미소파괴음을 이용한 KURT 화강암의 손상에 관한 정량적 평가

Quantitative Damage Assessment in KURT Granite by Acoustic Emission

이경수* · 김진섭** · 최희주*** · 이창수****

Lee, Kyung-Soo · Kim, Jin-Seop · Choi, Hey-Joo · Lee, Chang-Soo

Abstract

This paper presents the quantitative damage assessment of granite taken from KAERI Underground Research Tunnel using acoustic emission (AE). The results determined showed the crack initiation and crack damage stress occurred at 48%, 72% of uniaxial compressive strength (UCS) and until the applied stress level was reached the crack damage stress, the damage degree was 0.06. When the applied stress exceeded 80%, 90% of UCS, the damage degree were 0.34, 0.06 and which were similar to those obtained from axial deformation modulus. The simply regression analysis was used to interpret the relationship of the two damage assessment techniques and the two were highly correlated ($R^2=0.90$). Therefore, damage degree based on the AE energy and mohr-coulomb failure criterion were adopted to predict the mechanical properties. As results, the axial deformation modulus, rock strength, internal friction angle, and cohesion of KURT rock were reduced 6%, 12%, 7%, and 3% until the applied stress was 70% of UCS. But when the applied stress reached 90% of UCS, the results were more reduced 69%, 72%, 62%, and 24%, respectively.

Keywords : acoustic emission, crack damage stress, KAERI underground research tunnel, damage degree, mohr-coulomb failure criterion

요 지

본 연구에서는 미소파괴음을 활용하여 한국 원자력 연구원 지하처분연구시설에서 채취한 화강암의 손상도를 정량적으로 평가하였다. 해석결과 균열손상기준은 균열개시, 균열손상응력은 일축압축강도의 약 48%, 72%이며 균열손상기준에 따른 암석의 손상은 시료에 가해지는 응력이 균열손상응력을 초과하면서부터 0.06에서 일축압축강도의 80%, 90%에서는 0.34, 0.60로 급격히 증가하였다. 이는 축 방향 변형계수를 활용한 손상도 결과와 유사하여 단순회귀분석 결과 두 기법의 상관관계는 0.90로 상관성은 매우 높은 것으로 나타났다. 이에 미소파괴음 에너지를 활용한 손상도 결과와 모어-쿨롱 파괴규준을 이용하여 응력수준에 따른 축 방향 변형계수, 암석의 강도, 점착력, 내부마찰각 변화를 분석한 결과 균열손상응력 이전까지는 원 결과보다 각각 6%, 12%, 7%, 3% 감소하였지만 일축압축강도의 90%수준에서는 69%, 72%, 62%, 24%로 감소의 기울기는 급격히 증가하였다.

핵심용어 : 미소파괴음, 균열손상응력, 원자력연구소 지하처분연구시설, 손상도, 모어-쿨롱의 파괴규준

1. 서 론

방사성폐기물은 핵연료를 재처리할 때의 폐 용액 또는 사용 후 핵연료로 다량의 방사성독성과 붕괴열을 방출하므로 인간 생활권과 영구적으로 격리되어야한다. 이에 핀란드, 스웨덴은 Tang과 Sallig(1980)이 제안한 방법을 토대로 1982년과 1992년에 중저준위 폐기물을 동굴처분방식으로 관리하고 있으며 고준위 폐기물 처분장의 경우 스웨덴, 스위스, 프랑스, 핀란드, 미국, 일본 등에서 지하시험시설(Underground Research Tunnel: URL)을 건설하여 장기적인 안정성 확보

를 위한 연구를 수행하고 있다(권상기, 2002). 그러나 지하 암반에 건설되는 처분장 주변은 굴착에 의한 영향으로 응력 교란과 응력재분배가 발생하여 모암과는 다른 역학적·수리적·열적 특성 보이는 굴착손상대(Excavation Damaged Zone : EDZ)가 형성되며 이는 처분장의 장·단기적 안정성을 저해시키는 주요 원인 중의 하나이다(Kim 등, 2011).

국내의 경우 처분장과 같은 암반구조물의 안정성 향상을 위하여 암반변위계(Extensometer)를 활용한 모니터링법이 널리 이용되고 있으나 암반파괴는 초기응력의 크기, 무결암의 강도, 불연속면의 상태 등에 영향을 받기 때문에(Diederichs,

*정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : lks@uos.ac.kr)

**한국원자력연구원, 선임연구원 (E-mail : kverity@kaeri.re.kr)

***한국원자력연구원, 책임연구원 (E-mail : hjchoi@kaeri.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수 (E-mail : csll@uos.ac.kr)

1999) 암반 자중에 의한 낙석(Rock Fall) 또는 높은 현지응력과 굴착에 의한 파열(Burst), 돌파(Popping)와 같은 취성·국지적 파괴가 빈번히 발생하며 이는 변위계측으로는 예측하기 어려운 것으로 보고된다(천대성 등, 2008).

