3차원 입자결합모델을 이용한 디스크 커터의 암석절삭에 관한 연구

이승중, 최성웅*

Three Dimensional Numerical Analysis on Rock Cutting Behavior
of Disc Cutter Using Particle Flow Code

Seung-Joong Lee, Sung-Oong Choi*

Abstract The LCM (Linear Cutting Machine) test is one of the most powerful and reliable methods for designing the disc cutter and for predicting the TBM (Tunnel Boring Machine) performance. It has an advantage to predict the actual load on disc cutter from the laboratory test on the real-size large rock samples, however, it also has a disadvantage to transport and/or prepare the large rock samples and to need an extra cost for experiment. In order to overcome this problem, lots of numerical studies have been performed. In this study, the PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimension) has been adopted for numerical analysis on optimum cutter spacing and failure aspects of Busan Tuff. The optimum cutting condition with s/p ratio of 16 and minimum specific energy of 14 MJ/m^2 was derived from numerical analyses. The cutter spacing for Busan Tuff had the good agreements with those of LCM test and numerical analysis by finite element method.

Key words Disc cutter, LCM test, PFC3D, Optimum cutter spacing

초 록 선형절삭시험(Linear Cutting Machine)은 TBM(Tunnel Boring Machine)에서의 디스크 커터 설계와 굴진성능 예측을 위한 가장 신뢰성 있는 시험 중의 하나로서, 실험형 암석시료를 대상으로 실제의 커터 하중을 예측할 수 있는 장점을 갖고 있지만, 시료의 채취 및 운반이 용이하지 않고, 1회 시험에 많은 비용이 소요되는 단점을 갖고 있다. 최근 선형절삭시험이 갖는 이러한 경제적·시간적 제약점들을 극복할 수 있는 현실성 있는 수치모델의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 3차원 입자결합모델을 이용하여 디스크 커터의 절삭에 의한 부산 응회암의 파쇄양상과 최적 커터간격을 도출하였다. 본 해석에서 분석된 비에너지는 14.3 MJ/m^3 일 때 최소값을 나타냈다. 이때의 최적의 s/p 비는 약 16 으로 분석되었으며, 부산응회암의 선형절삭시험 및 유한요소법에 의한 수치해석 연구결과와 유사한 경향을 나타냈다.

핵심어 디스크 커터, LCM 시험, PFC3D, 최적 커터간격

1. 서 론

TBM(Tunnel Boring Machine) 굴착공법은 종래의 발파공법과 비교하여 소음 및 진동 등의 환경피해가 적

고 자동화 및 기계화로 인하여 경제적이란 장점을 갖고 있어 전 세계적으로 널리 이용되고 있다. 국내에서도 이러한 기계화 시공법을 도입하여 대형도로 터널이나 전력구 터널의 건설에 이용하고 있으며, 그 시공사례가 점차 증가하는 추세이다.

TBM 굴착공법에서는 시공지체시간의 조절 및 굴착성능 향상을 위하여 디스크 커터의 적합 설계법과 TBM 굴진성능 예측법이 핵심기술로 간주되고 있다. TBM 굴진성능 예측을 위한 설계인자를 효과적으로 도출하기 위한 방법 중 하나인 선형절삭시험(Liner Cutting Machine Test)은 TBM 적용 지역의 암석시험편을 대상으로 하기 때문에 커터헤드 설계에 직접적으로 활용될

Received: Jan. 10, 2013

Revised: Jan. 28, 2013

Accepted: Jan. 29, 2013

*Corresponding Author: Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332525550

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resource Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondahak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

수 있는 신뢰성 높은 시험이다. 국내에서도 2004년에 한국건설기술연구원에서 실험형 선형절삭시험 장비를 구축하고 국내 지반시료에 대한 실험적 연구를 지속적으로 수행해 오고 있다(Chang *et al.*, 2006, Park *et al.*, 2006, Yu *et al.*, 2007, Cho *et al.*, 2008, Jeong *et al.*, 2011). 하지만 선형절삭시험은 실험형 시료를 대상으로 실제의 커터 하중을 예측할 수 있는 이점이 있음에도 불구하고 시료의 채취 및 운반이 용이하지 않고 1회 시험에 많은 비용이 소요된다는 단점을 갖고 있다.

