

파괴역학과 굴착과 발파로 인한 암반 손상영역의 문헌적 고찰

양형식^{1)*}, 하태욱, 김원범, 정주환²⁾

Literature Review of Fracture Mechanics and Blasting and Excavation Damaged Zone

Yang H.S., Ha T.W., Kim W.B. and Jung J.H.

Abstract Literatures on the fracture mechanics and damaged zone of rocks were studied to estimate the excavation and blasting damaged zone for rapid tunneling. Fracture mechanics were applied to explain fracture mechanism and to estimate damaged zone and seemed to be applicable for controlling the fractures.

Key Words Damaged zone, Fracture mechanics, Excavation, Blasting, Rapid tunnelling

초 록 터널의 고속굴진을 위한 굴착 및 발파 손상영역을 평가하기 위하여 암반에 대한 파괴역학적 연구 결과들을 조사하고 고찰하였다. 파괴역학을 이용하여 균열의 발생 기구를 확립하고 손상영역을 평가하며 나아가서 균열을 효과적으로 제어하기 위한 시도들이 이루어지고 있으며 그 적용가능성이 높다고 판단된다.

핵심어 손상영역, 파괴역학, 굴착, 발파, 고속굴진

1. 서 론

파괴역학은 기계공학의 한 분야에서부터 시작 발전되었다. 제2차 세계대전 당시 미국에 의해 제작된 리버티 수송선 한 척이 작은 균열로 인해 완전히 두 동강이 나면서 침몰하는 사건이 발생하였다. 이를 보완하기 위해 인성이 개선된 구조용 철강재가 개발되었고 워싱턴에 있는 해군연구소의 연구원들이 파괴 문제를 자세히 연구하였다.

이후 파괴역학은 다양한 분야에 적용되었고 암반공학 분야에서도 적용되기 시작하였다. 단순히 암석, 암반의 강도만을 반영하고 안전율을 상당히 높게 고려하여 지하 구조물을 설계 했음에도 불구하고, 암반 내 작은 균열에 의해 붕괴사고가 발생하였고 이에 대한 문제를 해결하기 위해 파괴역학이 반영되었다. 그 외에 수압파쇄, 암반굴착용 디스크 커터, 유정의 생산공이나 지열개발과 관련한 암반파쇄, 조절발파 등에 파괴역학이 적용되고 있다. 하지만 파괴 메카니즘에 대한 해석은 이루어

지고 있으나 파괴역학적 개념을 생산이나 시공 등에 직접 적용할 수 있는 방안은 아직 명확하지 않다(양과 장, 2002).

본 연구에서는 터널의 고속굴진 시에 예상되는 굴착 및 발파로 인한 암반 내의 손상영역을 평가하기 위해 파괴역학과 손상영역에 관련된 기존의 연구 사례들을 조사하였다.

2. 암반공학 문제에서의 파괴역학 연구 동향

2.1 파괴역학의 개요

파괴는 균열성장에 필요한 에너지 량이 재료의 저항을 넘어설 때 발생한다는 Griffith(1920)의 취성이론으로부터 파괴역학은 발전되어 나왔다. 이 이론은 유리와 같은 잠재적인 균열을 갖는 취성재료의 파괴에 관한 것이었고, 이후 Irwin 등에 의해 이 이론은 개발되고 수정되어 연성재료에까지 적용되었다.

Irwin은 응력확대계수(stress intensity factor) K 를 이용하여 균열을 포함하는 재료의 균열 선단 부근의 응력상태를 나타내었다. 인장응력(σ)을 받는 무한 평판에 길이 $2a$ 인 균열이 존재할 때 응력확대 계수는 다음과 같이 주어진다.

¹⁾ 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

²⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2006년 6월 7일

심사 완료일 : 2006년 6월 14일

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

Irwin은 또한 에너지 해방률(strain energy release rate) G 를 정의하여 새로운 균열면의 형성을 설명하였다. (1)식과 같은 조건일 경우 에너지 해방률은 다음과 같다.

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \tag{2}$$

여기에서, E 는 탄성계수이다. 에너지 해방률은 균열 전진력이라고도 하는데, 식(1)과 (2)를 통해 K_I 와 G 사이의 관계를 알 수 있다.

$$G = K^2/E \quad \text{평면응력} \tag{3}$$

$$G = (1-\nu^2)K^2/E \quad \text{평면변형} \tag{4}$$

ν : 포아송비

Irwin은 G 가 임계값 G_C 에 도달하면 균열이 진행한다고 했는데 이를 균열저항력 이라고 한다.

