

TBM 커터 관입에 의한 암석 파쇄의 수치해석적 연구

백승한¹⁾, 문현구^{2)*}

A Numerical Study on the Rock Fragmentation by TBM Cutter Penetration

Seung Han Baek and Hyun Koo Moon

Abstract Rock fragmentation technique by cutter penetration has widely been used in the mechanical tunnel excavation. Microcracks propagate and interact because of locally concentrated high stress induced by cutter penetration, which is caused by heterogeneity of rocks. In this study Weibull distribution function and degradation index are used to consider the strength heterogeneity of a rock and the degradation of rock properties after failure. Through the numerical analyses, it is shown that the lateral pressure has an important influence on the rock fragmentation. In the single cutter penetration, large chips are formed as lateral pressure increase. The cutter spacing is also an important factor that affects the rock fragmentation in the double cutter penetration. The fragmentation efficiency of the double cutter penetration is better when cutter spacing is 70 mm than 40 mm and 100 mm. From the results, it is expected that this study can be applied to a TBM tunnel design by understanding of chipping process and mechanism of rock due to cutter penetration.

KeyWords Cutter penetration, Rock fragmentation, Heterogeneity, Weibull distribution, Degradation index, Lateral pressure, Cutter spacing

초 록 최근 TBM 등의 기계식 터널 굴착에 널리 사용되는 커터 디스크 관입에 의한 암석 파쇄 기술은 커터 디스크 관입에 따라 국부적으로 높은 응력이 발생하고 미소균열이 생성 및 전파되는 과정이며, 이러한 현상은 암석의 불균질성에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 수치해석적으로 TBM에 의한 파괴 메커니즘을 규명하기 위하여, Weibull 분포함수를 이용하여 암석의 불균질 강도 물성을 고려하였으며, 파괴후 물성 저하를 고려하기 위하여 저감지수를 도입하였다. 본 연구결과로부터 단일 커터 디스크 관입시 측압이 매우 중요한 영향을 미치며, 측압이 작을수록 관입에 저항하는 강도는 약하여 커터 디스크와 접촉하는 면과 수직인 방향으로 파괴가 잘 발생하고 측압이 클수록 암석 표면을 따라 chipping 현상이 잘 나타났다. 또한 두 개의 커터 디스크가 작용하는 경우 파괴영역이 전파되고 상호 연합되어 최종적으로 파괴가 발생하는데, 커터 디스크 간격이 70 mm인 경우가 40 mm와 100 mm인 경우 비해 좋은 파쇄효율을 나타내었다. 이상의 결과로부터 커터 디스크 관입에 의한 암석의 chipping 과정 및 메커니즘의 이해와 TBM 터널 설계를 위한 다양한 검토를 해석적 기법으로서 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 커터 디스크 관입, 암석 파쇄, 불균질성, Weibull 분포, 저감지수, 측압, 커터간격

1. 서 론

커터 디스크 관입에 의한 암반 굴착 기술은 효과적인 암석 파쇄 기술중 하나로서 채광뿐만 아니라 TBM 등의 기계식 터널굴착 등에 널리 사용되고 있다. TBM에 의한 기계식 터널굴착은 미시적으로 굴착 과정동안의 암석과 커터 디스크의 상호작용으로 인한 암석의 파쇄

과정과 거시적 관점에서의 굴착 대상 암반과 TBM 사이의 상호작용으로 구분할 수 있으며, 이러한 두 요소는 매우 중요한 의미를 가진다(Moon, 2001). 미시적 관점에서 볼 때, 커터 디스크 관입에 의해 암석내 국부적으로 높은 응력이 발생하며, 이로 인해 미소균열이 생성, 전파, 연합되고 최종적으로 암석 파편이 형성되어 파괴된다. 이러한 현상은 암석의 불균질성에 의한 인장응력의 국부적 집중에 기인한다(Whittaker et al., 1992; Blair and Cook, 1998; Liu et al., 2002). 또한 이러한 암석내 균열의 생성과 성장은 비가역적이고 에너지가 누적되는 과정이므로 균열이 발생함에 따라 암석의 탄성계수는 점진적으로 감소한다(Fang and Harrison,

¹⁾ 한양대학교 대학원 지구환경시스템공학과 박사과정

²⁾ 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과 교수

*교신저자(Corresponding Author): hkmooon@hanyang.ac.kr

접수일: 2003년 10월 10일

심사 완료일: 2003년 12월 2일

2001). 그러므로 암석의 chipping 과정을 모사하기 위해서는 암석의 불균질성과 파괴후 물성의 감소를 고려하여 분석하여야 한다. 본 연구에서는 암석의 불균질성과 파괴후 암석의 물성 감소를 고려한 수치해석을 통하여 커터 디스크 관입에 의한 암석의 chipping 과정 및 메카니즘을 분석하였으며, 커터 디스크 관입에 의한 암석 chipping 현상에 대한 축압(봉압) 및 커터 디스크의 간격 등의 영향을 분석하였다.

2. 문헌 연구

암반내 커터 디스크의 관입은 이론적으로 반무한면에 집중선하중의 작용으로 단순화할 수 있으며, 이 경우 Boussinesq 이론으로부터 암반내 반경방향 응력은 응력함수를 이용하고 경계조건을 적용함으로써 그리고 반경방향 및 접선방향 변위는 이미 결정된 응력분포와 응력-변형률 관계로부터 다음과 같이 유도할 수 있다 (Timoshenko and Goodier, 1982).

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \frac{\cos \theta}{r} \quad (1)$$

$$u = -\frac{2P}{\pi E} \cos \theta \log r - \frac{(1-\nu)P}{\pi E} \theta \sin \theta$$

$$v = \frac{2\nu P}{\pi E} \sin \theta + \frac{2P}{\pi E} \log r \sin \theta - \frac{(1-\nu)P}{\pi E} \theta \cos \theta + \frac{(1-\nu)P}{\pi E} \sin \theta \quad (2)$$

여기서 P 는 적용하중, θ 는 수직축(x축)으로부터의 각도, ν 는 포아송비, E 는 영률 그리고 r 은 원점으로부터의 거리를 나타낸다.

Boussinesq 이론식에 의한 응력 분포는 하중 작용점 근처에서 매우 큰 응력이 발생하고 작용점으로부터 멀어질수록 급격히 응력이 감소한다. 그러나 식 (1)과 (2)에서 볼 수 있듯이 Boussinesq 이론식은 다층 지반 및 불균질 지반의 특성을 고려할 수 없고 탄성조건에 한정된다.

