

취성재료의 장기 강도시험 중 미소파괴음 신호 분석

천대성, 정용복*

Analysis of Acoustic Emission Signals during Long-Term Strength Tests of Brittle Materials

Dae-Sung Cheon, Yong-Bok Jung*

Abstract We studied the time-dependent behaviors of rock and concrete materials by conducting the static and dynamic long-term strength tests. In particular, acoustic emission(AE) signals generated while the tests were analyzed and used for the long-term stability evaluation. In the static subcritical crack growth test, the long-term behavior and AE characteristics of Mode I and Mode II were investigated. In the dynamic long-term strength test, the fatigue limit and characteristics of generation of AE were analyzed through cyclic four points bending test. The graph of the cumulative AE hits versus time showed a shape similar to that of the creep curve with the first, second and third stages. The possibility for evaluating the static and dynamic long-term stability of rock and concrete is presented from the log - log relationship between the slope of the secondary stage of cumulative AE hits curve and the delayed failure time.

Key words Long-term stability, Acoustic emission (AE), Static, dynamic, Delayed failure time

초 록 본 연구에서는 암석과 콘크리트의 정적 및 동적 장기강도시험을 통해 이들 재료의 시간 의존적 거동에 대해 연구했으며, 특히 장기강도시험 중 발생한 미소파괴음 신호를 분석하여 장기 안정성 평가에 활용하고자 하였다. 정적 장기강도시험의 경우 임계하 균열성장시험을 활용하여 Mode I과 Mode II에 대한 장기거동과 미소파괴음 발생특성을 분석하였으며, 동적 장기강도시험의 경우, 반복재하 4점 굴곡시험을 통한 장기강도의 한계와 미소파괴음 발생특성을 분석하였다. 미소파괴음 분석결과, 미소파괴음 히트 누적곡선 대 시간에 따른 곡선은 1차, 2차, 3차 구간이 있는 크립곡선의 모양과 유사한 모양을 보였다. 선형구간에 해당하는 미소파괴음 히트 누적곡선의 2차 구간의 기울기와 지연파괴시간과의 로그-로그 관계로부터 암석과 콘크리트의 정적 및 동적 장기 안정성을 평가하는 방안에 대한 가능성을 제시하였다.

핵심어 장기안정성, 미소파괴음, 정적, 동적, 지연파괴시간

1. 서 론

미소파괴음(AE, acoustic emission) 또는 음향방출음은 재료 내에서 새로운 균열이 발생하거나 균열이 성장할 때 발생하는 탄성파로서(Ishida et al., 2017), 재료를

구성하고 있는 구성물질이나 파괴유형 등에 따라 다르게 미소파괴음이 발생하며, 이를 감지하는 센서나 센서 위치 등에 따라서도 달리 감지될 수 있다. 이러한 미소파괴음은 재하된 응력이 어떠한 임계값을 초과할 때 발생하므로, 재료의 장기강도 또는 장기적 강도의 한계값과 관련이 있다. 따라서 누적된 미소파괴음은 장기변형과 관계가 있다. 특히 미소파괴음 기술을 사용하여 암석 시험편의 미세 균열 발생 및 균열 발전양상을 지속적이고 실시간으로 모니터링할 수 있으므로 다른 모니터링 방법보다 효과적인 것으로 알려져 있다(Jiang et al., 2009)

암석의 장기 안정성은 방사성폐기물처분, CO₂ 지중

Received: May. 16, 2017

Revised: May. 26, 2017

Accepted: Jun. 7, 2017

***Corresponding Author:** Yong-Bok Jung

Tel) +82428683097, Fax) +82428683416

E-Mail) ybjung@kigam.re.kr

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon, Korea

저장, 압축공기에너지 지하저장 등과 같은 암반구조물의 장기적 활용측면에서 중요하다. 장기 안정성의 경우 정적인 크립(creep)에 의한 지연파괴(delayed failure)와 동적인 반복하중에 의한 피로파괴(fatigue failure)로 구분할 수 있다. 정적이든 동적이든 장기 안정성과 관련한 실내 또는 현장시험은 매우 많은 시간이 필요하기 때문에 일부 연구자들에 의해 제한적으로 연구되고 있다(Amadei and Curran, 1980, Wilkins, 1980, Backers, 2006, Kim and Kemeny, 2008, Rinnie, 2008, Ko, 2008, Nara et al., 2010, Lee et al., 1999; Park and Jeon, 2006).

정적 장기강도 또는 장기거동을 평가하기 위한 시험은 일반적으로 응력완화시험, 크립시험, 하중속도나 변형률속도를 달리한 재하시험 등이 사용되지만, 일반적으로 크립시험이 자주 사용된다(Li and Xia, 2000, Yoon et al., 2010). 국내에서 수행된 대부분의 연구 역시 크립시험을 기초로 하여 크립모형에 대한 분석이 주를 이루고 있다(Kim et al., 1983, Kim et al., 2003, Hong and Jeon, 2004, Yoon et al., 2010). 크립시험이나 반복하중을 가하는 피로시험은 연속체 개념에서 출발한 것인 반면, 임계하 균열성장시험은 균열의 생성 및 전파를 다루는 파괴역학 개념에서 암석이나 취성재료의 장기안정성을 다룬 시험이다(Atkinson, 1984). 일반적으로 환경적 요인 등에 의해 재료의 응력확대계수가 임계점 이하에서 장시간에 걸쳐 균열이 성장할 수 있다. 이러한 현상을 임계하 균열성장(SCG, subcritical crack growth)이라고 하며 지연파괴 또는 정적피로(static fatigue)라고도 한다.

동적 장기강도의 경우 대부분 반복적 또는 주기적인 재하조건에서의 암석의 변형이나 손상에 대한 연구가 수행되었다. Zhenyu and Haihong(1990)은 두 가지 유형의 주기적 하중 하에서 암석의 역학적 거동을 연구하여, 임계강도가 진폭, 하중속도, 주기적 하중의 파형에 의존한다고 보고하였다. Bagde and Petros(2009)는 반복재하를 받는 암석의 피로거동에 관한 상세한 문헌 검토를 수행한 후 사암의 주기적인 피로거동에 대한 파형 및 진폭의 영향을 분석하였다. Fuenkajorn and Phueakphum(2010)은 Sarakham 암염을 대상으로 한 반복재하 일축압축시험을 수행하였으며, 재하횟수의 증가에 따라 일축압축강도가 감소하는 경향을 보고하였다. Momeni et al.(2015)은 암석의 피로반응을 평가하기 위해 다양한 하중수준, 진폭 및 주파수 조건에서 실험적 연구를 수행한 후 이들 사이의 지수함수 관계를 규명하였다. 또한 재하하중의 진폭증가에 따라 축 방향과 횡 방향 잔류 변형률이 감소함을 확인하였다. Liu et al.(2016)은 반복적 재하에 대한 장기거동을 평가하기 위해 에너

지 손실을 고려한 새로운 손상구성 모델을 제안했다.

