

선형절삭시험에 의한 이방성 암석에 대한 TBM 디스크커터 절삭 성능 평가 연구

정호영¹⁾, 전석원^{2)*}, 조정우³⁾, 장수호⁴⁾, 배규진⁵⁾

Assessment of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter for Anisotropic Rock by Linear Cutting Test

Ho-Young Jeong, Seokwon Jeon, Jung-Woo Cho, Soo-Ho Chang, Gyu-Jin Bae

Abstract The linear cutting test is the most reliable and accurate approach to measuring cutting forces and cutting efficiency using full-size disc cutter in various rock types. The result of linear cutting tests can be used to obtain the key parameters of cutter-head design (i.e. optimum cutter spacing, cutter forces). In Korea, LCM (Linear Cutting Machine) tests have been performed for typical Korean rock types, but these studies focused on the isotropic rock types. For prediction of TBM (Tunnel Boring Machine) performances in complex geological conditions including a bedded and schistose rockmass, it is important to consider the effects of anisotropy of rockmass on cutting performances and cutting efficiency. This study discusses a series of LCM tests that were performed for Asan Gneiss having two types of anisotropy angles to assess the effect of the anisotropy angle on rock-cutting performances of TBM. The result shows that the rock-cutting performances and optimum cutting conditions are affected by anisotropy angle and the effect of anisotropy on rock strength should be considered in a prediction of the cutting performances and efficiency of TBM.

Key words Linear cutting test, Anisotropic rock, Cutting performance, Disc cutter, TBM

초 록 선형절삭시험은 실제 TBM에 장착되는 디스크커터를 사용하여 암석을 절삭하는 시험으로 디스크 커터의 암석절삭성능을 평가할 수 있는 가장 정확하고 신뢰도가 높은 시험 중 하나이다. 시험을 통해 디스크커터에 작용하는 작용력과 암석 절삭 부피 등을 정량적으로 측정할 수 있으며 선형절삭시험 결과는 TBM 커터헤드의 설계에 필요한 핵심인자(수직력, 회전력, 최적절삭간격 등)를 결정하는데 직접적으로 활용될 수 있다. 국내에서도 LCM시험시스템이 구축되어 국내 대표 암종에 대한 선형절삭시험이 수행된 바 있으나 국내에서 수행된 일련의 선형절삭시험은 등방성 암석에 초점을 맞추어 수행되었다. 하지만 이방성 암반을 굴착하는 TBM 커터헤드의 설계 시에는 암석의 절삭효율과 디스크 커터의 절삭성능에 미치는 대상 이방성암반의 영향을 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이방성 암석의 편리각이 TBM의 절삭성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 두 개의 다른 편리각을 가지는 아산편마암을 대상으로 압입깊이와 커터간격을 변화시켜가며 다양한 절삭조건 하에서 선형절삭시험을 수행하였다. 시험결과는 암석의 이방성은 디스크커터에 의한 암석의 절삭효율 및 절삭성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 특히 이방성 각도에 따른 암석의 강도 변화는 TBM의 절삭성능을 예측하는데 있어 고려되어야 할 중요한자임을 확인할 수 있었다.

핵심어 선형절삭시험, 이방성 암석, 절삭성능, 디스크커터, TBM

1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정
2) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
3) 한국생산기술연구원 대경권지역본부 메카트로닉스연구그룹 선임연구원
4) 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원
5) 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구위원
* 교신저자 : sjeon@snu.ac.kr
접수일 : 2011년 11월 15일
심사 완료일 : 2011년 12월 5일
게재 확정일 : 2011년 12월 16일

1. 서론

선형절삭시험(Linear Cutting Machine Test)은 커터헤드의 설계에 직접적으로 활용될 수 있는 신뢰성 높은 시험이다. LCM시험에서는 대형 암석시편(1 m×1 m×0.3 m)을 실제 사용되는 TBM 디스크커터로 절삭하면서 하나의 커터에 작용하는 하중을 측정하고 반복되는 절삭을 통해 굴착된 암석의 부피, 절삭효율 등을 관찰할 수 있으며 이를 통해 대상 암반의 물성, 지질조건에 따라 결정되어야 하는 설계 인자인 최적커터간격, 추력, 토크

등을 산출할 수 있다. 이러한 선형절삭시험은 미국 CSM (Colorado School of Mines)에서 처음 개발된 이후 여러 국가에서 지난 20년간 TBM의 설계인자를 도출하고 성능을 예측하는데 적용되어 오고 있다(Snowdon et al., 1982, Sanio, 1985, Nilsen and Ozdemir, 1993, Bilgin et al., 2006, Gertsch et al., 2007). LCM시험은 실대형 암석시편을 사용하므로 비교적 크기효과를 배제할 수 있기 때문에 시험결과를 직접적으로 적용할 수 있다는 장점을 가진다(Ozdemir and Nilsen, 1999). 국내에서는 허용하중(loading capacity) 100 tonf 규모의 실대형 LCM 시스템을 구축하여 지속적인 연구를 수행하고 있다(Fig. 1).