이에 처분관련 선진국에서는 균열 발생 시 생성된 탄성과(Elastic Wave)를 계측하여 구조물의 손상도를 평가하는 Acoustic Emission(AE)기법을 지하처분연구시설(Underground Research Tunnel :URL)에 적용하여 발파와 굴착에 의한 암반의 강도 변화에 대한 연구를 수행하고 있다. AE는 고체 내부에 국부적으로 형성된 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성과 또는 탄성과의 물리적 현상, 탄성과파를 이용한 비파괴시험의 일종으로 결함의 발생 및 성장거동을 파악하는데 탁월함을 인정받아 항공우주, 기계정밀 분야, 콘크리트 구조물과 같은 다양한 분야에 적용되고 있다.

그러나 AE는 재료 내부의 공극, 불연속면 분포 등에 좌우되며(Groose와 Ohtsu, 2008) 변형 에너지의 일부이기 때문에 손상 정보는 상대적 결과이다. 따라서 Ohtsu(1991)의 모멘트텐서해석(Moment Tensor Analysis) 또는 b value와 improved b value(ib value)의 결과는 균열 체적을 상대적 크기로 제시하거나 손상정도를 손상등급 또는 손상단계 정보로 제시하고 있다. 그러나 고체물질의 손상은 외부 응력에 의하여 생성된 균열의 면적과 이를 제외한 구간의 면적 비로써 나타낼 수 있기 때문에(정주환, 2010; Loland, 1980) 균열과 직접적 관계가 있는 AE는 손상에 따른 구조물의 강도변화와의 상관성을 통하여 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 처분장의 안정성 향상을 위한 기초연구로써 국내 고준위폐기물처분장 대상 암종인 화강암의 균열 발달 특성과 이에 따른 손상도를 AE기법을 활용하여 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여 적용된 응력-변형을 곡선(Stress-Strain Curve :SSC) 결과 중 암석의 강도를 대표하는 축 방향 변형계수(Axial deformation modulus)의 감소비를 손상의 절대적 지표라고 가정한 뒤 AE기법 결과와 비교하였다. 적용된 AE기법은 암석역학 또는 콘크리트분야에서 손상도 평가 시 널리 이용되는 균열손상기준결정법(Crack Damage Threshold), b value, ib value를 이용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 균열손상기준결정법

Brace 등(1966)과 Bieniawski(1967)는 Fig. 1과 같이 응력-변형을 곡선의 기울기가 변하는 지점에서 균열의 닫힘, 개시, 결함, 거시적 균열이 발생한다고 보고하였다. 이 후 여러 연구자들은 응력-변형을 곡선을 활용하여 획득되는 균열체적변형률(Crack Volumetric Strain)이 영이 되는 지점과 영에서 벗어나는 지점을 각각 균열닫힘과 균열개시응력, 체적강성곡선(Volumetric Stiffness)이 불규칙한 움직임을 나타내는 구간을 균열결합응력, 체적강성곡선과 체적변형률(Volumetric Strain)의 기울기가 양에서 음으로 변하는 구간을 균열손상응력 구간으로 분류하였다(Martin과 Chandler, 1994.; Eberdhart 등, 1998, 1999; Ranjith 등, 2008; 장보안 등, 2010).

Fig. 1. Stress-strain diagram showing the stages of crack development (after Martin, 1994)

Mogi(1962)는 누적 AE개수를 활용한 결과 곡선의 기울기가 변화하는 지점에서 균열손상기준이 관찰되며 이는 응력-변형을 곡선 결과와 유사하다고 보고하였다. 이 후 Eberhardt 등(1999), Diederichs 등(2004), Ranjith 등(2008)은 AE 개수를 적용한 결과 암석의 균열손상기준은 Table 1의 기준을 토대로 획득 가능하며 Cai 등(2007)은 광물의 종류와 크기, 암종별 특성에 따라 균열손상기준은 차이가 있지만 외부 하중에 의한 새로운 균열의 생성과 거시적 균열의 발달은 일축압축강도의 약 30~50%, 70~90%에서 발생한다고 보고하였다.

Table 1. Methodology used for identification of crack damage thresholds in AE (Ranjith 등, 2008)

Damage threshold	Descriptions
Crack closure (σ_{cc})	Point where the cumulative AE event curve changes from non-linear to linear
Crack initiation (σ_{ci})	Point where the AE event count firstly rises above the background level of detected event
Crack coalescence (σ_{cs})	Point where the AE event count secondly rises above the crack initiation level of detected event
Crack damage (σ_{cd})	Point where AE events diverge from the secondary linear interval and increase significantly

2.2 b value

“지진학”에서 유래된 b value는 AE 신호의 진폭과 누적빈도와의 관계를 이용하여 구조물의 손상도를 평가하는 기법으로 Gutenberg과 Richter(1954)는 이를 멱함수(Power Law) 형태로 식 (1)과 같이 나타냈으며 결과는 재료적 특성에 따라 다양하다. 그러나 손상이 진행됨에 따라 결과는 감소하며 암석의 경우 손상초기에서는 미세균열의 발달로 1.5~2.5 정도의 결과를 나타내지만 파괴 시에는 1 이하의 값을 보인다(Cox 등, 1993; Hatton 등, 1993).

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

여기서, a , b 는 상수, M 은 진폭의 크기, N 은 진폭의 누적빈도를 의미한다.