TBM 등의 기계식 굴착공법의 경우 암반 굴착에 요구되는 커터 디스크의 수를 최소화하고 커터 디스크가 관입할 수 있는 충분한 추력을 결정하는 것이 중요하다. 또한 TBM 등을 이용한 기계식 굴착공법은 관입깊이와 관입을 등에 의해 굴진율이 결정되므로 추력과 관입깊이의 관계 및 관입깊이에 따른 암석 chipping 현상이 매우 중요하다. 따라서 커터 디스크 관입에 따른 암석의 파쇄는 작용력-관입깊이 관계에 초점을 맞추어 연구되어 왔다.

Roxborough와 Phillips(1975)는 추력은 커터 디스크

와 암석의 접촉면적과 암석의 압축강도의 곱과 동일하다고 가정하여 관입깊이, 썰기각도, 커터 디스크 직경 그리고 커터 디스크 간격 등으로부터 최적의 커터 디스크 추력을 다음과 같이 계산하였다.

$$F_T = 4 \sigma_c \tan \frac{\omega}{2} d^{1/2} p_e^{3/2} \quad (3)$$

여기서, σ_c 는 암석의 압축강도, ω 는 썰기각도, d 는 커터 디스크 직경 그리고 p_e 는 커터 디스크의 관입깊이이며, 식 (3)에서와 같이 커터 디스크 추력은 암석의 압축강도, 관입깊이, 커터 디스크 직경 그리고 커터 디스크 썰기각도에 대해 비례관계를 보인다(Deliac, 1989).

Snowdon 등(1982)은 암석 종류에 따라 최적의 커터 디스크 간격과 관입깊이의 비 S/p_e 를 결정하는 연구를 수행한 결과 최적의 S/p_e 가 10~15 정도로 나타났다. 또한 암석 강도에 대한 가장 효과적인 S/p_e 를 압축강도가 25 MPa 이하인 암석에서는 $S/p_e = 3$, 압축강도가 25 MPa 이상이고 100 MPa 이하인 암석에서는 $S/p_e = 5 \sim 10$ 그리고 압축강도가 100 MPa 이상인 암석에서는 $S/p_e = 10 \sim 15$ 로 정리하였다. 따라서 커터 디스크 간격을 동일하게 했을 경우 압축강도가 증가할수록 커터 디스크의 관입깊이는 감소함을 알 수 있다.

Sanio(1985)는 커터 디스크 관입에 따른 암석 chipping 현상이 인장파괴에 의해 발생한다고 가정하고 파괴역학 이론을 응용하여 커터 디스크의 추력을 다음과 같이 결정하였다.

$$F_T = C_k \sqrt{d p_e S} \tan \frac{\omega}{2} \quad (4)$$

여기서, C_k 는 임계응력확대계수(critical stress intensity factor)로부터 결정되는 상수이며, S 는 커터 디스크의 간격이다. 또한 불연속면의 주향과 추력의 방향이 일치할 경우 커터 디스크의 진행방향에 따른 불연속면에 의한 이방성 영향을 분석한 결과로는 불연속면에 수직하게 진행할 때보다 평행하게 진행할 때 커터 디스크가 쉽게 관입되며, 커터 디스크가 불연속면에 수직하게 관입되는 경우에 비해 추력의 방향에 일정한 경사를 가진 경우가 큰 추력을 필요로 함을 알 수 있다.

Fowell(1989)은 커터 디스크 관입에 의한 굴착에 영향을 주는 변수로 관입깊이, 썰기각도, 커터 디스크의 직경 및 간격 등을 언급하였다. 일반적으로 추력은 회전력의 10배 정도이고 관입깊이를 증가시키기 위해서는 추력을 증가시켜야 하며, 썰기각도와 커터 디스크 직경이 증가하면 추력은 증가한다. 또한 커터 디스크 간격은 굴착에 영향을 주는 가장 중요한 요소중 하나이

며, 커터 디스크 간격에 대한 관입깊이의 비가 1/10 ~ 1/17일 경우 최적의 커터 디스크 간격이라고 제안하였다.

이상의 연구는 굴착 대상 암반 조건에 따른 커터 디스크 추력의 결정 및 기본적인 파괴 메카니즘 등에 관한 연구이며, 커터 디스크 관입에 의해 발생하는 암석의 chipping 과정을 모사한 연구라고 할 수 없다.

3. 전산 해석 모델링

일반적으로 암석은 내부에 무수히 많은 미소균열을 포함한 불균질한 물질이며, 또한 균질 연속체 모델은 커터 디스크 관입에 의한 chipping 과정을 모사할 수 없으므로 좀 더 복잡한 거동을 고려해야 한다(Tang et al., 2000, Fang and Harrison, 2002). 본 연구에서는 다음과 같은 Weibull 분포함수 $p(x)$ 를 이용하여 암석의 불균질한 물성을 고려하였다.

$$p(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x - x_L}{x_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x - x_L}{x_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

for $x \geq x_L \geq 0$

여기서 m 은 분산(scatter) 정도를 나타내는 형상계수이고 x_0 는 요소인자의 평균값 그리고 x_L 는 요소인자의 최소값이다.

Fig. 1은 식 (5)를 이용하여 x_L 이 0이고 x_0 이 1일 경우 1에서 4까지의 다양한 형상계수에 대한 x 의 분포를 나타낸다. Weibull 분포함수는 형상계수에 따라 다양하게 나타난다. 예를 들어 m 이 1일 때 음지수 분포함수가 되며, m 이 클수록 정규분포와 유사하고 보다 균질한 물성을 의미한다.