본 논문에서는 정적인 장기강도 평가의 경우 임계하 균열성장시험을 기반으로 하여 Mode I(인장모드)과 Mode II(전단모드)에 대한 장기적 특성과 이와 관련된 미소파괴음 특성에 대하여 분석하였다. 반면 동적인 경우는 반복재하 4점 굴곡시험을 통한 인장모드의 장기적 특성과 이와 관련된 미소파괴음 특성에 대하여 서술하였다. 또한 예측된 미소파괴음으로부터 암석의 장기 안정성을 평가하는 방안에 대하여 가능성을 검토하였다.

2. 시험편, 시험장치 및 방법

2.1 정적 장기강도시험

본 연구에서는 국내에서 널리 사용되고 있는 황등 화강암을 시험편으로 이용하였다. 시험에 사용한 하중기는 MTS 815 시스템이며, 시험과정동안 축 방향 하중과 변위를 측정하였다(Fig. 1). 또한 각 시험에서는 PAC사의 Pocket 미소파괴음 측정시스템을 이용하였다. 시험에 사용한 미소파괴음 센서는 R6a로서 35 kHz ~ 100 kHz 대역 센서이며, 내장된 프리앰프의 증폭은 26 dB로 설정하였다. 미소파괴음을 측정하기 위한 임계치(threshold)는 주변 환경을 고려하여 다소 높은 63 dB로 설정하였다. 정적 장기강도를 평가하기 위해 본 논문에서는 임계하 균열성장시험을 활용하였다.

파괴역학에서 출발한 대부분의 임계하 균열성장시험은 Charles(1958)가 제안한 균열성장속도와 응력확대계수간의 멱급수 모델을 기반으로 하며 일정온도조건에서는 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다(Wilkins, 1980).

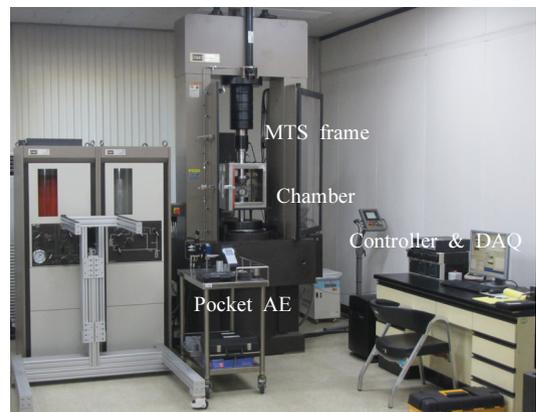


Fig. 1. View of the MTS test equipments for subcritical crack growth test (Jung et al., 2014)

$$v = \frac{da}{dt} = AK^n = A(Y\sigma_A \sqrt{a})^n \quad (1)$$

여기서, v 는 균열성장속도, A 는 상수, K 는 응력확대 계수, Y 는 형상계수, σ_A 는 가압하중, a 는 균열길이, n 은 임계하 균열성장 지수이며 응력부식이 주된 요인일 경우 응력부식지수라고도 한다.

n 은 시험을 통해 결정하며 균열성장특성과 암석종류에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Atkinson, 1984). 식 (1)에서 n 이 클 경우 시간효과의 영향이 작게 된다. 식 (1)은 Mode I, Mode II 및 III에 대응하여 구할 수 있으며, Backers(2006)의 경우 Mode I과 II에서 임계하 균열성장 지수를 구하였고 Ko(2008)의 경우 다양한 시험법을 적용하여 Coconino 사암의 Mode I ~ III에 해당하는 임계하 균열성장 지수를 구하였다.

임계하 균열성장 지수 A 와 n 을 결정하는 시험방법에는 대표적으로 이중비틀림시험(DT, double torsion test)이 있으며 이 경우 균열성장속도는 응력이완곡선으로부터 유추해서 구하므로 균열길이 측정이 필요 없으나 균열선단형상으로 인해 자료해석이 어렵다는 점과 10^{-9} m/s 이하의 작은 균열성장속도에 대응하는 응력이완을 측정하는 데 어려움이 있다(Wilkins, 1980). 또한 응력확대계수 계산 시 분산이 매우 커서 결과의 불확실성이 크다는 비판이 제기되어 왔다(Atkinson, 1984, Swanson, 1984). 실무적인 관점에서도 판상의 시험편을 제작하는 것은 코어형태의 시험편을 이용하는 것보다 시험편준비에 많은 시간과 노력이 소요되며 충분한 양의 시험편을 제작할 수 없는 상황도 존재한다. 본 논문에서는 이를 극복하고자 Wilkins(1980)가 제안한 시험법을 적용하였다. 이 방법은 시험방법이 비교적 단순하고, 다양한 조건 및 온도에서 수행할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 Mode I은 압열인장시험편(BD, Brazilian Disc)에 Wilkins(1980)가 제안한 임계하 균열성장 시험방법을 통하여 구하였다. Mode II의 경우 새로 개발된 Mode II 파괴인성시험법(Jung et al., 2014)을 조합하여 파괴인성과 임계하 균열성장 지수를 동시에 구하였다. 본 논문에서 사용된 황동 화강암의 물성과 정적 장기강도 시험인 임계하 균열성장시험은 Jung et al.(2014)에 자세히 서술되어 있다.

2.2 동적 장기강도시험

본 연구에 사용된 시험편은 압축공기에너지 저장 파일럿 시설의 내조시스템에 사용된 콘크리트를 이용하였으며, 시료의 균질성과 장기간 시험, 양생시간에 따른 강도변화의 영향을 줄이기 위해 콘크리트 전문업체에

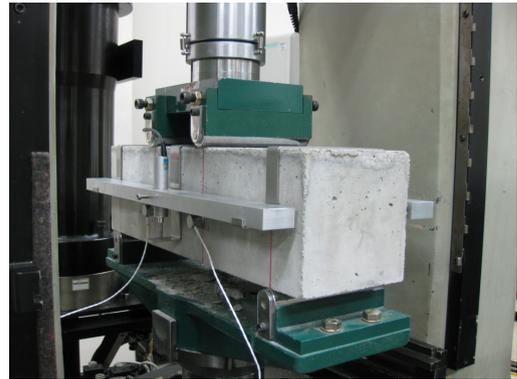


Fig. 2. Cyclic four point bending test(Cheon et al., 2012)

서 제작한 후 1년의 양생기간을 거쳤다. 시험편은 4점 굴곡시험 시료형태인 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ 의 각주로 제작하였다. 시험에 사용된 하중기는 인터라켄사의 하중기를 이용하였으며, 시험과정 동안 축 방향 하중과 변위, 그리고 변형률을 측정하였다(Fig. 2). 변형률에 대한 분석은 본 논문의 연구내용의 범위에 해당하지 않아 여기에서는 다루지 않는다.

