터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 11, No. 4, 2001, pp. 352~361

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 11, No. 4, 2001, pp. 352-361
J. of Korean Society for Rock Mech.

저온하에서의 온도 및 함수 조건에 따른 암석의 모드 I 파괴인성 측정

정용복[1] · 박 찬[2] · 신중호[3] · 이희근[4]

Measurement of Mode I Fracture Toughness of Rocks with Temperature and Moisture Conditions at Low Temperature

Yong-Bok Jung, Chan Park, Joong-Ho Synn and Hi-Keun Lee

Abstract. Mode I fracture toughness (K_{IC}) of the frozen rocks and that of the frozen-thawed rocks were obtained by using BDT and CCNBD specimens. The test temperatures ranged from +25℃ to -160℃. Wet and air-dry specimens of granite and sandstone were used in order to investigate the effect of water and porosity on fracture toughness. The SEM images of the frozen-thawed rocks were also analyzed to check the density of thermal cracks. The K_{IC} of the frozen rocks increased as the test temperature went down. The rate of increase was higher in wet condition than in dry condition and the rate of increase for wet granite was higher than that for wet sandstone. The K_{IC} of the frozen-thawed rocks varied within 15% from the K_{IC} of the rocks at room temperature. After one freeze-thaw process, thermal crack occurred in granite but no thermal cracks occurred in sandstone. And the crack density was increased as the temperature went down.

Key words : fracture toughness, low temperature, BDT, CCNBD, temperature dependance, ANOVA

초 록 : 저온 냉각 상태 및 냉각 후 상온 해빙 상태에서 암석의 모드 I 파괴인성을 BDT와 CCNBD 시험편을 사용하여 구하였다. 실험 온도 범위는 상온(25℃)에서 -160℃로 설정하였으며 건조 및 포화된 화강암과 사암을 사용하여 파괴인성에 대한 공극수와 공극률의 영향 정도를 조사하고자 하였다. 또한 냉각 과정에서 발생할 수 있는 열균열을 조사하기 위해서 SEM 이미지 분석도 실시하였다. 냉각된 암석의 파괴인성은 온도가 하강함에 따라 증가하였다. 이러한 증가경향은 포화시료에서 더 크게 나타났으며, 포화 시료의 경우 화강암의 증가율이 사암에 비해 크게 나타났다. 냉각 후 상온 해빙 상태에서 구한 파괴인성의 경우, 냉각을 거치지 않은 상온 상태의 파괴인성값의 15% 이내에서 결정되었다. 냉각-해빙을 거친 시료에 대한 SEM 분석결과 화강암의 경우 조암광물간의 열팽창 차이에 의한 열균열을 확인할 수 있었으며 냉각온도가 낮을수록 균열밀도가 증가하였다.

핵심어 : 파괴인성, 저온, BDT, CCNBD, 온도의존성, SEM, 분산분석

1. 서 론

LNG나 LPG 및 저온 식품의 지하저장에 관한 많은 관심에도 불구하고 아직까지 저온에 노출된 암반의 열역학적 거동에 대한 연구는, 핵폐기물 처분과 관련된 고온하 암반의 열역학적 거동에 대한 연구에 비교할 때 미미한 상태이다(Inada, 1989, Lindblom, 1997). 특히 저온하 암반 거동에 대한 파괴역학적인 연구는 비용 및 기타 이유로 아직까지 초보적인 단계이다(Ishzuka et al., 1984, Dwivedi et al., 2000).

저온 상태에서 암석은 인장(모드 I) 열응력을 받게 되며 온도가 하강함에 따라 급격한 온도 구배, 또는 구성광물간의 열팽창 차이로 인한 인장 균열들이 발생하게 된다. 따라서 온도변화에 따른 균열 발생 현상을 좀 더 정확하게 설명하기 위해서는 파괴역학적 접근이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 저온하 암석의 모드 I 파괴인성 변화와 요인을 분석하기 위해서 황등화강암과 보령사암의 파괴인성을 BDT (Brazilian Disk Test, Guo et al., 1993) 및 CCNBD (Cracked Chevron Notched Brazilian Disk, ISRM, 1995) 시편을 사용하여 저온실험을 통해 구하였다.