봉압은 암석의 chipping 메카니즘과 물성 저하에 영

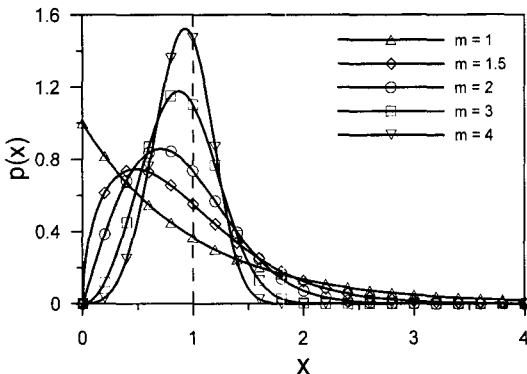


Fig. 1. The Weibull distribution: function for various values of shape parameter

향을 주는 가장 중요한 요소중 하나이다. 여러 봉압조건에 대하여 균열이 발생함에 따라 암석은 비선형 응력-변형률 거동을 보이며, 강도는 감소한다. 특히 일축 압축하에서 암석은 주로 취성 거동과 강도의 최대 저하를 나타낸다(Brady and Brown, 1992). 또한 응력-변형률 관계에서 나타나는 변형률 연화거동을 취성과 연성 부분으로 구분할 수 있다. Fang과 Harrison(2001)은 취성 부분은 미소균열 과정이고 소성 변형률은 발생하지 않으며, 강성과 강도의 저하만 일어나는 반면에 연성 부분은 소성 변형률은 발생하나 강도에는 영향을 미치지 못한다고 가정하였다. 따라서 균열에 의한 암석의 저감지수(degradation index, r_d)를 Fig. 2를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$r_d = \frac{\sigma - \sigma_d}{\sigma - \sigma_{dh}} = \frac{\delta \sigma}{\delta \sigma_h} \quad (6)$$

여기서 σ_c 는 일축압축강도이며, Fig. 2에서 강도 저하 $\sigma_c - \sigma_{du} = \delta \sigma_u$ 는 일축상태에서의 강도저하를 나타낸다. 일반적인 경우 저하된 응력-변형률 관계는 Fig. 2의 가상의 저하(hypothetical degradation)로 표현된 곡선으로 나타나며, σ_{dh} 는 저하된 강도를 나타낸다. 일반적인 삼축압축상태에서의 파괴후 저하된 강도는 σ_d 이며, 그러므로 저감지수는 일반적인 강도 저하 $\delta \sigma$ 와 가상의 강도 저하 $\delta \sigma_h$ 의 비로 표현된다. 저감지수는 봉압에 영향을 받고 0부터 1까지의 범위를 가지며, 이를 통해 일축상태의 취성거동과 유사-취성거동 그리고 높은 봉압조건에서의 연성거동을 나타낼 수 있다. 저감지수는 강성 및 강도저하가 없으면 0이며, 완전 저하가 발생하면 1이 된다.

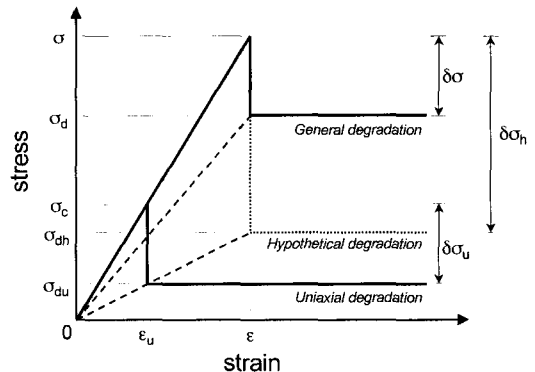


Fig. 2. Illustration of the definition of the degradation index (Fang and Harrison, 2001)

Fang과 Harrison(2001)은 실험자료로부터 저감지수와 붕압의 관계를 다음과 같이 간단한 형태로 제시하였다.

$$r_d = \exp(-n_d \sigma_3) \quad (7)$$

여기서 σ_3 는 최소주응력이며, n_d 는 형상을 나타내는 계수이다. 식 (7)을 이용하기 위해서는 n_d 가 필요하며, 암석 시편에 대한 일축 및 삼축압축실험으로부터 결정된 최대강도 및 잔류강도를 회귀분석하여 n_d 를 결정할 수 있다(Fang and Harrison, 2001).

본 연구에서는 커터 디스크 관입에 의한 암석 chipping 과정을 분석하기 위하여 불균질한 물성과 파괴후 강도 저하를 고려하였으며, 단일 커터 디스크에 의한 관입은 Fig. 3(a)와 같이 (200 mm×100 mm) 모델과 두 개의

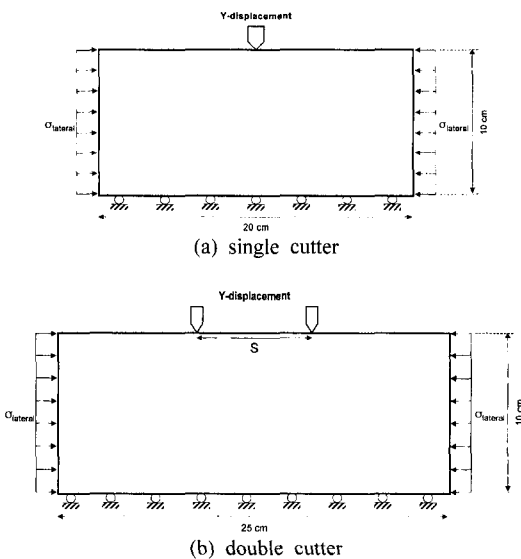


Fig. 3. Numerical simulation model

Table 1. Material properties used in numerical analyses

Young's modulus, E	40 GPa
Poisson's ratio, ν	0.25
Uniaxial compressive strength, C_0	$x_0 = 200$ MPa $x_L = 50$ MPa $m = 2$
Reciprocal of brittleness ratio, $\frac{T_0}{C_0}$	$x_0 = 0.05$ $x_L = 0$ $m = 2$
Internal friction angle, ϕ	35°
Uniaxial degradatin in strength, $\delta \sigma_{cu}$	90%
Degradation parameter, n_d	0.05

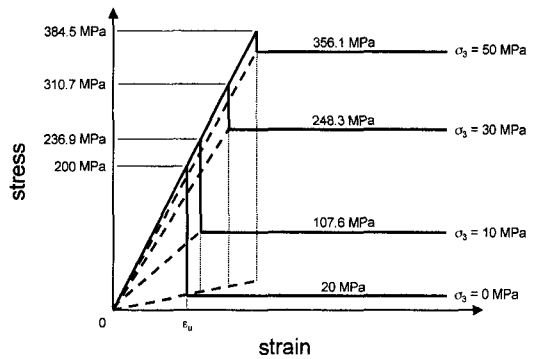


Fig. 4. The stress-strain relations used for numerical analyses

커터 디스크에 의한 관입은 Fig. 3(b)와 같이 (250 mm × 100 mm) 모델을 설정하였다. 전산해석은 FLAC (Itasca, 1995)을 이용하여 수행하였으며, 암반 물성은 Table 1과 같이 탄성계수 40 GPa과 포아송비 0.25, 일축압축강도 200 MPa와 취성을 20 그리고 내부마찰각 35°를 사용하였다.

