보호 (외주부 보호)
	Abrasion Protect Bit	Abrasion Protect Plate	
개요도			
대상지반	· 복합지반 및 토사지반	· 암반지반	· 복합지반 및 토사지반
설치위치	· 메인커터 주변부 및 커터를 설치할 수 없는 면판 중앙부	· 커터헤드 전면부 표면	· 커터헤드 외주부 표면
설치높이	· 메인 커터와 동일 높이	· 커터헤드 면판보다 12mm 높게	· 커터헤드 외주부 보다 15mm 높게
설치목적	· 메인 커터 및 면판 마모방지 · 커터 미 설치구간에 커터역할	· 암반에 의한 면판 보호	· 커터헤드 외주부 마모방지

표 5. 파괴 메카니즘에 따른 굴삭이론

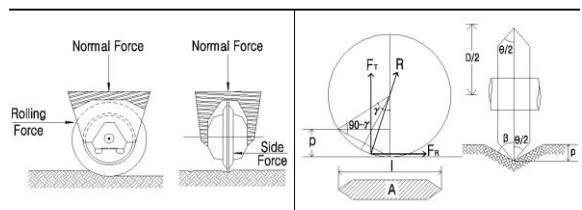
구분	Evans model	Ernst-Merchant model	Nishimastu model
개요도			
파괴식	$F_c = \frac{2twdsin^{0.5}[(\pi/2)-\alpha]}{1-sin0.5[(\pi/2)-\alpha]}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>F_c</math>: 파괴 순간의 절삭력</li> <li>· <math>t</math>: 지반의 인장강도 (Mpa)</li> <li>· <math>w</math>: Bit의 폭 (mm)</li> <li>· <math>d</math>: 절삭깊이 (mm)</li> <li>· <math>\alpha</math>: Bit Rake Angle(<math>^\circ</math>)</li> </ul>	$F_c = 2wdstan^{0.5}(90-\alpha-r)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>F_c</math>: 파괴 순간의 절삭력</li> <li>· <math>s</math>: 지반의 전단강도(Mpa)</li> <li>· <math>w</math>: Bit의 폭 (mm)v</li> <li>· <math>d</math>: 절삭깊이 (mm)</li> <li>· <math>\alpha</math>: Bit Rake Angle(<math>^\circ</math>)</li> <li>· <math>r</math>: 지반과 Bit의 마찰각(<math>^\circ</math>)</li> </ul>	$F_c = \frac{2swdcos(r-\alpha)cos\phi}{(n+1)(1-sin(\phi-\alpha+r))}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>s</math>: 지반의 전단강도(Mpa)</li> <li>· <math>w</math>: Bit의 폭 (mm)</li> <li>· <math>\alpha</math>: Bit Rake Angle(<math>^\circ</math>)</li> <li>· <math>r</math>: 지반과 Bit의 마찰각(<math>^\circ</math>)</li> <li>· <math>\phi</math>: 지반의 내부마찰각(<math>^\circ</math>)</li> <li>· <math>n</math>: 응력분배요소</li> </ul>

( $r^\circ$ ), Bit Shape, 지반강도(전단강도, 압축강도등) 및 Bit의 배치간격 등의 변수가 있다.

### 3.2.2 암반용 디스크 커터의 굴삭 원리

디스크 커터는 TBM으로부터 발생된 추력을 디스크 링에 집중시켜 암반면에 압쇄영역과 균열을 유발시킨다. 이때 발생하는 균열은 암반에 전단 및 인장파괴를 발생시키고 디스크 커터의 주행 방향과 직각방향으로 박리되어 굴착이 진행된다. 암반의 강도가 낮을 경우에는 디스크의 1회 주행으로 암반을 파쇄하지만, 압축 및 인장강도가 큰 경우에는 디스크의 반복 주행으로 균열을 성장시켜 암반의 파쇄를 유도한다.

그림 5는 쉴드 TBM에 추력을 가하면서 면판을 일정한 회전속도로 회전시킬 때 암반을 절삭하는 디스크 커터에 작용하는 힘의 3가지 성분을 보여준다. 암반 접촉면에 연직으로 작용하는 수직력(Normal Force), 디스크 커터가 회전하면서 암반면과 수평한 방향으로 작용하는 회전력(Rolling Force), 그리고 면판이 회전할 때 디스크 커터가 원운동하며 디스크링 측면으로 발생하는 Side Force이다. 이 세힘의 합력이 암반의 인장저항 또는 압축 저항보다 클 때 파괴가 진행된다(배규진 등, 2001).



$$\cdot F_r = 4\sigma \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{DP^3 - P^4} \quad (\text{파괴 순간의 추력})$$

$$\cdot F_R = 4\sigma P^2 \tan \frac{\theta}{2} \quad (\text{파괴 순간의 수평력})$$

$\sigma$ : 암석의 압축강도(Mpa),  $D$ : Disc의 직경(mm)

$\theta$ : Disc Edge Angle( $^\circ$ ),  $P$ : 절삭심도(mm)

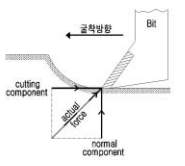
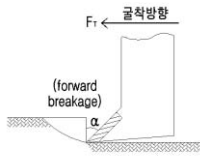
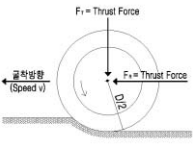
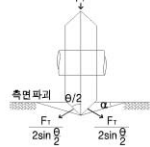
그림 5. 디스크 커터에 작용하는 힘의 성분 및 굴삭 이론

굴착에 대한 디스크 커터의 주요 인자는 Disc Edge Angle( $\theta$ ), Disc Diameter(mm), 절삭심도(P), 지반강도, 커터의 배치간격 및 디스크 커터의 형상 등이 있다.

