하중속도 및 수분포화가 암석의 파괴인성에 미치는 영향

Effects of Loading Rate and Water Saturation on the Fracture Toughness of Rocks

정우진*

Jung, Woo-Jin

Abstract

The fracture toughness of rock was measured by Chevron bend Tests. In order to make sure the effects of loading rate and water saturation on the fracture toughness of rocks, Chevron bend tests under static and impact loading using three different types of rocks in both saturated and dry states. In the Impact loading test, the loading rate was adjusted by changing the drop-height of a drop hammer. the testing results showed that dynamic fracture toughness of rocks increased significantly with increasing loading rates. Water saturation induced a substantial decrease in both the dynamic and static fracture toughness of Tage tuff, while we could no significant difference between dynamic and static fracture toughness for Kimachi sandstone and Inada granite between dry and saturated states.

Key words : rock, fracture toughness, impact loading, water saturation, loading rate

요 지

본 연구에서는 하중속도 및 수분포화가 암석의 파괴인성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 건조 및 수분포화상태의 3종류의 암석을 대상으로 정적 및 충격하중하에서 세브론 휨시험(CB시험)을 실시하였다. 충격하중 시험에서의 하중속도는 충격추의 높이를 변화시켜 조절하였다. 시험결과, 암석의 동적파괴인성은 하중속도가 증가됨에 따라 비교적 크게 증가하였다. 수분포화의 영향으로 응회암의 동적파괴인성은 크게 감소하였으나, 사암과 화강암은 건조상태와 포화상태와의 사이에 유의한 차이는 없었다.

핵심용어 : 암석, 파괴인성, 충격하중, 수분포화, 하중속도

1. 서 론

암석의 파괴특성에 대한 연구는 지진예지 등의 방재공학, 지구과학 등과 같은 분야에서 활발히 진행되고 있으며, 안전공학, 토목공학 및 자원공학에 있어서도 실시되고 있다. 또한 암반 내의 원유, 천연가스, LPG 등 에너지 저장 및 방시능 폐기물의 보관, 지열개발 등 여러 분야에서 다양한 지하이용이 실현되기 시작하였으며, 기초가 되는 암석의 파괴역학에 관한 연구가 주목받고 있다. 파괴역학은 파괴의 개시와 전파의 메커니즘을 설명하고 암석 파괴에 대한 연구의 중요한 수단의 하나로써 개발되어 왔다.

재료의 강도특성은 항복응력, 인장강도, 피로한계 등과 같이 대부분 응력으로 표시된다. 그러나 재료에 결함(균열)이 존재하면, 그 강도는 결함의 크기가 커짐에 따라 저하하므로, 결함을 내포한 재료의 강도특성은 응력과 결함의 크기가 조합된 파라미터로 나타낼 필요가 있으며, 파괴시의 균열의 진행에 대하여 재료가 나타내는 강도인 파괴인성의 평가는 균

열의 정확한 제어 및 평가가 요구되는 방재 및 안전분야, 제어발파 등에도 매우 효과적이라고 할 수 있다.

그러나 과거의 여러 가지 방법으로 실시되어온 암석의 파괴인성시험법을 표준화한 국제암반역학회(ISRM)가 제안한 암석의 파괴인성시험법인 세브론 휨시험(CB시험, 1988)은 정적 하중하에서의 암석의 파괴인성을 평가하는 시험법으로, 동적 하중하에서의 암석이나 구조물 등의 파괴인성을 평가하는 방법이 아니며, 아직까지 동적파괴인성에 대한 평가법이 확립되었다고는 할 수 없다. 그러나 지진, 사면붕괴, 암반파열 및 발파시의 암반은 다양한 하중속도에 노출되고 있다. 이러한 이유로 암석 파괴에 있어서 하중속도의 효과를 밝혀내는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

암석파괴에 대한 하중속도의 영향에 관한 연구는 대부분 암석의 압축강도에만 국한되어 왔으며(Janach, 1976; Olsson, 1991; Lajtai 등, 1991; Zhao 등, 1999), 암석의 동적파괴인성에 대한 연구는 2000년대에 들어와서 시작되었다. Zhang 등(1999, 2000)은 SB(Short rod) 시험편을 사용하여 대리석

*정회원 (주)우진엔지니어링 부장 (E-mail : deto90@paran.com, 교신저자)

과 반력암의 정적 및 동적 파괴인성을 측정하였으며, 시험에 사용한 암석은 하중속도와 온도(2001)에 의한 영향을 받는다는 것을 나타내었다.