본 해석에서는 Weibull 분포에 따라 형상계수 $m=2$ 를 사용하여 압축강도와 인장강도를 불균질하게 적용하였으며, 파괴여부는 cut-off Mohr-Coulomb 파괴 기준식 (Sheorey, 1997)을 사용하였다. 커터 디스크의 관입깊이는 0.005 mm/step을 적용하고 양 측면은 축압을 가하여 전산해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 축압 $\sigma_{lateral} = 10$ MPa, 30 MPa, 50 MPa과 Table 1의 값을 이용하여 저감지수를 적용한 경우 암석 모델의 응력-변형률 관계는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서와 같이 축압이 0인 단축압축 상태는 저감지수가 1이며, 압축강도가 200 MPa에서 파괴후 20 MPa로 감소하였다. 축압이 10 MPa의 경우는 저감지수가 약 0.607로서 압축강도가 236.9 MPa에서 파괴후 107.6 MPa로 감소하고 축압이 30 MPa의 경우는 저감지수가 약 0.223으로 압축강도가 310.7 MPa에서 파괴후 248.3 MPa로 감소하며, 축압이 50 MPa인 경우는 저감지수가 약 0.082로 압축강도가 384.5 MPa에서 356.1 MPa로 감소하였다.

4. 결과 분석

4.1 단일 커터 디스크 적용시 축압과 chipping mechanism과의 관계

Fig. 5는 10 MPa의 축압을 적용하였을 경우 chipping 과정으로서 커터 디스크 작용점 양 모서리 부분부터 파

과가 시작되고 단계가 진행될수록 커터 디스크 아래부분 역시 파괴가 발생함을 알 수 있다. 파괴 형상은 Weibull 분포로 발생시킨 암석의 불균질한 물성 분포 때문에 완전한 좌우 대칭을 나타내지 않고 있으며, 10 MPa의 축압 조건에서는 표면을 따라 파괴영역이 좌우로 잘 전파되지 못함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 축압이 30 MPa일 때 파괴영역을 나타낸다. 이 때, Fig. 5의 경우와 같이 커터 디스크의 양끝에서 먼저 파괴가 발생하며, Fig. 5에 비해 인장응력에 의해 발생하는 chipping 현상이 비교적 잘 나타난다. 또한 처음에는 오른쪽보다 왼쪽으로의 파괴 진행이 빠르게 나

타고 후에 서로 비슷한 파괴진행을 보여 Weibull 분포에 따른 불균질 물성의 영향이 반영되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 축압이 50 MPa일 경우의 커터 디스크 관입에 의한 암석 파괴 과정으로 Fig. 5와 Fig. 6에 비해 파괴영역이 넓게 분포하였다. 큰 축압과 커터 디스크 관입에 의해 커터 디스크 양끝으로부터는 인장파괴가 시작되고 커터 디스크의 바로 아래 부분은 전단파괴가 발생하였다. 또한 커터 디스크의 왼쪽 부분의 파괴가 조금 더 빨리 진행되고 단계가 진행될수록 점점 파괴영역이 증가하여 인장응력에 의한 chipping 현상을 제대로

