

단일절리를 포함한 암석 시험편에서 디스크 커터의 압입에 의한 파괴 메커니즘의 수치해석적 연구

이승중¹⁾, 최성웅^{2)*}

Numerical Analysis on Fragmentation Mechanism by Indentation of Disc Cutter in a Rock Specimen with a Single Joint

Seung-Joong Lee, Sung O. Choi

Abstract LCM test is one of the most powerful and reliable methods of experiment for the cutter head design and the performance prediction of TBM. In many cases, however, the predicted design model can be directly applied to the field design, because this test may have an uppermost limit in preparation and/or transportation of the large size rock samples and the test for the jointed rock mass is not easy. When the proper and reasonable numerical modeling is considered to overcome this limit, the most adequate cutter head design for TBM could be presented without any complicate preconsideration in the field. In this study, the crack propagation patterns dependent on the contact point of disc cutter and the angle of rock joint are analyzed for the rock specimen with a single joint using the UDEC. The authors could derive the appropriate contact points of disc cutters and their space with respect to the joint angle in rock mass thru the numerical analysis.

Key words LCM test, Disc cutter, Jointed rock mass, Crack propagation

초 록 LCM 시험은 TBM에서의 디스크 커터 설계와 굴진성능 예측을 위한 가장 신뢰성 있는 시험 중의 하나이다. 그러나 이는 실험형 암석시료의 채취, 운반 및 거치에 많은 비용이 소요되는 단점을 가지고 있으며, 절리가 포함된 시료에 대한 시험이 용이하지 않아 시험에서 예측된 모델을 설계에 활용하기 어려운 경우가 많다. 따라서 LCM 시험이 갖는 이러한 경제적·시간적 제약점들을 극복할 수 있는 현실성 있는 수치모델링이 고려된다면, 현장에서의 복잡한 검토과정 없이 현장에 직접 적용할 수 있는 적합한 형태의 TBM 절삭모델을 제시할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 UDEC을 이용하여 단일절리를 포함한 암석시료에 대한 디스크 커터의 절삭 메커니즘 분석을 위해 디스크 커터의 가압지점의 위치와 절리의 방향성에 따른 균열전파양상을 분석하였으며, 이를 통하여 절리의 방향에 따른 적절한 디스크 커터의 가압지점 위치 및 디스크 커터의 적정 간격을 도출하였다.

핵심어 LCM 시험, 디스크 커터, 절리 암반, 균열전파

1. 서 론

국가 기간망의 확장에 따라 각종 터널공사가 지속적으로 증가하고 있는 가운데, 도심지에서의 시공중 지반진동 및 소음 억제, 환경 보전 등의 이유로 발파공법을 대신하여 기계화 시공법이 점차 늘어가고 있는 추세이다.

¹⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 박사과정

²⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr

접수일 : 2009년 10월 5일

심사 완료일 : 2009년 10월 26일

게재 확정일 : 2009년 10월 26일

특히 이러한 기계화 시공법의 하나인 TBM 굴착공법에서는 시공지체시간의 조절 및 굴착 성능 향상을 위하여 디스크 커터의 적합 설계법과 TBM 굴진성능 예측법이 핵심기술로 간주되는 가운데, 이의 설계인자를 효과적으로 도출하기 위하여 LCM (Linear Cutting Machine) 시험 장비가 구축되어 실무용 시험이 이루어지는 등 핵심설계기술의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(박관인 외, 2006).

LCM 시험은 NTNU의 TBM 굴착속도 예측기법과 함께, TBM 장비의 면관설계와 굴진성능 예측을 위한 가장 신뢰성 있는 시험법 중의 하나로 알려져 왔는데,

특히 실대형 암석시료를 대상으로 커터 하중을 실제로 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있어 국내외적으로 그 신뢰성이 인정되고 있다(Boniface, 2000; Rostami *et al.*, 1996; Chang *et al.*, 2006).

그러나 약 100×100×50 cm에 달하는 실대형 시료의 채취 및 운반이 쉽지 않고, 시험장비의 구축과 시험에 많은 비용이 소요된다는 단점이 있으며, 또한 이방성 암석시료에 대한 시험 및 분석이 난해하여 현장의 불연속면이나 파쇄대 구간의 굴진효율을 예측하기가 용이하지 않은 단점이 있다.

따라서 최근 국내에서는 LCM 시험의 한계를 극복하고 이를 보완, 대체할 수 있는 수치모델 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나(백승한, 2003; 박관인 외, 2006; 조정우 외, 2008; 유상화 외, 2008; 이승중, 최성웅, 2009), 절리를 포함하는 암반에 대하여 절리의 분포 특성이 디스크 커터의 절삭메커니즘에 미치는 영향에 관한 연구는 충분히 이루어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 단일절리를 포함하는 암석시료를 고려하여, 디스크 커터가 암반표면에 닿는 지점과 암반표면에서 나타나는 절리 사이의 간격 변화에 따른 절삭 메커니즘을 분석하기 위하여 개별요소해석을 실시하였으며, 또한 암반 내부로의 절리경사각의 변화에 따른 절삭 메커니즘 해석도 함께 실시되었다. 수치해석을 위해 2차원 개별요소 해석프로그램인 UDEC이 사용되었으며 수치해석의 단순화를 위해 암반절리는 1개만이 고려되었고 절리의 경사각은 암반표면에 대해 15°부터 75°까지 15°씩 증가시켜 총 5가지 경우가 고려되었다.