2.3 ib value

b value는 지진학에서 유래된 손상도 분석기법이기 때문에 진앙과 센서의 위치에 따른 신호의 감쇠는 특별히 고려되지 않는다. 그러나 암석 내부에서 균열 발생 시 생성되는 AE 신호는 수십~수백kHz의 고주파대역이므로 균열과 센서의 거리에 따라 신호의 감쇠는 급격히 증가한다. 따라서 토목구조물에 AE 신호를 이용하여 손상도를 평가하기 위해서는 이에 대한 수정·보완은 필수이다. 이에 Shiotani와 Ohtsu (1999)는 AE 신호의 평균 μ , 표준편차 σ 등을 적용한 식 (2)의 ib value를 제안하였다.

$$Ib = \frac{\log_{10}N(w_1) - \log_{10}N(w_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)\sigma} \quad (2)$$

여기서, $N(w_1)$ 는 $N(w_2)$ 는 임의의 검출한계(Threshold)로서 $\mu - \alpha_2\sigma$, $\mu + \alpha_1\sigma$ 를 넘는 진폭의 누적수를 의미하며(Shiotani 등, 2001a) α_1 , α_2 는 경험적 상수로서 Rao와 Lakshmi (2005)는 0.5~5.0 사이의 상수를 사용할 것을 제안하였다. 또한 AE는 지진파와 달리 방대한 양이 짧은 시간에 방출되기 때문에 Shiotani 등(2001b)은 Gutenberg-Richter b value와의 상관성을 분석한 결과 손상단계마다 50~100 정도의 AE 이벤트를 이용하여 결과를 획득할 것을 제안하였다

3. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 한국원자력연구원 내에 위치한 지하처분연구시설인 KAERI Underground Research Tunnel(KURT)에서 채취한 복운모 화강암(Two-Mica Granite)을 이용하여 관련 연구를 수행하였으며 사용된 암석시료는 편의상 KURT 화강암으로 명칭하였다. 총 5개의 시료가 본 연구에 사용되었으며 국제암반역학회(International Society for Rock Mechanics: ISRM)에서 제시한 가로(직경 약 5.2 cm) 대 세로비가 약 1:2~2.25인 원기둥 형태가 되도록 시편을 제작하였고 결과의 정확도 향상을 위하여 표면연삭기를 이용하여 시편의 편평도를 0.005mm 이내가 되도록 연마하였다. 또한 암석에 가해지는 일축압축하중은 재하속도를 0.5~1.0MPa/sec 설정하여 재하 후 5~10분 이내로 시편이 파괴되도록 실험을 수행하였다(Brown, 1981).

AE 신호는 Rectuson과 Fuji ceramics에서 개발한 AE-

Fig. 2. A view of a KURT granite sample in uniaxial compression

300과 공진 주파수대역이 60kHz $\pm 20\%$ 인 AE 603 SW-GA 센서를 이용하여 계측하였으며 센서와 시편의 접촉상태는 결과에 영향을 주기 때문에 고진공접촉제를 이용하여 센서를 시료 표면에 단단하게 부착시켰다. 또한 발생한 AE 신호는 매우 미세하기 때문에 프리앰프와 메인앰프에서 각각 40dB, 20dB 신호를 증폭하였다. 센서에 획득된 신호는 Maji와 Shah(1988)가 제안한 임계전압법을 이용하여 검출한계와 AE 변수(Parameter)를 획득하였다. 발생한 탄성파의 중첩 및 산란 등을 최소화하기 위하여 Peak Definition Time (PDT), Hit Definition Time(HDT), Hit Lockout Time(HLT)은 50 μ s, 100 μ s, 500 μ s로 결정하였으며 Fig. 3은 실험 계통도를 나타낸 것이다.

Fig. 3. A schematic diagram of measurement system

4. 실험결과

4.1 KURT 화강암의 물리적·역학적 특성

Table 2는 본 연구에 사용된 KURT 화강암의 물리적·역학적 특성 결과로써 일축압축강도와 단위중량 그리고 탄성파속도를 고려할 때 암질이 치밀한 경암인 것으로 판단된다(Anon, 1979; Bieniawski, 1989). 그러나 포아송비는 축 방향과 수직방향으로 존재하는 편리의 영향으로 이희근과 양형식(1997)이 제안한 화강암의 일반적 범위인 0.15~0.25를 초과하는 평균 0.31로 결과는 다소 높은 것으로 사료된다.

여기서, 응력-변형률 곡선의 기울기는 Eberhardt 등(1998)이 제안한 점이동 회귀분석법(Moving Point Regression)을 이용하여 결정하였다. 점이동 회귀분석법은 연구자가 회귀분석구간(window)을 임의로 설정한 뒤 이 구간을 이동시켜가면서 구간별 기울기를 연속적으로 계산하는 방법이다. Fig. 4는 점이동 회귀분석법 적용 전 후의 결과를 나타낸 것으로써 민감도 분석(sensitivity analysis)을 토대로 전체 자료수의 약 1% 크기로 회귀분석 구간을 결정하여 결과를 획득하였다(장수호와 이정인, 2005; 장보안 등, 2010).