또한 정적하중하에서의 암석의 파괴인성은 함수조건에서는 건조조건과 비교하여 저하된다고 알려져 있다(Utagawa 등, 1999). 그러나 수분이 동적하중하에서 암석의 파괴인성에 미치는 영향에 대해서는 거의 연구되고 있지 않다. 따라서 우천시에 발생하는 지진으로 인한 사면이나 구조물에 대한 안정성 평가 또는 암반 내에 존재하는 지하수의 계절적인 변화를 고려하는 경우 등을 가정한 암석의 파괴인성에 미치는 수분의 영향에 대해서 검토하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 3종류의 암석에 대해서 정적 및 동적파괴인성을 건조상태와 포화상태에서 실험적으로 구하여, 암석의 파괴인성에 미치는 하중속도 및 수분의 영향에 대해서 검토하였다.

2. 시험방법 및 시험편

2.1 정적파괴인성

시험편은 Kimachi 사암, Tage 응회암, Inada 화강암 3종류의 암석을 사용하였다. 건조상태 시료는 65°C에서 120시간 항온조 내에서 건조후 24시간 진공펌프로 건조하였다. 또한 포화상태 시험편은 건조상태 시험편을 물을 채운 데시케이터 내에서 진공상태로 24시간 침지시킨 것을 사용하였다.

파괴인성을 측정하기 위한 시험편은 ISRM(1988)에서 제안하고 국내에서는 한국암반공학회(2005)에서 제정한 세브론 휨시험법(CB시험)에서 사용되는 것으로서, 원통형 시험편에 세브론 노치(Chevron notch)를 생성한 것이다. 이것은 V형 부분의 선단에서 균열전파가 개시된 후 시험편 축을 가로질러 파괴인성이 측정되는 지점까지 균열이 안정적으로 진행되도록 하기 위함이다. 그림 1에 시험편의 형상을, 표 1에 시험편의 크기와 물성치를 나타내었다.

암석의 정적파괴인성(K_{Ic})은 재료시험기(MTS 810, 최대하중 25Ton)를 사용하여 세브론 휨시험(CB시험)의 1수준 파괴인성시험을 실시하였으며, 3종류의 하중속도에서의 파괴인성을 측정하였다. 포화상태의 시험은 시험중에 새롭게 생성되는 균열선단에 항상 수분이 공급되도록 포화상태 시험편의 노치 주위에 플라스틱 용기를 설치하고, 주위를 실리콘으로 고정 및 밀봉하여 물을 채우고 시험을 실시하였다. 그림 2에 실험방법 모식도를 나타내었다.

그림 1. 암석 시험편 형상

그림 2. 세브론 휨시험 개략도

2.2 동적파괴인성

시험편은 상기와 동일한 3종류의 암석 시험편을 동일 규격으로 사용하였다. 표 1에 시험편의 크기와 물성치를 나타내었다.

암석 시험편의 동적파괴인성(K_{Id})은 충격 세브론 휨시험으로 측정하였다. 시험은 정적파괴인성시험에 사용한 시험편과 동일한 세브론 노치를 생성한 시험편에 충격추를 낙하시켜 시험편에 충격하중을 가함으로써 동적하중상태를 실현하였다. 그림 3에 실험방법 모식도를 나타내었다. 시험편에 가해지는 충격하중은 직접 제작한 로드셀을 시험편 위에 설치하여 측정하였다. 본 시험에서는 파괴시의 하중, 즉 최대하중을 사용하여 동적파괴인성을 평가하므로, 최대하중을 정확히 측정할 필요가 있다. 따라서 제작한 충격 세브론 휨시험장치의 시험정확성을 검증하기 위하여 철제의 원통형 로드셀(종류 SKD61, 직경 20 mm, 길이 60 mm)에 추(종류 SKD61, 직경 30 mm, 길이 123 mm)를 여러 높이에서 낙하시켜 로드셀의 변형율을 측정하고, 낙하높이와 변형율과의 관계를 구하였다.