[1]정회원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원
[2]정회원, 한국지질자원연구원 선임연구원
[3]정회원, 한국지질자원연구원 책임연구원
[4]정회원, 서울대학교 명예교수
접수일 : 2001년 12월 3일
심사 완료일 : 2001년 12월 18일

Table 1. Mineralogical compositions of tested rocks.
(unit : wt.%)

	Hwangdeung granite	Boryong sandstone
Albite	44.9	4.4
Chlorite	-	3.7
Muscovite	-	17.2
Quartz	39.8	74.7
Biotite	6.6	-
Microcline	8.6	-
Sum	99.9	100

2. 시료 및 특성

2.1 시료 선정

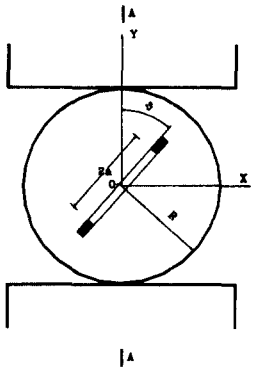
파괴인성에 대한 온도만의 영향을 파악하기 위해 비교적 균질하며 등방성을 가진 것으로 알려진 황등화강암과 보령사암을 대상암석으로 선정하였다. 두 암석에 대한 XRD(X-Ray Diffraction) 분석 결과를 Table 1에 표시하였다. 화강암의 경우 석영과 알바이트가 주요 성분이며 사암의 경우 대부분이 석영으로 구성되었다. 이로부터 온도 하강에 따라 인장 열응력이 암석 내부에 발생할 경우 열팽창계수가 다른 두 가지 광물로 구성된 화강암에서 열균열이 발생할 확률이 더 높을 것이라고 예측할 수 있다.

2.2 시료 성형

암석내 존재하는 불균질성을 최소화하기 위해 같은 조건에서 실험될 시료의 경우 동일한 블록 내에서 코어링하여 시료를 준비하였다. BDT 시료의 경우 NX사이즈로, CCNBD 시료의 경우 충분한 노치 길이를 위해 직경 75 mm 사이즈로 코어링을 실시했으며 두 종류의 시료 모두 ISRM 제안기준에 적합하도록 성형하였다 (Bieniawski, 1977, ISRM, 1995).

준비된 시료는 포화 및 건조 상태로 구분하였다. 건조시료의 경우, 오븐 건조시 발생할 가능성이 있는 미세한 열균열의 발생을 피하기 위해 공기조화가 되는 실험실에서 일주일간 자연상태로 건조하였으며 포화시료의 경우 수조에서 일주일 이상 보관하였다가 실험시 사용하였다.

Fig. 1은 ISRM 제안에 따른 CCNBD 시편의 형상 및 단면이며 CCNBD 시편의 경우 노치와 관련된 기하학적 기준이 제시되어 있다. 따라서 성형된 시편의 규격이 ISRM 제안기준에 부합되는지를 조사하였으며 기준에 맞는 시료만을 실험에 적용하였다. Fig. 2는 준비된 시료가 ISRM 기준에 부합됨을 보여주는 것이다.



Section A-A

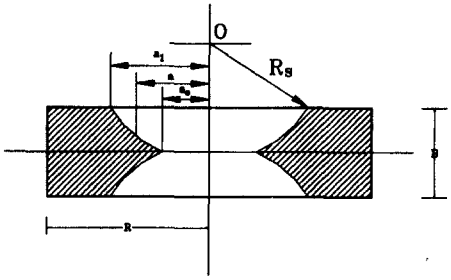


Fig. 1. The geometry of CCNBD specimen(ISRM, 1995).

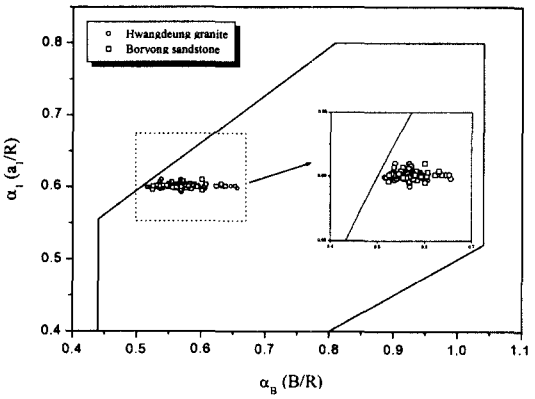


Fig. 2. Geometrical validity of prepared CCNBD specimens.

2.3 시료의 특성

실험에 사용된 두 종류 암석의 물리적, 역학적 성질을 Table 2에 표시하였다. Table 2에 표시된 값들은 3~5회 실험값의 평균치이며 화강암과 사암의 겉보기 공극률이 크게 차이가 남을 알 수 있다.