4.2 KURT 화강암의 균열손상기준

Fig. 5는 응력-변형률 곡선을 활용한 균열 체적변형률과 체적강성곡선 그리고 체적변형률을 이용하여 1번 시료의 균열손상기준을 나타낸 결과로써 시료 내부에 존재하는 공극 및 균열은 일축압축강도의 약 39%에서 닫히는 것으로 해석되지만 이는 기존 연구결과와 비교할 때 다소 높은 것으로

Table 2. The physical and mechanical properties of KURT granite samples

Sample No.	Bulk density (g/cm ³)	Tangential Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Uniaxial compressive strength (MPa)
1	2.67	50.8	0.31	5119	3454	200
2	2.68	42.5	0.33	5257	3526	177
3	2.68	44.8	0.32	5243	3595	174
4	2.67	48.1	0.33	5380	3615	161
5	2.69	46.5	0.28	5386	3195	155
Average	2.68	46.5	0.31	5277	3477	173

Fig. 4. Moving point regression technique: (a) Unfiltered result, (b) Filtered result

판단된다(Eberhardt 등, 1999; 장수호와 이정인, 2005, Cai 등, 2007). 그러나 이를 제외한 균열개시, 결합, 거시적 균열에 의한 손상은 일축압축강도의 46%, 54%, 72%에서 발생하며 이는 Cai 등(2007)이 제안한 기준을 만족하는 결과이다.

AE 개수를 활용한 1번 시료의 균열손상기준 결과는 Fig. 6(a)와 같이 일축압축강도의 24%, 42%, 68%, 87%에서 균열단합, 개시, 결합, 거시적 균열이 발생하는 것으로 해석되었으나 이는 응력-변형률 곡선 결과와 비교할 때 상당한 차이를 보인다. 반면에 AE 에너지(AE Energy: AEE)를 활용한 결과는 Fig. 6(b)와 같이 일축압축강도의 22%, 42%, 56%, 72%에서 균열단합, 개시, 결합, 손상이 진행되며 이는 균열단합응력을 제외하고는 응력-변형률 곡선 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이는 개수의 경우 단순히 검출한계를 초과하는 진폭의 누적수를 의미하기 때문에 검출한계와 지속시간에 상당한 영향을 받지만 AE 에너지는 검출전압을 초과하는 각각의 진폭을 제공한 결과이기 때문에 배경잡음에 의

Fig. 5. Methods to determine the crack damage threshold in KURT granite sample No. 1: (a) Crack volumetric strain, (b) Volumetric strain and volumetric stiffness

하여 지속시간이 길어지더라도 이것이 결과에 미치는 영향은 개수와 비교할 때 상대적으로 미약한 것으로 판단된다. 따라서 배경잡음에 의한 영향으로 Fig. 7(a)와 같이 최대진폭과 AE 에너지는 Fig. 7(b)에 비하여 약 25% 수준임에도 불구하고 개수는 1.05배 많은 것으로 나타났다. Table 3은 응력-변형률 곡선과 AE 에너지를 활용한 KURT 화강암의 균열손상기준 결과이다.

4.3 응력-변형률 곡선을 활용한 KURT 화강암의 손상도

4.3.1 축 방향 변형계수에 의한 KURT 화강암의 손상평가

Fig. 8은 균열손상기준에 따른 5개 시료의 축 방향 변형계수를 나타낸 결과로써 이는 손상기준마다의 응력-변형률 곡선 기울기를 이용하여 획득하였다. 균열개시응력 이전 구간에서의 손상은 공극 및 기존 균열의 단합에 의한 것이기 때문에 균열개시응력 이후 구간을 재하에 의한 손상 시작지점으로 가정할 경우 균열손상응력까지의 축 방향변형계수는 원 결과인 47.4GPa보다 약 7% 감소한 44.2GPa이지만 이

Fig. 6. Crack damage threshold based on AE in KURT granite sample No. 1: (a) AE count, (b) AE energy

를 기점으로 결과는 급격히 감소하여 일축압축강도의 80%, 90%에서는 각각 14%, 25% 감소한 40.9GPa, 35.4GPa, 파괴 시에는 38% 감소한 29.4GPa를 나타냈다.

여기서, 고체물질에서의 손상은 균열전파로 응력에 대항하는 단면적의 감소에 의하여 발생하기 때문에 암석역학분야에서는 암석의 역학적 특성을 대표하는 탄성계수(Young's modulus) 감소비를 이용하여 암석의 손상을 분석하고 있다 (Loland, 1980; Kim and McCarter, 1998). 이에 손상 받지 않은 암석의 축 방향 변형계수인 균열개시응력의 결과를 E_0 , 이 후 구간의 결과를 E_d 로 가정하여 암석의 손상도를 분석한 결과 Fig. 9와 같이 균열손상응력 수준인 일축압축강도의 약 70% 응력 하에서는 시료의 손상은 평균 0.06으로 손상정도는 미약하지만 일축압축강도의 80%, 90% 응력 하에서는 0.33, 0.69으로 손상의 기울기 변화는 급격히 증가하는 것으로 해석되었다.

$$D = 1 - \frac{E_d}{E} \quad (3)$$

Fig. 7. AE waveforms during different damage stage in KURT granite sample No. 1: (a) Early stage, (b) Final stage

Fig. 8. Stress ratio for axial deformation modulus of KURT granite

Table 3. Average normalized crack damage threshold values of KURT granites determined from Stress-Strain Curve and AE Energy