현재까지 수행된 대부분의 선형절삭시험은 등방성 암석에 대하여 수행되어 왔으며 이방성암석에 대한 TBM의 굴진 성능과 관련하여 수행된 연구는 Sanio(1985)가 썸기관입시험 및 선형절삭시험모델로 수행한 바 있고, 불연속 암반에 관련된 연구로는 NTNU 예측모델(Bruland, 1998)과 조정우(2010)의 불연속면을 포함한 시험체에 대한 선형절삭시험 연구가 있다. 이방성 암석에 대한 선형절삭시험 연구는 자연적인 편리면 및 불연속면이 포함된 시료의 채취가 쉽지 않을뿐더러 선형절삭시험에서 요구되는 실대형 시편으로 가공하는 것도 어려우며 선형절삭시험의 수행 및 데이터의 결과 해석이 까다롭기 때문에 시험 수행에 세심한 주의와 노력이 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 처음으로 이방성 암석인 아산편마암을 대상으로 두 개의 다른 편리각을 갖도록 암석시편을 채취하여 선형절삭시험을 수행하였으며 이를 통하여 이방성 각도에 따른 암석의 절삭효율을 분석하였다. 본 연구의 결과는 암반의 이방성에 따른 TBM의 굴착성능을 예측하는데 활용하기 위한 기초 연구로 수행되었다.

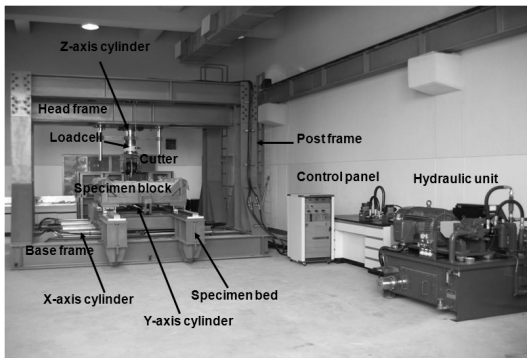


Fig. 1. Linear cutting machine system used in this study (Korea Institute of Construction Technology).

2. 선형절삭시험 계획

2.1 시험계획

횡등방성 암반에서는 Fig. 2와 같이 디스크 커터의 절삭선과 편리면이 이루는 각도가 α , 편리 경사면과 굴착면이 이루는 각도가 β 로 정의된다. 하지만 커터헤드가 회전하며 디스크 커터가 암반을 굴착하는 동안 α 는 0° 부터 90° 까지 순차적으로 변화하여 암석의 절삭에 미치는 영향이 서로 상쇄되므로, β 가 유일한 변수가 된다 (Sanio, 1985)

Sanio(1985)의 분석을 참고하여 디스크 커터의 절삭선과 편리면이 이루는 각도 α 가 암반의 절삭효율에 미치는 영향은 본 연구에서 고려하지 않았다. 따라서 편리면이 굴착면과 이루는 각도인 β 를 유일한 시험변수로 설정하였으며 그에 따라 시험은 평행편리(α =not defined, $\beta=0^\circ$)와 직각편리($\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$) 두 가지 경우에 대해서만 수행되었다(Table 1 참조). 평행편리 시료의 경우 압입깊이 4 mm, 6 mm, 8 mm에 대하여 시험을 계획하였으며 직각편리 시료의 경우에는 압입깊이 4 mm 와 6 mm에 한정하여 시험을 계획하였다(Table 1). 직각편리 시료는 채취된 시료의 개수가 두 개로 한정되어 압입깊이 8 mm에 대해서는 시험을 수행하지 않았다. 결과값에 영향을 크게 미칠 것으로 예상되는 편리의 방향을 선택하여 시편을 제작하였으며 이에 따라 $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$ 의 경우는 고려하지 않았다. 편리의 간격은 시험시 입력변수로 정량화하기 힘들기 때문에 고려되지 않았다.

본 연구에서 사용한 시편의 크기는 평행편리의 경우에는 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 가, 직각편리의 경우에는 $0.55\text{ m} \times 0.55\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 로 각각 다르게 적용되었다. 직각편리 시료의 크기는 선형절삭시험에서 일반적으로 사용되는 크기보다는 다소 작다. 선형절삭시험에서 충분히 큰 크기의 시편을 사용하는 이유는 반복되는 시험에 의해 필

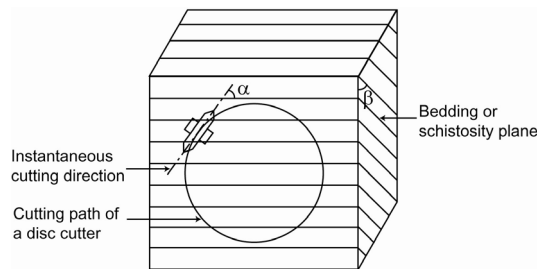
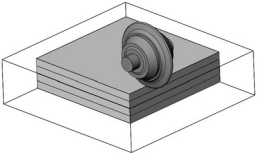
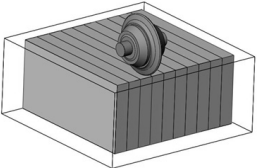


Fig. 2. Definition of the angles α and β determining the orientation of the planes of anisotropy (after Sanio, 1985).