최근 국내에서는 이러한 선형절삭시험의 한계를 극복하기 위해 수치모델 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chang *et al.*(2006)는 AUTODYN2D를 이용하여 암석절삭 현상을 모사하였고, MLTM(2007)에서는 PFC2D, FLAC2D 등의 상용프로그램을 이용하여 암석의 chipping 메커니즘에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 이상의 연구는 2차원적 관입조건으로 디스크 커터의 전체 작용력을 현실적으로 반영할 수 없는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 Yu *et al.*(2007)는 3차원 유한요소법인 AUTODYN3D를 이용하여 디스크 커터의 3차원 절삭메커니즘을 구현하였다. 또한 Cho *et al.*(2010)는 AUTODYN3D를 이용하여 암석의 파괴 메커니즘을 보다 현실적으로 모사하고자 국내 8개 암종에 대한 선형절삭시험 결과와 비교분석을 통해 수치모델의 타당성을 검증하였다.

본 연구에서는 디스크 커터의 절삭에 의한 암석의 파괴 메커니즘을 분석하고자 3차원 입자결합모델 프로그램인 PFC3D(Particle Flow Code in 3 Dimension)를 이용하였다. PFC3D는 개별적인 구형입자들의 집합체로 암석 또는 지반을 모델링할 수 있고 입자의 유동해석이 용이하기 때문에 선형절삭시험 모사시, 디스크 커터의 암석절삭에 의한 파쇄현상을 효과적으로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 PFC3D의 이점을 이용하여 디스크 커터의 절삭간격의 변화에 따른 암석시험편 모델의 파쇄양상과 최적 커터간격을 분석하고자 하였다.

2. 3차원 입자결합모델을 이용한 수치해석

2.1 대상 시료에 대한 PFC3D의 micro-parameter 산정

PFC3D와 같은 입자결합모델을 구성하여 실제 암석의 거동을 모사할 경우 입자의 물성치를 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 연속체 모델의 경우, 모델의 물성

Fig. 1. Calibration of micro-mechanical properties for Busan Tuff specimen

치는 실내시험이나 현장시험으로부터 얻어진 값을 감쇠기법으로 보정하여 해석에 적용하지만 입자결합모델의 경우, 입자들의 상호작용에 의해 개개의 입자들의 거동과 이 입자들로 구성된 모델의 거동은 다른 양상을 보인다. 이로 인해 입자의 물성치를 결정하기 위해서는 입자의 물성치를 반복적으로 입력하여 모델을 구성하고 이를 실제 암석의 거동과 비교하여 실제 암석의 거동에 가까운 물성치를 결정해야 한다(KSRM, 2005).

본 연구에서 해석모델의 대상 시료로 선택한 암석은 부산 응회암으로서 Chang *et al.*(2007)가 선형절삭시험 시험을 위해 수행한 실내시험의 결과값을 PFC3D 내의 미세 물성(micro-properties) 산정을 위한 기초자료로 활용하였다. 본 연구에서 적용한 입자구성모델은 contact bond 모델로서, 사용된 미세 물성은 밀도(ρ), 수직강성과 전단강성의 비(k_n/k_s), 탄성계수(E_c), 최소 입자반경(R_{min}), 최대 입자반경과 최소 입자반경의 비(R_{max}/R_{min}), 마찰각(μ), 인장강도(σ_n), 전단강도(σ_s)이다. 이러한 미세 물성 변수들의 값을 결정하기 위해서는 실내시험의 결과값과 수치해석의 결과값을 비교 검토하는 반복적인 try-and-error 과정을 수행해야 한다. Fig. 1 및 Table 1과 같이 일축압축시험, 간접인장시험의 모델링과 통하여 실내시험의 결과값들과 유사한 값을 도출하였다. 이러한 반복적인 과정에 의해 결정된 미세 물성의 결과값

은 Table 2와 같다.

2.2 수치해석 조건

2.2.1 암석시료 모델

일반적으로 수치해석을 위해 소요되는 해석시간은 요소의 개수의 제곱에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다. PFC3D는 입자와 입자, 입자와 wall 간의 접촉에 의한 물리적 연산이 이루어지기 때문에 입자의 수가 증가할수록 해석시간은 증가한다. 따라서 수치해석의 효율성을 증대시키기 위해서는 생성하고자하는 해석모델의 크기에 맞게 적합한 입자의 반지름과 입자의 수를 결정해야 한다. 본 수치해석에서는 디스크 커터의 절삭에 의한 균열의 전파범위와 그에 따른 해석모델의 경계조건을 결정하기 위해 예비해석을 수행하였다.