2. 디스크 커터의 절삭 메커니즘 분석

Gong *et al.* (2005, 2006)의 최근 연구에 의하면, 암반절리의 경사각 변화에 따른 절삭 특성을 분석하기 위하여 하나의 디스크 커터가 동일한 지점에 압입토록 한 상태에서 절리의 경사각을 암반표면에 대해 15°부터 75°까지 15°씩 증가시켜 총 5가지 경우로 수치해석을 실시하였으며, 이를 통해 암반표면에 대한 절리의 경사각이 작아질수록 디스크 커터의 압입 지점과 암반표면에 나타나는 절리가 이루는 삼각형 형태의 암편과 함께 절리경사와 나란한 방향으로의 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 보고한 바 있다. 또한 절리의 간격에 따른 절삭 특성을 분석하기 위하여 암반표면에 대해 0°의 경사, 즉 암반표면과 나란한 방향으로 절리가 서로 다른 간격으로 분포할 경우 절리간격이 증가할수록 절삭응력도 증가하나 그 간격이 약 200 mm 정도까지이며, 그 이상이 되면 절삭 응력의 변화는 둔감해짐을 수치해석적으로 밝힌 바 있다.

Table 1. Properties of intact granite (Zhao, 1996)

Property	Value
Bulk density (kg/m ³)	2600
Bulk modulus (GPa)	55
Shear modulus (GPa)	32
Cohesion (MPa)	66
Friction angle (°)	31
Tensile strength (MPa)	11.3
Dilation angle (°)	10

Table 2. Properties of joints (Sharma *et al.*, 1999)

Property	Value
Normal stiffness (GPa/m)	10
Shear stiffness (GPa/m)	5
Cohesion (MPa)	1.5
Friction angle (°)	25
Tensile strength (MPa)	0.04

따라서 본 연구에서는 이들의 연구에서 간과되었던 절리경사와 가압 지점간의 상관관계 및 이중 디스크 커터의 가압 위치에 따른 절리암반의 절삭 특성 및 균열 전파양상을 수치해석적으로 분석하였다.

Gong *et al.* (2005, 2006)의 연구결과와의 비교 분석을 위해, 절리경사의 변화 양상을 동일하게 적용하였으며 Table 1 및 Table 2에서 보는 바와 같이 암반 및 절리의 물성값도 동일하게 적용하였다(Sharma *et al.*, 1999; Zhao, 1996).

2.1 단일 커터의 가압지점의 변화에 따른 균열전파양상

2.1.1 해석조건

해석을 위한 기본 수치모델은 Fig. 1과 같다. 해석영

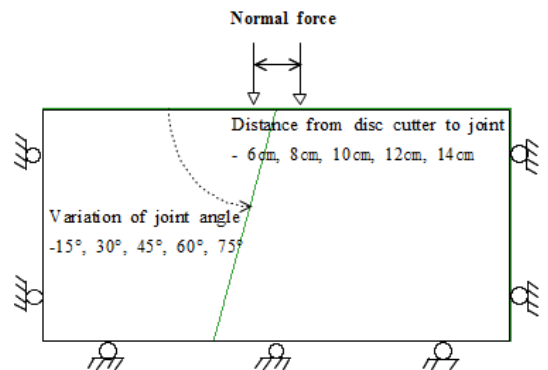


Fig. 1. Numerical simulation model of single cutter (100×50 cm)

역은 100×50 cm이며 모델상에서 디스크 커터의 형상을 고려하기 위하여 0.5 cm의 가압폭에 대해 수직하중이 등분포 형태로 부여되도록 함으로써 디스크 커터의 압입을 표현하였다. 또한 가압면에 노출된 절리의 위치를 해석모델의 중심으로 설정하였으며, 이때 절리의 경사각을 15°에서 75°까지 15°간격으로 총 5단계의 변화를 주어 해석을 실시하였다. 또한 각각의 절리경사각에 대하여 디스크 커터의 가압지점을 5가지 경우, 즉 암반표면에 나타나는 절리선을 기준으로 왼쪽으로 각각 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm로 변화시킴으로써 총 25개의 해석모델을 선정하여 해석을 수행하였다. 절리의 경사각에 대한 선정기준은 앞서 언급한 바와 같이 기존 연구결과와의 비교를 위함이었으며, 디스크 커터의 가압지점에 대한 선정기준은 수치해석상에서 압편의 발생양상을 효과적으로 보여주기 위해서이다. 모든 해석모델에 대해 암반은 Mohr-Coulomb 모델로, 절리는 Coulomb slip 모델로 각기 간주되었다.

2.1.2 균열전파양상

본 해석을 수행하기 위하여 절리를 포함하지 않은 모델과 절리를 포함하는 모델에 대한 균열전파양상을 먼저 분석하였다. 절리를 포함하는 모델의 경우, 5가지 절리의 경사각 중에서 45° 인 경우를 대표적으로 비교 분

석하였다(Fig. 2).

절리를 포함하지 않는 모델의 경우 초기 균열의 전파는 디스크 커터의 가압면 직하부에서 디스크 커터의 압입에 따라 압축균열대와 인장균열대가 형성되고 있음이 확인되며, 그 이후 팬 모양의 균열대가 형성되고 점차 균열이 전파되면서 입의 방향으로 형성되는 미세 균열과 30~40° 정도의 Hertzian cone 균열 및 가압면 직하부 종방향으로 균열이 확장되는 경향을 분석할 수 있었다. 이는 Gong *et al.* (2005)의 연구결과와 매우 유사한 수치해석결과를 보여주고 있다.