Table 1. Experimental design for linear cutting tests in this study



View	Penetration (p , mm)	s/p							
		5	7.5	10	12.5	15	20	25	30
	4	P1	P2	P3		P4	P5		P6
	6	P7	P8	P9		P10	P11		P12
	8	P13		P14	P15		P16	P17	
	4	N1	N2	N3		N4	N5		N6
	6	N7	N8	N9		N0	N11		N12

* s/p ratio=cutter spacing/penetration depth

**The “P” code indicate a parallel condition(α =not defined, $\beta=0^\circ$) and the “N” code indicate normal condition($\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$).

***The “P” and “N” codes identify the test number, and are also appeared in Table.5

Table 2. Strength and elastic modulus of Asan Gneiss

No. case	Testing direction	Uniaxial Compressive Strength, UCS (MPa)	Brazilian Tensile Strength, BTS (MPa)	Young’s Modulus (GPa)	E1/E2
1		241.00	13.4	52.82	1.23
2		186.00	10.7	42.62	

연적으로 발생하는 edge effects를 방지하기 위해서이다(Gertsch et. al., 2007). 본 연구에서는 이를 위하여 암석 주변을 콘크리트로 캐스팅하여 선형절삭시험에서 일반적으로 사용되는 크기인 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 를 만족시키도록 하였다. 또한 시험결과에 영향을 끼칠만한 edge effects가 발생하지 않도록 암석시편의 양 끝으로부터 50 mm까지는 절삭시험을 수행하지 않았다.

본 연구에서는 두 가지 편리각에 대한 시험을 계획하고, 편리가 발달한 이방성 암석 시료로 아산편마암을 채취하여 선형절삭시험용 실험대형 시료로 가공하였다(Fig. 3).

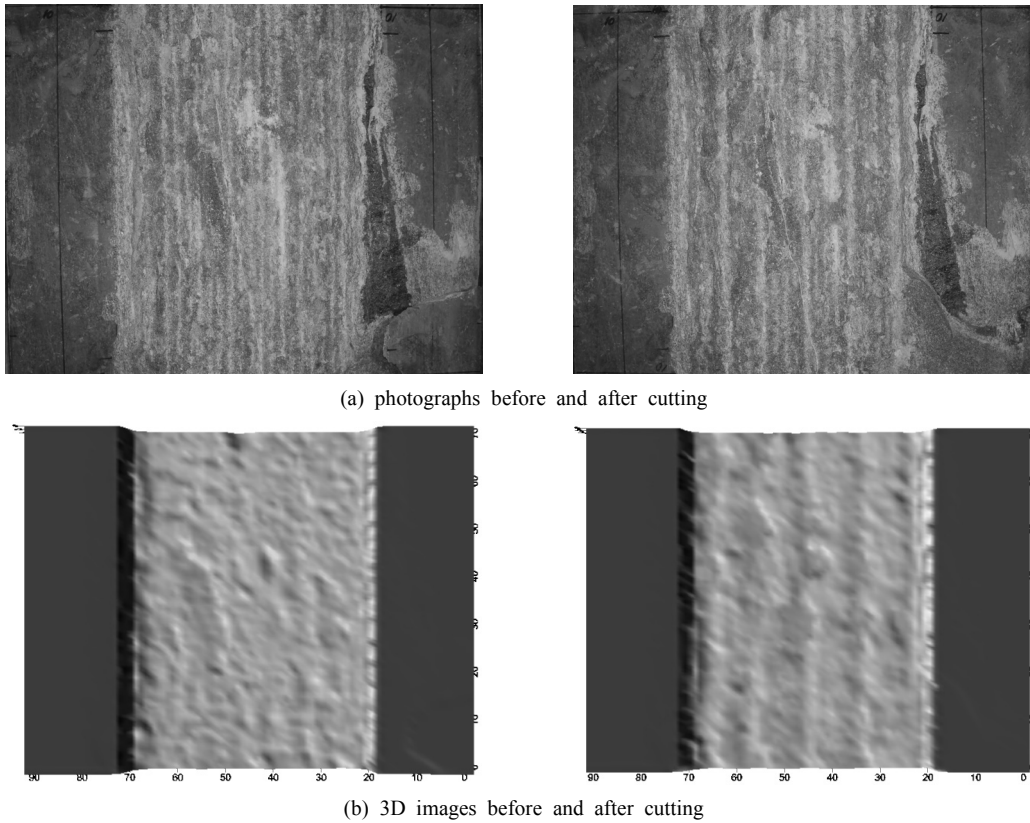
2.2 사진측량기법에 의한 절삭부피 측정

선형절삭시험에서는 획득된 회전력과 절삭된 암석의 부피를 통해 단위 부피의 암석을 절삭하는데 필요한 회전력을 나타내는 비에너지(Specific Energy, SE)를 (Eq. 1)과 같이 산출할 수 있다(Eq. 1). 여기서 MRF (Mean



Fig. 3. A photograph of anisotropic rock specimens for LCM tests.