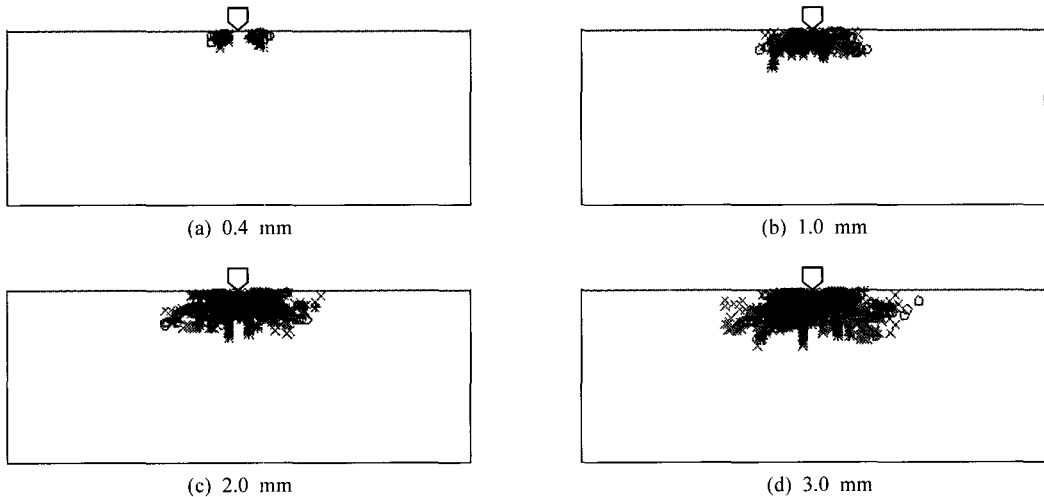


Fig. 5. Failure area in case of confining stress 10 MPa

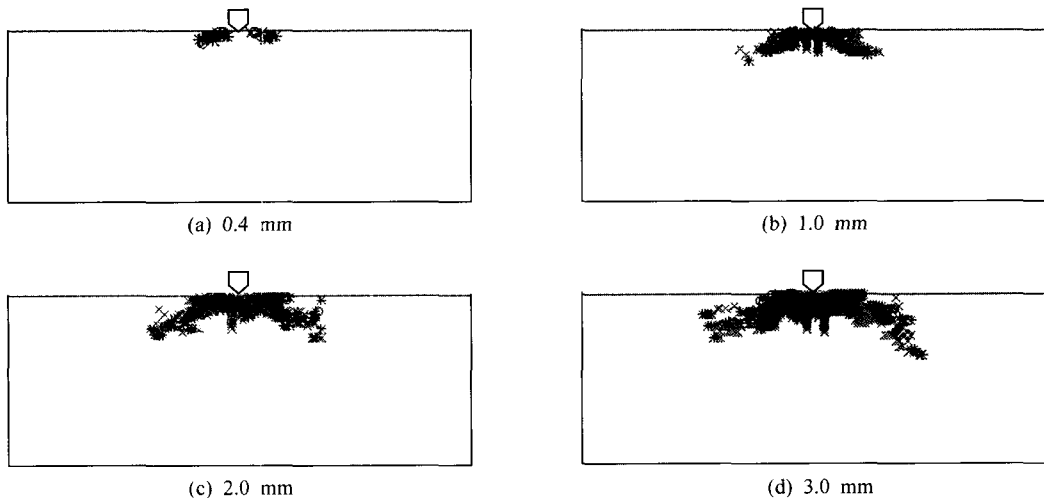


Fig. 6. Failure area in case of confining stress 30 MPa

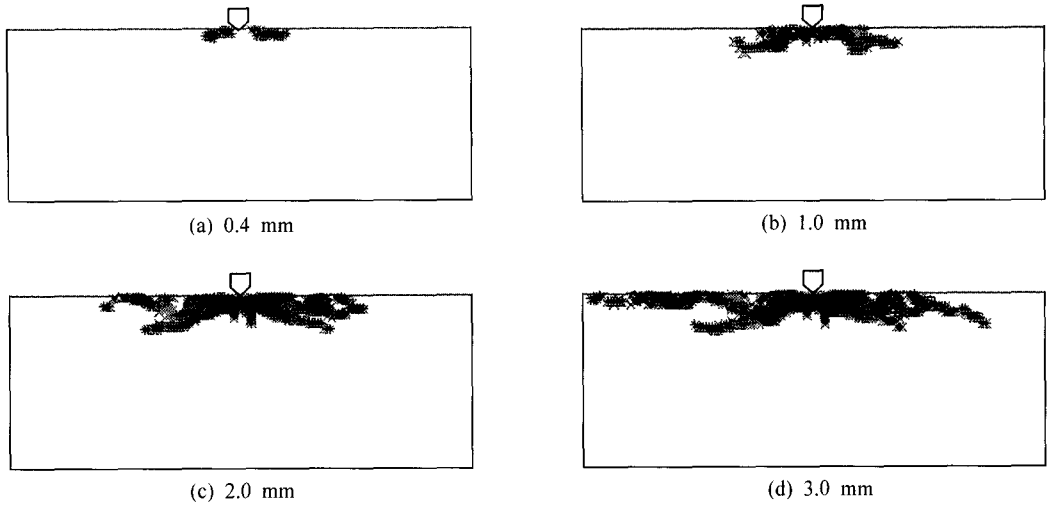


Fig. 7. Failure area in case of confining stress 50 MPa

관찰할 수 있다.

Fig. 8은 커터 디스크 관입에 따른 수평방향 최대 파괴영역을 나타내며, 이는 chipping이 발생할 수 있는 최대 크기를 의미한다. 축압이 10 MPa, 30 MPa, 50 MPa로 증가함에 따라 수평방향 최대 파괴영역은 1 mm 관입시 약 3.8 cm, 4.9 cm, 5.8 cm로 증가하고, 2 mm 관입시 5.5 cm, 6.0 cm, 9.1 cm 그리고 3 mm 관입시 6.82 cm, 7.7 cm, 13.8 cm로 증가하였다.

Fig. 9는 커터 디스크 관입에 따른 수직방향 최대 파괴영역을 나타내며, 축압이 증가할수록 감소하였다. 축압이 10 MPa, 30 MPa, 50 MPa로 증가함에 따라 수직방향 최대 파괴영역은 1 mm 관입시 약 1.3 cm, 0.8 cm, 0.5 cm로 감소하고, 2 mm 관입시 1.6 cm, 1.2 cm, 1.0 cm 그리고 3 mm 관입시 1.9 cm, 1.4 cm, 1.1 cm로 감소하였다.

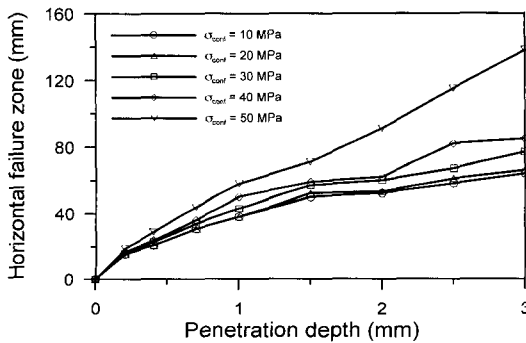


Fig. 8. Horizontal failure zone for single cutter penetration

상기의 결과를 종합하면, 축압이 증가함에 따라 커터 디스크 관입에 의해 형성되는 암석의 파편이 크며, 커터 디스크 주변으로부터 시작되는 파괴영역은 인장응력에 의해 일정하지 않은 곡선 형상으로 전파되고 최종적으로 암석의 표면과 연결되어 암석 파편을 형성하게 된다. 따라서 암석의 chipping 메카니즘은 주로 인장파괴와 관련이 깊은 것으로 판단된다.

4.2 이중 커터 디스크 적용시 커터 디스크 간격의 영향

축압조건이 30 MPa일 경우 커터 디스크 간격의 영향을 살펴보기 위하여 S = 40 mm, 70 mm, 100 mm의 경우 파괴 양상을 Fig. 10~12에 나타내었다. Fig. 10은 커터 디스크 간격이 40 mm인 경우로서 (a)의 단계에서 커터 디스크 사이 암석의 파괴가 연결되고 그 후 암석 표면을 따라 좌우로 파괴영역이 잘 전파되지 못하고 좌

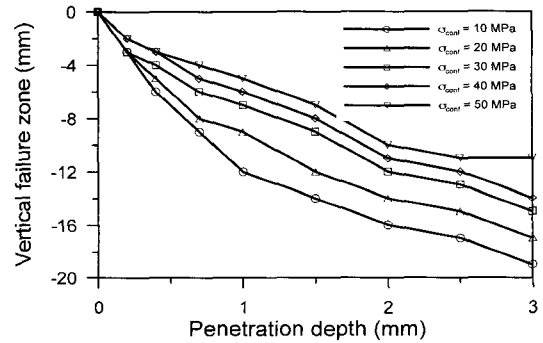


Fig. 9. Vertical failure zone for single cutter penetration

우 커터 디스크로부터의 파괴영역이 너무 빨리 연합되는 경향을 보인다. 그러나 커터 디스크의 간격이 70 mm인 Fig. 11에서는 좌우 커터 디스크의 양끝에서의 인장파괴 및 커터 디스크 아래의 일부 전단파괴가 발생하며, 단계가 진행됨에 따라 좌우 커터 디스크에서 시작된 파괴영역이 만나고 커터 디스크 사이의 탄성영역으로 표현되는 암석부분 역시 커터 디스크 사이 파괴영역의 연합으로 chipping이 발생하게 된다. 반면에 커터 디스크 간격이 100 mm인 Fig. 12는 커터 디스크 작용점으로부터 파괴가 시작되어 좌우 및 하부로 파괴영역이 전파되지만 커터 디스크 간격이 너무 넓으므로 파괴영역이 서로 연결되지 못하고 커터 디스크 사이 암석

부분이 탄성영역으로 남아 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우 커터 디스크 사이 파괴영역의 연결을 위해서는 매우 큰 커터 추력이 지속적으로 작용해야 함으로 적절하지 못하다고 판단된다.