G_C 에 대응하는 응력확대계수의 임계값 K_{IC} 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며 특히 K_{IC} 는 평면변형 파괴인성이라 한다. 이는 재료 고유의 균열성장에 대한 저항도를 나타내는 재료 상수이고 값이 낮을수록 균열의 성장이 용이하게 나타나며 응력확대계수가 이에 도달하면 균열이 성장한다. 단위는 응력단위 $[FL^{-2}]$ 에 길이의 제곱근 $[L^{1/2}]$ 이 곱해진 형태인 $[FL^{-3/2}]$ 로 표현된다(장수호 외, 2002).

$$K_C = \sqrt{EG_C} \quad \text{평면응력} \tag{5}$$

$$K_{IC} = \sqrt{EG_{IC}/(1-\nu^2)} \quad \text{평면변형} \tag{6}$$

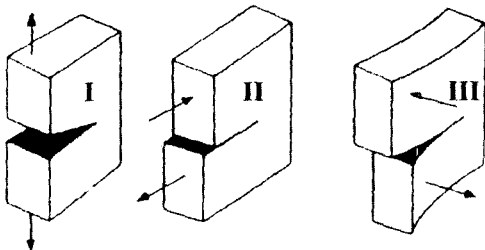


그림 1. 균열패턴 모드

선형탄성체 내에 균열이 존재하고 있을 때 균열에 대한 응력의 적용방식은 그림 1과 같이 인장모드(모드 I), 면외전단모드(모드 II), 면외전단모드(모드 III)의 세 가지로 분류할 수 있다. 이때 파괴인성 K_C 는 균열패턴모드에 따라 K_{IC} , K_{IIC} 또는 K_{IIIC} 로 표현한다. 일반적으로 균열에 대한 응력과 균열의 방향이 한가지로 되지 않기 때문에 세 가지 모드가 중복되어 발생하나 현실적으로 모드 I이 파괴에 가장 중요한 역할을 한다.

ISRМ에서 규정한 암석의 파괴인성을 측정하기 위한 공인시험법으로는 세브론 노치 굴곡시험법, 세브론 노치 직접인장 시험법 그리고 세브론 노치 간접인장 시험법 등이 있다.

2.2 수압파쇄

수압파쇄는 현지 암반의 응력상태를 위한 방법 중 하나로 시추공 내에 가압과 가압증지를 반복하여 발생하는 시추공 내 압력변화를 측정하여 현지 암반의 응력을 평가하는 방법이다. 현지 암반의 응력 상태를 평가하기 위해서 여러 가지 모델이 적용되는데 Abou-Sayed 외(1979)와 Rummel(1987)에 의해서 수압파쇄시험에 파괴역학 모델이 적용되기 시작하였고, 국내에서도 신중호(1990), 최성웅(1995)과 최용근 외(2001)에 의해 연구가 이루어졌다.

Rummel(1987)은 그림 2와 같은 모델에서 가압 유체의 압력은 공벽 뿐만 아니라, 기존의 균열면에도 가해지는 것으로 가정하였고 초기 공극압은 무시하였다. 균열 선단 근처에서의 응력장은 최대 수평주응력(σ_{hmax}), 최소 수평주응력(σ_{hmin}), 공내 압력, 균열면에 가해지는 압력 등의 4단계로부터 얻어지는 응력확대계수를 중첩하여 식(7)과 같이 간단히 나타내었다.

$$K_I(\sigma_{hmax}, \sigma_{hmin}, P, P_a) = K_I(\sigma_{hmax}) + K_I(\sigma_{hmin}) + K_I(P) + K_I(P_a) \tag{7}$$

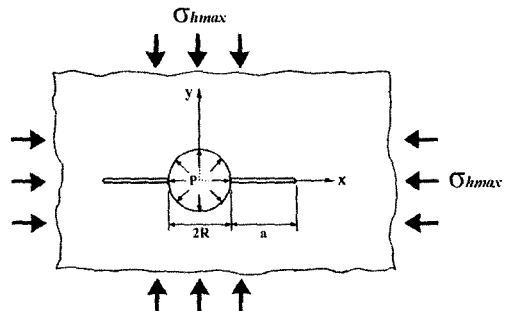


그림 2. LEMF 수압파쇄 모델

K_I : Mode I 균열전파에 관한 응력확대계수
 P : 시추공 벽면에 작용하는 유체압
 $P_a = P_a(x, 0)$: 균열을 따라 분포하는 유체압

따라서, 각각의 하중 단계에 대한 접선응력함수 $\sigma_y(x, 0)$ 를 구하고 이를 식(7)과 같이 중첩하여 시추공 내에 작용하는 응력(P_b)을 식(8)과 같이 나타내었다.

$$P_b = \frac{K_{IC}}{(h+i)\sqrt{R}} + \frac{g}{h+i}\sigma_{hmin} + \frac{f}{h+i}\sigma_{hmax} \quad (8)$$

K_{IC} : Mode I에서 암석의 파괴인성

$$f = -2\sqrt{(b^2-1)/\pi b^7}$$

$$g = \sqrt{\pi b} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{1}{b} \right) + 2(b^2+1) \sqrt{\frac{b^2-1}{\pi b^7}}$$

$$h = 1.3 \frac{b-1}{1+b^{3/2}} + 7.8 \frac{\sin\left(\frac{b-1}{2}\right)}{2 \times b^{5/2} - 1.7}$$

$$b = 1 + a/R$$

i 는 균열 내 유체압력의 분포형태에 따라서 달라지는 함수로 다음과 같이 나타내었다.