Rolling Force)는 평균회전력(kN), l 은 절삭 길이(mm), V_{cut} 는 절삭된 암석의 부피이다. 따라서 시험을 통해 절삭된 암석부피를 정확히 측정하는 것이 중요하며 본 연



(a) photographs before and after cutting

(b) 3D images before and after cutting

Fig. 4. (a) Typical photographs and (b) 3D images in photogrammetric process in cutting test of Asan Gneiss (α =not defined, $\beta=0^\circ$, $p=6$ mm, $s=120$ mm)

구에서는 암석의 절삭부피를 측정하는 방법으로 사진측량기법을 사용하였다. 사진측량기법을 통한 방법은 절삭면에 모래를 충전하여 부피를 측정하는 방법과 5%이내의 오차를 나타내어 만족스러운 정확도를 갖는 것으로 확인되었다. 시험 전 후 디지털 카메라를 이용하여 획득한 이미지는 전용 소프트웨어인 ShapeMertix3D를 통해 3차원 좌표로 환산되며 이 좌표값은 Surfer 8.0(by Golden Software)에서 3차원 이미지로 재현된다. 이러한 과정을 통해 얻어지는 선형절삭시험 전후의 영상은 Fig. 4와 같으며 (b)에서 노란부분은 절삭선 사이의 비파쇄대를 의미하고 녹색은 절삭이 이루어진 부분을 나타낸다. 부피 계산 시 오차를 줄이기 위하여 절삭선이 없는 양 끝단(부피계산 시 기준면으로 사용)은 평면으로 처리하였다.

$$SE = \frac{MRF \times l}{V_{cut}} \quad (\text{Eq. 1})$$

3. 이방성암석에 대한 선형절삭시험 결과

본 연구에서 두 가지 편리각을 가지는 아산편마암 암석시편에 대하여 Table 1과 같이 총 29가지의 선형절삭시험을 수행하였으며 결과는 Table 3과 4에 정리된 바와 같다.

3.1 작용력(Cutter forces)

디스크 커터가 암석을 절삭할 때에는 Fig. 5에 표시된 바와 같이 수직력(normal force), 회전력(rolling force), 측력(side force)의 세 방향의 힘이 작용한다(Cho, 2010). 디스크커터에 작용하는 세 방향의 힘은 복합적으로 작용하여 암석을 절삭하게 되며 선형절삭시험에서는 암석을 절삭하는 동안 작용하는 세 방향의 힘을 3방향 로드셀(load cell)로부터 실시간으로 측정한다. Fig. 6과 7은 선형절삭시험 시 측정된 커터의 평균작용력을 커터 간격에 따라 도시한 그래프이다(평균작용력은 측정된 모든 작용력의 평균값으로 계산).

Table 3. Results of linear cutting test (α =not defined, $\beta=0^\circ$)

p (mm)	s (mm)	s/p	Cutter forces (kN)		CC (%)	V _{cut}	SE (MJ/m ³)
			Mean Normal, MNF	Mean Rolling, MRF			
4	20	5	74.8	5.4	7.2	138.8	56.8
	30	7.5	88.4	6.7	7.6	127.4	50.1
	40	10	102.6	7.1	6.9	129.9	45.8
	60	15	103	7.2	7.0	88	42.2
	80	20	110	7	6.4	46.5	63.4
	120	30	111.5	7.3	6.6	27.5	74.2
6	30	5	100.4	7.7	7.7	124.2	48.1
	45	7.5	115.4	8.7	7.5	126.8	43.4
	60	10	127.1	9.4	7.4	101.9	38.7
	90	15	134	9.6	7.2	86	39.0
	120	20	134.5	9.8	7.3	36.7	56.4
	180	30	140.5	10.4	7.4	38	57.4
8	40	5	126.8	13.7	10.8	234.7	45.1
	80	10	165.4	17.8	10.8	220.9	33.8
	100	12.5	165.2	17.3	10.5	107.9	44.8
	160	20	170.1	17.9	10.5	61.7	61.1
	200	25	171.2	17.2	10.0	33	72.7

*p=penetration depth, s=cutter spacing, $CC=MRF/MNF$ =cutting coefficient, SE =specific energy of cutting

**cutting length, l is 700 mm

Table 4. Result of linear cutting test ($\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$)

p (mm)	s (mm)	s/p	Cutter forces (kN)		CC (%)	V _{cut}	SE (MJ/m ³)
			Mean Normal, MNF	Mean Rolling, MRF			
4	20	5	45.0	2.3	5.1	50.1	34.7
	30	7.5	61.5	2.6	4.2	58.8	25.7
	40	10	65.5	3.5	5.3	46.8	30.3
	60	15	85	3.9	4.6	33.3	36.9
	80	20	89.1	4.1	4.6	24.8	37.5
	120	30	93.6	4.1	4.4	15.2	48.7
6	30	5	64.8	4.4	6.8	61.1	32.1
	45	7.5	84.8	5.2	6.1	41.4	28.5
	60	10	89.4	5.8	6.5	51.2	30.3
	90	15	105.6	6.2	5.9	20.3	41.4
	120	20	104.5	6.3	6.0	19.1	44.5