### 3.2.3 지반에 따른 커터별 굴착효율

비트 커터는 굴착방향과 동일한 방향으로 지반의 파괴가 발생하나, 디스크 커터는 굴착방향과 직각방향으로 파괴현상이 일어난다. 이것은 표 6에서 나타낸 것 같이 커터에 작용하는 주 힘의 성분이 비트 커터는 굴착을 진행

표 6. 커터별 작용응력 및 파괴패턴

구분	작용 응력	파괴 패턴
비트 커터		
디스크 커터		

하는 커터헤드의 회전력이며, 디스크 커터는 TBM으로부터 발생된 추력이기 때문이다.

이와 같이 디스크 커터는 압착에 의한 측면파괴로서 커터의 폭과는 무관하지만, 비트 커터는 비트의 폭에 따라 절삭력이 증대되어 굴착효율에 영향을 미치게 된다. 그러나 이러한 절삭력의 증대는 비트 커터가 받는 수동저항력을 증가시키므로 이 저항력에 대응할 수 있는 정도 및 절단력이 확보된 비트 커터를 적용하여야 한다. 하지만 쉴드공법의 발명 이래 커터의 형상 및 제원의 발전에도 불구하고 압축강도가 80MPa 이상의 지반에서는 비트 커터의 사용이 제한되고 있다. 이러한 사유로 지반강도가 약한 토사지반에서는 비트 커터를 사용하며, 강도가 큰 압반 지역에서는 디스크 커터를 메인 커터로 사용하여 지반의 굴착효율을 극대화 시키고 있다.

### 3.2.4 디스크 커터의 토사지반 적용시 문제점

#### (1) 디스크 커터의 무회전에 따른 편마모 발생

디스크 커터의 회전력은 TBM의 추력으로부터 발생된 지반반력과 마찰력에 의해 생성되며 이 힘은 베어링 강성향상 및 축방향 정렬, 진도, 유격 등을 억제하기 위한 Preload 값 보다 커야한다. 이때 Preload가 너무 작으면 굴착시 디스크 커터에 유격과 정렬에 문제를 발생시키고, 너무 크면 베어링의 발열 및 모멘트의 증대로 커터의 수

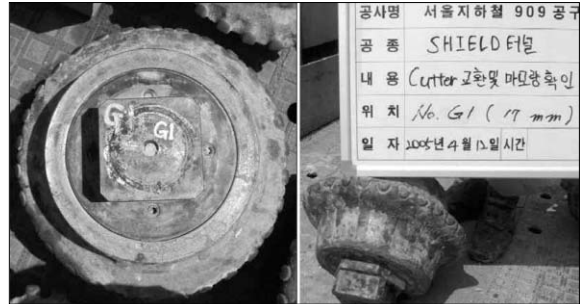


그림 6. 토사지반 굴착에 따른 디스크 커터의 편마모 사례  
 명을 단축시킨다. 이 Preload에 대한 디스크 커터의 회전력(Torque)은 커터의 크기 및 용도에 따라 다르지만, 대략 30~60Nm이다. 17" 커터의 경우 Ring 반경이 약 0.2m로 Disc의 회전에 필요한 마찰력은(30~60)/0.2=150~300N이고, 마찰계수를 0.3으로 보면 필요한 지반반력은 500~1000N이다. 지반 강성이 약한 토사지반에서는 이러한 반력을 얻기 곤란하여 디스크 커터의 회전이 불가능하기 때문에 커터의 편마모가 발생된다. 편마모 현상은 커터의 기능상실을 야기하며, 이로 인해 커터 헤드의 회전에 대한 저항력을 증대 시킨다. 그림 6은 서울지하철 9호선 909공구 쉴드터널 공사중 토사구간 굴착시 디스크 커터에 발생된 편마모의 사례이다.

#### (2) 커터 Torque 및 TBM 추력 증대

연약한 모래 및 점토지반은 많은 양의 간극을 보유하고 있으며 변형성이 높다. 이러한 지반에서 Disc Ring에 전달된 추력은 지반의 변형에 의해 소비되어 버린다. 추력이 지반에 전달되지 않기 때문에 강성지반에서 발생하는 Disc Ring 주변의 박리현상은 일어나지 않고 디스크 커터의 폭 부분만을 굴삭 하는 결과를 초래하게 된다.

이러한 현상은 점성토 지반에서 빈번하게 나타나고 있으며, 굴삭되지 않은 부분의 토사는 커터 헤드의 면판에 직접 접촉되어 커터 Torque 및 TBM 추력의 증대를 유발시킨다.



표 7. 토사지반에서의 커터도구 선정시 고려사항

지 반 조 건	(1) 지층 구성 : 점토, 실트, 모래, 자갈, 옥석등 (2) 지반 강도 : N치 및 압축강도 (3) 지질 분포 : 각 지질별 연장 (4) 고유 지층명
시 공 조 건	(1) 굴착 연장 및 직경 (2) 비트 커터의 배치 간격 및 수량 (3) 커터헤드의 회전속도 (4) Shield TBM 형식 : Slurry, EPB

### 3.3 토사지반내 커터도구 선정시 고려사항

커터도구의 선정 목표는 3.2절에서 언급한 바와 같이 지반에 따른 굴착효율의 증대와 굴진중 커터 교체 의 최소화이다. 이를 위해 커터의 마모량 및 결손 발생 요소를 사전에 예측하여 지반조건에 적합한 최적의 커터도구를 선정하여야 한다. 이러한 커터도구의 선정을 위해 고려할 사항은 크게 지반조건과 시공조건으로 구분되며 각 조건에 따른 상세 내용은 다음 표 7과 같다.