Fig. 2의 예비해석 결과로 확인할 수 있듯이 디스크 커터의 초기 관입으로 인하여 발생된 균열은 디스크 커터의 관입지점의 중심에서 좌우로 약 16 mm이며, 이때 발생된 균열의 깊이는 디스크 커터의 직하부, 즉 암석 시험편의 절삭면 하부 약 24 mm이다. 따라서 디스크 커터의 간격의 변화에 따른 암석절삭시 균열전파에 영향을 미치지 않도록 경계조건을 고려하여 최소의 입자의 수로 해석모델을 구성하였다. 암석시험편의 구성입자의 반지름은 1 mm, 전체 입자의 수는 44,000개로서,

Table 1. Mechanical properties of Busan Tuff specimen in the macro-test and PFC3D

Mechanical properties	Experiment results	PFC3D model results
UCS (σ_c)	115.00 MPa	111.00 $\pm$ 10 MPa
Elasticity modulus (E)	43.90 GPa	42.90 $\pm$ 5 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.18	0.19 $\pm$ 0.01
UTS (σ_t)	25.20 MPa	29.90 $\pm$ 5 MPa

Table 2. PFC3D parameters for Busan Tuff specimen

Particles	
Density (ρ)	2,720 kg/m ³
Ratio of normal to shear stiffness (k_n/k_s)	2.0
Elasticity modulus (E_c)	71 GPa
Minimum radius (R_{min})	1 mm
Particle ratio of maximum radius to minimum radius (R_{max}/R_{min})	1.0
Friction coefficient (μ)	0.5
Contact bond	
Normal strength (σ_n)	90 $\pm$ 5 MPa
Shear strength (σ_s)	70 $\pm$ 5 MPa

Fig. 2. Pre-analysis result

Fig. 3. Numerical simulation model of Busan Tuff specimen

해석모델의 크기는 $50 \times 176 \times 50 \text{ mm}$ 가 되도록 격자 형태로 입자를 배열하였다(Fig. 3).

2.2.1 디스크 커터 모델

디스크 커터 모델은 선형절삭시험의 실제 디스크 커터와 유사한 크기로 내경 200 mm, 외경 176 mm, 두께 76 mm가 되도록 생성하였다. PFC3D 내의 wall cylinder 명령어를 이용하여 두 개의 wall cylinder가 접합된 형태가 되도록 설정하였으며, 암석 절삭시 각 wall cylinder에 작용하는 힘으로부터 디스크 커터의 작용력을 분석하

였다.

디스크 커터의 절삭속도는 절삭력에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보고된 바 있기 때문에(KTA, 2005, Cho *et al.*, 2008) 본 해석에서는 해석의 효율성을 제고하기 위해 디스크 커터의 직선 이동속도를 2 m/sec, 회전 각속도를 10 rad/sec로 설정하였다. 디스크 커터의 암석시험편의 관입깊이는 4 mm가 되도록 설정하였고, 디스크 커터의 절삭에 의한 암석시험편의 유동이 없도록 해석모델의 최하부에 위치한 구성입자들의 상하변위 및 좌우변위를 구속하였다.

실제 선형절삭시험 시험과 유사한 시험조건을 모사하고자 1차 절삭을 수행하여 손상된 암석면을 형성한 후, 디스크 커터의 중심 위치를 이동시켜 2차 절삭을 수행하였다. 디스크 커터의 2차 절삭위치는 1차 절삭 중심 위치에서 24 mm, 36 mm, 48 mm, 60 mm, 72 mm, 84 mm로 변화시켰다.

2.3 수치해석 결과

2.3.1 디스크 커터의 작용력과 암석시험편의 파쇄양상

디스크 커터가 암석을 절삭할 때 Fig. 5와 같이 세 방향의 힘, 즉 수직력(normal force), 회전력(rolling force), 측력(side force)이 복합적으로 작용하여 암석을 절삭하게 된다. Fig. 6은 디스크 커터가 1회의 절삭을 수행하는 동안 측정된 세 방향의 작용력을 나타낸 것이다. 암석시험편을 절삭하는 과정에서 디스크 커터에 작용하

Fig. 4. Numerical simulation model of disc cutter

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

Fig. 6. Applied forces to disc cutter (1st cut)

는 세 방향의 힘은 초기 절삭에 의해 점차 증가하다가 주된 절삭이 이루어지는 구간에서 가장 크게 발생되었으며, 암석시험편의 절삭에 가장 크게 기여한 힘은 수직력 > 측력 > 회전력 순으로 나타났다.

