

디스크 커터의 성능을 고려한 추력의 계산방법과 강도 및 인성을 개선한 슈퍼HD 디스크커터 적용 결과의 검토



김재영
(주)코템
공학박사/대표이사



박효림
(주)코템
연구전담부서/주임

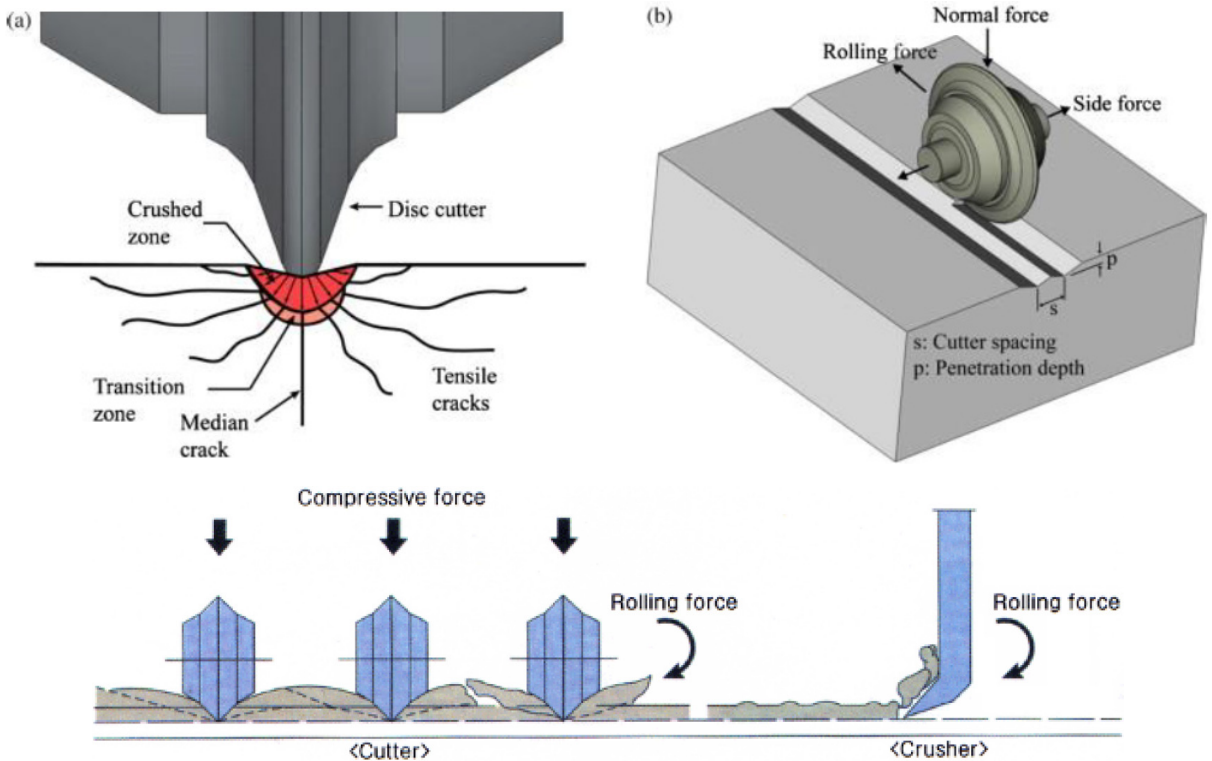
1. 머리말

TBM의 설계에 있어서 커터헤드에 장착되는 디스크커터의 용량과 성능, 품질은 대단히 중요한 요소이다. 또한 TBM의 소요 추력을 계산하는데 있어서도 디스크커터에 작용하는 하중과 설치 개수는 큰 영향을 미치게 된다.