#### 3.3.1 지반 조건에 따른 고려사항

##### (1) 지층 구성

점토, 실트 및 모래층과 같이 연약한 지반에서는 모재부 표면에 팁(Tip)이 부착된 비트 커터를 사용하며, 사력층과 같이 충격에 의한 팁의 탈락이 예상되는 지반에서는 모재부내 팁이 삽입된 비트 커터를 선택한다. 하지만, 다량의 옥석 및 기반암이 조우하는 복합지반에서는 2중 팁이 매입된 비트 커터에 디스크 커터를 추가로 장착하여 토사층과 암반층을 모두 굴착하여야 한다.

##### (2) 지반 강도

양입도의 조밀한 지반과 같이 강성이 큰 토사지반에서는 메인 비트 커터에 부하되는 수동저항력과 마모량을 감소시키기 위해 선행 비트를 배치하여야 하며, 이를 통해 계획연장까지 굴착이 가능하도록 하여야 한다. 일반적으

로 점토, 실트 및 모래 지반에서는 소형의 선행 비트(Knife Edge Bit)를, 자갈 및 옥석등이 포함된 지반에서는 대형의 선행 비트(Special Knife Edge Bit)를 적용하고 있다. 연결방식으로는 비트 커터 자체가 어느 정도 흔들림이 가능하여 비트의 탈락 및 마모를 감소시킬 수 있는 Pin 방식을 선택하여야 한다.

또한, 연약한 점토 및 토사지반에 대해서는 비트 커터 날의 경사각(Rake Angle)을 크게 하여 절삭성을 높이고, 자갈층과 같이 강성이 높은 지반에 대해서는 각도를 작게 하여 비트 커터의 내구성을 높이는 것이 바람직하다.

##### (3) 지질 분포

지반은 일반적으로 점토, 실트, 모래, 사력 및 암반으로 분류되며, 공사 시점으로부터 종점까지 단일 지층인 경우는 극히 드물다. 특히, 대구경 실드에서는 굴착단면 내에 다수의 지층이 분포 할수 있다. 이러한 복합 지층에서는 각 지질에 따른 연장별 마모량을 예측하여 커터도구를 선정하여야 하며, 암반 및 거대 옥석이 존재하는 지반에서는 그 지층의 굴착연장이 극히 적더라도 이들을 굴착하기 위한 커터도구의 선정이 우선시 되어야 한다.

##### (4) 고유 지층명

동일한 입경의 모래층이라도 지역 및 생성기원에 따라 커터의 마모량은 다소 다르다. 따라서 경험상 마모성이 높은 지층에 대해서는 이러한 지반특성을 감안한 커터도구를 선정하여야 하며, 이를 위해 지역 및 지층에 따른 마모특성을 파악하여야 한다. 일본에서는 카즈사층, 도쿄자갈층, 에도가와 모래층, 오사카 층군 등의 고유명칭을 부여하여 마모성이 높은 지층에 대해서는 별도의 마모방지 대책을 강구 하고 있다.

#### 3.3.2 시공조건에 따른 고려사항

##### (1) 굴착 연장 및 직경

커터의 마모량은 지반에 접촉하여 굴삭되는 길이와 비

레하기 때문에 지반과 시공조건이 동일하더라도 굴착 연장 및 직경이 큰 경우에는 비트의 마모 방지대책을 강구하여야 한다. 장거리 굴착을 위한 대처방안으로는 커터 규격의 대형화, 고강도 재료의 선정, Pin 연결방식 및 선행비트의 추가 적용 등이 있다.

### (2) 비트 커터의 배치 간격 및 수량

커터헤드에 설치되는 비트 커터의 폭은 일반적으로 굴착 직경이 4m보다 작으면 120mm, 그 이상은 150mm를 사용하고 있으며, 한 열에 배치되는 비트 커터의 수는 굴착폭 100mm당 지반 체적이 1,000m<sup>3</sup> 이하가 되도록 설계된다. 이것은 커터가 지반에 대응할 수 있는 허용능력을 초과하지 않고, 원활한 배토를 유도하며 TBM의 과부하를 방지 하기 위함이다.

### (3) 커터헤드의 회전속도

커터헤드의 회전속도가 클수록 굴착속도는 증대하여 공기 단축의 효과가 있을 것으로 생각되지만 커터의 마모량이 증가되어 커터의 수명을 단축하고 굴착 중 잦은 교체를 유발시키기 때문에 오히려 공기가 증가하게 된다. 그 원인은 빠른 회전에서의 굴착은 커터의 마찰력 증대를 통한 피로하중의 증대로 추정된다. 이러한 이유로 커터헤드의 회전속도는 25m/min 이하로 제한되어 사용된다.

### (4) Shield TBM 형식

오늘날 실의 형식은 크게 이수식(Slurry)과 토압식(EPB)으로 구분되며, 비트 커터의 마모도를 비교하면 약 1:2.5정도로 토압식이 크다. 이는 막장토압을 지지하는 방식이 서로 다르기 때문에 마모도가 차이나는 것으로, 이수식은 액체인 이수로 막장압을 지지함과 동시에 냉각수 역할에 의한 비트의 마모량을 감소시켜 주기 때문에 마모도가 작다.(표 14. 실드형식 및 지반에 따른 제조사별 마모계수 참조). 따라서 모든 조건이 동일하더라도 토압식 실드의 비트 커터는 이수식 실드의 비트 커터 보다 내마모

성 및 내구성이 더 증가된 커터도구의 선정이 필요하다.