Fig. 7은 디스크 커터의 암석시험편의 절삭과정을 나

타낸 그림이다. 암석시험편의 파쇄양상을 분석하기 위해 시험편을 구성하고 있는 입자가 본래 갖고 있던 결합력을 상실하게 되면 균열 및 파쇄가 발생하였다는 의미로 입자의 색이 변하도록 설정하였다. Fig. 7(a)는 디

Fig. 7. Failure aspects of 1st cut

스크 커터가 암석시험편을 절삭하는 초기 단계로서 디스크 커터의 초기 관입으로 인한 인장균열이 암석시험편의 하부 약 28 mm, 좌우측 방향으로 8 mm, 진행방향으로 10 mm까지 전파된 것을 확인할 수 있었다. 이는 세 방향의 힘이 복합적으로 작용하여 발생된 균열로서 시험편의 하부 균열은 주로 수직력, 좌우측 균열은 주로 측력, 진행방향의 균열은 주로 회전력과 수직력의 합력으로 인해 발생된 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 7(b)와 (c)는 주된 절삭이 이루어지는 단계로서 Fig. 6에서 분석된 바와 같이 세 방향의 힘이 복합적으

로 작용하여 암석시험편이 파쇄되고 있음을 보여준다. 암석시험편의 파쇄양상을 초기절삭단계와 비교해 보면, 좌우측으로 발생하는 균열은 디스크 커터가 진행함에 따라 측력의 작용 면적이 점차 증가하기 때문에 점차 확장되는 것으로 나타났다. 또한 디스크 커터의 연속적인 절삭에 의해 발생한 선형 균열의 영향으로 주된 절삭 과정에서 상대적으로 취약한 균열방향을 따라 주된 파쇄가 발생하였으며, Fig. 7(d)와 같이 절삭이 완료된 이후 균열 및 파쇄영역이 증가된 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 디스크 커터의 절삭간격에 따른 작용력의 변화

일반적으로 디스크 커터의 간격이 임의의 간격 이상이 되면 인접한 커터 사이에 chipping이 발생하지 않는 비효율적인 절삭조건이 된다. 따라서 최적 커터간격으로 설정된 조건에서 TBM을 운용해야 절삭 성능을 최대화할 수 있다(Rostami and Ozdemir, 1993). 본 연구에서는 해석모델의 디스크 커터의 최적 절삭간격을 도출하고자 1회 절삭을 수행한 후, 디스크 커터의 중심을 24~84 mm까지 12 mm 간격으로 이동시켜 2회 절삭을 수행하였다. 해석시간을 절약하기 위해 입자와 입자 사이에 부여한 결합력이 접촉하고 있는 모든 면에서 0이 되면 입자가 자동적으로 지워지도록 별도의 코드를 작성하여 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 1회 절삭 후, 절삭간격 36 mm에서 2회 절삭을 수행한 암석시험편의 파쇄양상이다. 초기 절삭에 의

한 파쇄양상은 1회 절삭과 유사한 경향을 나타내지만 주된 절삭이 이루어지면서 디스크 커터의 우측방향, 즉 1회 절삭에 의해 형성된 파쇄영역으로 균열이 확장되어 chipping이 발생하는 효율적인 파쇄가 이루어졌다.

최적 커터간격은 파쇄된 형상과 측정되는 좌우측 측력으로부터 유추해 볼 수 있다. Fig. 9는 1회 절삭에 의한 좌우측 측력과 2회 절삭 중 절삭간격 24 mm, 36 mm, 60 mm의 좌우측 측력을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 확인할 수 있듯이 1회 절삭에 의해 디스크 커터에 작용한 측력은 암석시험편을 절삭하기 위해 좌우측 방향으로 거의 대칭적인 측력이 발생하였지만, 절삭간격 24 mm에서 분석된 측력은 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 비대칭적으로 측력이 발생하였다. 이는 앞서 분석된 바와 같이 1회 절삭에 의해 형성된 인장균열 및 파쇄영역과 인접하여 2회 절삭이 이루어졌기 때문에 chipping