Table 2. Physical and mechanical properties of tested rocks.

	Granite	Sandstone
Bulk specific gravity	2.68	2.72
Absorption ratio (%)	0.25	0.12
Apparent porosity (%)	0.67	0.30
P-wave velocity (m/sec)	4,300	5,580
S-wave velocity (m/sec)	2,290	3,060
Uniaxial compressive strength (MPa)	188	217
Brazilian tensile strength (MPa)	8	20
Young's modulus (GPa)	51	63
Poisson's ratio	0.24	0.21

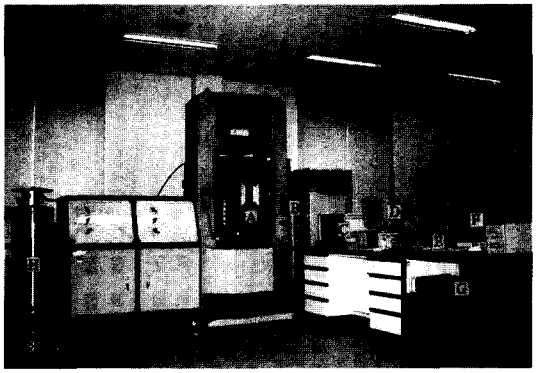


Fig. 3. A view of Interlaken rock testing system (A: Environmental chamber, B: Temperature controller, C: DDC4000 controller, D: System control PC, E: AE measurement system, F: Data acquisition PC, G: Dynamic strain amplifier, H: LN_2 tank).

3. 저온 실험 장비

한국지질자원연구원의 인터라켄 암석시험시스템은 저온챔버를 부착하여 -180°C 범위까지 저온 역학 실험을 수행할 수 있는 장비이다. 액체질소를 포함하여 저온 실험용으로 설치된 전체 시험시스템 모습이 Fig. 3에 있으며 Fig. 4는 개념도이다. 저온 실험의 주된 구성요소는 하중기 및 콘트롤러, 저온챔버 및 온도조절장치 그리고 하중, 변형률, 온도 등을 측정하는 자료획득장치이다.

각 장비의 특성 및 제원은 참고문헌에 자세하게 설명되어 있다(정용복, 2000).

4. 실험 방법

4.1 냉각-저온 실험

냉각-저온 실험은 암석을 특정 온도까지 챔버내에서 냉각시킨 후 온도를 유지한 상태에서 하중을 가하는 방식을 말한다. 냉각시 온도조절장치를 사용하여 냉각 속도를 2°C/min 으로 유지하였다. 목표 온도에 도달한 뒤, 시료 내부까지 동일한 온도로 냉각시키기 위해 약 한시간 정도 온도를 유지한 뒤 하중을 가하였다. 이러한 시간-온도 곡선을 개략적으로 Fig. 5에 나타내었다. 온도조절장치에서 검사하는 온도는 챔버 내부의 온도이기 때문에 시료내부와 챔버내의 온도가 다를 수 있다. 따라서 Fig. 6과 같이 시료 내부 온도를 조사하기 위한 추가 시료를 챔버내에 설치해서 시료 내부 온도가 목표

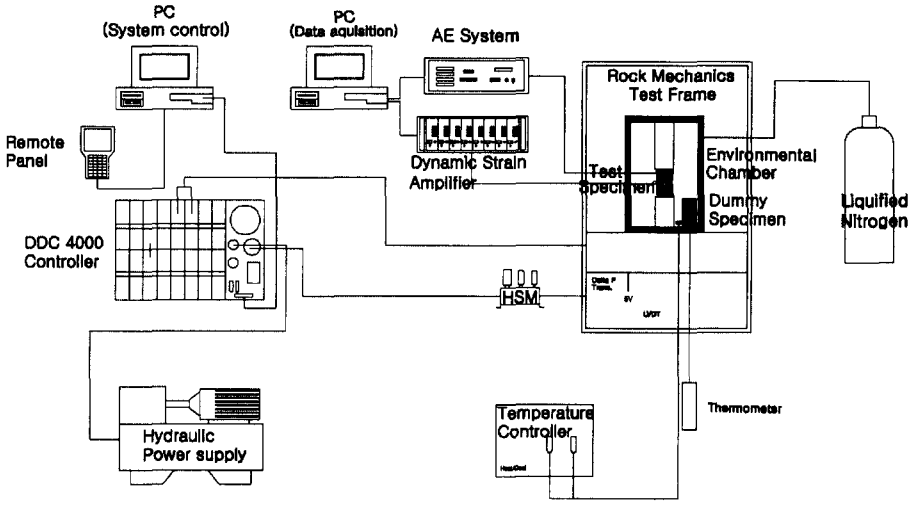


Fig. 4. A schematic diagram of the rock testing system at low temperature.