## 3.4 커터 제원 선정

비트 커터는 모(母)재부와 팁(칼날선단부)으로 구성되며, 커터의 내구성은 진공상태에서 소결되어 제조된 팁 재료의 경도에 의해 좌우된다. 팁 재료는 표 8에 나타난 것처럼 일본 JIS 분류규격으로 구분되고 있으며, 일반적으로 실드 TBM 굴착용 으로는 E5가 사용된다. 이는 초경화 합금의 경도가 높아질수록 커터의 내마모성은 증가하지만 절단력(횡단파열강도)은 반대로 감소되어 옥석 및 암편 굴착시 충격에 의한 파손이 우려되기 때문이다. 즉, 큰 옥석 및 암편이 혼재된 지반에서는 인성이 우수한 E5종의 선단 팁을 적용하고, 지반강성이 약한 토사지반내 장거리 굴착을 위한 선단팁의 재료로서는 경도(내마모성)가 우수한 E3종이 적절하다.

본 설계구간의 터널굴착 총연장은 3.2km이며, 정거장간 최대연장은 921m로서, 터널 통과 지층은 암편이 혼재된 풍화대 지반이다. 이와 같이 암편이 혼재된 장거리 굴착을 위해서는 비트의 내구성(경도 및 절단력) 확보가 필수적이며, 이에 그림 7과 같이 고유의 경도를 유지하면서도 절단력(횡축파괴강도)을 향상시킨 HIP(Hot Isostatic Pressing) 소결 공정의 E3재료를 본 설계에 적용하도록

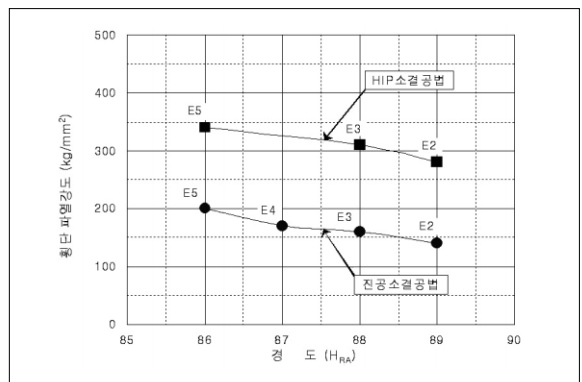


그림 7. 소결법에 따른 절단력(횡단파열강도) 크기

표 8. 커터 선단 팁 재료 분류(JIS M 3916 광산공구용 초경 팁)

종류	특 성			구 성 성 분				비 고
	소결 공정	경도 (H <sub>RA</sub> )	*내마모성 (CC/rev)	절단력 (kg/mm <sup>2</sup> )	W(%)	Co(%)	C(%)	
E2	진공	89이상	7~9	140이상	85~89	5~10	5~6	* 내마모성은 STARLOY 업체의 실험 결과 값임.
E3	진공	88이상	14~19	160이상	83~87	7~12	5~6	
E4	진공	87이상	24	170이상	82~86	8~13	5~6	
E5	진공	86이상	28~30	200이상	78~85	9~17	5~6	

표 9. 메인 비트 커터 고정방식 적용사례 검토

굴착연장과 시공년도 관계	평균 N치와 굴착연장 관계	검 토 결 과
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Weld : 굴착연장 1,000m 이하, N치 40이하의 점토 및 모래지반</li> <li>■ Bolt : 굴착연장 1,500m 이하, N치 40이하의 점토 및 모래자갈 지반(자갈분포 30%미만)</li> <li>▲ Pin : 굴착연장 700m 이상, N치 40이상의 모래자갈 지반(자갈분포 30%이상)</li> </ul>

표 10. 팁(Tip) 삽입방식 적용사례 검토

굴착연장과 시공년도 관계	평균 N치와 굴착연장 관계	검 토 결 과
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Stick : 굴착연장 1,500m 이하, N치 35이하의 점토 및 모래지반</li> <li>■ Single Insert : 굴착연장 2,000m이하, N치 30이상의 모래자갈지반(자갈분포 30%미만)</li> <li>▲ Double Insert : 굴착연장 700m이상, N치 40이상의 모래자갈지반(자갈분포 30%이상)</li> </ul>

표 11. 보조비트 커터(전면부) 적용사례 검토

굴착연장과 시공년도 관계	평균 N치와 시공년도 관계	검 토 결 과
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Knife Edge Bit <ul style="list-style-type: none"> <li>- 98년 이전 : 굴착연장 2,000m이하, N치 20이상의 토사지반</li> <li>- 98년 이후 : 굴착연장 2,500m이하, N치 45이하의 굳은점토</li> </ul> </li> <li>■ S-Knife Edge Bit <ul style="list-style-type: none"> <li>- 98년 이후 : 굴착연장 700m이상, N치 30이상의 모래자갈</li> </ul> </li> </ul>

표 12. 보조비트 커터(외주부) 적용사례 검토

굴착연장과 시공년도 관계	평균 N치와 굴착연장 관계	검 토 결 과
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● P (96년 이전) : 굴착연장 1,500m이하, N치 20이상의 토사지반(자갈분포 30%미만)</li> <li>■ P+D (96년 이전) : 굴착연장1,500m 이하, N치 30이상의모래자갈 (자갈분포 30%이상)</li> <li>▲ S (96년 이후) : 굴착연장 700m 이상, N치 20이상의 토사지반 (자갈분포 30%미만)</li> <li>◆ S+D (96년 이후) : 굴착연장 700m 이상, N치 30이상의 모래자갈 (자갈분포 30%이상)</li> </ul>
<p>여기서 · P : Protect Bit · D : Disk Cutter · S : Special Knife Edge Bit</p>		

하였다. 이는 굴착 중 비트 커터의 마모량 및 파손을 저감토록 하여 커터의 잦은 교체를 방지 할 것이다.