TBM을 추진할 때 디스크커터는 면판의 회전과 함께 굴진면에 대해 커터링이 회전하면서 압쇄에 의해 원지반을 파쇄하는 원리로서 그림 1에 나타내었다. 커터링의 선단은 원지반의 지지력보다 큰 커터링의 압력으로 관입되어 파쇄시키고, 주변에 있는 스크레이퍼는 이 파편을 긁어서 챔버내로 유입시키면서 굴진하게 된다. 연속적인 굴진을 위해서는 디스크 커터에 (+)의 압력(positive pressure)을 가하고, 디스크커터를 회전시키기 위한 수평의 추력을 가하게 된다. 이때 (+)의 압력은 TBM의 추력이며, 수평의 추력은 커터헤드와 평행한 디스크커터의 샤프트를 회전하는 추력이 된다. 따라서 디스크커터는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

- 지반조건에 적합한 충분한 강도, 인성을 가져야 한다.
- 디스크커터의 토크가 적합해야 한다.

본 기사에서는 해외의 3개사가 제시하고 있는 암반지반에 많이 사용되고 있는 HD(Heavy Duty)디스크커터의 성능에 대해 소개하고, HD(Heavy Duty)디스크커터에 비해 강도와 인성을 향상시킨 Super HD(Heavy Duty)디스크커터의 품질성능과 현장 시공사례를 소개하고자 한다.



〈그림 1〉 디스크커터의 굴착 개요

2. 제조사별 디스크 커터의 성능과 소요 추력 계산의 예

2.1 제조사별 디스크 커터의 성능비교

디스크커터의 성능은 TBM의 굴진에 있어서 대단히 중요한 요소이며, 주기적인 점검과 교체, 유지관리가 필요한 핵심 요소 중 하나이다. 대상으로 하는 과업구간의 지반조건을 면밀히 분석한 후 터널구간의 조건에 적합한 커터를 선정하여 사용하여야 하며, 관련된 기계데이터를 항상 모니터링하면서 점검과 교체를 적절히 수행하고, 기록관리하여 이력을 바탕으로 개선방향을 검토할 필요가 있다.

다음에는 이탈리아의 P사, 중국의 E사 및 T사가 소개하고 있는 디스크커터에 사용되는 재질에 따른 차이를 보면 다음과 같다.

- Standard Steel : 연약한 복합지반에 적합하며, 내마모성이 상대적으로 좋지 않고 편마모되기 쉽다.
- Heavy Duty Steel : 마모성이 높은 암반, 경암에 적합하며, 내마모성은 Standard Steel에 비해 향상되나, 인성이 좋지 않으므로 균질한 암반층에 적합하다.

그리고 TBM의 소요 추력과 적정한 디스크커터의 수량을 확보하는데 활용할 수 있도록 각 제조사가 제시하는 하중성능에 대해서 표 1에 정리하였다.

〈표 1〉 제조사별 커터의 굴착 하중성능

디스크커터 외경		1개당 하중성능, kN(ABC순)		
인치, inch	밀리미터	E사	P사	T사
10	254mm	100	-	100
12	305mm	125	118~157	125
13	330mm	-	157	-
14	356mm	125	196	125
15	381mm	176	196~245	176
15.5	394mm	-	245	-
17	432mm	255	245	255
18	457mm	255	274	255
19	483mm	350	343	350
20	508mm	350	-	350

2.2 디스크 커터의 성능정보를 활용한 소요 추력 계산의 예

TBM의 소요 추력을 계산하는 경우, 표 1의 개당 하중성능을 다음과 같이 계산할 수 있으며, 그 예를 나타내었다.

1) Cutting force of cutterhead

While TBM tunneling in hard rock stratum

$$F_1 = NF_n$$

F_1 : thrust force of cutterhead and cutting tools

N : number of disc cutter blades, which is $6 \times 2 + 23 = 35$

F_n : maximum thrust force of each blade, designed as 250kN,

$$F_1 = 35 \times 250 = 8750kN$$

While TBM tunneling in mixed ground

$$F_1 = \frac{\pi(D_{ED}^2 C)}{4}$$

D_{ED} : excavation diameter, designed as 5.29m

C : adhesive force of soil, it is 60kPa

$$F_1 = \frac{3.14 \times (5.29^2 \times 60)}{4} = 1318kN$$

Note : this is the maximum theoretical thrust force, which is much higher than that in actual use.