*p=penetration depth, s=cutter spacing, $CC=MRF/MNF$ =cutting coefficient, SE =specific energy of cutting

**cutting length, l is 450 mm

일반적으로 디스크 커터의 압입깊이와 간격이 증가함에 따라 작용력이 증가하는 경향은 이미 기존의 실험적, 수치해석적 연구를 통하여 밝혀진 바 있다(Chang et

al., 2006, Gertsch et al., 2007, Cho et al., 2010). 본 연구에서도 관입깊이가 증가함에 따라 디스크 커터의 작용력이 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 절

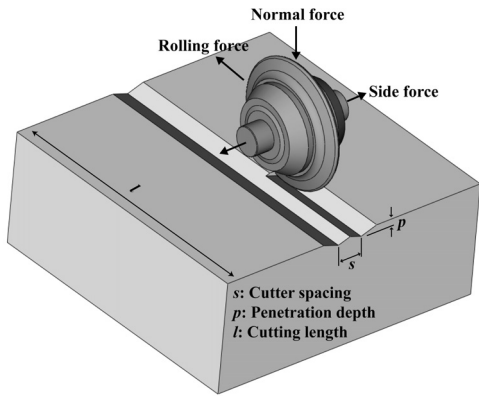
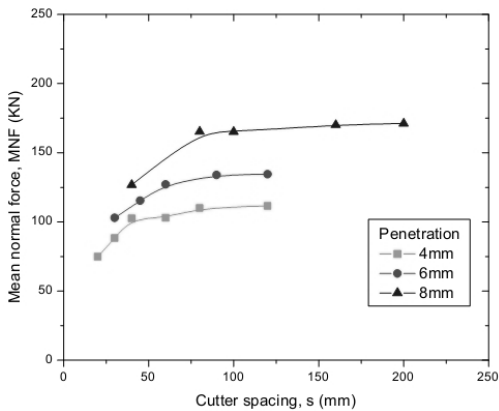


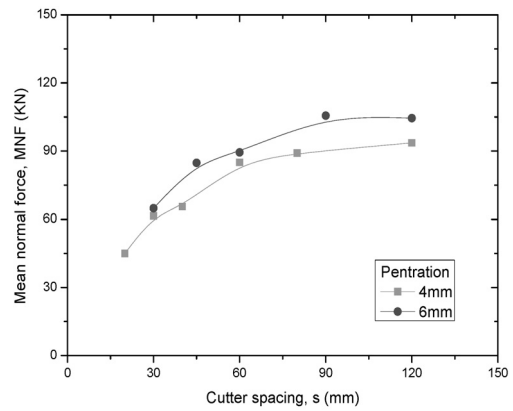
Fig. 5. Three directional cutting forces acting on a disc cutter (Cho, 2010)

삭 간격이 늘어남에 따라 디스크 커터의 작용력은 증가하는 경향을 보이다가 특정 절삭간격 이상에서는 수렴하거나 곡선이 완만해 지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 동일한 관입깊이에서 어느 수준 이상으로 커터간격이 넓어지면 인접한 디스크 커터 사이에 상호작용이 거의 일어나지 않는 것을 의미하며 최적 절삭조건은 일반적으로 작용력이 수렴하는 커터 간격 근처에서 관측된다.

Fig. 8은 평행편리(“P” code)와 직각편리(“N” code)에 대하여 동일한 절삭조건에서의 시험에서 측정된 평균작용력의 비(force ratio, Table 5 참조)를 s/p비에 따라 나타낸 것이다. Force ratio의 값이 클수록 두 가지의 편리각을 대상으로 수행된 선형절삭시험에서 얻은 작용력의 차이가 크게 나타난 것을 의미하며 평균수직력과 평균회전력 모두 s/p비가 증가함에 따라 편리각에 따른