특히 절리를 포함하는 모델의 경우, 초기에 균열이 전파되는 과정은 절리를 포함하지 않는 모델과 매우 유사하게 진행되지만, 균열이 점차 절리면에 가까이 전파되면서 절리의 경사와 나란한 방향으로의 균열대 및 절리면을 향하는 방향으로의 균열대가 주도적으로 발생되고 있으며, 또한 절리면을 향하여 전파되던 균열은 절리면에 도달한 후 더 이상 진행되지 않는다는 것이 절리를 포함하지 않는 모델의 해석결과와 다른 점임을 알 수 있다. 따라서 절리를 포함하지 않는 모델과 절리를 포함하는 모델에 대하여 디스크 커터의 압입을 수치적으로 모사한 결과, 균열 전파 양상은 전자의 경우 좌우 대칭적이며 후자의 경우 비대칭적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

2.1.3 해석결과

본 해석에서는 앞서 분석된 바와 같이 디스크 커터의 압입에 의해 절리면 방향으로 입의의 각을 이루면서 형성되는 균열과 그 균열이 절리면과 만나면서 형성되는 압편의 발생 양상을 규명하기 위하여, 앞서 언급한 바와 같이 절리의 경사각과 디스크 커터의 가압지점을 달리하여 총 25개 모델에 대하여 해석을 수행하였으며, 이를 정리하여 나타내면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 모든 해석 모델에 대해 디스크 커터의 압입 지점에서부터 시작한 인장균열대가 절리면까지 전파되면서 유사한 형태의 압편이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 다만, 절리면의 경사각이 15°에서 75°까지 증가함에 따라, 또한 디스크 커터의 가압지점과 암반표면 상에서의 절리면 사이의 간격이 6 cm에서 14 cm로 증가함에 따라 형성되는 압편의 크기는 점차 커지는 것을 확인할 수 있었다.

또한 동일한 절리경사각에 대해 디스크 커터의 가압지점과 절리면 사이의 간격이 증가할수록 삼각형 형태의 압편을 형성하기 위한 인장균열과 압축균열이 점차 증가되는 양상을 나타내고 있는데, 이는 압편을 형성하기 위해 요구되는 디스크 커터의 수직하중이 점차 증가된다는 것을 의미한다.

Calculation Step	No joint model	Joint model
10		
30		
50		
100		
200		

Fig. 2. An example of crack propagation patterns for no joint model and joint model (○ : tensile failure, × : compressive failure)

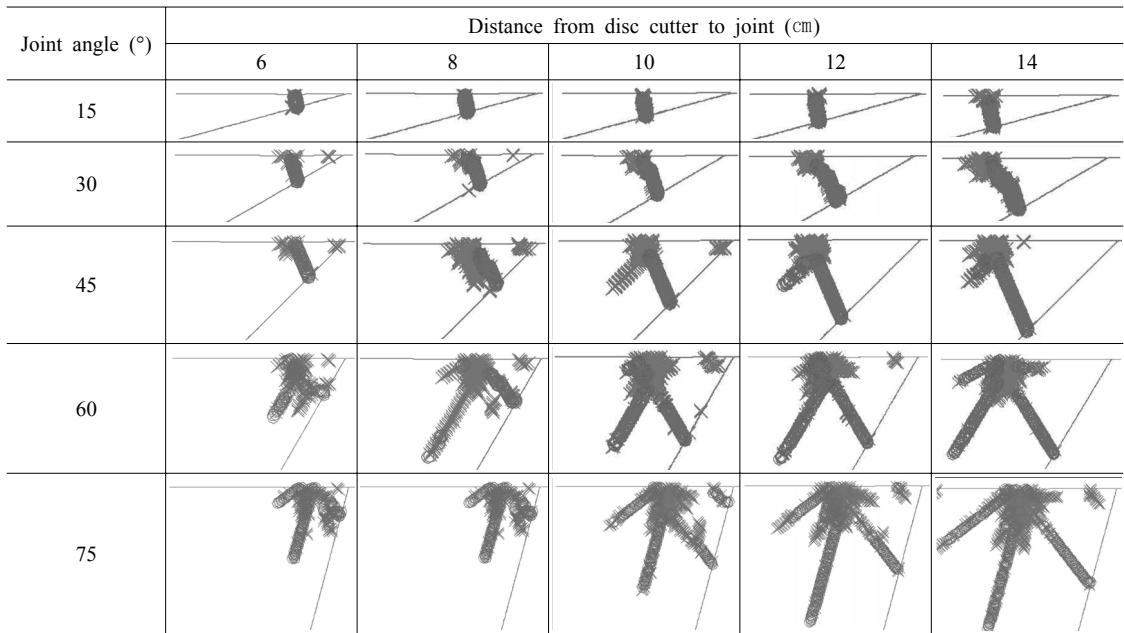


Fig. 3. Crack propagation developed with the change of joint angle and disc cutter position (○ : tensile failure, × : compressive failure)

Fig. 3의 25개 해석모델의 결과에서 보여지는 암편의 발생각도를 정량적으로 분석하기 위하여 각 해석결과에서 발생한 균열의 좌표를 추출할 수 있도록 프로그램을 구성하였으며 이 값들에 대한 회귀분석을 통하여 최종적으로 암편의 발생각도를 산정하였다(Fig. 4).