- ① $i = \sqrt{b} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{1}{b} \right)$: 균열 내 유체압력이 일정하다고 가정할 경우
- ② $i = \nu \times \sqrt{\pi b} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{1}{b} \right)$, $0 \leq \nu \leq 1$: 균열 내 유체압력이 시추공 내 압력보다 일정한 비율만큼 작은 경우

식(8)은 시추공 내 압력이 균열발생압력에 도달할 때 불안정한 균열이 전파함을 나타낸다.

또한 Rummel(1987)은 수암파쇄에서 균열의 전파는 균열 선단에서의 응력상태에 의해 결정된다고 하였고, 이를 파괴역학의 개념을 도입하여 모델링 하였다. 그는 균열 선단 주위의 응력상태를 다음 식으로 표현하였다.

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - K_{III} \tan \frac{\theta}{2} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) \quad (10)$$

$$\tau_{r_\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right] \quad (11)$$

$$\text{여기서, } K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \frac{2G}{(x+1)} (\nu_r - \nu_o)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \frac{2G}{(x+1)} (u_r - u_o)$$

r : 균열 선단으로부터 균열 내부로의 거리

G : 강성률

$u_r - u_o$: 균열 선단에 대한 거리, r 에서의 상대적 전단변위

$\nu_r - \nu_o$: 균열 선단에 대한 거리, r 에서의 상대적 수직변위

x : $= 3 - 4\nu$ (평면변형을 상태),
 $= (3 - \nu)/(1 + \nu)$ (평면응력 상태)

위의 균열 선단 주위의 응력상태식으로부터 균열 전파 조건은 다음과 같다.

- ① 전파개시 : 균열 선단의 최대접선응력이 파괴인성에 도달할 때

$$\sigma_\theta \sqrt{2\pi r} = constant = K_{IC}$$

$$\text{즉, } \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) = K_{IC}$$

- ② 전파방향 : 균열 선단에서 최대인장방향의 직각방향($\tau_{r_\theta} = 0$)일 때

$$\tau_{r_\theta} = 0,$$

$$\text{즉, } \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] = 0$$

2.3 기계굴착

지하 암반에 대한 굴착작업은 지금까지 주로 발파에 의한 방법이 대부분이었다. 하지만 모암의 상태가 취약하거나, 암반의 손상영역을 최소화하기 위해 절삭에 의한 암반 굴착이 유용한 방법으로 연구 개발되기 시작하였다.

지금까지 절삭에 의한 암석 파쇄이론은 금속에 대한 Merchant 이론(1945)에서부터 발전하여 Potts와 Shuttleworth(1958), Evans(1962), Nishimatsu(1972), Roxborough(1973) 등에 의해 발견되어 왔으며, 이러한 이론들은 주로 암석의 강도 및 기초물성들과 절삭력과의 관계에 기초하고 있다.

Sanio(1985)는 Cutter Disk 관입에 따른 암석 chipping 현상이 인장파괴에 의해 발생한다고 가정하고 파괴역학적 원리를 적용하여 Bit의 관입력을 다음 식(12)와 같이 나타내었다.

$$F_r = C_k \sqrt{d p_e s} \tan\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (12)$$

- C_k : 임계응력확대계수로부터 결정되는 상수
- d : Disk의 직경
- s : Disk의 간격
- p_e : Disk로 인한 관입길이
- ω : Disk의 각도

Deliac(1988)은 단일 Cutter Disk에 의한 절삭력 F_c 를 파괴역학적 원리를 적용하여 계산하였다. 그는 Cutter Disk에 의해 생기는 암편 형태에 따라 두 가지 양상으로 구분하였다.

첫 번째는 암석의 파쇄가 전단 및 압축력에 의해 일어나는 것으로, Coulomb의 파괴기준을 적용하였고 이러한 형태의 파쇄는 비트의 폭이 넓고 연암에서 나타나고, 단일 Disk에 의한 절삭력 F_c 는 다음 식(13)과 같다.

$$F_c = Z\sigma_c h(h+W) \quad (13)$$

- Z : 내부마찰각에 비례하고 Disk angle에 반비례하는 계수(1에 가까움)
- σ_c : 일축압축강도
- h : 절삭 심도
- W : 비트의 폭

두 번째는 인장균열이 전파될 경우, 비트가 강하고 날 카로우며 암석이 취성적이고 절삭심도가 얇을 때 적용할 수 있다. 이 경우의 절삭력 F_c 는 다음 식(14)과 같다.

$$F_c = aATK_{IC} h^{3/2} \quad (14)$$

- a : depends on unit system
- A : 암석의 종류에 따른 계수
- T : Tip sharpness에 따른 계수

2.4 사면안정

Kemeny(2003)는 그림 3과 같은 암석 브리지를 갖는 암반에 대한 점착각도를 파괴역학적 모델을 이용하여 시간에 따른 평면파괴 발생확률을 정량적으로 예측하

는 방법을 제안하였다.