(a) 11,000 Step

(b) 31,000 Step

(c) 51,000 Step

(d) 121,000 Step

Fig. 8. Failure aspects of 2nd cut (36 mm)

(a) Side force of 1st cut (b) Side force of 2nd cut (cutting spacing: 24 mm) (c) Side force of 2nd cut (cutting spacing: 36 mm) (d) Side force of 2nd cut (cutting spacing: 60 mm)**Fig. 9.** Side forces of 1st cut and 2nd cut

이 발생한 것으로, 디스크 커터의 좌측력보다 우측력이 작게 나타난 것이다. 24 mm 이상의 절삭간격에서는 비대칭적으로 좌우측 측력이 작용하다가 60 mm 절삭간격에서는 1회 절삭과 유사하게 대칭적으로 측력이 작용하였다(Fig. 9(d)). 이는 비효율적인 2회 절삭이 시작되는 절삭간격으로서 Fig. 10의 파쇄된 형상에서도 확인할 수 있듯이 1회 절삭에 의한 좌측 균열과 2회 절삭에 의한 우측 균열이 서로 영향을 미치지 않는 충분한 이격거리로 인해 두 커터사이에 비파쇄대를 형성하며 독립적인 균열 및 파쇄 양상을 나타내는 것을 분석할 수 있다.

또한 이러한 양상은 Fig. 11과 같이 절삭간격의 변화에 따른 세 방향의 작용력의 변화로부터 확인할 수 있다. 전체적인 경향은 Fig. 6의 1회 절삭의 결과와 유사하게 수직력 > 측력 > 회전력 순으로 나타났으며, 디스크 커터의 절삭간격이 증가할수록 세 방향의 작용력은 증가하다가 절삭간격 60 mm 이상부터는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 절삭간격이 증가할수록 그만큼 절

Spacing (mm)	Fragmented shapes	
	Whole model	Enlarged for failure zone
0
24
36
48
60
72
84

Fig. 10. Fragmented shapes with respect to cut spacing of disc cutter

삭해야 하는 암석의 부피가 커지기 때문에 이에 비례하여 디스크 커터의 작용력이 증가한 것이며, 앞서 분석된 바와 같이 절삭간격 60 mm부터는 비효율적인 2회 절삭이 시작되어 세 방향의 작용력이 1회 절삭에 의한 작용력과 유사한 값으로 감소되는 경향을 나타냈다.

2.3.3 최적 절삭간격

절삭깊이를 일정하게 유지한 상태에서 디스크 커터의 간격을 증가시키면 비에너지(specific energy)의 값은 점차 감소하다가 다시 증가되기 시작하는 지점이 발생하는데, 이때의 디스크 커터의 간격을 최적 절삭간격이

라고 한다. 비에너지는 회전력, 절삭된 암석의 부피, 그리고 절삭된 길이를 통해 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 SE 는 비에너지, MRF 는 평균회전력, l 은 절삭 길이, 그리고 V_{cut} 은 절삭된 암석의 부피이다. 본 연구에서 절삭된 암석의 부피에 대한 계산은 모든 접촉면에 대하여 결합력을 상실한 입자의 수로부터 산정하였다.

부산 응회암의 s/p 비에 따른 비에너지의 변화는 Table

Fig. 11. Relationship between forces and cutting spacing

Fig. 12. Relationship between specific energy and s/p ratio

Table 3. Analyzed results in each cutter spacing (cutting length: 50 mm)

p (mm)	s (mm)	s/p ratio	Cutter force (kN)			SE (MJ/m³)
			MNF	MRF	MSF	
4	24	6	11.00	1.18	5.42	16.31
	36	9	14.30	1.56	7.42	14.74
	48	12	15.50	1.51	8.11	14.31
	60	15	16.10	1.64	8.45	14.51
	72	18	15.80	1.63	8.18	14.53
	84	21	14.20	1.50	7.41	14.46

* p : Penetration depth,
 s : Spacing,
 MNF : Mean normal force,
 MRF : Mean rolling force,
 MSF : Mean side force,
 SE : Specific energy of cutting.

3과 같이 $14.31 \sim 16.31 \text{ MJ/m}^3$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 이를 Fig. 12와 같이 회귀 분석하여 비에너지가 최소가 되는 지점인 최적의 s/p 비를 추정하였다.

결과적으로, 본 연구에서 3차원 입자결합모델로 분석된 부산 응회암의 비에너지는 s/p 비가 약 16일 때, 14.3 MJ/m^3 을 나타내는 것으로 분석되었다.