Damage Threshold	Normalized relationship											
	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		Average	
	SSC	AEE	SSC	AEE	SSC	AEE	SSC	AEE	SSC	AEE	SSC	AEE
$\sim \sigma_{cc}$	0.39	0.22	0.41	0.24	0.42	0.15	0.38	0.18	0.39	0.16	0.40	0.19
$\sigma_{ci} \sim \sigma_{cs}$	0.46	0.42	0.50	0.48	0.48	0.48	0.51	0.51	0.47	0.50	0.48	0.48
$\sigma_{cs} \sim \sigma_{cd}$	0.54	0.56	0.56	0.55	0.53	0.53	0.58	0.58	0.62	0.58	0.57	0.56
$\sigma_{cd} \sim \sigma_{UCS}$	0.72	0.70	0.72	0.71	0.71	0.71	0.74	0.73	0.80	0.74	0.74	0.72

Fig. 9. Damage value based on axial deformation modulus

4.4 AE를 활용한 KURT 화강암의 손상도

4.4.1 AE 에너지에 의한 KURT 화강암의 손상평가

AE는 균열과 직접적 관계가 있기 때문에 손상 초기에는 전위(dislocation)량이 작은 미시적 균열로 인하여 상대적으로 진폭수준이 낮은 AE 신호가 우세하게 발생하지만 파괴 시에는 미끄러짐 형태(sliding)의 거시적 균열로 인하여 신호의 진폭은 급격히 증가한다. 따라서 AE 변수는 균열손상기준결정 이외에도 물체의 파괴 메커니즘 및 손상도 규명에도 적합할 것으로 판단된다(Groose와 Ohtsu, 2008). 이에 본 연구에서는 식 (4)와 같이 응력 수준에 따른 AE 에너지를 이

용하여 시료의 손상도를 분석하였다.

$$D_{AE} = \frac{N}{N_m} \quad (4)$$

여기서, N 은 응력 수준에서의 누적 AE 에너지, N_m 은 전체 AE 에너지를 의미하며 식 (3)과 같이 손상이 진행되지 않은 물체의 경우 결과는 0, 파괴 시는 1이 된다.

해석결과 Fig. 10(a)와 같이 균열개시응력이 구간간까지는 기존 균열, 공극의 닫힘에 의한 손상이기 때문에 결과는 약 0.05이다. 그러나 이는 앞에서 언급한 바와 같이 재하에 의한 균열성장이 주요 원인이 아니기 때문에 본 연구에서는 균열개시응력구간부터의 결과를 이용하여 손상도를 분석하였으며 이에 대한 결과는 Fig. 10(b)와 같다. 미시적 균열 발달로 균열손상응력 이전까지의 누적 손상은 평균 0.14이지만 이후 구간부터는 AE 신호의 발생빈도와 진폭수준이 증가함에 따라 일축압축강도의 80% 수준에서는 손상이 0.34, 90%에서는 0.60으로 축 방향 변형계수 결과와 유사한 것으로 나타났다.

4.4.2 b value에 의한 KURT 화강암의 손상평가

Table 4는 일축압축하중을 받는 5개 시료에서 발생한 AE 진폭을 응력수준에 따라 정규화 하여 나타난 결과이며 이를 활용한 b value 결과는 Fig. 11과 같다.

여기서, Fig. 11(a)는 균열닫힘, Fig. 11(b)는 균열개시응력 구간부터의 결과로써 b value는 AE 진폭과 누적빈도와의

Fig. 10. Damage value based on AE energy obtained from crack closure stress to failure (a) and crack initiation stress to failure (b)

Fig. 11. b value results obtained from crack closure stress to failure (a) and crack initiation stress to failure (b)

Table 4. A Relation between stress level and normalized AE events in KURT granites

Sample number	Amplitude (V)	Stress level for failure stress								
		~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
No. 1	~1.5	0.003	0.004	0.010	0.031	0.053	1.000	0.195	0.345	0.431
	1.5~2	0.000	0.000	0.001	0.010	0.022	0.053	0.145	0.214	0.319
	2~3	0.000	0.000	0.001	0.009	0.018	0.034	0.095	0.158	0.243
	3~5	0.000	0.000	0.001	0.005	0.015	0.021	0.057	0.100	0.145
	5~10	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.009	0.033	0.048	0.144
No. 2	~1.5	0.222	0.274	0.444	0.419	0.564	0.684	0.872	0.889	1.000
	1.5~2	0.026	0.017	0.009	0.094	0.128	0.188	0.385	0.410	0.556
	2~3	0.017	0.026	0.026	0.060	0.068	0.103	0.256	0.325	0.444
	3~5	0.026	0.026	0.034	0.051	0.043	0.085	0.214	0.256	0.325
	5~10	0.009	0.000	0.009	0.026	0.026	0.043	0.282	0.248	0.214
No.3	~1.5	0.002	0.006	0.026	0.075	0.102	0.128	0.358	0.508	1.000
	1.5~2	0.001	0.001	0.012	0.024	0.035	0.075	0.236	0.515	0.766
	2~3	0.000	0.001	0.004	0.021	0.031	0.058	0.219	0.242	0.724
	3~5	0.000	0.001	0.002	0.024	0.023	0.036	0.129	0.229	0.474
	5~10	0.000	0.000	0.002	0.003	0.010	0.012	0.048	0.021	0.215
No.4	~1.5	0.050	0.111	0.185	0.057	0.063	0.062	0.048	0.441	1.000
	1.5~2	0.072	0.042	0.101	0.022	0.033	0.039	0.020	0.217	0.478
	2~3	0.099	0.038	0.086	0.024	0.026	0.039	0.023	0.204	0.472
	3~5	0.096	0.058	0.057	0.014	0.018	0.025	0.018	0.140	0.331
	5~10	0.003	0.002	0.004	0.004	0.005	0.002	0.021	0.073	0.193
No.5	~1.5	0.001	0.001	0.003	0.008	0.017	0.068	0.236	0.459	1.000
	1.5~2	0.000	0.000	0.002	0.003	0.008	0.032	0.168	0.318	0.678
	2~3	0.000	0.000	0.002	0.003	0.006	0.023	0.076	0.234	0.453
	3~5	0.000	0.000	0.002	0.002	0.003	0.016	0.100	0.167	0.318
	5~10	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.008	0.056	0.122	0.170