암석 브리지를 갖는 경우의 새로운 Mode II 응력확대계수를 식(15)와 같이 표현하였고 이를 정리하여 식(16)과 같이 나타내었다.

$$K_{II} = \frac{(\tau - \sigma_n \tan\phi)2w}{\sqrt{\pi a}} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{K_{IIC}\sqrt{\pi a}}{2w} + \sigma_n \tan\phi \quad (16)$$

- τ : 전단응력
- σ_n : 수직응력
- ϕ : 내부마찰각

식(16)에서 첫 번째 항은 그림 3 모델에서의 브리지에 의한 점착력을 나타낸다.

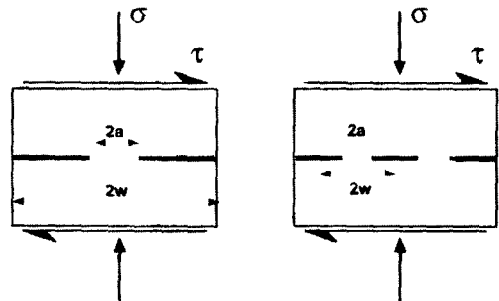
이는 시간과 하중이 작용함에 따라 암석 브리지는 줄어들게 되고 점착력은 줄어들게 된다. 따라서 그는 시간과 하중에 의한 암석 브리지 크기의 변화에 대한 함수를 이용하여 시간에 따른 점착력을 식(17)과 같이 유도하고 이를 이용하여 사면의 점착력과 안전율을 구한 바 있다.

$$c_o = \frac{\sqrt{\pi} [a_o^{1+n/2} - (1 + \frac{n}{2})At \left\{ \frac{2w(\tau - \sigma_n \tan\phi)}{K_{IIC}\sqrt{\pi}} \right\}^n]^{1/(2+n)}}{2w} \cdot K_{IIC} \quad (17)$$

- A, n : 물질상수
- t : 시간

2.5 조절발파

발파는 오랜 기간 동안 암반굴착 수단으로 매우 유용하게 사용되고 발전되어 왔다. 발파공 내에서 화약에



a) 단일 암석브리지 b) 다중 암석브리지

그림 3. 파괴역학모델(Kemeny, 2003)

의해 발생하는 충격파는 약 8~12개 정도의 균열패턴을 반경방향으로 형성시키고, 이후 발생하는 가스압에 의해 균열이 진전됨으로써 암반의 파괴가 일어난다. 이러한 발파 메카니즘을 파괴역학적으로 이해함으로써 발파균열을 제어하기 위한 방법이 꾸준히 연구되고 있지만 아직은 매우 어려운 문제로 인식되고 있다.

조절발파에 있어서 파괴역학적으로 접근하는 가장 간단한 모델은 다음 그림 4와 같이 나타나 있는 2차원 평면상의 원형 발파공이다. Ouchterlony(1972, 1974)는 여러 발파 균열 모델을 대상으로 균열 전파에 필요한 압력(p_c)을 산정하였다. 균열의 길이 a 가 충분히 짧을 경우($a=0.05R$), 발생하는 균열의 수와 상관없이 식(18)과 같이 파괴인성을 이용하여 나타내었다.

$$p_c = K_{IC} / 2.24 \sqrt{\pi a} \quad (18)$$

그림 5는 암종별 파괴인성의 차이에 따른 발파공 벽면의 노치로부터 균열이 전파되는 데 필요한 압력을 식(18)을 이용하여 계산한 결과이다. 이를 통해서 노치로부터 균열 전파가 일어나는데 필요한 발파 압력은 노치

길이가 짧은 경우 낮은 수준으로 충분하고, 암종별 특성보다는 각 암종의 파괴인성이 균열의 성장과 관련된 중요한 요소임을 알 수 있다. 현재까지 발파대상 암석들의 파괴인성은 약 $0.18 \sim 15 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도의 범위 내에 분포하는 것으로 알려져 있다(이희근 외, 1997).