3. 고찰 및 토의

실제 선형절삭시험에서 디스크 커터에 작용하는 축력은 측정의 어려움으로 인해 좌우 축력의 합력 또는 단방향의 축력만으로 분석되어 왔다. 하지만 본 연구에서는 두 개의 cylinder wall로부터 디스크 커터의 좌우 축력을 측정하였으며, 2회 절삭 과정에서 좌우 축력이 대칭적으로 발생하는 절삭간격 60 mm 를 최적 절삭간격으로 유추하였다. 이는 최소 비에너지로부터 결정된 최적의 s/p 비 16과 비교적 잘 부합하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 Cho *et al.*(2008)가 부산응회암에 대하여 수행한 선형절삭시험 및 AUTODYN3D를 통해 분석된 최적의 s/p 비와 비에너지를 본 연구에서 분석된 결과와 함께 도시한 것이다.

선형절삭시험 및 AUTODYN3D에 의한 부산응회암의 비에너지와 최적의 s/p 비는 각각 18.4 MJ/m^3 과 17, 65.5 MJ/m^3 과 19로 분석되었다. 실제 선형절삭시험보다 AUTODYN3D에 의한 비에너지가 크게 나타나는 이유는 실제 암석에 포함되어 있는 미세한 균열과 편리 등을 수치 해석적으로 모두 고려할 수 없었기 때문에

47.1 MJ/m^3 의 편차가 발생한 것이다(Cho *et al.*, 2008). 반면, 본 연구에서 3차원 입자결합모델에 의해 분석된 비에너지는 14.3 MJ/m^3 로서 실제 선형절삭시험의 비에너지와 4.1 MJ/m^3 의 편차를 나타냈다.

실제 선형절삭시험의 결과값과 이러한 두 수치해석에 의한 결과값의 차이는 해석방법에 의한 차이로서, AUTODYN3D는 유한요소법, PFC3D는 개별요소법에 의해 모델을 구성하기 때문이다. 즉 균질한 등방성 재질로 암석시험편을 모델링한 방법은 같지만 암석시험편을 사각 요소망으로 빈틈없이 구성하는 유한요소법과는 달리 3차원 입자결합모델은 모델의 구성요소를 구형입자로 표현하기 때문에, 입자와 입자 사이의 접촉에 의해 형성되는 공극으로 인하여 해석모델의 강도가 유한요소법에 비해 비교적 약하게 발현되기 때문이다. 이상의 비교 분석결과로부터 3차원 입자결합모델은 상대적으로 강도가 취약한, 즉 미세한 균열 및 편리 등이 포함된 암석시험편을 거시적으로 표현하는데 용이하다고 판단된다. 또한 디스크 커터의 절삭에 의한 암석시험편의 파쇄거동을 유한요소법에서는 사각 요소망의 분리현상으로 표현하지만, 개별요소법에서는 개별입자 또는 입자의 그룹으로 표현함으로써 파쇄거동을 보다 현실적으로 표현할 수 있다.

본 연구에서 표현한 암석시험편은 수치적 계산에 영향을 미칠 수 있는 변수를 최소화 하고자 단일 입자크기와 격자형태의 단순배열로 해석모델의 단순화시켰기 때문에 실제 암석시험편의 입자크기와 배열을 반영하지 못하였다. 또한 디스크 커터의 절삭 위치를 입자와 입자 사이에 위치시킴으로서 결합력에만 접촉되어 있는 입자간의 분리 현상이 쉽게 발생하였기 때문에 균열 및 파쇄거동이 비교적 낮은 힘에서 발생한 것으로 판단된다.

따라서 실제 암석시험편과 유사한 입자크기와 배열을 갖도록 3차원 입자결합모델을 이용하여 암석모델 구성한다면 보다 현실적으로 선형절삭시험을 모사할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 입자결합모델 프로그램인 PFC3D 이용하여 선형절삭시험을 모사하였으며, 디스크 커터의 절삭에 의한 부산 응회암 시험편의 파쇄현상과 최적 커터간격을 도출하고자 하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 부산 응회암에 대한 contact bond 모델의 미세 물성을 산정하고, 예비해석을 통해 초기 절삭시 균열전파 양상을 분석하였다. 초기 절삭에 의한 균

Fig. 13. Relationship between specific energy and s/p ratio

열은 디스크 커터의 관입지점의 중심에서 좌우 16 mm, 하부 24 mm까지 발생된 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 암석시험편 모델의 경계조건과 해석시간을 고려하여 최소 입자의 수로 해석모델을 구성하였다.