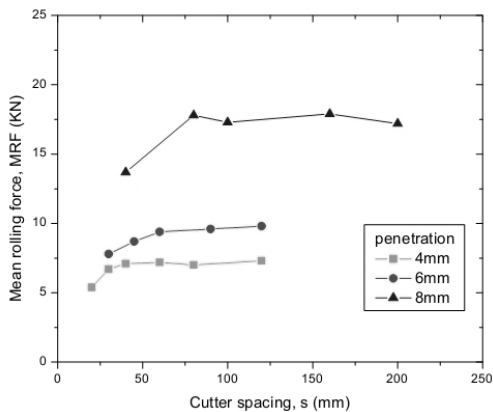


(a) α =not defined, $\beta=0^\circ$

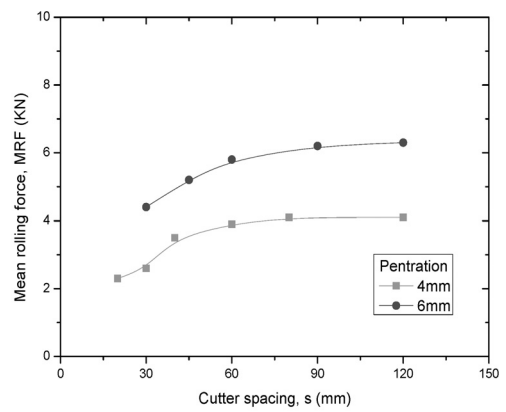


(b) $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$

Fig. 6. Relationship between mean normal force and cutter spacing



(a) α =not defined, $\beta=0^\circ$



(b) $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$

Fig. 7. Relationship between mean rolling force and cutter spacing

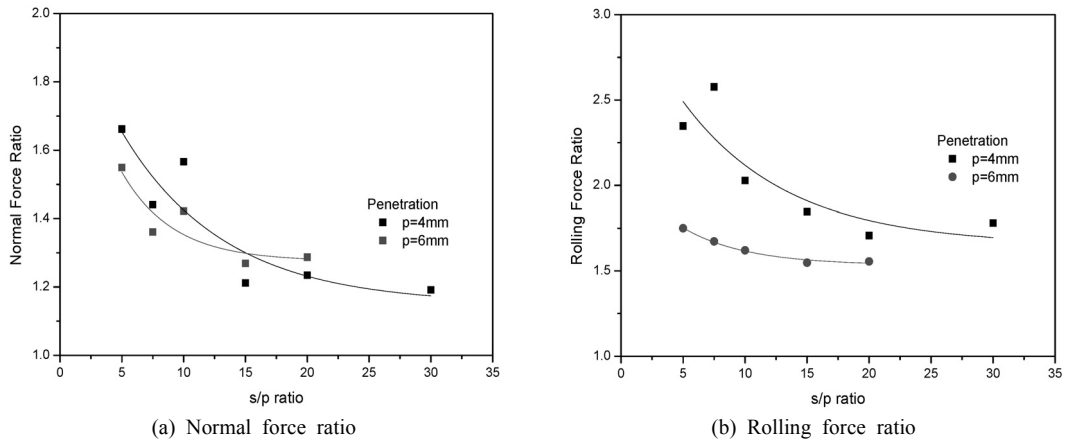


Fig. 8. Variation of cutter forces ratio

Table 5. Results of the cutter forces.

Cutter forces	<i>p</i> (mm)	<i>s/p</i>	“P” code (α =not defined, β =0°)	“N” code (α =0°, β =90°)	Force ratio
<i>MNF</i>	4	5	74.8	45.0	1.66
		7.5	88.4	61.5	1.44
		10	102.6	65.5	1.56
		15	103	85	1.21
		20	110	89.1	1.23
		30	111.5	93.6	1.19
	6	5	100.4	64.8	1.55
		7.5	115.4	84.8	1.36
		10	127.1	89.4	1.42
		15	134	105.6	1.27
<i>MRF</i>	4	5	5.4	2.3	2.34
		7.5	6.7	2.6	2.57
		10	7.1	3.5	2.02
		15	7.2	3.9	1.84
		20	7	4.1	1.70
		30	7.3	4.1	1.78
	6	5	7.7	4.4	1.75
		7.5	8.7	5.2	1.67
		10	9.4	5.8	1.62
		15	9.6	6.2	1.54
		20	9.8	6.3	1.55

*Force ratios are defined by ratio of cutter forces in case of (α =not defined, β =0°) to (α =0°, β =90°).

***MNF* is mean normal force and *MRF* is mean rolling force.

작용력의 차이가 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 수직력의 비는 1.2 ~ 1.7사이의 값으로 나타났으며, 회전력의 경우에는 1.5 ~ 2.5 사이의 값으로 수직력의 경우 보다는 다소 높은 값을 나타내었다. 이것은 동일한 절삭조건에서 절삭면에 평행한 편리면이 발달한 암반을 절삭할 경우 직각의 편리면을 가지는 경우에 비하여 최대 1.7배의 수직력과, 2.5배에 해당하는 회전력이 요구될 수 있다는 것을 의미한다.

3.2 최적 절삭간격(Optimum cutting spacing)

최적 절삭간격이란 최대의 암석절삭부피를 발생시키는 절삭간격으로 정의되며 일정한 압입깊이에서 커터간격을 늘려나가면서 선형절삭시험을 수행하다보면 비에너지가 최소점을 나타내거나 혹은 일정해지는 커터간격이다(Fig. 9). 최적커터간격 이상의 커터간격에서는 인접한 커터사이에 칩핑이 발생하지 않는 비효율적인 절삭조건이 되므로 최적커터간격으로 설정된 절삭조건에서 TBM을 운용해야 절삭성능을 최대화할 수 있다 (Rostami and Ozdemir, 1993).