관입깊이에 따른 파괴영역은 커터 디스크 간격이 70 mm일 경우가 가장 넓게 나타났다. 1.5 mm 관입할 때 까지는 커터 디스크 간격의 영향이 거의 없으나 커터 디스크 간격이 70 mm인 경우 좌우 커터 디스크로부터 발생한 파괴영역이 확대되어 서로 연결되므로 2 mm 관입시부터 그 차이가 조금씩 크게 나타나고 있다. 따라서 커터 디스크 간격에 따른 좌우 파괴영역의 연합과정이 암석 파괴에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 반

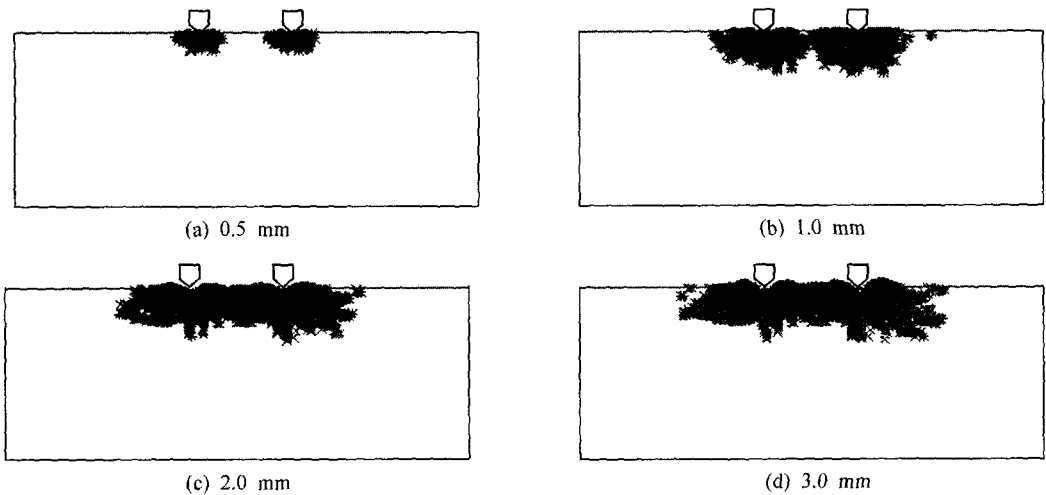


Fig. 10. Failure zone in the case of cutter spacing 40 mm

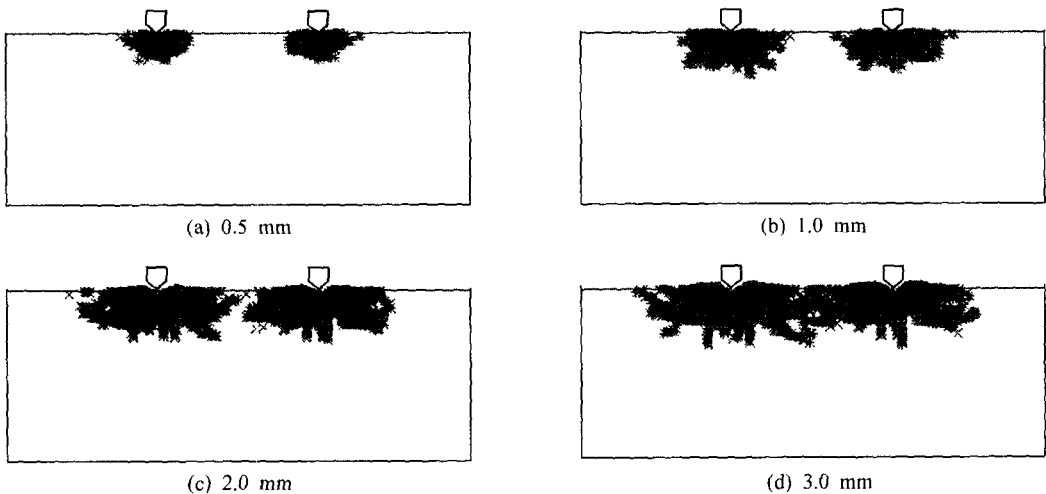


Fig. 11. Failure zone in the case of cutter spacing 70 mm

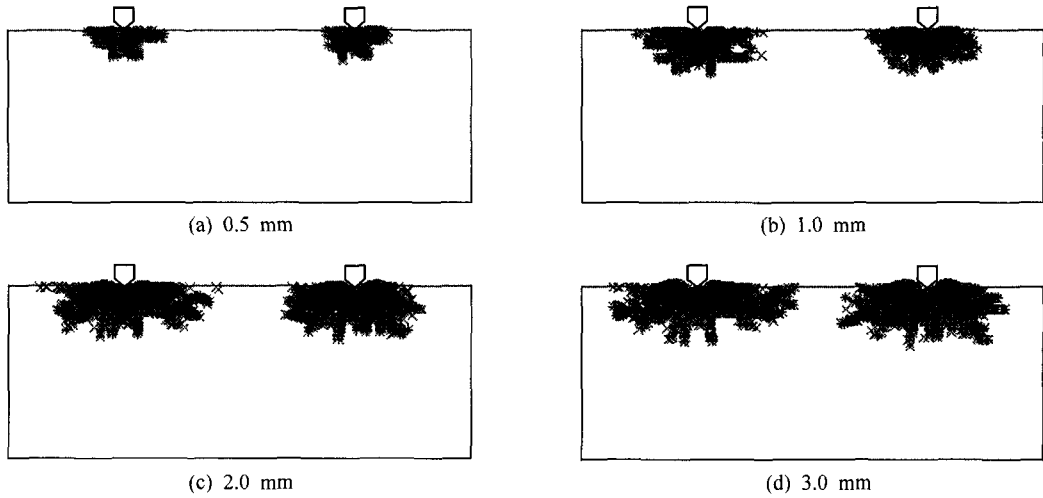


Fig. 12. Failure zone in the case of cutter spacing 100 mm

면에 수직방향 최대 파괴영역은 커터 간격에 거의 영향을 받지 않았다. 수평방향 파괴영역은 커터 간격 40 mm인 경우 1 mm, 2 mm, 3 mm 관입시 9.3 cm, 10.5 cm, 11.5 cm로 증가하고, 커터 디스크 간격 70 mm인 경우 2 mm, 2.5 mm, 3 mm 관입시 14 cm, 14.3 cm, 14.8 cm로 증가하였으며, 커터 디스크 간격 100 mm인 경우는 좌우 커터 디스크로부터 발생된 파괴영역의 연합이 이루어지지 않았다.