2) Friction force between shield and ground

While TBM tunneling in mixed ground

$$F_2 = W \times \mu_1$$

W : weight of main machine, designed as 2400kN

μ_1 : coefficient of friction, which is 0.15

$$F_2 = 2400 \times 0.15 = 360kN$$

While TBM tunneling in mixed ground

$$F_2 = \mu_5 \pi D L P_A$$

F_2 : friction force of shield

μ_5 : coefficient of friction between shield and ground

D : shield diameter, designed as 5.25m

L : length of main machine(including cutterhead), designed as 11m

P_A : average pressure applied on shield

$$F_2 = 0.15 \times \pi \times 5.25 \times 11 \times 300 = 8164kN$$

3) Horizontal soil and water pressure ahead of TBM

$$F_3 = \frac{\pi}{4} D_{ED}^2 P_D$$

D_{ED} : excavation diameter, designed as 5.29m

P_D : horizontal soil and water pressure at tunnel axis, which is 4.2bar

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \times 5.29^2 \times 420 = 9231kN$$

4) Friction force between tail shield and segments

$$F_4 = n_1 \times W_s \times \mu_2 + \pi \times D_0 \times b \times p_2 \times n_2 \times \mu_3$$

n_1 : number of segmental rings inside shield, which is approximately 2

W_s : weight of 1 ring of segments, which is 142.5kN

μ_2 : coefficient of friction between tail shield and segments, which is 0.3

μ_3 : coefficient of friction between tail shield sealing brush and segments, which is 0.15

D_0 : outer diameter of segment, designed as 5m

b : contact length between tail shield sealing brush and segments, designed as 0.12m

n_2 : row of tail sealing brush, designed as 4

p_2 : grease pressure behind the tail sealing brushes, designed as 6bar

$$F_4 = 2 \times 142.5 \times 0.3 + \pi \times 5 \times 0.12 \times 600 \times 4 \times 0.15 = 764kN$$

5) Towing force of back-up system

$$F_5 = W_B \times \mu_4$$

W_B : weight of back-up system, designed as 2200kN

μ_4 : coefficient of friction, which is 0.15

$$F_5 = 2200 \times 0.15 = 330kN$$

Thus total thrust force

While TBM tunneling in hard rock stratum

$$F_{Tptal1} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 8750 + 360 + 9231 + 764 + 330 = 19435kN$$

While TBM tunneling in mixed ground

$$F_{Tptal2} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 1318 + 8164 + 9231 + 764 + 330 = 19807kN$$

3. 슈퍼HD 디스크 커터의 품질성능 비교

일반적인 HD(Heavy Duty) 디스크 커터의 제작은 H13강을 기준 자재로 사용하여 열처리시 특정의 금속원소를 투입하여 강도와 인성을 조정하고, 커터링 폭을 소정의 크기로 제작하고, 경도(Gradient Hardness)를 조정하여 완충력을 확보하여 커터링의 파손을 방지한다.

슈퍼HD 디스크의 제작은 동급의 H13강을 기준자재로 사용하여 열처리시 특정의 금속원소를 추가 투입하여 강도 및 인성을 조정하고, 커터링 폭을 소정의 크기로 제작하고, 경도를 조정하여 완충력과 내마모성을 확보하여 커터링의 성능을 개선한다.

표 2~3에 품질과 성능의 비교를 위한 시험결과를 나타내었다. 그 결과, 커터링의 품질개선으로 인장강도(Tensile strength) 증가, 내충격성(V-notch iMPact toughness) 증가, 압축강도(Compressive strength) 증가와 같이 경도(Hardness)와 인성(Toughness)이 증가하고, 이에 따른 마모한계의 증가와 하중성능이 향상되었다.