절리경사각이 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 인 경우, 가압

지점의 변화에 따른 평균 암편발생각도는 각각 79°, 71°, 66°, 60°, 51° 로 나타났으며, 결과적으로 절리의 경사각이 클수록 균열의 전파로 인해 형성되는 암편발생각도는 점차 낮아지는 것으로 분석되었다(Fig. 5).

또한 절리의 경사각과 가압지점의 변화에 따른 파쇄 범위를 비교하기 위해, 균열대와 절리면, 그리고 암반표

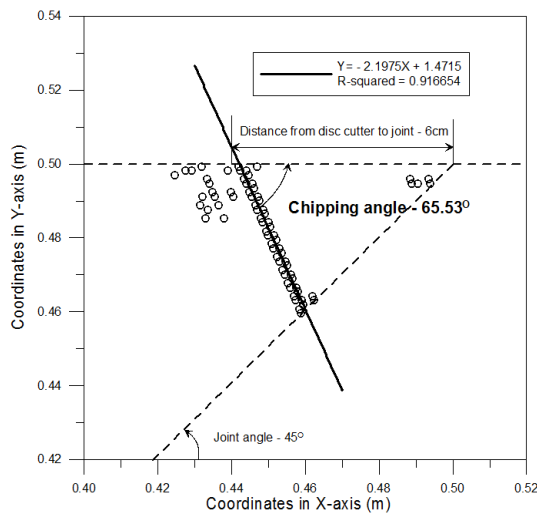


Fig. 4. Chipping angle (joint angle-45°, distance from disc cutter to joint-6 cm)

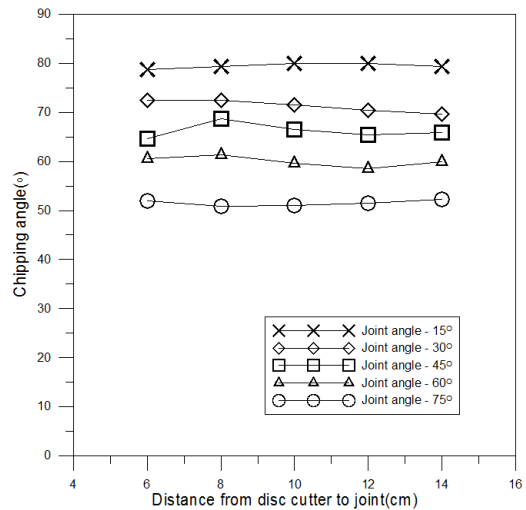


Fig. 5. Chipping angle developed with change of joint angle and distance from disc cutter to joint

면으로 구성되는 삼각형 형태의 면적을 기하학적으로 구하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 동일한 절리경사각에 대해 암반표면에 나타나는 절리와 디스크 커터의 가압지점 사이의 간격이 증가할수록 파쇄범위는 증가하는 것으로 나타났으며, 절리의 경사각이 증가할수록 파쇄범위도 증가하는 것을 알 수 있다. 전자의 결과는 기하학적으로 당연한 결과이나, 후자의 결과와 함께 비교해 볼 때 절리의 경사각이 클 경우 절삭 효율을 증대시키기 위해서는 가능한 절리면에 가까운 위치에 디스

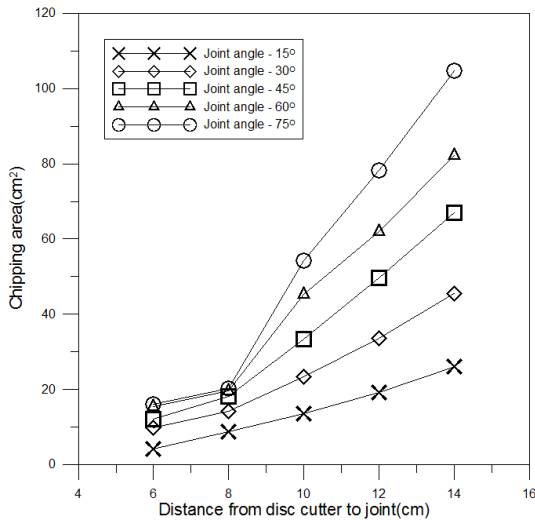


Fig. 6. Chipping area developed with change of joint angle and distance from disc cutter to joint

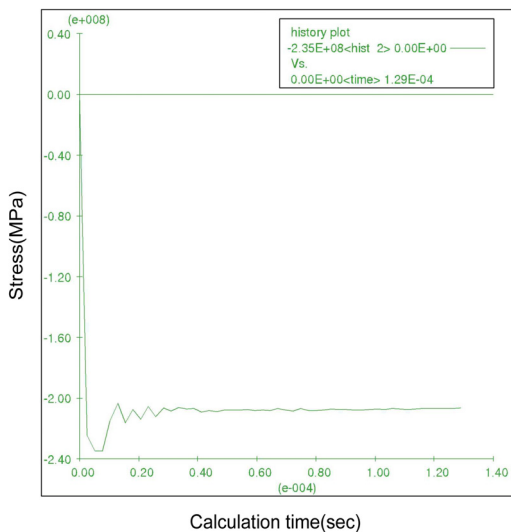


Fig. 7. Induced stress by chipping (joint angle: 75°, distance from disc cutter to joint: 14 cm)

크 커터가 압입되도록 하여야 함을 알 수 있다. 이는 수치해석 과정에서 구할 수 있는 디스크 커터의 수직응력 분포양상에서도 확인할 수 있었다. Fig. 7은 수치해석에서 측정된 수직응력의 이력곡선의 한 예인데, 모든 해석모델에 대해 수직응력은 가압면 직하부 영역에서 측정되었으며, 수직응력의 이력곡선 상에서 가압 초기의 최고 수직응력이 아닌 압편이 형성되는 순간, 즉 압편 형성에 관여하는 균열이 더 이상 발생하지 않을 때의 응력 값으로부터 추정하였다.