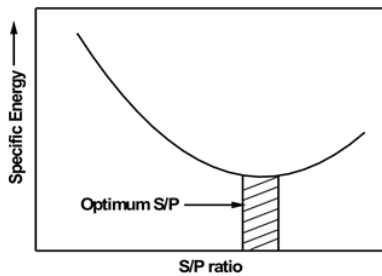
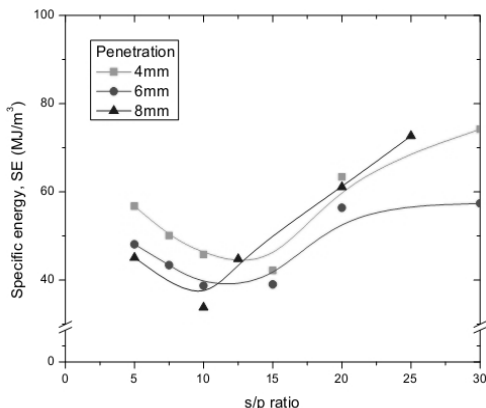


Fig. 9. Concept of optimum S/P condition (Yu, 2007)

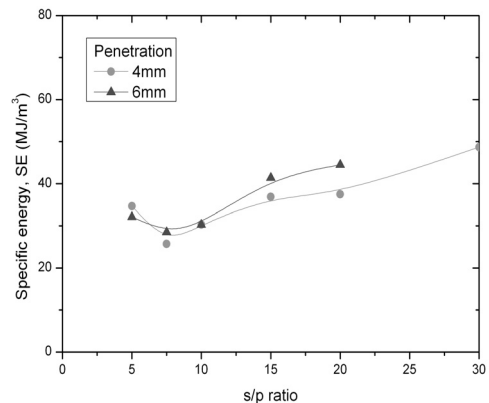
본 연구에서 나타난 s/p비에 따른 압입깊이별 비에너지의 변화양상은 Fig. 10과 같다. 압입깊이가 증가함에 따라 최적 s/p비는 소폭 감소하는 경향을 보였으며 편리가 절삭면과 평행한 경우에는 직각인 경우에 비해 넓은 절삭간격에서 최적 s/p비가 도출됨을 확인할 수 있었다. 예를 들어 관입깊이 4 mm의 경우 최적 s/p비는 평행편리의 경우 10 ~ 15사이의 값이, 직각편리는 7.5 ~ 10 사이의 값이 도출되었는데(Fig. 10) 이는 절삭면과 평행하게 편리면이 발달한 경우에 편리면은 연약면으로 작용하여 평행방향으로 균열의 전파를 촉진하게 되므로 더욱 넓은 간격에서 최적 절삭조건을 기대할 수 있게 된다는 의미이다. 반대로 절삭면과 직각인 방향의 편리면을 가지는 경우에는 인접한 커터사이의 인장균열의 전파가 억제되는 것으로 판단되며 평행편리에 비해 넓은 커터 간격에서는 chipping이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 이방성 암석의 경우 절삭면과 편리면이 이루는 각도에 따라 최적 절삭간격이 달라지는 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 평행편리의 경우에는 직각편리보다 평균회전력이 높게 측정되어 비에너지의 값은 직각편리의 경우가 전반적으로 낮게 관측되었다.

3.3 절삭계수(Cutting Coefficient, CC)

절삭계수(Cutting Coefficient, CC)는 디스크 커터의 수직력에 대한 회전력의 비로 정의되는 값으로 보통 TBM의 설계모델에서 추력이 산정된 후 토크의 추정을 위해 사용되는 계수이다(Gertsch et al., 2007). 따라서 절삭계수가 큰 암석일수록 동일한 추력이 작용할 경우에 더 큰 토크가 작용하게 된다. 선행연구(Gertsch et al., 2007)에서 절삭계수는 관입깊이와 절삭간격에 따라 변화하는 것으로 조사된 바 있다.



(a) α =not defined, $\beta=0^\circ$



(b) $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$

Fig. 10. Relationship between specific energy and s/p ratio for two different anisotropy angles

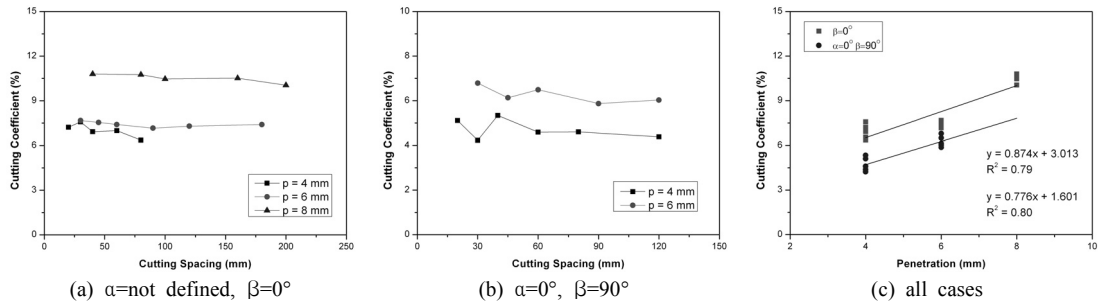


Fig. 11. Variation of cutting coefficient : (a) and (b) as a function of cutting spacing for two different anisotropy angles, (c) as a function of penetration depth