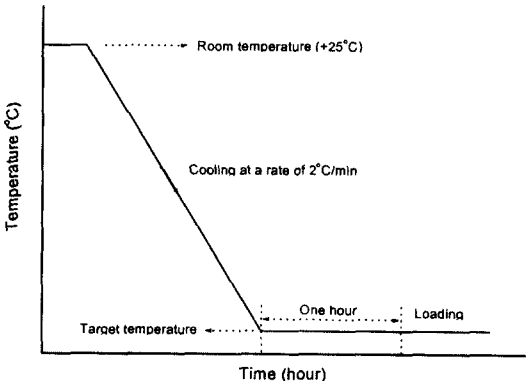


Fig. 5. Cooling strategy for fracture toughness tests on frozen rocks.

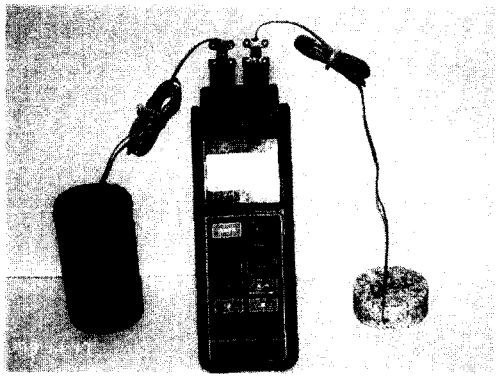


Fig. 6. Dummy specimens for checking uniform temperature distribution with a digital temperature and thermocouples.

온도에 도달함을 추가로 확인한 뒤 실험을 수행하였다.

Dwivedi(2000)는 이러한 냉각 시간을 열전도만을 고려해서 해석적으로 분석하였지만 냉매와 암석시료 표면 사이의 낮은 대류열전달계수(h, W/m^{2}K)를 고려하지 않았다. 온도 측정 결과, NX 시료의 경우 1시간 정도 온도를 유지할 경우 시료 내부까지 동일한 온도분포를 보임을 확인하였다.

하중제어 변수로는 변위를 사용하였으며, 0.002mm/sec의 속도로 재하하였다. 실험 온도는 25°C(상온), -5°C(포화시료만 실험), -20°C(저온식품저장시설), -50°C (LPG 저장시설), -100°C(에틸렌 저장시설), -160°C (LNG 저장시설)에서 수행하였으며 건조 및 포화 시료에 대해서 동일한 실험을 반복하였다. 또한 실험상의 오차나 암석 자체의 불균질성을 줄이기 위해 동일한 조건에서 3~5회 반복 실험을 수행하여 평균치를 구하였다.

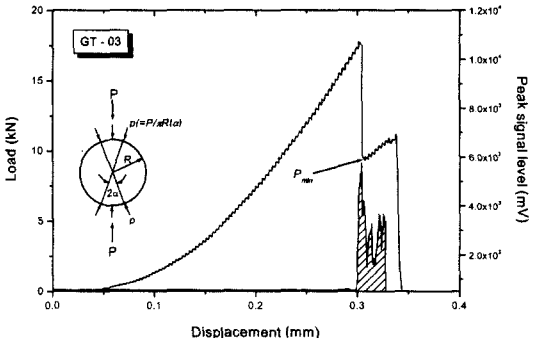


Fig. 7. A typical load-displacement curve and AE signal during BDT test.

4.2 저온열처리(냉각-해빙) 실험

반복되는 열하중을 받는 암반의 상태를 모사하기 위해서 저온열처리 실험을 수행하였다. 이 실험은 포화 및 건조 시료를 냉각-해빙시킨 후 상온 상태에서 수행한 실험을 의미한다. 저온열처리 실험의 경우 시료가 상온 상태가 된 후 냉각 이전의 무게가 될 때까지 상온 상태에서 건조시킨 후에 하중을 가하였다. 나머지 실험조건은 냉각-저온 실험과 동일하다.

또한 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 분석을 통해서 냉각-해빙 과정에서 열균열이 발생했는지를 조사하였다.