관계를 이용하여 결과를 제시하기 때문에 연구자의 주관적 판단에 따라 누적곡선의 기울기는 상당한 차이가 발생한다. 따라서 Fig. 11(a)와 같이 균열단힘응력구간 결과를 포함할 경우 균열개시응력구간에서의 b value는 평균 2.14이지만 이를 생략할 경우 Fig. 11(b)와 같이 결과는 1.27이 된다. 그러나 b value는 암석의 균열손상기준을 평가할 수 없으며 AE 에너지와 달리 누적곡선의 기울기에 따라 결과는 상당한 차이를 나타내기 때문에 b value의 경우 모든 구간에서 발생한 신호를 이용하여 손상도를 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

해석결과 균열손상응력까지는 균열단힘응력구간에서의 평균값인 2.24보다 약 0.21 감소한 2.03인 것으로 나타났다. 그러나 이를 기점으로 b value의 결과에 직접적 영향을 주는 5~10V 진폭 범위의 신호가 급격히 증가함에 따라 일축 압축강도의 80% 수준에서는 b value가 평균 1.61로 약 0.42 감소하며 파괴 시에는 선행연구결과와 유사하게 1 미만인 0.74인 것으로 해석되었다.

4.4.3 ib value에 의한 KURT 화강암의 손상평가

Fig. 12는 각각의 응력수준에서 발생한 50개의 AE 이벤트를 이용하여 획득한 ib value 결과이다. b value를 개량한 기법이기 때문에 손상이 진행됨에 따라 결과의 기울기

Fig. 12. ib value results

감소 경향은 b value 결과와 유사하다. 따라서 균열단힘부터 균열손상응력까지는 결과가 평균 0.10에서 0.094로 약 0.006 감소하였으나 일축압축강도의 약 80%, 90% 응력 하에서는 0.06, 0.05, 파괴 시에는 평균 0.03의 결과를 나타냈다.

4.5 KURT 화강암의 손상기준

응력-변형률 곡선과 AE기법을 활용한 결과 KURT 화강암은 균열손상응력인 일축압축강도의 약 70%를 초과하는 응

력이 시료에 가해지면서부터 손상이 급격히 증가하는 것으로 해석되었다. 따라서 AE 에너지, b value, ib value 결과를 독립변수(independent variable), 축 방향 변형계수를 활용한 손상도 분석 결과를 종속변수(dependent variable)로 하여 단순회귀분석(simple regression analysis)을 수행한 결과 Fig. 13과 같이 모든 결과의 결정계수(coefficient of determination: R^2)는 0.75이상으로 상관관계는 높은 것으로 판단되며 특히 AE 에너지와 축 방향 변형계수 결과는 약 0.90인 것으로 나타났다. 따라서 AE 에너지와 축 방향 변형계수 결과를 토대로 KURT 화강암의 손상도를 분석한 결과 균열개시~균열손상응력 수준에서는 미약한 균열 발달로 앞

Fig. 13. A Relation between AE energy (a), b value (b), ib value and axial deformation modulus (c)

에서 언급한 바와 같이 손상은 약 0.14 진행되며 이에 따라 시료의 축 방향 변형계수는 3% 감소한다. 하지만 시료에 가해지는 일축압축강도가 이를 초과하는 일축압축강도의 80%, 90% 수준에서는 손상은 0.34, 0.60으로 증가하며 축 방향 변형계수는 12%, 25% 감소하다가 파괴 시에는 38% 감소한 29.4GPa인 것으로 나타났다.

여기서, 손상에 따른 암석의 강도 감소는 식 (5)를 이용하여 획득 가능하기 때문에 AE 에너지를 활용한 손상도 결과를 D 로 하여 응력수준에 따른 암석의 강도 감소를 분석해보면 Fig. 14와 같이 균열손상응력 이전구간까지의 강도는 평균 153MPa로 원 강도보다 약 20MPa 감소하였지만 일축 압축강도의 약 80% 수준에서는 평균 100MPa로 손상으로 강도는 약 53MPa 저하되었다.