Table 3은 분석된 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 이 결과에서 압편을 형성하는데 요구되어지는 유효응력의 변화양상과 압편의 크기변화는 주목할 만하다. 이는 곧 절리를 포함하는 모델에 대한 디스크 커터의 절삭효율인데, Fig. 8에 도시된 결과에서 알 수 있듯이 절리의 경사각이 작을수록 절삭효율은 높으며, 동일한 절리경사각의 경우 가압지점의 위치가 8 cm에서 10 cm로 증가할 때 절삭효율이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 절리의 경사각이 클수록 더욱 뚜렷한데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 절리의 경사각이 작을 경우 전체적으로 절삭효율은 높기 때문이기도 하다.

일반적으로 디스크 커터는 선단을 중심으로 양측방향으로 절삭에 의한 암석파괴가 함께 유도되어야만 절삭효율이 높다고 할 수 있다. 하지만 본 해석에서와 같이 절리를 포함하는 암반의 경우, 절삭 효율은 절리의 경사각과 가압지점의 위치 변화에 따라 균열 전파 및 압편 형성이 좌우되기 때문에 형성되는 압편의 크기와 유효응력으로부터 절삭효율을 판단해야 한다. 따라서 실제 TBM 굴착현장에서 절리면의 영향으로 인해 압편의 크기가 비이상적으로 크게 발생된다면, 절삭효율은 높다 하더라도 디스크 커터가 암반 내에 물리거나 끼이는 현상이 발생하여 시공지체시간이 증가되면서 전체적인 굴착효율을 저하시키게 될 것이다.

2.2 이중 커터의 간격 변화에 따른 균열전파양상

2.2.1 해석조건

본 해석은 절리를 포함한 암반에 관한 수치 모델에서 인접한 디스크 커터에 의한 균열전파 및 상호작용을 분석하기 위해 수행되었다. 앞선 해석에서는 절리의 경사각이 높을수록 압편발생각도가 낮게 형성되고, 형성되는 균열이 절리면에 접하면 더 이상 전파되지 못하고 중단되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 해석에서는 인접한 두 커터에 의해 발생하는 균열은 암반절리의 경사각이 클수록 상호 연결성이 높을 것으로 판단되어 암반절리의 경사각이 큰 75° 모델에 대한 해석을 수행하였다.

Table 3. Analysis results of single cutter

Joint angle(°)	C_d (cm)	V_d (cm)	C_{ar} (°)	C_{ar} (cm ²)	C_s (MPa)	C_{ar}/C_s
15	6	1.55	78.69	4.22	11.05	0.38
	8	2.07	79.38	8.77	19.02	0.46
	10	2.59	79.99	13.46	22.00	0.61
	12	3.11	79.99	19.26	28.00	0.69
	14	3.62	79.38	26.12	34.00	0.77
30	6	3.00	72.47	9.84	35.10	0.28
	8	4.00	72.47	14.14	42.60	0.33
	10	5.00	71.57	23.41	46.60	0.50
	12	6.00	70.35	33.65	56.00	0.60
	14	7.00	69.68	45.39	65.00	0.70
45	6	4.24	65.53	12.02	46.20	0.26
	8	5.66	68.63	18.23	63.80	0.29
	10	7.07	66.57	33.27	73.10	0.46
	12	8.49	65.38	49.65	90.00	0.55
	14	9.90	65.85	67.06	100.00	0.67
60	6	5.20	60.52	15.39	81.90	0.19
	8	6.93	61.39	19.67	92.90	0.21
	10	8.66	59.66	45.27	111.00	0.41
	12	10.39	58.52	62.03	130.00	0.48
	14	12.12	59.90	82.26	149.00	0.55
75	6	5.80	52.00	15.98	125.00	0.13
	8	7.73	50.91	20.31	142.00	0.14
	10	9.66	51.01	54.35	165.00	0.33
	12	11.59	51.45	78.18	185.00	0.42
	14	13.52	52.22	104.49	207.00	0.51

* C_d : Distance from disc cutter to joint
 V_d : Normal distance to joint surface
 C_{ar} : Chipping angle
 C_{ar} : Chipping area
 C_s : Induced stress by chipping

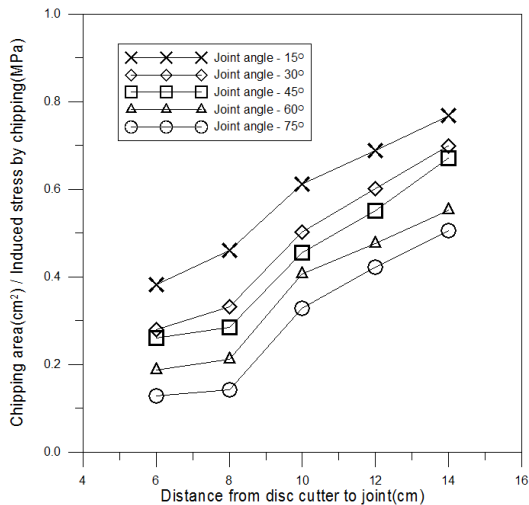


Fig. 8. C_{ar}/C_s developed with change of joint angle and distance from disc cutter to joint