동적 장기거동시험을 위해 반복재하(2 Hz 사인파) 4점 굴곡시험을 실시하였으며, 최대하중은 사전시험을 통해 획득한 최대지하중의 70, 80, 85, 90, 95%에 해당하였다. 반복재하회수는 장비의 한계와 시험기간 등을 고려하여 50,000회를 최댓값으로 설정하였다. 파단이 예상되는 시험편의 하부에 파단선에 직교하도록 스트레인게이지를 부착하고, 시료의 측면에는 미소파괴음 센서를 설치하여 굴곡시험 시 발생하는 변형과 미소파괴음을 측정하였다. 본 시험에서 사용된 미소파괴음 측정시스템은 미국 PAC사의 PCI/Disp 시스템으로, 2 채널을 통해 측정이 수행되었다. 광대역 주파수를 갖는 WD 센서를 사용하였으며, 프리앰프를 통한 증폭은 40 dB, 임계치는 45 dB로 설정하였다. 사용된 콘크리트의 물성과 사용된 시험법은 Cheon et al.(2012)에 자세히 서술되어 있다.

3. 시험결과

3.1 정적 장기강도시험 - 임계하 균열성장시험

암석의 Mode I, II의 장기 강도시험 결과로부터 각각의 파괴인성과 임계하 균열성장 파라메타인 n 과 A 값을 얻었으며 Fig. 3과 Fig. 4에 표시하였다(Jung et al., 2014, KIGAM, 2015). 파괴인성의 경우 Mode II가

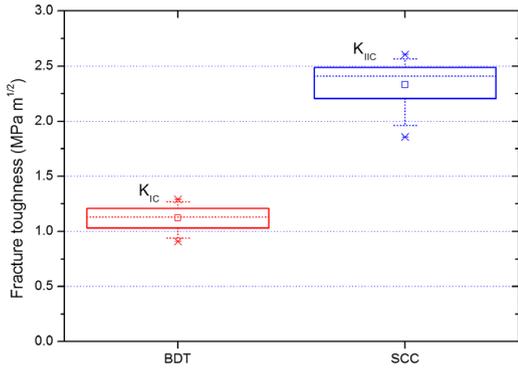


Fig. 3. Fracture toughness in Mode I and II for granite (BDT: Mode I, SCC: Mode II)

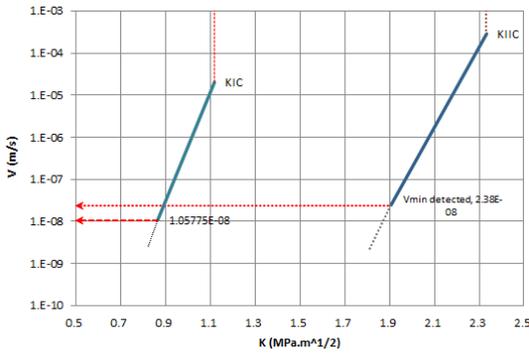


Fig. 4. Mode I & II cracking velocity graph for granite and the lowest detectable cracking velocity ($n_I = 29.39$, $n_{II} = 46.56$)

Mode I보다 2.08 배 크게 나왔으며 기존의 연구결과들과 유사한 양상을 보였다. (Jung et al., 2016)

일반적인 암석에서 Mode I의 경우 n 값은 30 ~ 60 범위로 보고되고 있으며, Wilkins는 다양한 암석에 대하여 본 연구에서 적용한 방법과 동일한 방법을 사용하여 4점 굴곡시험을 통해 n 을 구하였으며 17 ~ 50 범위의 분포를 보였다(Wilkins, 1980, Wilkins, 1987). Mode II의 경우 섬록암에 대해서 $n_{II}=95$ ($n_I=48$), 사암의 경우 35 ~ 41 (Mode I의 경우 35 ~ 38)의 값이 보고되었다(Backers, 2006, Ko, 2008). 사암의 경우는 Mode I과 Mode II의 n 값이 크게 차이가 나지 않았으나 섬록암의 경우 약 2배 정도 차이를 보였다. 기존 연구에서 구한 화강암의 Mode I n 값은 29.39이므로 Mode II 임계하 균열성장 지수($n_{II} = 46.56$)는 Mode I에 비하여 약 1.59 배 크게 나타났다(KIGAM, 2015). 이는 임계하 균열성장 지수가 Mode I에서 더 발생한다는 것이며 시간 의존적

영향이 Mode I에서 더 크다는 것을 의미한다.

임계하 균열성장시험 시 측정된 미소파괴음 자료는 히트(hit)와 진폭(amplitude)을 위주로 분석되었다. 전체 시험편 중 지연파괴가 발생한 Mode I, Mode II 시험편에 대한 하중 - 시간 곡선과 미소파괴음 진폭 - 시간, 누적 히트 - 시간 그래프를 같은 시간 축으로 표시하여 분석하였다(Fig. 5와 Fig. 6)

일정하중시험의 경우 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 시간이 경과함에 따라 미세균열들의 생성과 이에 따른 미소파괴음이 발생하는 것을 알 수 있다. Mode I 시험시 누적 히트 곡선이 일반적인 크립 곡선과 매우 유사하였으며 대부분 지연파괴 직전에 미소파괴음 히트가 다시 증가하는 형태를 보였다. 즉, 목표 하중에 도달한 후 미소파괴음 히트가 초기에 발생하다가 감소하여 파괴시간 중반에는 미소파괴음 발생 빈도가 최소가 된다. 이후 소량씩 미소파괴음 히트가 증가하다가 파괴 직전에 비교적 많은 미소파괴음 히트가 발생하였다. 이러한 경향은 진폭-시간 곡선과 누적 곡선을 통해 확인할 수 있다. Mode I의 경우 파괴 직전에 미소파괴음 히트 증가 경향이 두드러지게 나타났다.