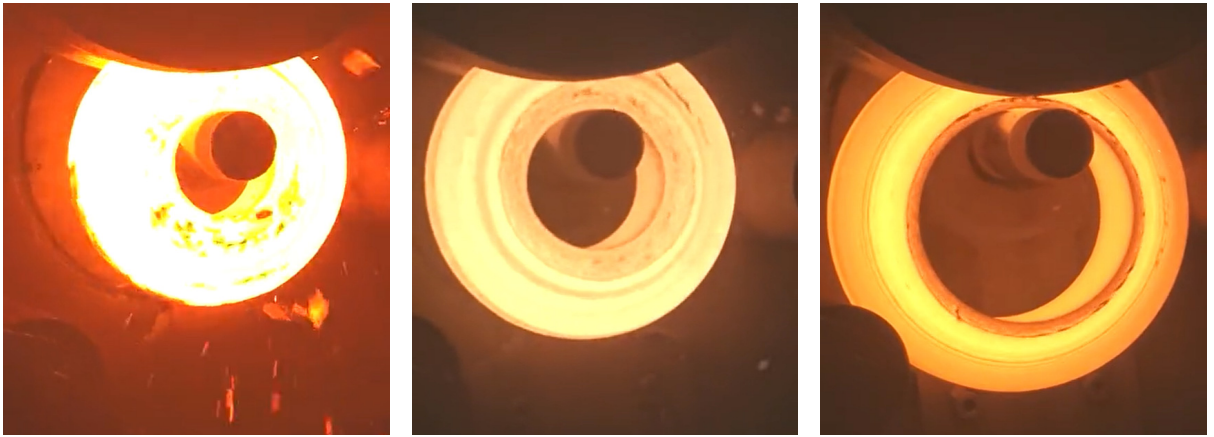
그림 2에는 롤 단조(Roll Forging)가공을 통해 커터링이 제작되는 과정과 커터링의 품질시험에서 HRC값의 분포를 체크하는 상황을 참고적으로 나타내었다.

〈표 2〉 17인치 싱글, 일반HD 대비 슈퍼HD 디스크커터의 품질성능 비교

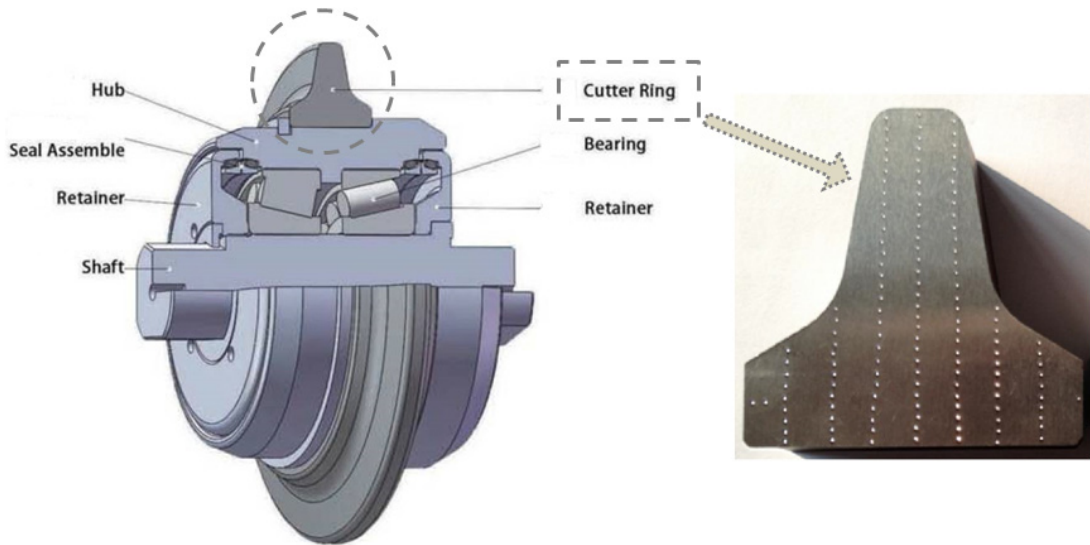
Div	Testing list for 17 inch single disc	Standard	Super HD
Cutter hub	Tensile strength	1,130MPa	1,130MPa
	Yield point	980MPa	980MPa
	Elongation after break	10%	10%
	Shrinkage of section	50%	50%
	IMPact absorption	47J	47J
Cutter ring	Tensile strength after temper	2,000MPa	2,100MPa
	V-notch iMPact toughness	17~19J	19~22J
	IMPact toughness(normal temp. AKU)	45~50	48~52
	Compressive strength	2,500MPa	2,600MPa
	Peripheral extension inner ring	33mm hardness	35mm hardness
		(HRC) 58~60	(HRC) 59~61
Intermediate hardness(HRC)	54~58	55~59	
Inner ring 13mm hardness(HRC)	50~54	50~55	
Disc cutter	Load capacity	>265kN	>280kN
	Allowed Abrasion loss on radial direction	23~27mm	25~30mm