4.3 이중 커터 디스크 적용시 순차적 커터 관입의 영향
순차적 커터 디스크 관입에 의한 암석 chipping 과정을

분석하기 위하여 좌우 측면에서의 축압은 30 MPa를 적용하였으며, 커터 디스크의 관입깊이는 0.005 mm/step을 적용하여 좌측 커터 디스크 2 mm 관입후 우측 커터 디스크를 2 mm 관입하였다.

Fig. 13은 커터 간격이 40 mm일 때 순차적 커터 디스크 관입에 의한 파괴영역으로 좌측 커터 디스크가 먼저 관입되어 커터 디스크 양쪽으로 파괴영역이 발생하였으며, 커터 디스크 사이의 간격이 가까우므로 우측 커터 디스크가 관입되자 바로 파괴영역이 연결됨을 볼 수 있다. 이 경우 순차적 커터 디스크 관입에 의해 chipping이 너무 빨리 발생하므로 바람직하지 못함을

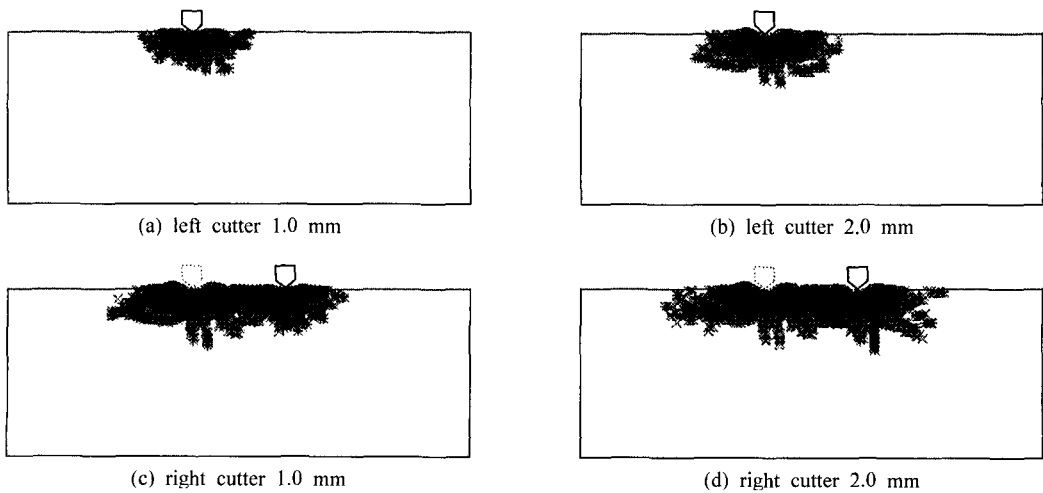


Fig. 13. Failure zone in the case of sequential penetration with cutter spacing 40 mm

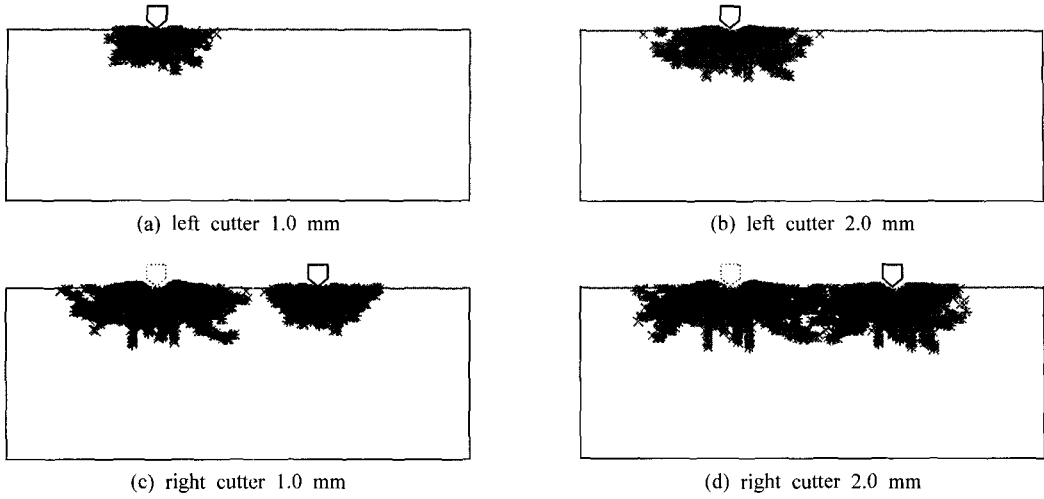


Fig. 14. Failure zone in the case of sequential penetration with cutter spacing 70 mm

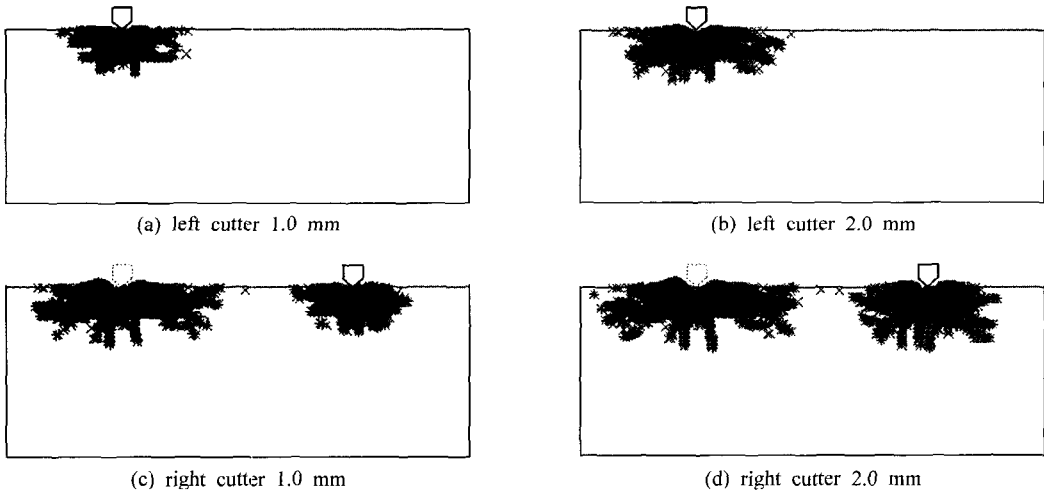


Fig. 15. Failure zone in the case of sequential penetration with cutter spacing 100 mm

알 수 있다.