디스크 커터의 간격은 노출된 절리를 중심으로 6 cm에서 14 cm까지 2 cm씩 증가시켜 총 5단계의 변화를 주었다. 디스크 커터의 간격을 이와 같이 설정한 이유는 개별요소해석 상에서 균열의 전파양상을 효과적으로 보여줄 수 있기 때문이며, 실제 현장에서의 설정값과 다를 수 있음을 밝힌다. 또한 디스크 커터의 가압하중은 인접한 두 커터에 같은 하중조건으로 예비 해석해 본 결과, 균열의 전파가 절리면의 영향을 유리하게 받는 좌측 커터(수치모델 상에서 암반표면에 나타나는 절리면의 왼쪽에 위치하는 커터)보다 우측 커터(수치모델 상에서 암반표면에 나타나는 절리면의 오른쪽에 위치하는 커터)에 더 높은 하중이 요구되기 때문에 같은 수직하중으로 해석할 경우, 좌측 커터 하부에서 절리면 방향으로 균열이 과도하게 형성되어 뚜렷한 균열의 연결성을 확인할 수 없었으며, 파쇄영역의 과도한 증가는 실제 분진량과 암석 분쇄에 필요한 에너지 증가로 이어

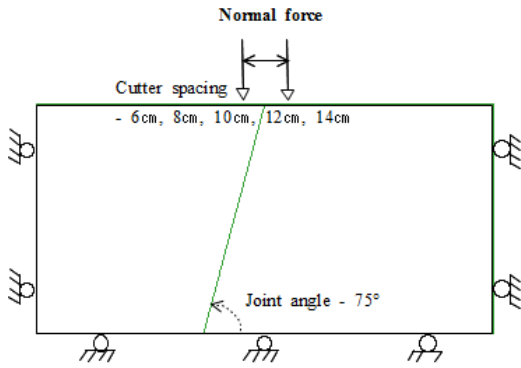


Fig. 9. Numerical simulation model of double cutter (100x50 cm)

지므로 효율적인 절삭이 이루어지지 않는 것으로 볼 수 있다.

따라서 인접한 두 커터에 의한 균열의 연결성과 디스크 커터의 절삭효율을 고려하여 양쪽 커터의 가압하중 조건을 달리하였으며 하나의 디스크 커터가 수치해석 모델 상에서 수직하중조건으로 가해지는 가압지점의 폭은 앞선 해석과 동일하게 0.5 cm로 유지시켰다. 해석 영역, 해석모델 그리고 입력물성값은 단일 커터의 경우와 동일하게 유지하였다(Fig. 9).

2.2.2 해석결과

앞서 언급한 단일 디스크 커터의 수치해석과 마찬가지로, 본 해석에서도 절리를 포함하지 않은 모델과 절리를 포함하는 모델에 대한 균열전파양상을 먼저 분석하였다.

절리를 포함하지 않은 모델의 경우에 대한 전체적인 균열 전파 양상을 살펴 보면, 단일 커터에 의해 발생하는 초기 균열전파 양상과 비슷한 형태의 균열이 각각의 디스크 커터 가압지점에서부터 시작하지만, 균열이 점차 확대되면서 각 커터에 의한 인장균열이 서로 연결되어 암편이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

반면 절리를 포함하는 모델의 경우, 초기 균열 전파는 좌측 커터에 의한 균열이 우측 커터의 균열보다 절리면에 먼저 도달함으로써 삼각형 형태의 암편이 형성되고, 그 이후 우측 커터의 균열이 절리면에 도달하여 절리면의 좌우측 균열이 연결되는 양상이 나타났다(Fig. 10).

디스크 커터의 간격 변화에 따른 균열전파의 변화 양상을 살펴보기 위하여 Fig. 10에서와 동일한 형태의 수치모델에 대해 디스크 커터의 간격을 변화시키면서 해석을 실시한 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같으며, 각 경우에 대하여 디스크 커터에서 요구되는 응력을 정리한 결과는 Table 4에 나타난 바와 같다.

Calculation Step	No joint model (cutter spacing: 6 cm)	Joint model (joint angle: 75°, cutter spacing: 6 cm)
20		
40		
60		
100		

Fig. 10. Crack propagation patterns by double cutter of both isotropic and anisotropic model

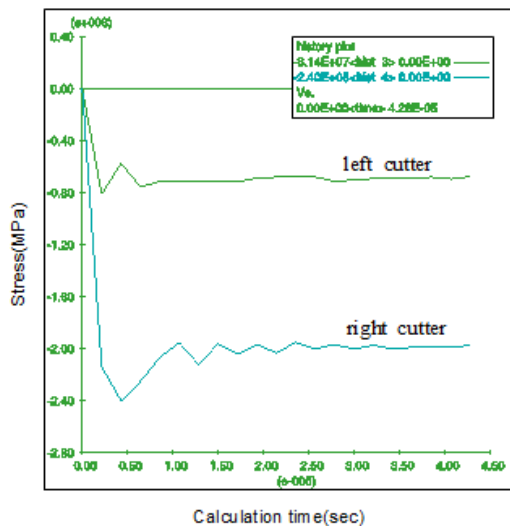
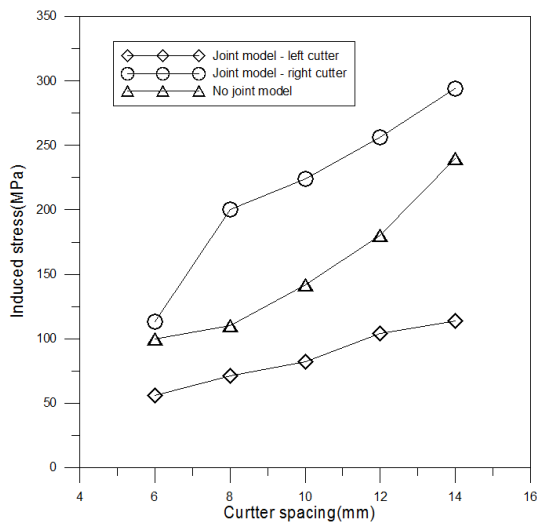
Calculation Step	No joint model	Joint model (joint angle: 75°)
6		
8		
10		
12		
14		