### 3.5 해외 사례 분석 및 커터형식 선정

#### 3.5.1 해외 사례 분석

본 설계구간의 굴착지층의 분포는 풍화토(65%), 풍화암(35%)이며, 굴착연장이 673m, 685m, 899m, 921m인 4개소의 쉴드터널로 계획되었다. 이러한 토사지반에서의 장거리 쉴드공사는 아직 국내에서 경험해 보지 못한 것으로서, 굴착중 커터도구의 잦은 교체로 인한 비가동 시간과 비용의 증가가 예상되었다. 본 설계에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 유사 조건의 커터도구 무교체 시공사례를 조사 및 분석하여 과업구간 커터도구 선정의 지표로 삼았다.

표 9~12에 나타난 것과 같이 커터도구 무교체 시공 사례 25건에 대하여 검토한 결과, 각 커터 도구별 주 사용년도, 굴착연장 및 N치의 관계를 도출하였으며, 1996년 이후 커터도구의 개발로 인한 굴착연장 및 대상지반의 적용범위가 점점 확대 됨을 알 수 있었다. 이 사례결과를 토대로 본 과업구간의 커터도구를 선정하면 다음과 같다.

시공 조건	통과 지층	· 풍화토:65% 풍화암:35%
	구성 상태	· 실트질모래, 암편부분 존재
	N치	· 9/30~50/13, 50/10~50/2
	굴착 연장	· 673m ~ 921m



선정 안	고정 방식	· Pin 방식
	팁(Tip)삽입	· Double Insert
	보조 비트	내부 · Special Knife Edge Bit 외주부 · Special Knife Edge Bit

#### 3.5.2 과업구간 현황 분석 및 커터 선정

과업구간의 쉴드 TBM 통과구간 지층은 모암이 화강암인 풍화토 및 풍화암층으로서, 내부마찰각이 크고 점착력이 비교적 작은 지반특성을 보이고 있다. 따라서 메인 커터는 내마모성이 우수하고 교체가 용이한 핀조임식 2매 겹탑형 비트 커터로 선정하였다.

하지만, 구성 광물중 석영성분이 약 20%로 비트 커터의 마모 증대를 통한 잦은 교체가 예상되어 디스크 커터의 혼용을 검토하였으나, 쉴드 통과 지층내 기반암 및 암블럭이 존재하지 않으며, 지반 강도가 약한 풍화대층에서 디스크 커터의 정상적인 회전이 불가능하다고 판단되었다. 따라서 압축강도 30Mpa 까지 굴착이 가능하며, 메인

풍화대 지반에서의 실드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

비트 커터의 커팅 저항력을 감소시킬 수 있는 선행 비트(Knife Edge Bit)를 추가 배치하였다.

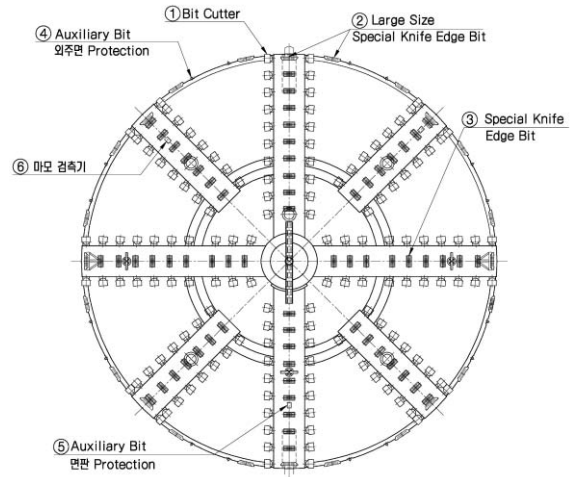
특히 회전 굴착 거리가 길며, 지반과의 마찰이 큰 커터 헤드의 외주부에는 대형 고강도 선행 비트인 Large Special Knife Edge Bit를 설치하여 계획연장까지 굴착이 가능하도록 계획하였다.

또한, 실드 TBM의 원활한 굴착을 위해 커터헤드 면판과 외주부에 커터 Face 보호 보조비트와 Outer Surface 보호 비트를 배치하여 커터헤드 및 면판을 보호토록 하였다. 비트 커터 선단 팁 재료로는 통상 사용하는 E5종보다 경도가 큰 E3종의 초경팁을 적용함으로써, 커터의 마모량을 최소화 하도록 하였다. E3종의 초경팁은 인성이 뒤 떨어져 충격에 의한 비트파손이 예상되나(절단력), 기존 진공상태에서의 소결방법을 개선한 HIP(Hot Isostatic Pressing)소결 공법으로 처리하여 E5종과 대등한 인장강도를 나타내도록 하였다.

그림 8은 과업구간에 적용한 커터헤드 및 커터도구의 개요도이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 핀 조임식 Double Insert형 메인 비트 커터와 대형 고강도 선행 비트를 혼용하여 내구성 및 내마모성 향상을 통한 굴진효율을 증대토록 하였다. 더불어 면판 Protection 보조비트에 마모량 검측기를 설치하여 지속적인 마모 검측을 통한 적정 교체시간 예측으로 실드 TBM의 과부하를 방지하도록 하였다.

모계수는 암반에서의 마모량 평가방법(Cerchar Abrasivity Test, NTH 모델 등)처럼 아직 정립화 되지 않아 이를 산정하기가 매우 어려운 실정이다.