2. 디스크 커터의 절삭간격의 변화에 따른 파쇄양상과 측력을 비교분석한 결과 절삭간격 24 mm에서 분석된 측력은 디스크 커터의 좌측력보다 우측력이 더 작게 나타났으며, 이는 1회 절삭에 의해 형성된 인장균열 및 파쇄영역과 인접하여 2회 절삭이 이루어졌기 때문에 chipping 현상이 발생한 것으로 분석되었다. 60 mm 절삭간격부터는 1회 절삭과 유사하게 좌우측력이 대칭적으로 작용한 것을 분석할 수 있었다. 이는 1회 및 2회 절삭에 의한 균열이 서로 영향을 미치지 않는 충분한 이격거리로 인해 두 절삭간격 사이에 비파쇄대를 형성하며 독립적인 균열 및 파쇄양상을 나타내기 때문이다.
3. 본 연구에서 분석된 부산 응회암의 s/p 비에 따른 비에너지는 $14.31 \sim 16.31 \text{ MJ/m}^2$ 의 범위를 나타냈으며, 최적의 s/p 비는 비에너지가 14.3 MJ/m^2 일 때 약 16을 나타내었다.
4. 부산 응회암에 대한 실제 선형절삭시험과 AUTODYN3D에 의한 결과값과 비교 분석한 결과, 3차원 입자결합 모델에 의해 분석된 비에너지는 실제 선형절삭시험과 4.1 MJ/m^3 편차를 나타냈으며, 47.1 MJ/m^3 의 편차를 보인 AUTODYN3D에 비해 낮은 편차를 보이는 것으로 분석되었다. 결과적으로 미세 균열 및 편리가 포함된, 즉 상대적으로 강도가 취약한 암석시험편에 대한 수치해석적 연구는 3차원 입자결합모델이 용이할 것으로 사료된다.

본 연구에서의 암석시험편 모델은 구성입자의 크기와 입자의 배열을 단순화시켜 균질한 암석으로 표현하였기 때문에 다양한 입자크기와 복잡한 배열을 갖는 실제 암석시험편의 파쇄 양상과는 차이가 있을 것으로 사료

된다. 향후 시험 대상지역의 암석과 유사하게 암석시험편 모델을 구성하고 실제 선형절삭시험의 결과와 비교 분석 한다면, 보다 현실성 있는 선형절삭시험을 모사할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Chang, S. H., Choi, S. W., Bae, G. J. and Jeon, S. W., 2007, A parametric study of rock properties and mechanical cutting conditions for deriving an optimum design model of a TBM cutterhead equipped with disc cutters, Journal of Korean Society of Civil Engineers, 27, 1C, 87-98.
2. Cho, J. W., 2010, Linear cutting test and numerical study on the assessment of rock cuttability of a TBM disc cutter, Doctor's thesis of Seoul National University.
3. Cho, J. W., Yu, S. H., Jeon, S. W. and Chang, S. H., 2008, Numerical study on rock fragmentation by TBM disc cutter, Tunnelling Technology, 10, 2, 139-152.
4. Itasca, 2004, PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) Theory and Background 5, 4-9.
5. Jeong, H. Y., Jeon, S. W., Cho, J. W., Chang, S. H. and Bae G. J., 2011, Assessment of cutting performance of a TBM disc cutter for anisotropic rock by linear cutting test, Tunnel and Underground Space, 21, 6, 508-517.
6. Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2005, Technical advisory final report for shield tunnel excavation of Busan subway 230 area, 176-202.
7. KSRM, 2005, Numerical analysis of rock mechanics, Gunsulbook, 239-243.
8. MLTM, 2007, Development of optimized excavation model for mechanized construction of rapidly tunnel, Reserch report, 168-213.
9. 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.
10. Park, K. I., Chang, S. H., Choi, S. W. and Jeon, S. W., 2006, Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in Korean granite by the linear cutting test, Proc. of KSRM Conf., 217-236.
11. Yu, S. H., 2007, A study on rock cutting behavior by TBM disc cutter, Master's thesis of Seoul National University.

이 승 중

2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253

E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 박사과정

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 에너지·자원공학과 교수