〈표 3〉 18인치 싱글, 일반HD 대비 슈퍼HD 디스크커터의 품질성능 비교

Div	Testing list for 18 inch single disc	Standard	Super HD
Cutter hub	Tensile strength	1,130MPa	1,130MPa
	Yield point	980MPa	980MPa
	Elongation after break	10%	10%
	Shrinkage of section	50%	50%
	IMPact absorption	47J	47J
Cutter ring	Tensile strength after temper	2,000MPa	2,100MPa
	V-notch iMPact toughness	17~19J	19~22J
	IMPact toughness(normal temp. AKU)	45~50	48~52
	Compressive strength	2,500MPa	2,600MPa
	Peripheral extension inner ring	43mm hardness	35mm hardness
		(HRC) 58~60	(HRC) 59~61
Intermediate hardness(HRC)	54~58	55~59	
Inner ring 13mm hardness(HRC)	50~54	50~55	
Disc cutter	Load capacity	>265kN	>280kN
	Allowed Abrasion loss on radial direction	36~40mm	38~43mm



〈그림 2〉 롤 단조(Roll Forging) 가공의 과정



〈그림 3〉 디스크링 단면내 품질시험 위치 개요

4. 슈퍼HD 디스크커터의 사용결과 - 중국 Shenzhen 지하철 16호선

기존 HD 디스크커터의 성능에 비해 강성과 인성을 크게 개선한 슈퍼HD 디스크커터의 현장 사용실적을 공개가능한 범위의 자료를 바탕으로 분석하였다.

중국 Shenzhen지역의 지하철 16호선 터널공사 중 단선병렬의 각 터널연장 3342m로 계획된 구간에서 2대의 토압식 쉘드TBM을 사용하여 순차적으로 발진하였다. 본 터널구간은 단선병렬이므로 선형조건과 지반조건이 거의 동일한 것으

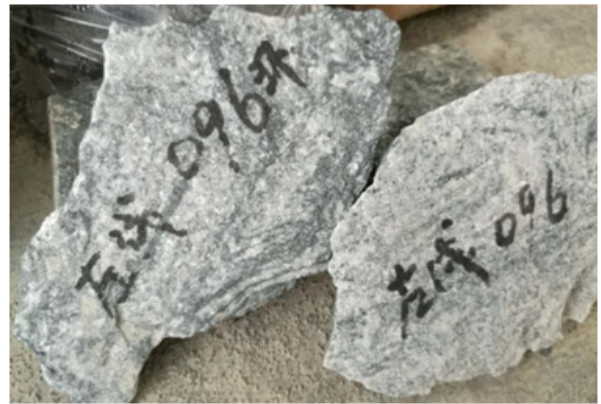
로 조사되었으며, Left구간에서는 전 구간에 Standard HD를 사용하고 Right구간에서는 전 구간에 Super HD를 사용하여 데이터를 기록하였다.

〈표 4〉 Shenzhen, 지하철 16호선 터널구간에서 디스크커터 적용 개요

구분	터널구간	커터종류	커터size	터널연장	지반조건	직경	장비
커터 종류	Left line	Standard	19inch	3342m	화강암	6980mm	EPB
	Right line	Super HD	19inch	3342m	화강암	6980mm	EPB