Fig. 11. Crack propagation developed with the change of cutter spacing

여기서 알 수 있듯이, 절리를 포함하지 않은 모델의 경우 균열 전파양상은 기존연구에서 분석된 바와 같이 각각의 커터 간격에서 좌우 커터에 의한 균열이 서로 대칭적으로 전파되면서 커터 간격이 10 cm일 때 최적의 절삭효율을 발휘함을 알 수 있다. 그러나 절리를 포함하는 수치모델의 경우, 우측 커터에 의해 발생하는 수많은 미세균열 분포양상 및 응력측정 결과로부터 알 수 있듯이 두 커터에 의해 발생하는 균열을 서로 연결시키기 위해서는 우측 커터에 높은 하중이 요구되어지기 때

Table 4. Induced stress of cutter developed with the change of cutter spacing to each model

Cutter spacing (cm)	No joint model	Joint model (joint angle: 75°)	
	Induced stress of double cutter (MPa)	Induced stress of left cutter (MPa)	Induced stress of right cutter (MPa)
6	100	56	113
8	110	71	200
10	142	82	224
12	180	104	256
14	240	114	294

**Fig. 12.** Induced stress of each cutter to joint model (joint angle: 75°, cutter spacing : 8 cm)**Fig. 13.** Induced stress of double cutter developed with the change of cutter spacing

문에 앞서 언급한 바와 같이 과도하게 형성되는 균열로 인한 분진량과 분쇄에 필요한 에너지의 증가로 효율적인 절삭이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. Fig. 12는 이에 대한 한 예로서, 디스크 커터의 간격이 8 cm일 경우에 대한 좌측 디스크 커터 및 우측 디스크 커터에서 요구되는 응력의 크기를 나타내고 있다.

Fig. 13은 절리를 포함하지 않는 경우와 절리를 포함하는 경우에 대하여 디스크 커터의 간격의 변화에 따른 유도 응력의 크기를 도식적으로 나타내고 있다. 그림에서 이해되는 바와 같이, 절리를 포함하든 포함하지 않든 디스크 커터의 간격이 넓어질수록 커터에 요구되는 응력의 크기는 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 디스크 커터의 간격에 대해 살펴보면, 좌측 커터에서의 응력은 절리가 없는 경우에 비해 더 작은 응력이 요구되며 우측 커터에서는 절리가 없는 경우에 비해 더 큰 응력이 요구됨을 알 수 있다. 즉, 절리가 있을 경우 암반 내부에서 절리면과 예각으로 만나게 되는 지점에서 가압되는 디스크 커터가 그 반대의 경우보다 요구되는 응력의 크기가 작음을 의미한다.