따라서, 서울지하철 7호선 연장 703공구는 그림 9와 같이 기 시공되었던 비트 커터의 마모량을 통해 경험적 마모계수를 적용하고 있는 일본의 사례를 분석하여 마모계수를 산정하였다. 본 과업구간은 타 업체에 비해 마모계수가 낮게 평가된 가와사키의 적용값을 제외한 E3 계열의 평균값을 마모계수로 선정하였으며, 원활한 굴착 및



① 메인 비트커터	② 선행비트(외주부)	③ 선행비트(내부)
④ 외주면 Protection	⑤ 면판 Protection	⑥ 마모검측기

그림 8. 과업구간에 적용된 커터도구

## 4. 비트커터의 마모량 및 교체 주기 검토

### 4.1 마모계수 산정

비트 커터의 마모량 산정 요소는 커터의 제원, 실드 형식, 굴착연장, 회전반경, 회전속도, 굴착속도, 마모계수 등이 있으며, 이중 지반별 마모계수 선정은 그 무엇보다도 중요한 요소이다. 하지만 토사 지반에서의 지반별 마

풍화대 지반에서의 실드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

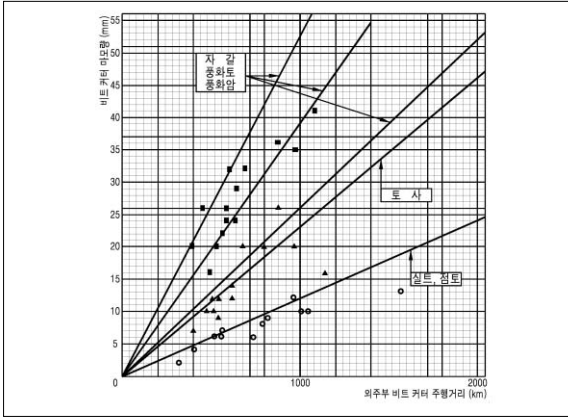


그림 9. 지반별 비트 커터의 마모계수  
(MITSUBISHI-EPB TYPE)

표 13. 과업구간 시공조건 및 선정 마모계수

시 공 조 건	통과 지층	· 풍화도:65% 풍화암:35%
	실드 형식	· 토압식 실드
	커터 제원	· E3 초경팁
	커터 조합	· 비트커터 + 선행비트



비트커터:0.013mm/km, 선행비트:0.033mm/km

계획구간에서의 커터교체가 가능하도록 검토하였다.

마모계수의 선정을 위한 과업구간의 시공조건 및 선정 마모계수는 표 13과 같다

표 14는 실드 형식, 커터 제원, 커터의 구성조합 및 굴

표 14. 실드형식 및 지반에 따른 제조사별 마모계수

구 분	토압식 실드						이수식 실드						
	점토 / 실트		모 래		자갈/풍화대		점토 / 실트		모 래		자갈 / 풍화대		
	E3	E5	E3	E5	E3	E5	E3	E5	E3	E5	E3	E5	
1. 비트 커터 마모계수 ⇒ 비트 커터만 장착시												단위:10 <sup>-3</sup> mm/km	
가와사키	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	
고 마 츠	5.8	8.7	11.7	17.5	20.1	30.2	2.2	3.3	5.1	7.7	9.8	14.8	
히 다 짜	6.7	10.0	20.0	30.0	33.3	50.0	2.7	4.0	9.3	14.0	21.3	32.0	
미쯔비시	8.0	12.0	15.3	23.0	26.0	39.0	3.3	5.0	6.0	9.0	10.0	15.0	
IHI	13.3	20.0	13.3	20.0	20.0	30.0	8.7	13.0	8.7	13.0	14.7	22.0	
적 용 안	8.7	13.0	15.3	23.0	24.7	37.0	4.0	6.0	7.3	11.0	14.0	21.0	
2. 비트 커터 마모계수 ⇒ 비트 커터 + 선행비트 장착시												단위:10 <sup>-3</sup> mm/km	
가와사키	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	
고 마 츠	2.9	4.4	5.8	8.7	10.1	15.1	1.1	1.7	2.6	3.9	4.9	7.4	
히 다 짜	3.3	5.0	10.0	15.0	16.7	25.0	1.3	2.0	4.7	7.0	10.5	16.0	
미쯔비시	5.3	8.0	9.3	14.0	16.0	24.0	2.0	3.0	4.0	6.0	6.0	9.0	
IHI	6.7	10.0	6.7	10.0	10.0	15.0	4.3	6.5	4.3	6.5	7.3	11.0	
적 용 안	4.7	7.0	8.0	12.0	13.3	20.0	2.0	3.0	4.0	6.0	7.3	11.0	
3. 선행비트 마모계수												단위:10 <sup>-3</sup> mm/km	
가와사키	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	0.8	1.2	4.0	6.0	10.0	15.0	
고 마 츠	8.7	13.1	17.5	26.2	30.2	45.3	3.3	5.0	7.7	11.6	15.0	22.3	
히 다 짜	6.7	10.0	20.0	30.0	33.3	50.0	2.7	4.0	9.3	14.0	21.3	32.0	
미쯔비시	12.8	19.2	24.5	36.8	41.6	62.4	12.8	19.2	24.5	36.8	41.6	62.4	
IHI	26.7	40.0	26.7	40.0	26.7	40.0	8.7	13.0	8.7	13.0	14.7	22.0	
적 용 안	14.0	21.0	22.0	33.0	33.0	49.0	6.7	10.0	12.7	19.0	23.3	35.0	

착거리(1000m)에 따른 일본 쉴드 TBM 제조사별 적용 마모계수이다. 이를 분석해 보면 이수식 쉴드와 고강도 재료 및 보호비트(선행비트)의 적용에 따라 마모계수는 공통적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 동일 조건에서의 각 지반별 마모계수는 서로 상이하며 크기는 40%이상의 차이를 나타내고 있다.