(a) 시추코어



(b) 커터헤드 개구부로 유입된 암편

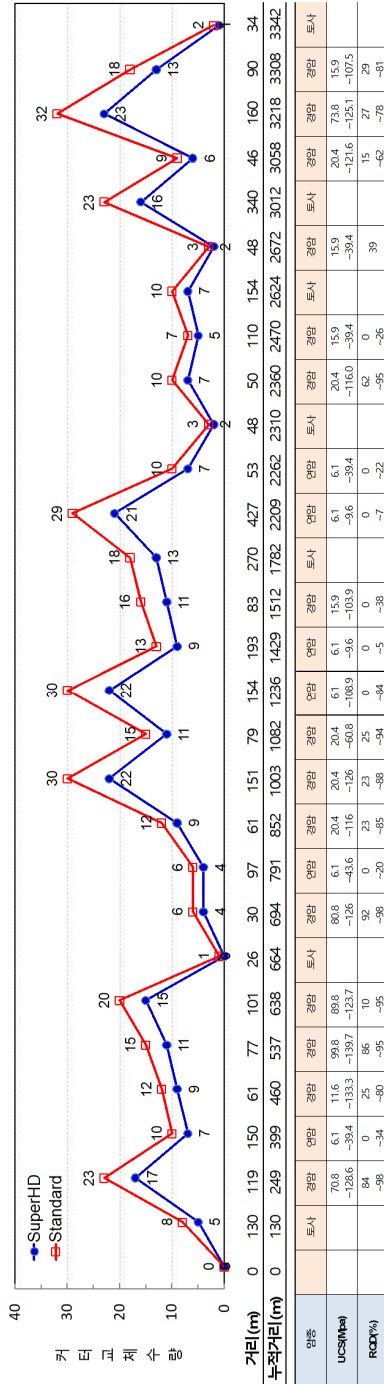
〈그림 5〉 시추코어 챔버내 유입된 암편

현장에서 기록한 사용실적을 보면 터널구간의 암반강도는 6.1~139MPa로 상당히 강도분포가 다양한 지반조건을 굴진하였다. 그림 6을 보면, 전구간에 걸쳐 HD 디스크커터의 교체 수량이 슈퍼HD 디스크커터에 비해 크게 나타으며, 그림 7에 나타낸 누적값으로 보면 HD 디스크커터는 391개, 슈퍼HD 디스크커터는 279개로 약 29%가 절감되었다.

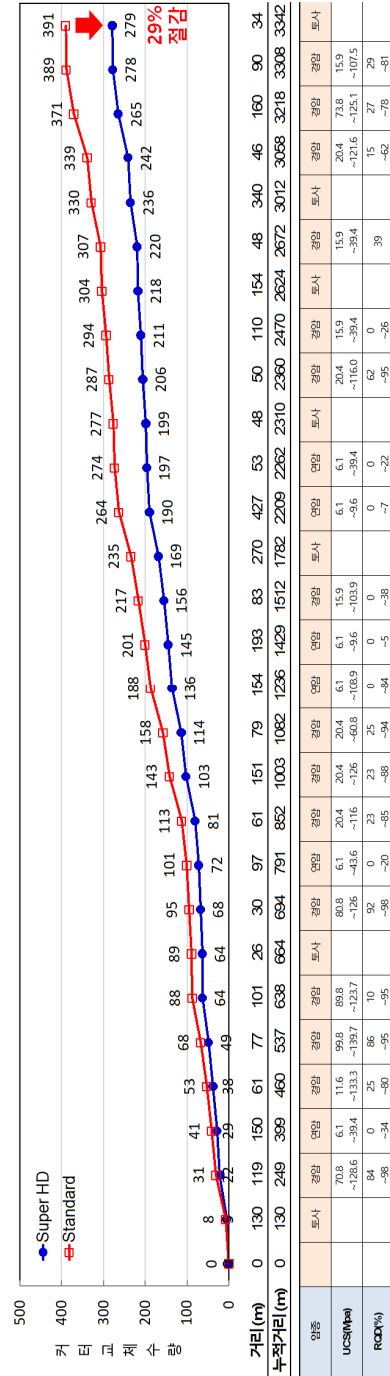
토압식 실드TBM 직경이 6980mm 이므로 단면적 $A=38.26m^2$, 터널연장이 3,342m이므로 이론 굴착량은 $127,865m^3$ 이다. 따라서, HD 디스크커터는 평균 $(127,865 \div 391) = 327.0m^3/EA$, 슈퍼HD 디스크커터는 평균 $(127,865 \div 279) = 458.3m^3/EA$ 로 계산할 수 있다. 1개당 평균 굴착량으로 환산하는 경우는 HD 디스크커터에 비해 슈퍼HD 디스크커터의 굴착량은 $(458.3 \div 327.02 \times 100) = 140.1\%$ 로 향상되었다.

슈퍼HD 디스크커터는 제작과정과 열처리에서 HD 디스크커터보다 복잡하고 시간이 많이 소모되므로 HD 디스크커터에 비해 다소 고가이나, 다음과 같은 장점을 기대할 수 있다.