반면에 Mode II의 경우 파괴 직전까지 히트가 선형적으로 계속 증가하다가 파괴되었다. 즉, 파괴 직전에 미소파괴음 히트가 급격하게 증가하는 현상이 명확하게 나타나지 않았다. 미소파괴음 히트의 수도 Mode I에 비하여 Mode II가 10배 이상 많았다. 이는 일반적으로 전단균열로 생성되는 미소파괴음의 진폭이 커서 더 잘 측정되며 또한 생성되는 균열의 부피가 Mode II 경우에 더 크기 때문으로 판단된다.

3.2 동적 장기강도 시험

반복재하 4점 굴곡시험에서 최대재하하중이 85, 90, 95%인 경우는 반복횟수가 50,000회 이내에서 시험편의 파괴가 발생하였으나, 70%와 80%의 최대재하하중이 작용한 경우에는 50,000회 이내에서 파괴가 발생하지 않았다. 반복하중에 의한 크립거동을 파악하기 위해 측정된 변위과 미소파괴음의 시간에 따른 그래프는 Fig. 7과 같이 제시된 바 있다. 반복재하 4점 굴곡시험에서 측정된 처짐변위는 최대, 최소 하중구간의 반복 때문에 주기적으로 변화하는 양상을 보였다. Fig. 7에 나타난 처짐변위의 변화폭은 대략 0.3 mm이며, 파괴가 발생한 순간까지 그 폭에 변화가 없는 것으로 보아 탄성변형이 발생한 것으로 여겨진다. 미소파괴음 발생양상의 경우 반복현상이 나타나지 않고 지속적으로 증가하는 모습을 보였는데, 이는 시험편 내부의 균열이나 손상이 발생에 따라 신호가 검출되기 때문에 반복의 영향을 거의 받지

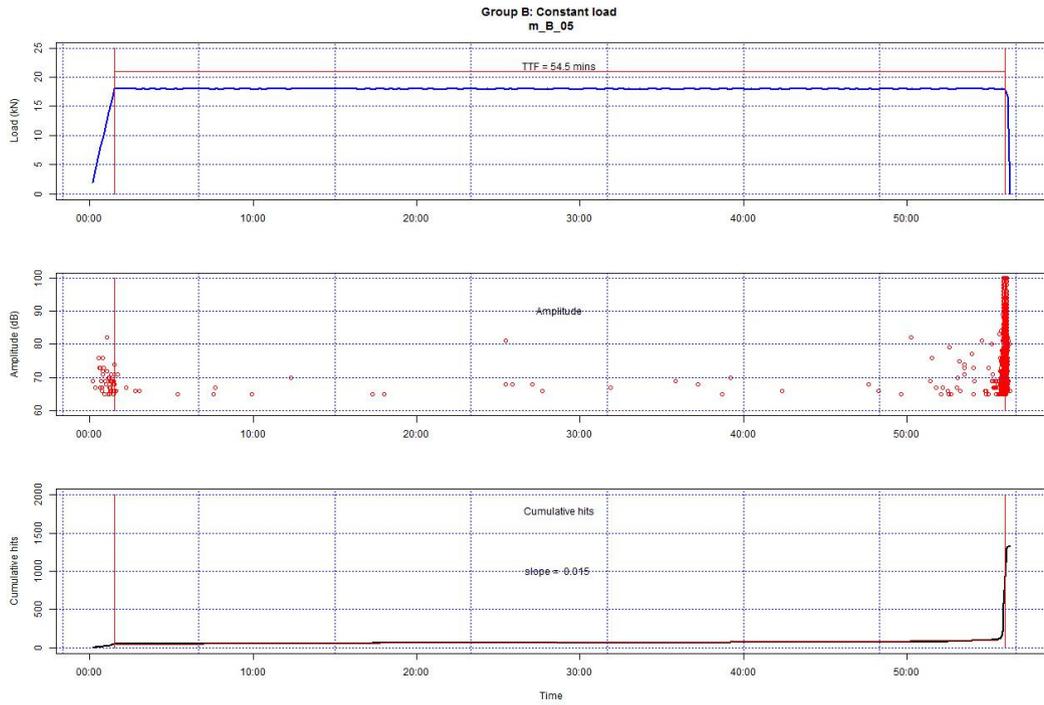


Fig. 5. Characteristics of generated AE during BDT (Mode I) subcritical crack growth test

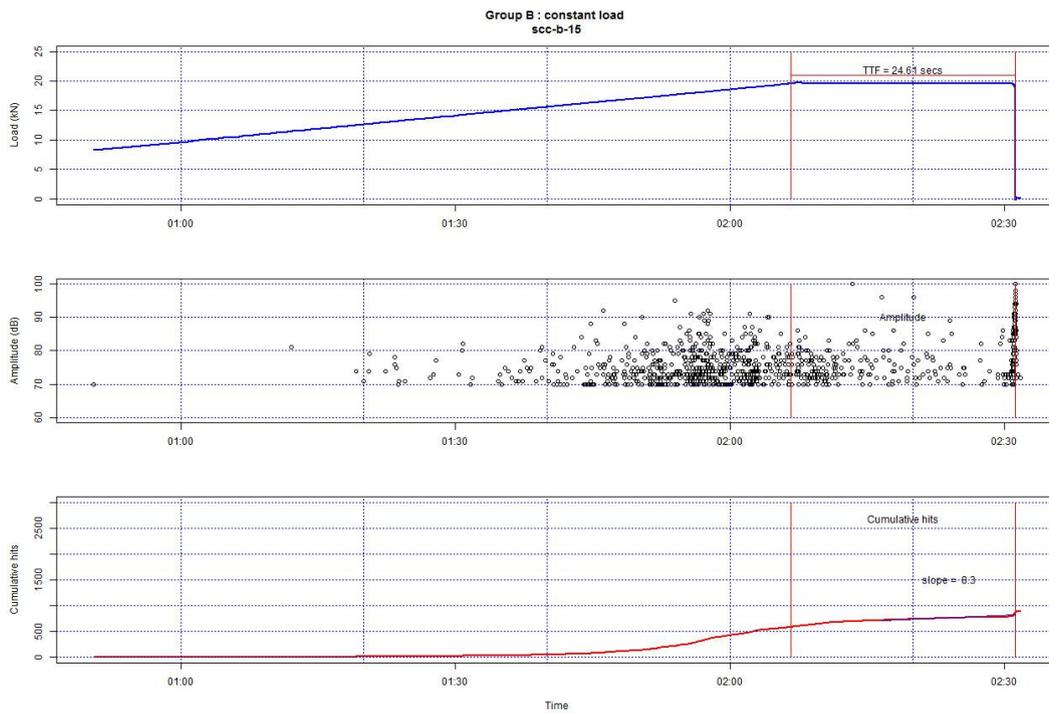


Fig. 6. Characteristics of generated AE during SCC(Mode II) subcritical crack growth test