본 연구에서 선형절삭시험을 통해 도출된 절삭조건 별 절삭계수는 Table 3, Table 4에 정리하였으며 절삭계수는 관입깊이의 증가에 따라 증가하는 것으로 관찰되었으나 절삭간격과는 의미 있는 상관관계를 찾기가 어려웠다(Fig. 11(a), (b) 참조). 또한 절삭면과 평행한 편리의 경우에는 직각인 편리의 경우에 비해 절삭계수가 높게 도출되어 동일한 추력이 작용할 때 더욱 큰 토크가 필요함을 확인할 수 있었으며 이것 또한 편리의 방향성에 따른 영향인 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 두 가지 편리각을 가지는 이방성 암석에 대한 선형절삭시험을 통해 디스크 커터에 의한 이방성 암석의 절삭효율을 조사하였다. 이방성 암석에서 편리각도는 TBM에 의한 암반 굴착 시 디스크 커터의 작용력 및 인장균열 전파, 암석의 chipping에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 수직력 보다 회전력이 편리각에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 암석의 이방성에 기인한 암석의 강도차이는 디스크 커터가 암석을 절삭 할 때 발생하는 작용력의 차이를 가져오며 또한 편리면은 연약면으로 작용하여 편리방향으로의 균열 전파를 보다 촉진하고 암석의 chipping을 용이하게 하기 때문에 나타난 결과인 것으로 판단되었다. 따라서 절삭면과 평행한 편리면이 발달한 암반을 굴착하는 경우, 커터의 간격을 보다 넓게 적용할 수 있고 커터헤드 설계 시 디스크 커터의 개수를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 커터간격이 증가함에 따라 단일 커터가 받는 하중은 증가하므로 커터의 용량이 허용되는 범위 내에서 커터간격을 신중히 결정해야 한다.

반대로 절삭면과 직교하는 편리면이 발달한 경우에는 평행편리의 경우에 비해 암석의 강도가 낮아지는 특성을 가지며 절삭방향으로의 균열이 촉진되는 효과가 있

으므로 상대적으로 적은 추력과 토크로 절삭이 가능해지는 효과를 기대할 수 있다. 따라서 편리 구조가 급변하는 이방성 암반 구간을 굴착하게 될 때에는 TBM의 절삭능력이 변화할 수 있으며 절삭선 사이에 비파쇄대 구간(ridge)이 발생할 확률이 높아지므로 시공속도를 저해할 수 있는 요인이 될 수 있다. 그러므로 이방성 암반 구간의 굴착능을 예측하고자 할 때에는 상세한 지반조사가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 아산편마암에 대하여 두 개의 이방성 각도를 대상으로 하여 비교적 한정된 횟수의 시험을 수행하였을 뿐만 아니라 $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$ 에 대한 경우는 고려하지 못한 한계가 있다. 따라서 향후 추가시험 또는 수치해석적인 기법을 통하여 다양한 편리각을 가지는 경우와 다른 종류의 이방성 암석에 대한 디스크커터의 절삭효율을 평가하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계 부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E09) - 1세부과제: TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. Snowdon, R. A., Ryley, M. D., Temporal, J., 1982, A study of disc cutting in selected British rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 19, 107-121.
2. Nilsen, B. and Ozdemir, L., 1993, Hard rock tunnel boring prediction and field performance, Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), 833-852.

3. Bilgin, N., Demircin, M. A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemira, H., Akin, N., 2006, Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43.1, 139-156.
4. Gertsch, R., Gertsch, L. and Rostami, J., 2007, Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 44.2, 238-246.
5. Ozdemir, L. and Nilsen, B., 1999, Recommended laboratory rock testing for TBM projects, AUA News, Vol. 14, No. 2, 21-35.
6. Bruland, A., 1998, Hard rock tunnel boring, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
7. 조정우, 2010, TBM 디스크 커터의 암석 절삭성능 평가에 대한 선형절삭시험 및 수치해석 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
8. Sanio, H. P., 1985, Prediction of the performance of disc cutters in anisotropy rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 22.6, 771-788.
9. Chang, S. H., Choi, S. W., Bae, G. J., and Jeon, S., 2006, Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 3-4, 271.
10. Cho, J., Jeon, S., Yu, S. H. and Chang, S. H., 2010, Optimum cutter spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 25, No. 3, 230-244.
11. Rostami, J. and Ozdemir, L., 1993, A new model for performance prediction of hard rock TBMs, Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), 793-809.
12. 유상화, 2007, TBM에 사용되는 디스크 커터에 의한 암석 절삭에 관한 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.

정호영



2008년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석사

Tel: 02-880-7230
E-mail: hyjung04@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정

전석원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학원 공학석사
1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수

조정우



2002년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 053-580-0138
E-mail: chojw1665@gmail.com
현재 한국생산기술연구원 대경권지역본부 메카트로닉스연구그룹 선임연구원

장수호



1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2002년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0661
E-mail: sooho@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 GEO-인프라 연구실 연구위원

배규진



1980년 국립경북대학교 농공학과 공학사
1982년 연세대학교 대학원 토목공학과 공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-910-0212
E-mail: gjbae@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 GEO-인프라 연구실 선임연구위원