심영중 외(2006)는 발파에 시 발생하는 가스압에 의해 생성되는 균열의 최종 진행 길이를 예측함으로써 발파로 인한 최종 손상영역을 간단하게 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 그림 6과 같이 발파 후 충격파에 의해 균열이 생성되고, 발파공에 작용하는 가스압과 균열에 작용하는 가스압을 분리하여 계산하였다. 균열이 가스압에 의해 진행하기 위해서는 다음 식(19)와 같은 조건을 만족해야 하며, 이를 통해 최종 균열길이(l)을 구할 수 있다.

$$K_I = \left(p_0 k_{IA} \left(\frac{l}{r} \right) + p_0 k_{IB} \left(\frac{l}{r} \right) \right) \sqrt{\pi r} \geq K_{IC} \quad (19)$$

k : 무차원 함수
 r : 발파공의 반경

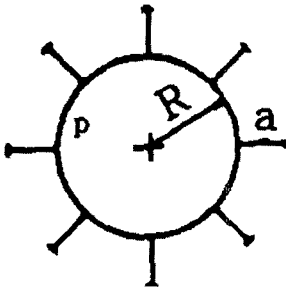


그림 4. 조절발파를 위한 파괴역학모델

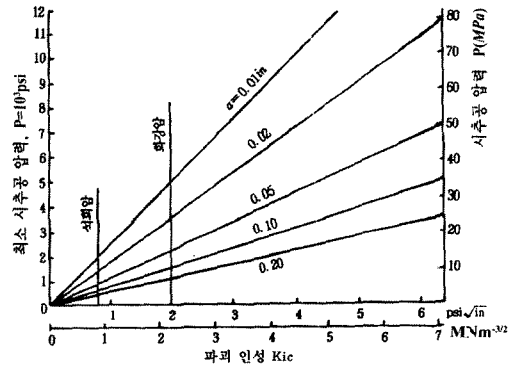


그림 5. 파괴인성과 균열전파압의 관계

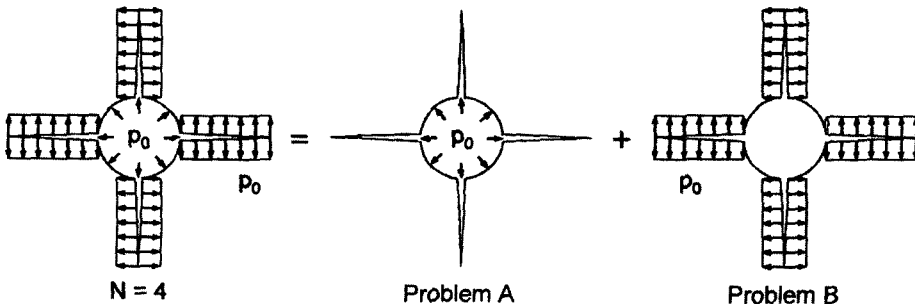


그림 6. 발파공 주변의 균열 형성 모형(심영중 외, 2006)

3. 암반 손상영역에 대한 연구 사례

대부분의 원자력 에너지 사용 국가들은 심부 암반층 내 지하구조물 건설을 통한 격리가 고준위 방사성폐기물 처분을 위한 가장 현실적인 방법으로 고려되고 있다. 하지만 굴착 시 발생하는 암반 손상영역은 구조물의 역학적 안정성 측면뿐 아니라 장기적인 핵종이동에 많은 영향을 줄 수 있다(이희석, 2003). 또한 암반 손상영역은 일반 터널의 안정성과 보강 설계로 인한 경제성에 많은 영향을 줄 수 있다.

이러한 손상영역을 줄이기 위한 연구가 스웨덴, 캐나다를 중심으로 활발히 진행되고 있지만 국내의 경우는 암반 손상영역에 대한 연구가 매우 미흡한 상태라 할 수 있다(장수호 외, 2000).

본 절에서는 암반 굴착으로 인한 손상영역의 평가 및 예측 방법에 대한 기존 연구사례에 대해 다루고자 한다.

3.1 손상영역

암반 손상영역(the Excavation Disturbed Zone or Damaged Zone)은 그림 7과 같이 굴착으로 인하여 터널 주변의 암반이 모암과의 변형계수, 수리전도도, 탄성파 속도 등 암반 특성의 변화가 나타나는 영역으로 파괴영역, 손상영역, 교란영역을 모두 포함하는 영역을 의미한다. 파괴영역은 암반블록이 암반으로부터 완전히 분리된 영역이고, 손상영역은 미소파괴가 발생하여 변형계수의 감소, 투수계수의 증가 등과 같은 암반 특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역이며, 교란영역은 굴착에 의한 응력 재분배 등으로 인하여 응력 또는 수리적 특성의 변화가 발생하는 영역으로 암반특성의 변화

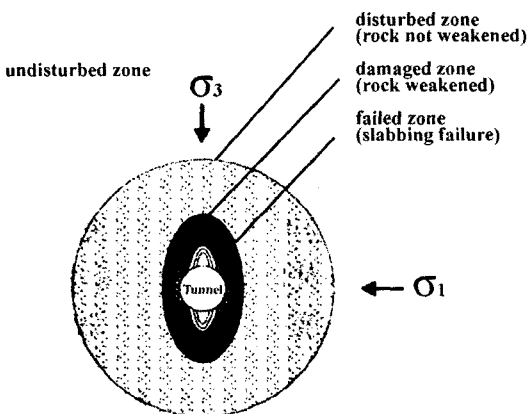


그림 7. EDZ 모델(장수호 외, 2000)

는 크기 않거나 회복 가능한 영역으로 정의된다. 이러한 손상영역은 굴착 방법에 따라 다르게 나타나고, 일반적으로 발파공법을 이용할 경우의 손상영역은 기계식 굴착공법으로 인한 손상영역 보다 더 크게 발생한다(장수호 외, 2000, Sato 외, 2000).