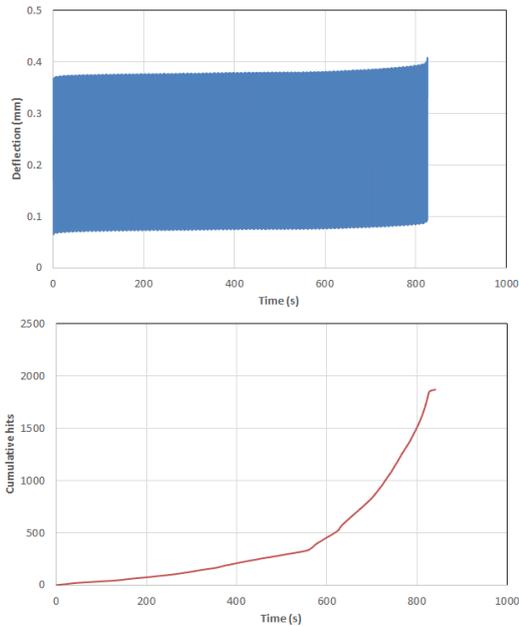


Fig. 7. Deflection and AE hits with time during a cyclic four point bending test

않는 것으로 판단된다. 미소파괴음 히트 누적곡선은 3차 크립의 시작점이 처짐곡선에 비해 더 이른 시간에 발생함을 보여준다. 이러한 경향은 기존 연구에서도 보고되었으며, 미소파괴음 측정을 통해 파괴의 사전징후를 변위측정의 경우보다 먼저 감지할 수 있음을 보여준다.(Martin et al., 1997, Cheon et al. 2014, Ishida et al., 2017).

Fig. 8은 동적 장기강도 시험에서 계측된 미소파괴음 히트 누적수와 진폭을 도시한 것이다. 1차 크립구간에서 미소파괴음의 발생이 집중되어 있으며, 파괴 직전인 3차 크립구간에 또한 많은 양의 미소파괴음이 발생하고 진폭이 상대적으로 크게 발생하였다. 이는 Fig. 5의 BDT (Mode I)의 미소파괴음 발생경향과 유사하다. 다만 동적 장기강도 시험의 경우 반복적인 하중이 재하됨에 따라 2차 크립구간에서 발생한 미소파괴음의 발생량이 상대적으로 많았다. 그러나 전체적인 누적 미소파괴음 히트곡선을 보면 전체기간동안 발생된 양에 비해 2차 크립구간에서 발생한 양은 상대적으로 적음을 알 수 있다. 또한 정적 장기강도시험에서와 같이 인장으로 인한 파괴의 경우 파괴에 소요되는 시간이 짧아 미소파괴음의 사전적 정보제공 역시 상대적으로 짧게 선행되는 현상을 보였다.

Fig. 9은 재하하중의 크기와 반복횟수에 따라 센서 한 개당 발생한 미소파괴음 히트 누적곡선을 나타낸 것이다. 미소파괴음은 손상과 관련이 있기 때문에, Xiao et al.(2010)과 Sun et al. (2017)의 연구에서 제시된 손상 또는 손상지수(D)와 상관성이 크다. Fig. 9 (a)에 나타난 곡선들은 a에서 e로 갈수록 재하된 응력이 큰 것을 의미한다. 반복재하 4점 굴곡시험에서의 미소파괴음 히트 누적곡선은 일반적인 크립거동과 같이 역 S 모양 (Inverted-S shape)으로 3단계로 구분된다. 미소파괴음 히트 누적곡선에 의한 크립거동의 경우, 재하하중에 따라 크립곡선의 모양이 달라지며, 재하하중이 작을수록 2차 단계의 미소파괴음의 발생속도가 낮아졌다. 따라서 미소파괴음의 발생속도를 분석하는 경우 장기적인 안

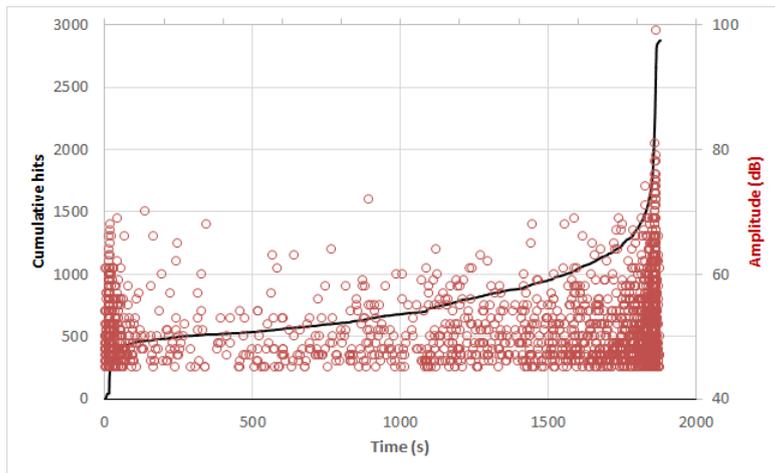


Fig. 8. Cumulative AE hits and AE amplitude with time during a cyclic four point bending test

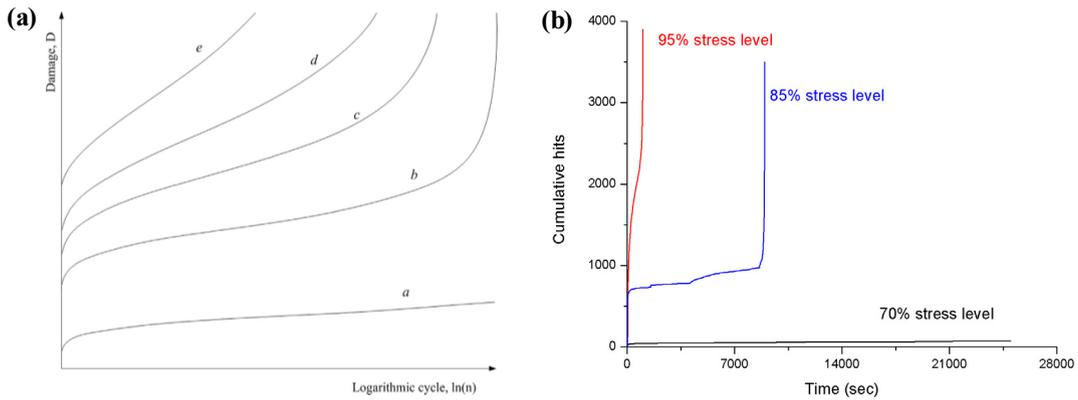


Fig. 9. (a) Inverted S-shape curves(Sun et al., 2017) (b) Classification of AE cumulative hits with different stress levels (Cheon et al., 2012)