표 1. 암석시험편의 크기와 물성치

시험편	직경 [mm]	길이 [mm]	a_0^* [mm]	노치 폭 [mm]	밀도 [g/cm^3]	공극율 [%]	Cp^{**} [km/s]	E^{***} [GPa]	E^{****} [GPa]
Kimachi 사암	60	210	9	1	2.00	16.54	2.71	7.74	7.25
Tage 응회암	60	210	9	1	1.76	28.79	2.38	4.45	2.21
Inada 화강암	60	210	9	1	2.58	0.49	3.95	57.58	57.54

*: 세브론 노치 V정점의 위치

** : 탄성파속도

***: 건조상태의 영률(탄성파속도로 구한 값)

****: 포화상태의 영률(탄성파속도로 구한 값)

그림 3. 충격 세브론 휨시험 개략도

그림 4. 낙하높이와 최대변형률과의 관계

로드셀은 측면에 4개의 변형률 게이지(게이지 길이 1 mm)를 부착하여 제작하였으며, 변형률 게이지가 감지한 변형의 변화를 브릿지 회로를 통하여 전압의 변화로 변환시킨 것을 앰프를 통하여 증폭시키고 데이터 레코더로 그 신호를 측정하였다. 그림 4에 나타난 것처럼, 낙하높이가 증가함에 따라 최대 변형률은 직선적으로 증가하는 것을 확인 하였으며, 시험편에 가해지는 충격하중이 정확히 측정되었다고 판단된다.

3. 파괴인성 평가방법

정적 및 동적 파괴인성은 다음의 식과 같이 최대하중으로 평가하였다.

$$K_{Ic} = K_{Id} = A_{min} \cdot F_{max} / D^{1.5} \quad (1)$$

여기서, K_{Ic} 는 정적파괴인성, K_{Id} 는 동적파괴인성, A_{min} 은 시험편 하중속도 및 수분포화가 암석의 파괴인성에 미치는 영향

그림 5. 변형률 계측례

험편 크기와 세브론 노치의 크기와 형상에 의해 결정되는 계수이며 파괴균열의 성장과정에서의 최소무차원 응력확대계수 값이며 세브론 휨시험에서는 10.42를 적용한다. D 는 시험편 직경이며 F_{max} 는 최대하중이다. 동적파괴인성의 경우 최대하중의 직접 측정이 곤란하므로 제작한 철재 로드셀을 시험편 위에 설치하고 충격추가 낙하하여 로드셀에 충격시 로드셀에 발생하는 최대변형률을 상기와 같이 변형률 게이지로 측정하여 다음의 식과 같이 최대변형률로부터 최대하중을 산출하였다.

$$P = AE\varepsilon \quad (2)$$

여기서 P 는 하중, ε 는 로드셀에서 측정된 변형률, A 는 로드셀의 단면적, E 는 로드셀의 영률이며, P 파속도와 S 파속도로 구한 동적 영률이다.

또한 동적파괴인성에서의 하중속도는 그림 5에 나타난 시간과 변형률과의 관계 중 가장 선형적으로 거동하는 a와 b의 구간에서 다음의 식과 같이 구하였다.

$$\dot{k} = \frac{K_b - K_a}{t_b - t_a} \quad (3)$$

여기서 $\dot{k}$ 는 하중속도, K_a , K_b 는 a 및 b에서의 응력확대계수, t_a , t_b 는 a 및 b에서의 시간이다.

4. 결과 및 분석

4.1 하중속도의 영향

그림 6 ~ 그림 8에 3종류의 암석의 하중속도와 파괴인성의 관계를 각각 나타내었다. 3종류의 모든 암석에 있어서 하중속도 $\dot{k}$ 가 증가함에 따라 파괴인성이 증가하였다. 파괴인성은 $10^{-2} < \dot{k} < 10^1$ MPam^{1/2}s⁻¹의 정적 하중속도 범위에서는 작은 변화량을 보였으나, 동적하중이 가해진 $\dot{k} > 10^1$ MPam^{1/2}s⁻¹의 하중속도 범위에서는 파괴인성이 급격하게 증가하였다. 이와 같이 건조상태에서의 동적파괴인성과 하중속도와의 관계

그림 6. 파괴인성과 하중속도와의 관계(Kimachi 사암)

그림 8. 파괴인성과 하중속도와의 관계 (Tager 응회암)

그림 7. 파괴인성과 하중속도와의 관계 (Inada 화강암)