3.2 실험을 통한 손상영역 평가

실험을 통한 손상영역을 평가는 Sato 외(2000)와 Cai 외(2005) 등 많은 연구자들에 의해 이루어졌다. 특히, 장수호 외(2000)는 실험실 시험, 발파진동예측식, 보어홀 카메라, 미소파괴음(AE) 측정 등을 이용하여 발파로 인한 암반의 손상영역을 평가하고, 각 평가 방법의 타당성을 검증하고자 하였다. 암석의 역학적 특성들 중 탄성계수와 σ_{AE} (미소파괴음 event가 급격하게 증가하기 시작하는 응력수준)의 변화는 편차가 크게 나타나 손상영역을 평가하기가 어려웠고, 탄성파속도를 이용한 방법이 비교적 타당하다는 결론을 내렸다. 또한, 발파진동 예측식을 통한 손상영역의 범위는 실험실 시험 결과와 비슷하게 예측되었지만, 보어홀 카메라를 통한 손상영역 측정 결과는 미세균열들을 관찰하기가 어렵기 때문에 정량적인 손상영역 평가가 어려웠다.

따라서 보다 효과적으로 손상영역을 평가하기 위해서는 어느 한 방법에만 의존하지 않고, 위에서 제시된 방법 외에 탄성파 굴절법 탐사, 물리검층, 투수시험 등 가능한 모든 방법들을 적용하는 것이 유용하다고 하였다.

3.3 수치해석을 통한 손상영역 평가

수치해석을 이용한 방법은 직접 실험을 하지 않고 암반 손상영역을 예측할 수 있는 장점이 있지만 폭굉압과 가스압에 의한 발파메카니즘을 정확히 반영할 수 있는 구성 모델을 만들기 어렵다는 단점이 있다. 하지만 국내외 많은 연구자들에 의해서 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 이뤄지고 있다.

Yang 외(1996)와 Liu 외(1997)는 체적변형률, 균열 밀도함수를 이용하여 연속체 손상모델을 제시하였다. 동적 암반손상은 응력과 시간의 함수이고 체적 당 균열수를 나타내는 균열밀도함수 C_d 는 다음 식(20)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_d = \alpha(\theta - \theta_c)^\beta t \quad (20)$$

α, β : 재료상수

θ : 체적변형률

θ_c : 임계 체적변형률

t : 시간

식(20)을 이용하여 파괴확률을 나타내는 식(21)을 구할 수 있고, 이는 손상변수 D 와 동일한 개념으로 사용할 수 있다.

$$p_f = 1 - e^{-C_d V_0} = D \quad (21)$$

V_0 : 단위체적

발파하중으로 인해 발생하는 균열들의 증가가 암반의 강성에 미치는 영향은 다음 식(22)와 같다.

$$E_d = E(1 - D), G_d = G(1 - D) \quad (22)$$

E_d : 탄성계수

G_d : 전단계수

이인모 외(2003)는 연속체 손상모델인 식(22)를 코딩하여 손상변수 D 를 산출하고, ABAQUS/Explicit를 이용하여 수치해석을 실시하여 굴착선 주변의 손상영역

을 평가하였다(그림 8). 암반이 파괴되기 시작하는 시점인 손상변수 D_{min} 은 Shockey 외(1974)에 의해 제안된 0.632를 적용하였고, 국부적으로 여굴이 15cm정도 발생하였다. 적용된 암반의 물성 및 화약의 물성은 표 1, 표 2와 같다.

또한, 이인모 외(2004)는 Fuzzy-random 파쇄확률의 등가선을 이용하여 파쇄 경계를 결정하는 방법과 손상계수의 등치선을 이용하는 방법을 비교하였다. 그림 9와 같이 파쇄 경계는 Fuzzy-random 파쇄확률을 적용하는 것이 유용하다고 결론지었다.

박봉기(2005)는 밀장전 발파압력에 의한 등방성과 이방성 암반손상의 비교를 위한 수치해석을 실시하였다. 이방성 암반의 물성과 발파압력은 표 3, 4와 같다.

등방성과 이방성 암반손상 해석결과를 비교하면 그림 10과 같다. 이방성 해석결과와 수평 방향 손상영역은 등방성 보다 34% 증가하였고, 수직 방향 손상영역은 12% 감소하였다. 따라서 암반의 손상영역에 대해서 암반의 이방성을 고려하는 것이 합리적이다.