정성을 판단하는 추가적인 인자로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 미소파괴음을 이용한 장기 안정성 평가

장기강도시험 또는 피로시험은 일반적으로 장시간을 요하는 시험으로, 시험 중 계측기의 소음을 포함하여 많은 양의 신호가 장기강도시험 중에 민감한 미소파괴음 센서에 감지된다. 따라서 유효신호 추출방법을 사용하여 원치 않는 신호를 걸러 내야한다. 잡음을 걸러내는 효과적인 방법 중 하나는 관심대상 영역이외의 지역에 가드센서(guard sensor)를 놓는 것이며, 가드센서와 주요 계측센서가 신호를 수신하는 시간 순서에 따라 외부에서 발생한 신호를 감지하여 취사선택할 수 있다. 특히, 장기강도시험에서 발생된 미소파괴음 신호는 전위 운동, 주기적 연화, 균열 발생, 균열 닫힘 및 최종적인 파괴와 같은 다양한 메커니즘에 의해 발생하기 때문에 위와 같은 가드센서 이외에 Berkovits and Fang (1995)이 제안한 미소파괴음 이벤트 또는 히트, 반복회수, 응력의 3차원 그래프를 활용한 방법을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 가드 센서나 3차원 그래프 등을 활용하여 신호 구분을 수행하지 않고, 발생된 미소파괴음 전체를 대상으로 분석을 진행하였으며, 많은 양의 신호를 분석하고자 개별적인 신호해석 대신 누적된 미소파괴음 발생량을 이용하였다. 정적 장기강도 시험의 경우에는 하중이 일정하게 유지되는 기간 동안 미소파괴음 히트 누적곡선의 직선부 기울기를 추정하여 일정하중 조건에서 암석의 균열이 생성 또는 확장되는 경향을 분석하였다. 동적 장기강도 시험의 경우에는 일정하중 조

건과 관계없이 미소파괴음 히트 누적곡선에서 2차 크립에 해당하는 직선부의 기울기를 추정하였다. 기울기는 1초당 발생하는 미소파괴음 히트의 개수를 의미한다.

정적 장기강도 시험에서 Mode I과 Mode II에 대응되는 기울기 값을 상자그림으로 Fig. 10에 표시하였다. 정적 장기강도 시험의 미소파괴음 분석 결과 Mode I의 경우 대부분 기울기가 1 이하로 작게 나왔다. 반면에 Mode II의 경우는 미소파괴음 히트의 수가 많아서 기울기가 대부분 Mode I 경우보다 큰 기울기를 나타냈다.

동적 장기강도 시험에서 2차 크립구간인 선형구간에 대한 기울기의 평균값을 Fig. 11에 표시하였다. 재하된 응력수준이 70%와 80%인 경우 기울기 차이가 미미하지만 이후 응력수준이 증가함에 따라 기울기가 명확히 증가하고 있음을 보여준다. 계산된 기울기의 평균값은 대략 1 이하를 보여 두 결과가 유사한 범위에서 나타나고 있다. 이는 본 논문에서 사용된 동적 장기강도 시험이 반복재하 4점 굴곡시험으로서 정적 장기강도시험의 Mode I에 해당하는 점을 고려하면 같은 인장균열에 대한 미소파괴음 히트의 발생특성이 유사하다는 점을 보여준다. 그러나 이 둘 사이의 유사성이 존재한다고 단정하기 위해서는 추가적 시험이나 이론적 분석 등이 보다 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

정적과 동적 장기강도 시험에서 얻어진 미소파괴음 히트 누적곡선의 기울기 값과 지연파괴시간을 로그-로그 그래프로 표시한 결과 Fig. 12와 같이 나타났다. Mode I과 Mode II는 정적 장기강도 시험에서 구해진 결과이며, Cyclic test로 표기된 것은 반복재하 4점 굴곡시험에서 구해진 결과이다. 다만, Mode I의 경우는 목표하중이 시험편의 30% 정도가 재하시 파괴되고 나머지 시