Fig. 14는 커터 디스크 간격이 70 mm일 경우 순차적 커터 디스크 관입에 의한 파괴영역으로서, 좌측 커터 디스크가 관입후 우측 커터 디스크 관입에 따라 좌측 커터 디스크 주변의 파괴 영역도 진전됨을 볼 수 있다. 이 경우 우측 커터 디스크가 1.5 mm~2 mm 정도 관입되어야 좌우 커터 디스크 사이의 파괴영역이 충분히 연결되어 chipping이 발생하였다. 따라서 본 해석에서는 커터 디스크 간격이 70 mm일 경우 가장 우수한 암석의 chipping 현상을 볼 수 있었다.

커터 디스크 간격이 100 mm 일 때 순차적 커터 디스

크 관입에 따른 파괴영역을 나타낸 Fig. 15에서는 우측 커터 디스크가 관입됨에 따라 우측뿐만 아니라 좌측 부분에도 파괴 영역이 증가하나 우측 커터 디스크가 2 mm 관입한 최종 단계에서도 chipping 현상은 발생하지 않았다. 이러한 결과는 커터 디스크에 의해 충분한 굴진이 이루어지지 않으므로 부적절한 커터 디스크 간격이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 커터 디스크 관입에 의한 암석 파괴

메카니즘을 알아보기 위해 Weibull 분포에 따른 암석 물성 및 파괴후 암석 강도의 저감지수를 사용하여 전산 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 요약하면 다음과 같다.

암석의 불균질 물성을 고려하기 위하여 형상계수 $m=2$ 를 사용하여 Weibull 분포에 의해 압축강도와 인장강도를 결정하였다. 또한 파괴후 암석의 강도 저하는 저감지수로 표현이 가능하며, 최소주응력이 증가함에 따라 파괴후 강도저하는 감소하였다.

단일 커터 디스크 관입시 축압이 작을수록 커터 디스크와 접촉하는 면과 수직인 방향으로 높은 응력이 집중하여 전단파괴가 발생하고 좌우로 chipping 현상이 잘 나타나지 않으며, 반면에 축압이 클수록 커터 디스크 접촉 하부의 전단파괴보다는 커터 디스크와 접촉하는 암석 좌우 방향의 인장파괴 영역이 많이 나타남을 알 수 있다. 주로 이러한 인장응력에 의해 암석의 chipping 현상이 나타나게 되고, 실제 TBM 등의 기계식 터널굴착에 있어 굴착에 따른 응력 조건이 매우 중요한 요소로 판단된다.

이중 커터 디스크를 동시에 관입할 경우 커터 디스크 간격이 40 mm인 경우는 좌우 커터 디스크로부터의 파괴영역이 너무 빨리 연결되는 경향을 보이며, 커터 디스크 간격이 100 mm인 경우는 커터 디스크 간격이 너무 넓어 파괴영역이 서로 연결되지 못함을 볼 수 있다. 커터 디스크 간격이 70 mm인 경우는 커터 디스크가 2 mm 정도 관입되었을 때 좌우 커터 디스크에서 시작된 파괴영역이 만나므로 40 mm와 100 mm의 경우에 비해 적절한 chipping이 이루어졌다.

순차적 커터 디스크 관입에 의한 암석의 파괴도 역시 커터 디스크의 간격에 영향을 많이 받으며, 커터 디스크 간격이 70 mm일 경우가 40 mm와 100 mm의 경우보다 암석의 chipping 정도가 우수하게 나타났다. 따라서 커터 디스크 관입에 의한 chipping 과정에 있어 커터 간격의 영향이 매우 크므로 TBM 터널 설계시 반드시 고려되어야 할 중요한 설계변수로 사료된다.

본 연구를 통하여 커터 디스크 관입에 의한 암석의 chipping 과정 및 메카니즘 그리고 축압 및 커터 간격의 영향을 이해함으로써 TBM 터널 설계 등의 적용에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- Blair, S.C. and Cook, N.G.W., 1998, Analysis of Compressive Fracture in Rock Using Statistical Techniques: Part I. A Non-linear Rule-based Model, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 35.7, 837-848.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T., 1992, *Rock Mechanics for Underground Mining*, 2nd ed., London: Chapman & Hall, p.571.
- Deliac, E.P., 1993, Theoretical and Practical Rules for Mechanical Rock Excavation, in *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*, 4-I, Ed. J.A. Hudson, Pergamon Press, 177-227.
- Fang, Z. and Harrison, J.P., 2001, A mechanical degradation index for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 38, 1193-1199.
- Fang, Z. and Harrison, J.P., 2002, Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in homogeneous rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 39, 443-457.
- Fowell, R.J., 1993, The Mechanics of Rock Cutting, in *Comprehensive Rock Engineering: Principales, Practice & Projects*, 4-I, Ed. J.A. Hudson, Pergamon Press, 155-176.
- Itasca, 1995, *Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 3.3, Minnesota.
- Liu, H.Y., Kou, S.Q., Lindqvist, P.-A. and Tang, C.A., 2002, Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 39, 491-505.
- Moon, H.K., 2001, A Comparative Study on Five Assessment Systems of TBM Tunnelling, *Geosystem Engineering*, 4(2), 61-69.
- Roxborough, F.F. and Phillips, H.R., 1975, Rock Excavation by Disc Cutter, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 12, 361-366.
- Sanio, H.P., 1985, Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 22.2, 153-161.
- Sheorey, P.R., 1997, *Empirical rock failure criteria*, Rotterdam: Balkema, p. 176.
- Snowdon, R.A., Ryley, M.D. and Temporal, J., 1982, A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, 107-121.
- Tang, C.A., Liu, H., Lee, P.K.K., Tsui, Y. and Tham, L.G., 2000, Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression - Part I: effects of heterogeneity, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 37, 555-569.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., 1982, *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, p. 567.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N. and Sun, G., 1992, *Rock Fracture Mechannics*, Amsterdam: Elsevier, p. 520.



백승한

1996년 한양대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1998년 한양대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 02-2299-3012
E-mail: shbaek@hrg.hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 지구환경시스템공학과
박사과정



문헌구

1974년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1983년 Univ. of Utah 암석역학
공학석사
1987년 Univ. of Utah 암석역학
공학박사

Tel: 02-2290-0413
E-mail: hkmoon@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 지구환경시스템공학과
교수