표 1. 손상영역 해석을 위한 암반 물성(이인모 외, 2003)

밀도(ρ_0 , g/cm^3)	탄성계수(E_{clas} , GPa)	소성계수(E_{plas} , GPa)	포아송비(ν)
2.6	25	6.3	0.23
암반 항복응력(σ_y , MPa)	균열 생성율(a)	임계 체적변형율(θ_c)	축압계수(K_0)
100	7×1010	0.000216	1.0

표 2. 손상영역해석을 위한 화약류 성질(이인모 외, 2003)

화약	밀도(ρ_0 , g/cm^3)	폭굉속도(D_v , m/s)	직경(d , mm)
Emulsion explosives	1.2	5000	32
Gurit	1.0	4000	17

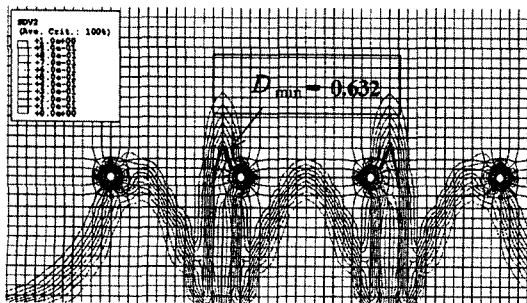


그림 8. $D_{min} = 0.632$ 등가선과 과굴영역(이인모 외, 2003)

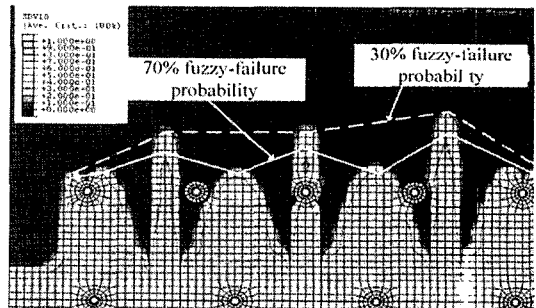


그림 9. 퍼지 랜덤 균열 가능성(이인모 외, 2003)

표 3. 이방성 암반의 물성(박봉기, 2005)

구 분	초기손상	한계 인장변형률	재료상수 a_i
수 평	0.134	0.303×10^{-3}	6.09×10
수 직	0.222	0.359×10	3.63×10
탄성계수의 이방성(k_{aniso})	0.60	0.84	1.68

표 4. 완전충전 장약의 폭발압력(박봉기, 2005)

구분	수평	수직	수평/수직
최대압력(GPa)	10.81	10.40	1.04
최대압력 도달시간(μ sec)	64	70	0.91

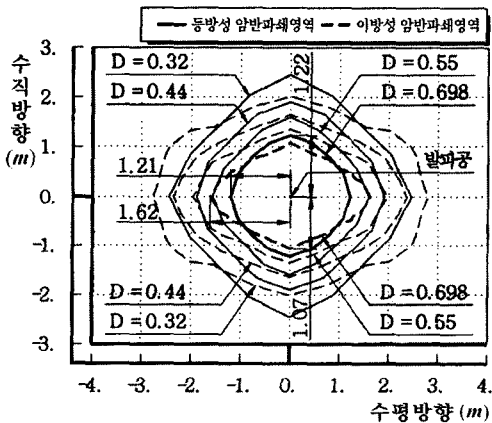


그림 10. 등방성 및 이방성 암반의 파쇄영역 비교(박봉기, 2005)

4. 결 론

지하 방사성 폐기물 처분장 건설과 일반 터널 시공에서의 안정성, 경제성의 확보를 위해서는 굴착 시 발생하는 손상영역의 최소화가 필수적이라 하겠다. 특히 터널의 고속굴착에는 손상영역의 발생이 불가피할 것으로 생각되며 이의 평가는 시공성과 함께 안전율의 확보에도 중요한 요소가 될 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 암반 굴착이나 발파에서 파괴역학의 적용사례와 손상영역에 대해 기 발표된 자료를 중심으로 고찰하였다.