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{UCS}}{(1-D)} \quad (5)$$

또한 일축압축강도는 모어-쿨롱의 파괴기준(mohr-coulomb failure criterion)을 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 암석의 강도 저하에 따른 점착력(Cohesion)과 내부마찰각(Internal friction angle)의 감소는 강도와 선형적 관계가 있기 때문에 식 (7)과 같이 암석의 원 강도와 손상 받은 암석의 강도 차를 이용하여 획득 가능하다(Cai 등, 2007). 따라서 본 연구에서는 식 (7)에 최소자승법(Least square method)을 적용하여 두 강도정수를 획득하였다.

해석결과 Fig. 15와 같이 5개 시료의 점착력과 내부마찰각은 평균 26MPa과 56°이며 균열손상응력이전까지는 점착력과 내부마찰각은 원 결과보다 7%, 3% 감소하였지만 일축 압축강도의 약 80%, 90% 수준에서부터 결과는 각각 62%, 24% 감소하여 파괴 시에는 점착력은 소실, 내부마찰각은 31% 감소한 것으로 나타났다. 여기서, 이러한 결과는 Kwon 등(2009)이 수행한 결과를 토대로 획득하였으며 Table 5는 위 결과를 토대로 제안된 균열손상기준에 따른 KURT 화강암의 손상규준이다.

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

$$\int_{\rightarrow \min} = \left(\frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} - D \frac{2c^d \cos \phi^d}{1 - \sin \phi^d} \right) \quad (7)$$

Fig. 14. Rock strength with stress ratio for failure stress

Table 5. Crack development and damage criteria of KURT granite

Crack damage threshold	Damage degree (AE energy)	b value	ib value	Reduction ratio (%)			
				Rock strength	Cohesion	Internal friction angle	Axial deformation modulus
$\sigma_{cc} \sim \sigma_{ci}$	<0.05	>2.03	>0.1	12<	7<	3<	<6
$\sigma_{cc} \sim \sigma_{cd}$	0.05~0.14						
$\sigma_{cd} \sim 0.9\sigma_{UCS}$	0.14~0.60	0.94~2.03	0.10~0.05	12~72	7~62	3~24	6~69
$0.9\sigma_{UCS} \sim \text{failure}$	0.60>	<0.94	<0.05	72>	62>	24>	69>

Fig. 15. Rock strengths parameters with stress ratio for failure stress (a) Cohesion (b) Internal friction angle

여기서, c , ϕ , c^d , ϕ^d 는 손상 받지 않은 암석과 손상 받은 암석의 점착력과 내부마찰각을 의미하며 D 는 손상도를 뜻한다.

5. 결 론

본 연구에서는 일축압축하중을 받는 KURT 화강암의 균열 발달특성과 손상에 관한 연구를 응력-변형을 곡선과 균열 발생 시 생성되는 AE를 활용하여 정량적으로 평가하였으며 획득된 주요 결과들은 다음과 같다.

1. 응력-변형을 곡선과 AE 에너지를 활용하여 KURT 화강암의 균열손상기준을 분석한 결과 균열개시, 균열손상응력은 두 기법 모두 평균 일축압축강도의 48%, 72%에서 발생하는 것으로 해석되었다. 그러나 응력-변형을 곡선을 활용한 결과는 일축압축강도의 약 40% 응력에서 시료 내부에 존재하는 공극 및 기존 균열이 닫히는 것으로 해석

되지만 이는 기존 연구결과와 비교할 때 15~20% 차이가 난다. 반면에 AE 에너지는 일축압축강도의 약 19% 응력 하에서 균열단합 현상이 발생하는 것으로 해석되었다.

2. 본 연구에서는 응력 수준에 따라 감소하는 축 방향 변형계수를 이용하여 KURT 화강암의 손상도를 평가하였으며 위 결과는 손상의 절대적 지표로 이용되었다. 해석결과 축 방향 변형계수는 균열손상응력 수준인 일축압축강도의 약 70% 응력이 시료에 가해짐에도 불구하고 결과는 3% 감소한 47GPa이지만 파괴 시에는 38% 감소한 29GPa로 나타났다. 따라서 이를 활용한 손상도 결과 일축압축강도의 70% 응력 하에서는 손상이 0.06이지만 일축압축강도의 80%, 90% 응력에서는 0.33, 0.69로 손상은 급격히 증가하였다.
3. AE 에너지를 활용한 손상도 분석 결과의 경우 균열손상 응력까지는 AE 신호의 진폭수준과 발생빈도가 상대적으로 미약하기 때문에 손상은 0.14 진행된 것으로 해석되었으나 일축압축강도의 80% 수준의 응력이 시료에 가해지면서부터 손상은 0.34, 90% 수준에서는 0.60 진행되었다. b value와 ib value의 경우 일축압축강도의 70% 응력 하에서는 결과가 2.03, 0.09로 균열단합 응력구간에서의 결과와 비교할 때 약 0.21, 0.01 감소하였으나 파괴 시에는 각각 0.74, 0.03의 결과를 제시하였다.
4. AE 에너지, b value, ib value를 독립변수, 축 방향 변형계수를 활용한 손상도 결과를 종속변수로 설정한 뒤 이에 대한 상관관계를 분석한 결과 AE 에너지와 축 방향 변형계수 결과는 결정계수가 0.90으로 상관성은 매우 높은 것으로 나타났다. 이에 AE 에너지를 활용한 손상도 결과와 모어-쿨롱의 파괴규준을 이용하여 축 방향 변형계수, 암석의 강도, 점착력, 마찰각 변화를 분석한 결과 균열손상응력 이전까지는 각각 6%, 12%, 7%, 3% 감소하였으나 일축압축강도의 약 90%수준에서는 69%, 72%, 62%, 24% 이상 결과는 감소하였다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참고문헌

- 권상기(2002) 고준위 방사성폐기물처분 연구, 한국자원공학회, 제 39권 제1호, pp. 387-402.
- 이희근, 양형식(1997) 응용암석역학, 서울대학교 출판부.