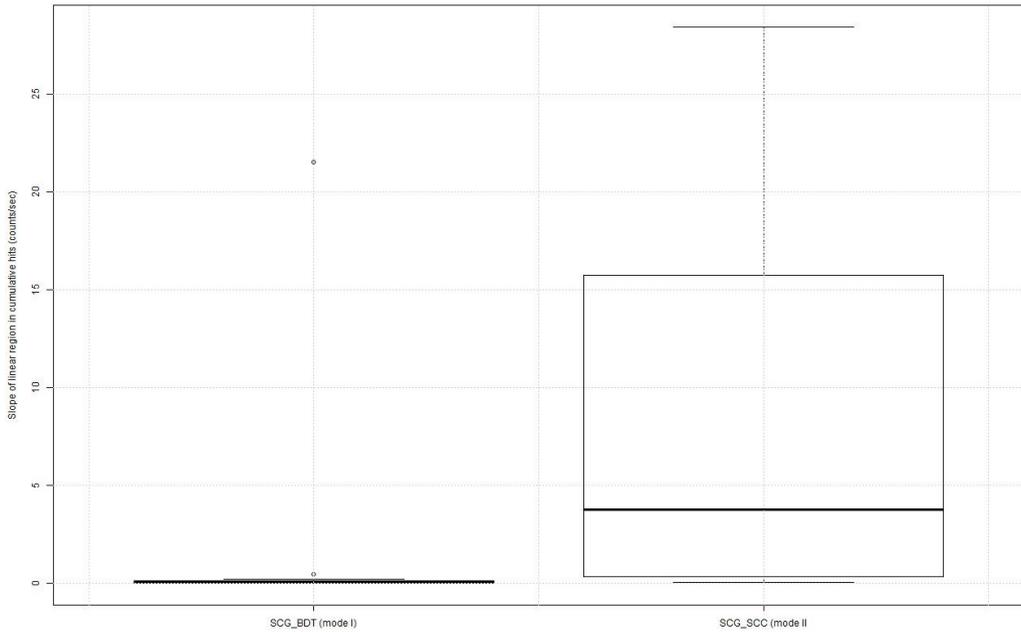


Fig. 10. Slope of linear region in AE cumulative hits of Mode I and Mode II

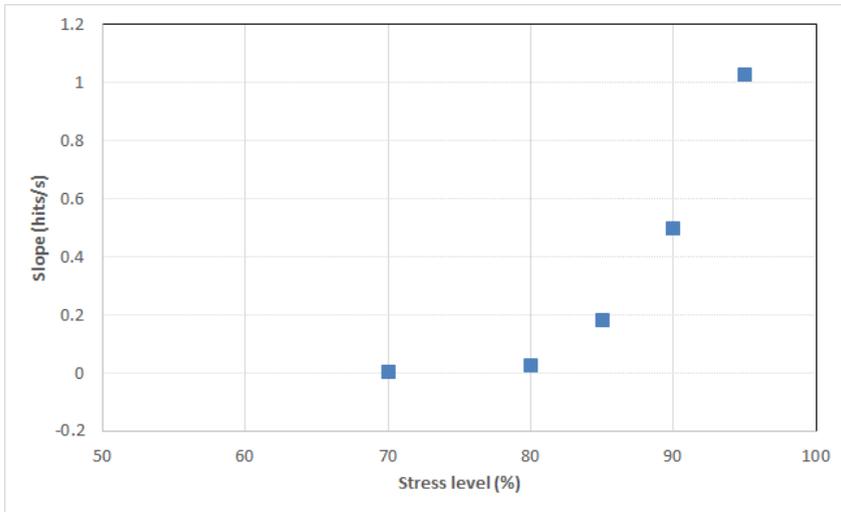


Fig. 11. Slope of linear region in AE cumulative hits during dynamic long-term strength tests with stress level

험편인 70%가 지연파괴가 일어나도록 정했으나 Mode II의 경우는 이 비율을 38%로 증가시켰다. 이에 따라 Mode II의 경우 Mode I에 비해 지연파괴시간(TTF, Time To Failure)이 상대적으로 짧았다. 동적 장기강도시험에서의 지연파괴시간은 재하된 응력수준에 따라 달라졌다. 세 경우에 대해 멱함수로 회귀한 결과 선형

성을 보이며 Fig. 12에서 보이는 바와 같이 유사한 경향을 보였다. 동일한 기울기 값을 갖는 경우 동적 파괴에 필요한 지연파괴시간이 정적 파괴에 비해 더 길게 나타났다. 일반적으로 동적 강도가 정적 강도에 비해 큰 점을 고려할 때, 지연파괴 역시 동적인 경우에서 더 많은 시간이 소요됨을 시사한다고 볼 수 있다. 또한 이 그래

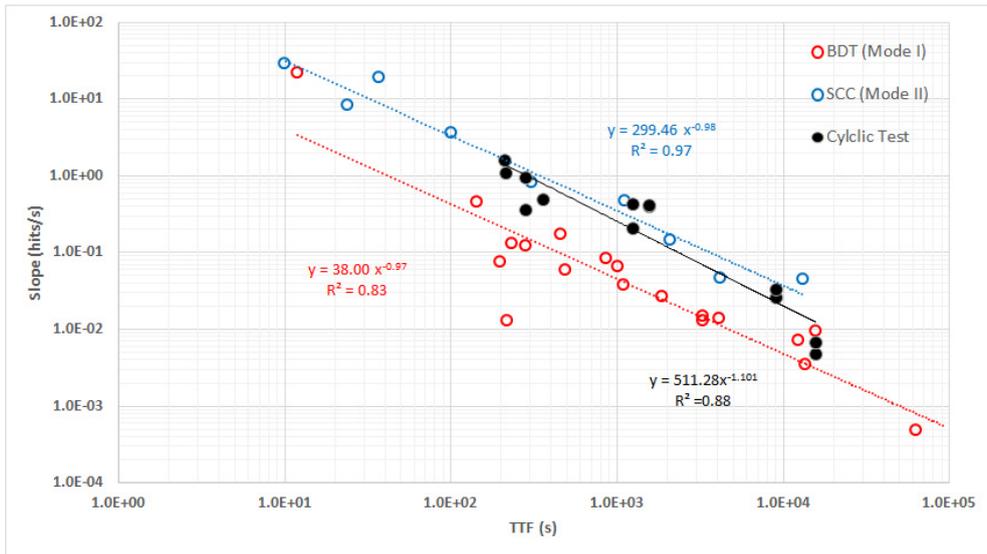


Fig. 12. Relationship between the slope of linear region in AE cumulative hits and TTF in the static and dynamic long-term strength tests

프는 암석내 손상의 증가율(기울기)이 클수록 지연파괴 시간이 짧다는 것을 보여주며, 암석이 가지는 강도가 한계가 있음을 고려할 때 손상의 누적을 통해 암석의 파괴를 예측할 수 있음을 의미한다.

5. 결론

일정한 하중을 받거나 반복적인 하중을 받는 암반구조물의 경우 시간이 경과함에 따라 균열이 생성되고 성장하여 파괴가 발생할 수 있으며, 균열의 생성과 성장은 미소파괴음을 통해 계측가능하다. 본 연구에서는 일정한 하중을 받는 경우에 대한 장기강도 평가를 위해 임계하 균열성장시험을 수행하였으며, 반복적인 하중을 받는 경우에 대해서는 반복재하 4점 굴곡시험을 수행하였다. 두 시험동안 미소파괴음을 측정하고 이들 특성을 분석하여 암반구조물의 장기 안정성을 평가할 수 있는 근거를 제시하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 아래와 같다.

1. 본 연구에서는 Mode II 임계하 균열성장 변수를 구하기 위해 제안된 Wilkins(1980)의 시험법을 SCC 시험과 결합하여 화강암의 결보기 전단강도, Mode II 파괴인성, 임계하 균열성장 지수를 구하였으며 Mode I 결과와 비교하였다. Mode II SCG 변수인