는 정적파괴인성과 하중속도와의 관계와는 다른 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 하중속도에 따라 파괴인성이 다르게 거동하는 것과 하중속도가 증가할수록 파괴인성이 증가하는 이유로서, 동적파괴와 같이 하중속도가 큰 경우에는 암석시험편에 가해진 에너지는 정적파괴와 달리 시험편의 파괴에 유용하게 활용되지 못하고 시험편에 흡수되었기 때문으로 판단된다. 또한 정적파괴의 경우는 가해진 에너지의 대부분이 파괴면을 생성하는데 소비되지만 동적파괴에서는 파괴면의 생성 외에도 파괴면에서의 균열 분기에도 사용되며, 생성되는 균열로서 입계균열 외에도 입내균열이 생성된다(Zhang 등, 1999, 2000). 그리고 빠른 하중속도에서는 환경적 요인으로 기인한 입계하 균열성장(subcritical crack growth)이 관여할 시간적 여유가 없고 오직 역학적인 하중만이 파괴에 관여하게 된다(고태영 등, 2008). 즉, 동적파괴의 경우는 정적파괴와 달리 시험편의 파괴에 많은 에너지가 필요하게 되므로 파괴인성이 증가하게 되는 것이다.

4.2 수분의 영향

포화상태의 Kimachi 사암(그림 6)과 Inada 화강암(그림 7)은 건조상태와 마찬가지로 하중속도가 증가할수록 파괴인성이 증가하였다. 또한 수분의 영향으로 정적파괴 시에는 건조상태와 비교하여 파괴인성이 저하되었으나, 동적파괴 시에는 수분의 영향으로 인한 파괴인성의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이와 같은 이유로는 정적파괴 시에는 균열의 확장속도가 빠르지 않아 새롭게 생성된 균열 선단에 수분이 충분히 공급되므로 입자간의 결합력 및 마찰계수가 저하되고 파괴인성이 저하되었다고 판단된다. 그러나 동적파괴 시에는 균열이 고속으로 확장되기 때문에 새롭게 생성된 균열 선단에 수분이 공급되지 못하여 동적파괴인성이 변화하지 않은 것으로 판단된다. 정적파괴인성은 1.39×10^{-2} MPa·m^{1/2}~1.39 MPa·m^{1/2}·s⁻¹의 하중속도 범위에서 사암은 51.3~67.5%, 화강암은 5.05~11.5% 저하되었으며, 공극율이 16.54%로 큰 사암은 많은 변화를 보였으며 공극율이 0.49%로 작은 화강암은 파괴인성의 변화가 적었다.

그림 8에 나타난 것과 같이 포화상태의 응회암도 다른 2종류의 암석과 마찬가지로 건조상태 및 포화상태에서 하중속도가 증가할수록 파괴인성이 증가하였다. 또한 수분의 영향으로 정적파괴인성은 1.39×10^{-2} MPa·m^{1/2}~1.39 MPa·m^{1/2}·s⁻¹의 하중속도 범위에서 건조상태와 비교하여 60.8~73.2% 저하되었다. 그림에 의하면 응회암도 사암 및 화강암의 경우와 마찬가지로 동적파괴 시에는 수분의 영향으로 인한 파괴인성의 변화는 거의 나타나지 않는 것으로 보이나, 그림 9에 나타난 것처럼 수분의 영향으로 인해 동일 낙하높이에서의 하중속도는 건조상태와 비교하여 17.1~31.1%, 동적파괴인성은 10.1~24.6% 저하되었다. 즉, 응회암의 경우는 수분의 영향으로 시험 전에 이미 시험편의 강성이 저하되어 건조상태와 비교하여 같은 변위를 일으키는 동안 시험편이 받는(저항하는) 힘이 적어졌기 때문에 하중속도가 저하되었다고 판단된다. 응회암은 공극율이 28.8%로 포화상태에서 함유량이 많으며, 또한 점토광물인 몬모리로나이트가 입자간에 많이 함유되

그림 9. 동적파괴인성, 하중속도와 낙하높이와의 관계 (Tage 응회암)