이상의 결과로 유추해 볼 때 TBM 굴착현장에서 암반절리의 경사방향에 대해 반대쪽에 위치하는 디스크 커터의 파손 가능성이 경사방향쪽에 위치하는 디스크 커터보다 높다는 점을 예측하여 합리적인 디스크 커터 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 절리가 있는 암반에서의 TBM 디스크 커터의 절삭 메커니즘 분석을 위해 개별요소 프로그램인 UDEC을 이용하여 절리와 단일 커터의 가압지점 변화에 따른 암편발생 현상을 분석하였고, 이중 커터에 의한 절삭에서 커터 간격의 변화에 따른 균열 전파양상과 유효응력을 분석하였다. 본 연구에서 분석된 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 디스크 커터의 압입 하중에 의한 균열 전파 양상은, 절리가 없는 암반 모델의 경우 좌우 대칭적으로 균열이 전파되었으나 절리가 있는 암반 모델에서는 절리의 영향으로 인해 좌우 비대칭적으로 균열이 전파되었으며, 수치해석영역 중에서 강도가 상대적으로 낮은(수치해석상에서는 표면에너지가 낮은 지점) 취약한 절리면으로 전파된 후, 절리면을 통과하여 전파되지 못하고 절리면과 나란한 방향으로 암반 내부로 전파되는 양상을 확인할 수 있었다.
2. 절리의 경사각과 단일 커터의 가압지점을 달리하여 해석한 25개 모델에 대한 분석 결과, 절리의 경사각이 클수록, 그리고 절리와 디스크 커터의 가압지점이 멀어질수록 형성되는 삼각형 형태의 암편 면적이 점차 증가하였고, 그에 따른 디스크 커터의 유효응력 또한 증가하는 것으로 분석되었다. 절리가 포함된 암반 모델에 대한 단일 커터의 절삭효율은 디스크 커터의 가압지점과 암반표면에서의 절리면 사이의 간격이 10cm 이상인 경우부터 효율적으로 증가되는 양상을 보였다. 그러나 이는 수치해석상의 결과이며, 실제 TBM 굴착 현장에서 절리와 가압지점의 간격이 넓어 절삭효율이 높아져서 암편의 크기가 비이상적으로 크게 발생된다면, 오히려 디스크 커터가 물리거나 끼이는 현상으로 시공 지체시간이 증가되어 굴착효율을 저하시킬 것으로 판단된다.
3. 인접한 두 커터에 의한 균열전파 및 상호작용을 분석하기 위해 75°의 경사를 갖는 절리를 포함하는 모델에 대하여 절리를 중심으로 커터 간격의 변화를 주어 해석을 실시한 결과, 두 커터 중 좌측 커터는 절리면의 영향으로 균열 전파가 우측 커터보다 유리하게 발생되었고, 우측 커터는 두 커터의 중심으로 균열을 연장하기 위해 좌측 커터보다 높은 하중이 요구되었다. 또한 절리가 없는 암반 모델에서는 균열 연장을 위한 이중 커터의 유효응력보다 높은 응력이 작용하였다. 결과적으로 절리를 포함하는 모델의 우측 커터에서는 과도하게 형성되는 균열로 분쇄에 필요한 에너지가 증가되어 절삭 효율이 저하되는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 유추해 볼 때, 실제 현장에서 절리경사 반대 방향에 위치하는 디스크 커터의 파손 가능성이 반대쪽에 위치하는 커터보다 높을 것으로 판단된다.
4. 본 연구에서 해석 대상으로 선정한 절리가 없는 모델 및 단일절리가 있는 모델의 경우, 그리고 2차원 수치해석의 한계상 디스크 커터의 회전을 고려하지 못하고 단순히 수직하중을 가하는 형태로 디스크 커터의 압입을 모사하는 등은 현장의 사례와 많은 차이가 날 수 있다. 하지만 기존 연구에서 충분히 다루지 못했

던 암반절리의 경사각의 차이 및 가압지점의 차이, 그리고 암반절리가 있을 경우에서의 이중 디스크 커터의 간격 변화 등에 대한 수치해석적 연구결과는 절리암반에서의 TBM 굴착성능예측 및 디스크 커터의 적합 설계에 합리적인 판단기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 현장에서 복잡한 형태로 나타나는 절리의 분포특성을 그대로 반영하는 수치해석연구가 추가적으로 수행된다면 보다 정량적인 결과값이 제시될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2009년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. 박관인, 장수호, 최순욱, 전석원, 2006, 선형절삭시험에 의한 TBM 디스크 커터의 최적 절삭조건 예측, 한국암반공학회 2006 춘계학술발표회 논문집, pp.217-236.
2. 백승한, 2003, TBM 커터 관입에 의한 암석 파쇄의 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, 제13권, 제6호, pp.444-454.
3. 유상화, 장수호, 조정우, 전석원, 2008, 동적 파괴모델링에 의한 TBM 디스크 커터의 최적 절삭간격 예측, 터널기술, 제10권, 제1호, pp.81-90.
4. 이승중, 최성용, 2009, LCM 이방성 시료와 디스크 커터의 절삭 메커니즘 분석을 위한 수치해석적 연구, 한국지구시스템공학회 2009 춘계학술발표회 논문집, pp.196-199.
5. 조정우, 유상화, 전석원, 장수호, 2008, TBM 디스크 커터의 암석절삭에 관한 수치해석적 연구, 터널기술, 제10권, 제2호, pp.139-152.
6. Boniface, A., 2000, Tunnel Boring Machine Performance in Basalts of the Lesotho Formation, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.15, No.1, pp.49-54.
7. Chang, S.H., Choi, S.W., Bae, G.J., Jeon, S., 2006, Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by the linear cutting test, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.21, Issues 3-4, p.271.
8. Itasca, 2000, UDEC (Universal Distinct Element Code) Verification Problems & Example Applications 8; 1-7.
9. Gong, Q.M., Zhao, Hefny, A.M., 2005, Numerical Simulation of Rock Fragmentation Process Induced by Two TBM Cutters and Cutter Spacing Optimization, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.21, Issues 3-4, p.263.
10. Gong, Q.M., Zhao, J., Jiao, Y.Y., 2005, Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters, Tunnelling Underground Space Technology, Vol. 20, pp.183-191.
11. Gong, Q.M., Zhao, J., Jiao, Y.Y., 2006, Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters, Tunnelling Underground

- Space Technology, Vol. 21, pp.46-55.
12. Rostami, J., Ozdermir, L., Nilson, B., 1996, Comparison between CMS and NTH hard rock TBM performance Prediction models, ISDT Las Vegas, pp.1-11.
 13. Sharma, J.S., Chu, J., Zhao, J., 1999, Geological and geotechnical features of Singapore: an overview, Tunnelling Underground Space Technology, Vo.14, No.4, pp.419-431.
 14. Zhao, J., 1996 Construction and utilization of rock caverns in Singapore Part A: The Bukit Timah granite bedrock resource, Tunnelling Underground Space Technology, Vol. 11, No.1, pp.65-72.

이 승 중



2007년 강원대학교 지구시스템공학과
공학사
2009년 강원대학교 지구시스템공학과
공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구시스템공학과 박사
과정

최 성 응



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 지구시스템
공학과 교수