파괴역학을 이용하여 수압파쇄, 기계굴착과 함께 조절발파 시 생성되는 균열의 발생 기구를 확립하고 손상영역을 평가하며 나아가서 균열을 효과적으로 제어하기 위한 시도들이 이루어지고 있으며 그 적용가능성이 높다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 전남대학교에서 수행하고 있는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업(CTRM과제) 'IT 및 신소재를 활용한 급속안전화 터널 시공기술 개발'의 제3세 부과제 '고효율의 급속시공을 위한 신개념 굴착 공법 개발'의 위탁연구사업인 '터널주변 발파교란대 평가 및 최소화 기술 개발'과제에서 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박봉기, 2005, 발파압력과 암반손상에 관한 연구, 제3회 한화 발파기술 심포지움, 157-168
2. 신중호, 1990, 수압파쇄에 의한 삼차원 암반응력측정과 균열전파특성에 관한 모형실험 및 수치해석적 연구, 서울대학교 박사학위논문, 154
3. 심영종, 조계춘, 김홍택, 2006, 발파에 의한 암반의 손상영역 예측, 2006, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 229-237
4. 양형식, 장명환, 2002, 암석파괴이론, 전남대학교 출판부, 242-260
5. 이인모, 박봉기, 백채우, 2004, 터널발파로 인한 굴착선 주변 암반거동의 확률론적 연구, 한국지반공학회논문집, 20.4, 89-102
6. 이인모, 이형주, 박봉기, 윤현진, 이상돈, 2003, 굴착선 주변공 발파의 암반손상을 고려한 터널 안정성 검토, 한국지반공학회논문집, 19.4, 167-178
7. 이희근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, 319-330
8. 이희석, 2003, 방사성폐기물 처분공 주변 암주에서의 균열 진전 및 손상에 대한 수치해석적 연구, 한국지반공학회논문집, 19.5, 211-221
9. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, 2000, 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 16.5, 129-140
10. 장수호, 이정인, 배규진, 이석원, 2002, 암석의 파괴인성 측정방법에 관한 고찰, 한국암반공학회 시험분화위원회 기술세미나, 48-57

11. 최성용, 이희근, 1995, 인공슬롯을 고려한 수압파쇄 균열의 발전양상에 관한 연구, 터널과 지하공간, 5.3, 251-265
12. 최용근, 배성호, 박배한, 이정인, 전석원, 2001, 파괴역학 모델을 이용한 수압파쇄시험 결과의 해석에 관한 연구, 터널과 지하공간, 11.3, 237-247
13. Abou-Sayed, A.S., Brechtel C.E. and Clifton R.J., 1978, In-situ stress determination by hydrofracturing : A fracture mechanics approach, J. Geophys. Res., 83.6, 2851-2862
14. Atkinson, B.K (ed.), 1987, Fracture mechanics of rock, Academic Press, 217-240
15. Dialiac, E.P. and C.E. Fairhurst, 1998, Theoretical and practical investigations of improved hard rock cutting systems, Key Questions in Rock Mechanics : Proc. 29th US Symp., Univ. of Minnesota. Minneapolis, 553-562
16. Evans, I., 1962, A theory of the mechanics of coal ploughing, Proc. Int. Symp. Min. Res., Pergamon Press, London, 761-798
17. Kemeny, J., 2003, The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities : A fracture mechanics, Rock Mechanics and Rock Engineering, 36.1, 27-38
18. Liu, L. and P.D. Katsabanis, 1997, Development of a continuum damage model for blasting analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34.2, 217-231
19. Merchant, E.M., 1945, Mechanics of the metal cutting process, J. Appl. Phys., 11, A168
20. Nishimatsu, Y., 1972, The mechanics of rock cutting, Int. J. Rock Mech. Min. & Geomech. Abstr., 9, 261-270
21. Ouchterlony, F., 1972, Analysis av Spanningstillstandet Kruig Nogra Olika Geometrier Med Radiellt Ricktade Sprickor I ett oandlight plant medium under inverkan av expansionkrafter, Swedish Detonic Research Foundation Report, DS
22. Ouchterlony, F., 1974, Fracture mechanics applied to rock blasting, Conference., Swed Deton Res. Found. Stockholm, S Proc. 3rd Congress, Int. Soc. Rock Mech. Denver, 2.B, 1377-1383
23. Potts, E.L.J. and P. Shuttleworth, 1958, A study of ploughability of coal, with special reference to the effects of blade shape, direction of planing to the cleat, planing speed and the influence of water infusion, Tran. Inst. Min. Engr., London 117, 520-548
24. Roxborough, F.F., 1973, Cutting rock with picks, Mining Engineer 132, 445-452
25. Sato, T., T. Kikuchi and K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, 56, 97-108
26. Shocky, D.A., D.R. Curran, L. Seaman, J.T. Rosenberg and C.F. Peterson, 1974, Fragmentation of rock under dynamic loads, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 11, 303-317
27. Yang, R., W.F. Bawden and P.D. Katsabanis, 1996, A new constitutive model for blast damage, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33.3, 245-254

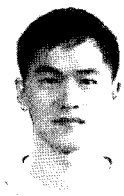
양형식



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

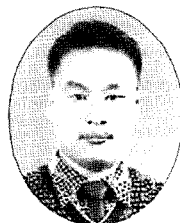
김원범



2002 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사
2004 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

E-mail: hp96042345@nate.com
현재 전남대학교 공과대학 조교, 박사수료

하태욱



2000 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사
2003 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

E-mail: htw8646@nate.com
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사수료

정주환



2005 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사

E-mail: coswin33@nate.com
현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정