- 커터 교체, 유지관리 작업으로 인한 굴진정지 횟수, 시간이 대폭 감소
- 굴진정지 횟수가 대폭 감소하므로 전반적인 다운타임이 감소
- 굴진을 증가로 인한 공기단축효과 기대



<그림 6> 디스크커터 구간별 교체 실적



<그림 7> 디스크커터 누적 교체 실적

〈표 5〉 슈퍼HD 디스크커터 교체수량의 정리

터널연장(m)		구간연장(m)	TBM통과구간			구간별 교체수량		누적 교체수량	
			지반	UCS(MPa)	RQD(%)	일반HD	SuperHD	일반HD	SuperHD
0	130	130	토사	-	-	8	5	8	5
130	249	119	경암	70.8~128.6	84~98	23	17	31	22
249	399	150	연암	6.1~ 39.4	0~34	10	7	41	29
399	460	61	경암	11.6~133.3	25~80	12	9	53	38
460	537	77	경암	99.8~139.7	86~95	15	11	68	49
537	638	101	경암	89.8~123.7	10~95	20	15	88	64
638	664	26	토사	-	-	1	0	89	64
664	694	30	경암	80.8~126.0	92~98	6	4	95	68
694	791	97	연암	6.1~ 43.6	0~20	6	4	101	72
791	852	61	경암	20.4~116.0	23~85	12	9	113	81
852	1003	151	경암	20.4~126.0	23~88	30	22	143	103
1003	1082	79	경암	20.4~ 60.8	25~94	15	11	158	114
1082	1236	154	연암	6.1~108.9	0~84	30	22	188	136
1236	1429	193	연암	6.1~9.6	0~5	13	9	201	145
1429	1512	83	경암	15.9~103.9	0~38	16	11	217	156
1512	1782	270	토사	-	-	18	13	235	169
1782	2209	427	연암	6.1~9.6	0~7	29	21	264	190
2209	2262	53	연암	6.1~ 39.4	0~22	10	7	274	197
2262	2310	48	토사	-	-	3	2	277	199
2310	2360	50	경암	20.4~116.0	62~95	10	7	287	206
2360	2470	110	경암	15.9~ 39.4	0~26	7	5	294	211
2470	2624	154	토사	-	-	10	7	304	218
2624	2672	48	경암	15.9~ 39.4	39	3	2	307	220
2672	3012	340	토사	-	-	23	16	330	236
3012	3058	46	경암	20.4~121.6	15~62	9	6	339	242
3058	3218	160	경암	73.8~125.1	27~78	32	23	371	265
3218	3308	90	경암	15.9~107.5	29~81	18	13	389	278
3308	3342	34	토사	-	-	2	1	391	279
누적 교체수량 합계								391	279

5. 맺음말

TBM터널에서 암반구간의 효율적인 굴진과 핵심 소모품인 디스크커터에 대해서 많은 연구와 기술이 향상되고 있다. 기존에는 강성이 우수한 디스크커터, 인성이 우수한 디스크커터로 분류되어 이 2가지의 특성을 공통으로 갖는 디스크커터가 개발되지 않았다. 본 기사에서는 기존의 HD 디스크커터에 비해 강성과 인성을 증가시킨 슈퍼HD 디스크커터에 대

해 품질성능을 비교하고, 시공실적을 바탕으로 향상된 효율을 검토하고 제시하였다.

TBM 터널공사 기간을 단축하고 효율적인 굴진과 비용을 절감하기 위해 다양한 접근을 하고 다. 그중 핵심 소모품 중 하나인 디스크커터의 품질을 개선하고 성능을 향상시켜서 마모와 파손에 대한 수명이 증가하면 교체 시간이 단축되고 교체 수량이 적으므로, 비용을 절감하고 공기를 확보하는데 유효한 방법 중 하나로서 향후 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. EST Engineering Tools(브로슈어)
2. Tianyou(브로슈어)
3. Palmieri(브로슈어)
4. CREG, Thrust Force Calculation for Slurry TBM
5. 김재영 외, 쉴드TBM공법(2015), 씨아이알

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]