어있어 이것이 수분에 의해 녹아 입자간 결합력, 마찰계수가 저하되고, 결국 응회암은 시험전에 시험편 전체가 열화 되어 있었다고 판단된다. 이것은 표 1에 나타난 것처럼 수분포화 상태의 응회암의 영률이 건조상태와 비교하여 50.34% 저하된 것으로도 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 하중속도 및 수분이 암석의 파괴인성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 건조 및 수분포화상태의 3종류의 암석을 대상으로 정적 및 충격하중하에서 세브론 휨시험(CB시험)을 실시하였다. 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 3종류의 암석은 건조상태 뿐만 아니라 포화상태에 있어 서도 하중속도가 증가함에 따라 파괴인성이 증가하였다. 특히 동적파괴인성이 증가한 이유로는 하중속도가 큰 경우에는 정적파괴와 달리 암석시험편에 가해진 에너지는 시험편의 파괴에 유용하게 활용되지 못하고 시험편에 흡수되는 등 시험편의 파괴에 많은 에너지가 소비되기 때문으로 판단된다.
- 수분의 영향으로 3종류의 암석은 건조상태와 비교하여 정적파괴인성이 감소되었으며, 감소율은 공극율의 크기에 따라 다르다. 이와 같은 이유로는 정적파괴 시에는 균열의 확장 속도가 빠르지 않아 새롭게 생성된 균열 선단에 수분이 충분히 공급되므로 입자간의 결합력 및 마찰계수가 저하되어 파괴인성이 감소되었다고 판단된다.
- 수분의 영향으로 응회암의 동적파괴인성은 감소되었으나, 사암과 화강암의 동적파괴인성은 건조상태와 포화상태와의 사이에 유의한 차이는 없었다. 이와 같은 이유로는 동적파괴 시에는 균열이 고속으로 확장되기 때문에 새로

게 생성된 균열 선단에 수분이 공급되지 못하고, 또한 공극율이 작은 사암, 화강암은 수분의 영향을 거의 받지 못하여 동적파괴인성의 변화가 없으나, 공극율이 크고 점토광물을 많이 함유하고 있어 시험전에 이미 열화 되어있는 응회암은 수분의 영향을 받아 동적파괴인성이 감소되었다고 판단된다.

- 본 연구는 하중속도 및 수분이 암석의 파괴인성에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초연구로서, 시험편에서의 동적 에너지의 활용, 균열선단에의 수분공급 상황에 대하여 보다 정량적인 검토가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- 고태영, Kemeny, J., 문현구 (2008) 컴팩트 시험편을 이용한 암석의 모드 I 파괴인성 측정 및 시험편의 크기와 재하속도가 파괴인성에 미치는 영향, 한국지구시스템공학회지, Vol. 45, No. 3, pp. 234-241.
- 한국암반공학회 (2005) 한국암반공학회 표준암석시험법, 암석의 시표채취와 시험편제작 표준법, 터널과 지하공간, 제15권, 제2호.
- ISRM (1988) Suggested method for determining fracture toughness using chevron bend specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, Vol. 25, pp. 69-89.
- Janach, W. (1976) The role of bulking in brittle failure of rock under rapid compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 13, pp. 177-186.
- Lajtai, E.Z., Scott, D.E.J. and Carter, B.J. (1991) The effect of strain rate on rock strength, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 24, pp. 99-109.
- Utagawa, M., Seto, Kosugi, M., Katsuyama, K. and Matsui, K. (1999) The evaluation of fracture toughness of rock in wet condition at crack tip, *J. Japan Soc. Safety Eng.*, Vol. 38, No. 1, pp. 9-16 (In Japanese)
- Olsson, W.A. (1991) The compressive strength of tuff as a function of strain rate from 10^{-6} to $10^3/\text{s}$, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 8, No. 1, pp. 115-118.
- Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W. and Chen, E.P. (1996) Moisture and strain rate effects on concrete strength, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, pp. 293-300.
- Zhang, Z.X., Kou, S.Q., Jiang, L.G. and Lindqvist, P.A. (2000) Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 37, pp. 745-762.
- Zhang, Z.X., Kou, S.Q., Yu, J., Yu, Y., Jiang, L.G. and Lindqvist, P.A. (1999) Effects of loading rate on rock fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, pp. 597-611.
- Zhang, Z.X., Yu, J., Kou, S.Q. and Lindqvist, P.A. (2001) Effects of high temperatures on dynamic rock fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38, pp. 211-225.
- Zhao, J., Li, H.B., Wu, M.B. and Li, T.J. (1999) Dynamic uniaxial compression tests on granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, No. 2, pp. 273-277.

© 논문접수일 : 11년 02월 12일
 © 심사의뢰일 : 11년 03월 14일
 © 심사완료일 : 11년 03월 28일