- 장보안, 지훈, 장현식(2010) 황등화강암을 이용한 암석의 손상기준 결정방법 연구, **대한지질공학회지**, 대한지질공학회, 제39권 제1호, pp. 89-100.
- 장수호, 이정인(2005) 응력수준에 따른 암석의 손상기준 결정에 관한 실험적 연구, **대한지질공학회지**, 대한화약발과공학회, 제23권 제4호, pp. 31-44.
- 정주환(2010) **탄성파속도 측정법을 이용한 암반손상대 평가**, 공학박사학위논문, 전남대학교대학원.
- 천대성, 박의섭, 정용복, 박철환, 신중호(2008) AE와 MS 이벤트를 이용한 계측기술, **한국암반공학회지**, 한국암반공학회, 제18권 제1호, pp. 1-9.
- Anon. (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping Part 1: Rock and soil materials. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, Vol. 19, pp. 364-371.
- Brown, E. T. (1981) *rock characterization, testing and monitoring- ISRM suggested methods*. Oxford, Pergamon Press.
- Bieniawski, Z. T. (1967) Stability concept of brittle fracture propagation in rock. *Engineering Geology*, Vol. 2, pp. 149-162.
- Bieniawski, Z. T. (1989) *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, NY.
- Brace, W. F., Paulding, B. W. Jr. and Scholz, C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, pp. 3939-3953.
- Cai, M., Morioka, H., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Kurose, H., Minami, M., and Maejima, T. (2007) Back analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 44, pp. 538-549.
- Cox, S. J. D. and Meredith, P. G. (1993) Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emission. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, pp. 11-21.
- Diederichs, M. S. (1999) Instability of hard rock masses: The role of tensile damage and relaxation. Ph.D. Dissertation, University of Waterloo, Canada.
- Eberhardt, E., Stead, D., and Stimpson, B. (1999) Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 32, pp. 361-380.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B. and Read, R.S. (1998) Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Can. Geotech. J.*, Vol. 35, pp. 222-233.
- Grosse, G.U. and Ohtsu, M. (2008) *Acoustic Emission Testing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1954) *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton, Princeton University Press, New Jersey.
- Hatton, C. G., Main, I. G., and Meredith, P. G. (1993) A comparison of seismic and structural measurements of scaling exponents during tensile sub-critical crack growth. *J. Struct. Geol.*, Vol. 15, pp. 1485-1495.
- Kim, J. S., Kwon, S., Sanchez, M. and Cho, G. C. (2011) Geological storage of high level nuclear waste, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 721-737.
- Kwon, S., Lee, C. S., Cho, S. J., Jeon, S. W. and Cho, W. J. (2009) An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, *Tunnelling Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 1-13.
- Loland, K. E. (1980) Continuous damage model for load-response estimation of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, pp. 395-402.
- Martin, C. D. and Chandler, N. D. (1994) The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, pp. 643-659.
- Maji, A. and Shah, S. P. (1988) Process zone and acoustic emission measurements in concrete. *Exp Mech.*, Vol. 28, pp. 27-33.
- Mogi, K. (1962) Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena. *Bull. Earthq. Res.*, Vol. 40, pp. 125-173.
- Ohtsu, M. (1991) Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: application to in situ hydrofracturing test, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. B4, pp. 6211-6221.
- Ranjith, P. G., Jasinge, D., Song J. Y., and Choi, S. K. (2008) A study of the effect of displacement rate and moisture content on the mechanical properties of concrete: Use of acoustic emission, *Mechanics of Materials*, Vol. 40, pp. 453-469.
- Rao, M. V. M. S. and Lakschmi, P. K. J. (2005) Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Curr. Sci.*, Vol. 89, pp. 1577-1582.
- Shiotani, T., Bisschop, J. and van Mier, J. G. M. (2003) Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement based materials. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 1509-1525.
- Shiotani, T. and Ohtsu, M. (1999) Prediction of slope failure based on AE activity. *ASTM*, STP 1353, pp. 156-172.
- Shiotani, T., Ohtsu, M. and Ikedam, K. (2001a) Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation. *Construction and Building Materials*, Vol. 15, pp. 235-246.
- Shiotani, T., Yuyuma, S., Li, Z. and Ohtsu, M. (2001b) Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials. *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 18, pp. 118-133.
- Tang, Y.S. and Sailing, J.H. (1990) *Radioactive waste management*. Hemisphere Publishing Co, New York.

(접수일: 2012.4.23/심사일: 2012.6.26/심사완료일: 2012.9.28)