- n의 경우 Mode I에 비하여 1.59배 크게 나타났다.
2. Mode I 임계하 균열성장시험에서 계측된 미소파괴음 히트 누적곡선은 크립곡선과 유사하였으며 파괴 직전에 미소파괴음의 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 반면 Mode II의 경우에는 일정하중이 지속되는 동안에 지속적으로 미소파괴음이 발생하는 경향을 보였다.
3. 동적 장기강도시험에서 계측된 미소파괴음 히트 누적곡선은 크립곡선과 유사하였으며, 반복재하된 최대하중의 수준이 높을수록 누적곡선은 급격하게 변화하였다.
4. 정적 및 동적 장기강도시험에서 인장모드에 대한 미소파괴음 히트 누적곡선의 선형구간 기울기는 유사한 값을 보였으며, 전단모드에 대한 미소파괴음에 비해 기울기가 매우 낮은 값을 보였다.
5. 미소파괴음 히트 누적곡선의 기울기 값과 지연파괴 시간을 멱함수로 회귀한 결과 선형성을 보이며 정적, 동적 시험과 관계없이 이들 사이에는 유사성을 보였다. 암석내 손상의 증가율(기울기)이 클수록 지연파괴시간이 짧다는 것을 보여준다. 향후 미소파괴음 히트 누적곡선의 기울기와 지연파괴시간에 대한 추가시험과 자료구축을 통해서 암반구조물의 장기안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 기준값을 수립할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통산자원부의 에너지국제공동연구사업인 ‘에너지 지하저장시설의 해외시장 진출을 위한 핵심기술 개발 및 Value Chain 통합기술관리 시스템 개발(20168510050070)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Amadei B. & Curran J.H., 1980, Creep behaviour of rock joints, 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, 146-150.
- Atkinson, B. K., 1984, Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophysics Res.* 89(B6), 4077-4114.
- Backers, T., 2006, Experimental Determination of Subcritical Crack Growth Parameters, Report R101-1B06, GeoFrames, 82.
- Bagde, M., & Petros, V., 2009, Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 200-209.
- Berkovits, A., Fang, D., 1995, Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission, *Eng. Fracture Mech.*, 51 (3), 401-416.
- Cheon, D.S., Park, C., Jung, Y.B., Park C.W., Song, W.K., 2012, Mechanical properties of a lining system under cyclic loading conditions in underground lined rock cavern for compressed air energy storage, *Tunnel and Underground Space*, 22(2), 77-85.
- Cheon, D.S., Jung, Y.B., Park, E.S., 2014, Development of acoustic emission monitoring system for the safety of geotechnical structures, *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, 16(5), 471-485.
- Fuenkajorn, K., & Phueakphum, D., 2010, Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology*, 112, 43-52.
- Hong, J.S., Jeon, S., 2004, Characteristics of Creep Deformation Behavior of Granite under Uniaxial Compression, *Tunnel and Underground Space*, 14(1), 69-77.
- Ishida, T., Labuz, J.F., Manthei, G., Meredith, P.G., Nasser, M.H.B., Shin, K., Yokoyama, T., Zang, A., 2017, ISRM Suggested Method for Laboratory Acoustic Emission Monitoring, *Rock Mech. Rock Eng.*, 50, 665-674.
- Jiang, X., Shu-chun, L., Yung-qi, T., Xiao-jun, T., Xin, W., 2009, Acoustic emission characteristic during rock fatigue damage and failure. *Procedia Earth and Planetary Science*, 556-559.
- Jung, Y.B., Cheon, D.S., Park, E.S., Park, C., Lee, Y.S., Park, C., Choi, B.H., 2014, Estimation of the Characteristics of Delayed Failure and Long-term Strength of Granite by Brazilian Disk Test, *Tunnel and Underground Space*, 24(1), 67-80.
- Jung, Y.B., Park, E.S., Kim, H., 2016, Development and application of Mode II fracture toughness test method using rock core specimen, *Tunnel and Underground Space*, 26(5), 396-4080.
- KIGAM, 2015, Development of technology for CO2 geological storage and securing green energy resources in deep geo-environment (Part III), GP2015-010-2015(1), MKE, 265.
- Kim, Y.S., Jung, S.K., Cha, J.S., Bang, I.H., 2003, The creep behavior of shale in Daegu area, *Tunnel and Underground Space*, 13(2), 100-107.
- Kim, C., Kemeny, J., 2008, A three-dimensional progressive failure model for joints considering fracture mechanics and subcritical crack growth in rock, *Tunnel and Underground Space*, 19(1), 86-94.
- Kim, J.D., Lee, J.I., Kim, Z.K., 1983, A Rheological study on creep behavior of sandstone in Samcheok coal mine, *J. Korean Institute of mineral and mining engineering*, 20, 153-160.
- Ko, T. Y., 2008, Subcritical crack growth under mode I, II and III loading for conconino sandstone, Ph.D dissertation, The University of Arizona, 301.
- Lee, H.S., Park, Y.J., You, K.H., Lee, H.K., 1999, A experimental study for the mechanical behavior of rock joints under cyclic shear loading, *Tunnel and Underground Space*, 9(4), 45-58.
- Li, Y. and C. Xia, 2000, Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 467-475.
- Liu, X. S., Ning, J. G., Tan, Y. L., & Gu, Q., 2016, Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 27-32.
- Martin, C.D., Read, R.S., Martino, J.B., 1997, Observation of brittle failure around a circular test tunnel, *Int. J. Rock Mech. & Rock Eng.*, 34, 1065-1073.
- Momeni, A., Karakus, M., Khanlari, G.R., Heidar, M., 2015, Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite, *Int. J. Rock Mech. & Rock Eng.*, 36(4), 543-549.
- Nara, Y., Takada, M., Mori, D., Owada, H., Yoneda, T., Kaneko, K., 2010, Subcritical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material, *Int. J. Fracture*, 164, 57-71.
- Park, B.K., Jeon, S., 2006, Dynamic frictional behavior of saw-cut rock joints through shaking table test, *Tunnel and Underground Space*, 16(1), 67-80.
- Sun, B., Zhu, Z., Shi, C., Luo, Z., 2017, Dynamic mechanical behavior and fatigue damage evolution of sandstone under cyclic loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 94, 82-89.
- Swanson, P.L., 1984, Subcritical crack growth and other time and environmental behaviour in crustal rock, *J. Geophys. Res.*, 89, pp.4137-4152.
- Wilkins, B. J. S., 1980, Slow crack growth and delayed failure of granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 17, 365-369.

29. Wilkins, B. J. S., 1987, The long-term strength of plutonic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 24(6), 379-380.
30. Xiao, J.Q., Ding, D.X., Jiang, F.L., Xu, G., 2010, Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 461-468.
31. Yoon, Y.K., Kim, B.C., Jo, Y.D., 2010, Creep Characteristics of Granite in Gagok Mine, Tunnel and Underground Space, 20(5), 390-398.
32. Zhenyu, T., & Haihong, M., 1990, Technical note: An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 27(1), 51-56.

천대성



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248
E-mail: cds@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 전략기술연
구본부 방사성폐기물지층처분연구단 책임
연구원

정용복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사

Tel: 042-868-3097
E-mail: ybjung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 전략기술연
구본부 심지층연구단 책임연구원