이는 각 업체별 마모량 검측 Data에 대한 상호간의 교류가 없었으며, 시공조건, 검측 Data의 수량 및 시공능력에 따른 차이로 추정된다.

#### 4.2 마모량 평가 및 교체주기 검토

3.4~3.5절에서 선정된 커터의 종류, 제원 및 규격에 따른 마모량 산정요소는 표 15와 같으며, 본 쉴드터널 구간에 대한 예상 커터마모량은 표 16과 같다. 검토결과 본 과업구간에 적용된 커터종류별 마모량은 허용마모량 이내로 그림 10과 같이 개착구간에서의 커터교체가 가능함을 보여주고 있으며, 이러한 개착 구간에서의 교체는 작업자의 안정성 확보 및 신속한 교체작업을 통한 공기단축의

효과를 기대할 수 있을 것이다.

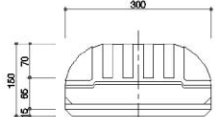
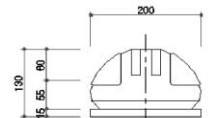
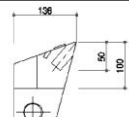
또한, 상기에서 검토된 허용마모량은 커터 1개당의 마모량으로 동일 궤적내의 설치수를 고려하면 비트 커터의 마모량은 저감될 것으로 예상되며, 첨가제 기포의 적용에 따른 윤활제 및 냉각수의 작용으로 커터에 작용하는 마모량은 더욱 감소될 것으로 판단된다.

표 15. 과업구간 비트 마모량 산정요소

구분	내용	단위	적용	비고
k	마모계수 (E3)	mm/km	0.013	비트 커터
			0.033	선행비트
R	커터별 최대 굴착반경	m	3.70	선행비트(外)
			3.50	선행비트(內)
			3.65	비트 커터
N	회전속도	rpm	1.0	
V	굴착속도	mm/min	20.00	
· 비트 마모량(δ) = k · 2π · R · N · L/V				
상선	1 구간	굴착연장 : 685m		
	2 구간	굴착연장 : 899m		
하선	1 구간	굴착연장 : 673m		
	2 구간	굴착연장 : 921m		

표 16. 굴착 연장별 비트 마모량(비트 1개당 마모량)

(단위 : mm)

구분	개요도	선단 높이	허용 마모량	터널구간	예상 마모량	안전율	동일궤적내 설치수	
Large Size Special Knife Bit 선행비트(外)		70	50	상선	1 구간	26.3	1.9	· 외부:16ea · 내부:8ea
					2 구간	34.5	1.4	
				하선	1 구간	25.9	1.9	
					2 구간	35.4	1.4	
Special Knife Bit 선행비트(內)		60	40	상선	1 구간	24.9	1.6	· 외부:4ea · 내부:2ea
					2 구간	32.7	1.2	
				하선	1 구간	24.5	1.6	
					2 구간	33.5	1.2	
메인 비트 커터		50	30	상선	1 구간	10.3	2.9	· 외부:8ea · 내부:4ea
					2 구간	13.5	2.2	
				하선	1 구간	10.0	3.0	
					2 구간	13.8	2.2	

※ 허용 마모량 : 커터의 선단팁 높이(H) - 굴착 가능한 커터의 최소 선단팁 높이

→ 최소 선단 팁 높이는 제작사별 15mm~20mm 로 서로 상이하여 최대치인 20mm 적용

풍화대 지반에서의 쉴드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

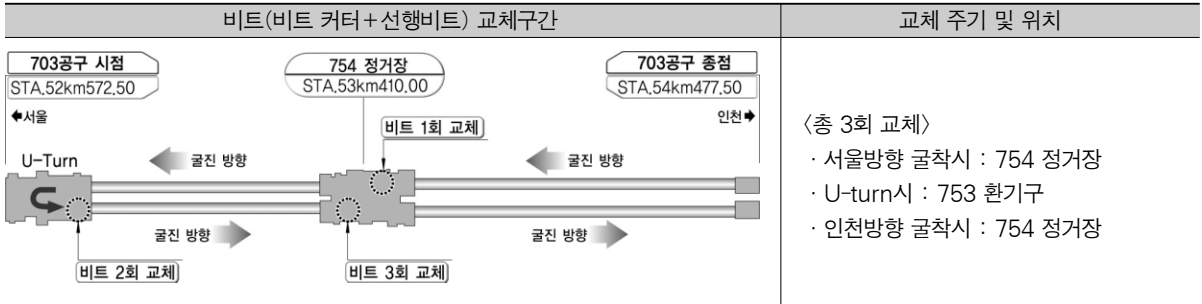


그림 10. 서울지하철 7호선 연장 703공구 커터교체 계획

## 5. 맺음말

본 사례연구는 국내 토사(풍화대)지반내 적용된 쉴드 TBM 공사중 최장거리 쉴드공사에 대하여, 굴착중 커터도구의 무교체 시공 및 굴착효율 증대를 위해 커터 종류별 형상, 규격, 재질 및 손상 원인에 대하여 검토하였으며, 해외 시공사례를 고찰해 보았다. 또한 일본 쉴드 TBM 제조사 및 전문 시공업체의 적용사례를 통해 커터 종류에 따른 지반별 마모계수를 제시하였으며, 마모량을 평가하였다.

이상의 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 커터에 작용하는 응력 및 파괴 메카니즘에 대하여 고찰한 결과 토사지반에서는 커터의 진행방향과 동일한 방향으로 파괴가 발생하며, 커터 폭에 비례하여 굴삭력이 증대되는 비트 커터가 적절함을 확인하였다. 또한 토사지반 에서 디스크 커터 적용은 커터의 편마모 및 TBM의 추력 증대를 유발시킬 수 있으므로 주의하여야 한다.
- 2) 커터의 내구성을 좌우하는 팁(칼날 선단부)의 재료는 일본 JIS 분류규격에 의해 E1~E5종 으로 구분되며, 경도가 높을수록 절단력 (횡단파열강도)이 감소되는 특성을 확인 할 수 있었다. 하지만 본 과업 구간은 암편이 혼재된 장거리 굴착지반으로서 경도 및 절단력 모두 확보해야만 굴착중 커터도구의 무교체

시공을 실현할 수 있었다. 따라서 커터의 고유강도는 유지하면서, 절단력을 향상시킬 수 있는 HIP 소결 공법의 E3 재원을 선정하였다.

- 3) 굴착연장 700m 이상의 커터도구 무교체 시공 사례에 대하여 검토한 결과, 각 커터 도구별 주 사용년도, 굴착연장 및 N치와의 관계를 도출 하였으며, 특히 1996년 이후 커터도구의 개발로 인한 적용범위가 확대됨을 알 수 있었다. 과업 구간에 적용된 커터도구는 다음과 같다.

- 메인 커터 고정방식 및 팁(Tip) 삽입 방식
  - 핀 조임식, Double Insert
- 메인 커터
  - Large Size 비트 커터
- 비트 커터 보호
  - Special Knife Edge Bit(내부)
  - Large Special Knife Edge Bit(외주부)
- 커터 헤드 보호
  - Abrasion Bit(내부)
  - Outer Surface 보호(외주부)

- 4) TBM 제조사 및 시공업체의 쉴드형식에 따른 지반별 마모계수를 조사한 결과 동일 조건 에서의 지반별 마모계수는 서로 상이하였으며, 크기는 40%이상의 차를 보여주고 있었다. 이는 각 업체별 마모 검증 Data에 대한 상호 교류가 없으며, 시공조건, 검증



## 풍화대 지반에서의 실드 TBM 커터도구 선정 및 마모량 평가

수량 및 시공능력에 따른 차이로 추정된다. 따라서 본 현장에서는 마모계수가 가장 낮게 평가된 가와사키 중공업의 값을 배제한 평균값으로 마모 계수를 선정 하였으며, 굴착연장 및 시공조건에 따른 마모량 검토결과 당초 계획대로 지반 굴착중 커터의 교체는 필요 없음을 확인하였다.

터널의 기계화 시공이 보편화되고 있는 오늘날에도, 국내의 TBM 설계는 전적으로 해외 장비제조사에 의존하고 있는 실정이다. 이로 인해 국내에서 기계화 굴착에 대한 연구 및 검토가 부진하고, 지반특성이 제대로 반영되지 못한 장비의 도입 및 운영으로 인하여 시공중 발생하는 문제점들이 지속적으로 반복되고 있다.

이와 같은 각각의 문제점을 해결하기 위해서는 국내 지역 및 지층에 대한 지반특성을 우선적으로 파악하여야 하며, 그에 따른 적합한 커터도구의 선정 및 마모량 평가가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 서울특별시 지하철건설본부 (2005), 서울지하철 7호선연장 703공구 건설공사 실시설계 보고서
2. 서울특별시 지하철건설본부 (2005), 서울지하철 7호선연장 703공구 건설공사 실시설계 지반 조사보고서
3. 박준수의(2005), "토사지반에서의 대구경 실드 터널 설계"
4. 지왕률, 이호성(2001), "실드 TBM의 암반 굴삭 원리". 한국암반공학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 191~199
5. 이석원, 최순욱(2003), "TBM 굴진성능 예측을 위한 모델링", 한국암반공학회지, Vol. 13, No. 6, pp. 413~420
6. 오진우(1997), "토목구조물 설계 표준 · 동해설 실드 터널편", 과학기술
7. Cigla M. and Ozdemir L.(2000), "Computer Modeling For Improved Production of Mechanical Excavators", Society for Mining, Metallurgy and Exploration(SME) Annual Meeting, Salt Lake City, UT
8. Hatakoshi(2005), "MHI Technology Review", "Mitsubishi Heavy Industry 号
9. 深澤 成年(1996), "2,325mをビット無交換で貫通(片福連絡線 淀川シールドトンネル)", トンネルと地下, 日本トンネル技術協會, 第27卷4号 pp. 27~34
10. 水本 清志(1996), "風化岩を含む複雑な地質を泥土圧シールドで掘る", トンネルと地下, 日本トンネル技術協會, 第27卷7号 pp. 7~16
11. 秋葉 芳明(1999), "シールドカッタービットの實績調査に基づく耐久性の評価", トンネルと地下, 日本トンネル技術協會, 第30卷3号 pp. 47~54
12. 名出 表生(2000), "超長距離シールド工事の新記録に挑む", トンネルと地下, 日本トンネル技術協會, 第31卷4号, pp. 35~41
13. 小關 時夫(2004), "シールド工法における長距離高速施工", 土木技術5, 土木技術社, 9卷3号, pp. 65~70
14. 社団法人 地盤工學會(1997), 地盤工學實務 シリーズ 3 シールド 工法の調査・設計から施工まで