4.3 파괴인성 계산식

4.3.1 BDT

BDT의 경우 시료의 기하학적 형상과 임계하중(Fig. 7)을 기록하여 파괴인성을 계산한다. 임계하중을 얻기 위해서는 변위제어모드로 실험을 수행해야 하며 계산식은 다음과 같다(Guo et al., 1993).

$$K_{IC,\,BDT} = BP_{min}\,\Phi_{max}\,(c/R) \tag{1}$$

$$B = \frac{2}{\pi^{3/2}R^{1/2}t\alpha} \tag{2}$$

여기서 B는 무차원 형상계수, Φ는 균열길이의 함수인 무차원 응력확대계수(Stress Intensity Factor, SIF), c는 시료중심에서 발생하는 균열길이의 1/2, R은 시료의 반지름, t는 두께, α는 접촉각이다. 가압판과 시료 사이의 접촉각은 ISRM 제안에 의하면 10°(α = 5°)이다. 이 경우 최대 무차원 응력확대계수는 0.112가 된다(Fig. 8, Guo et al. 1995). 본 시험도 ISRM 제안에 따라 수행하였으므로 식 (1)에서 Φ_{max}에 0.112를 대입하여 파괴인

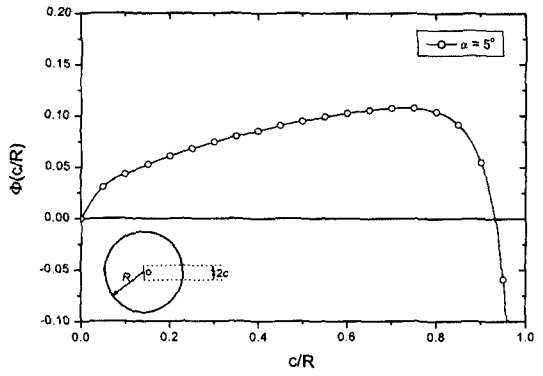


Fig. 8. Dimensionless SIF for the diametral crack in the Brazilian test condition(after Guo et al., 1993).

성을 계산하였다.

4.3.2 CCNBD

CCNBD 시험편의 경우 기하학적 형상과 파괴하중(P_{max})만 기록하면 다음 식을 사용하여 파괴인성을 계산할 수 있다(ISRM, 1995).

$$K_{IC,ISRM} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min} \quad (3)$$

여기서 P_{max}는 파괴하중, B는 시료의 두께, D는 시료의 직경이며 Y_{min}은 임계 무차원 응력확대계수로서 시료의 형상(Fig. 1)에 의해 결정되는 값이며 다음 식으로 계산한다.

$$Y_{min} = ue^{v\alpha_1} \quad (4)$$

$\alpha_1 = a_1/R$, u와 v는 각각 $\alpha_0(=a_0/R)$와 $\alpha_B(=B/R)$에 의해 결정되는 상수이며 ISRM(1995)에 표 형태로 제시되어 있다. α_0와 α_B의 경우 ISRM에서 제시한 표에 정확히 일치하는 값이 없을 경우 보간값을 사용한다.

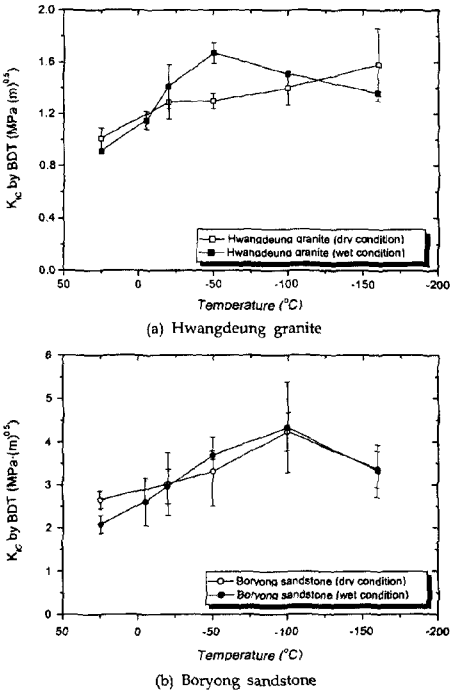
5. 실험 결과 및 분석

5.1 냉각-저온 실험

냉각-저온 상태에서 BDT 및 CCNBD 시험편을 사용하여 구한 파괴인성을 Fig. 9~Fig. 10에 표시하였다. 모든 그래프상의 파괴인성은 평균과 표준편차를 사용하여 도시한 것이다.

5.1.1 온도에 따른 파괴인성의 변화

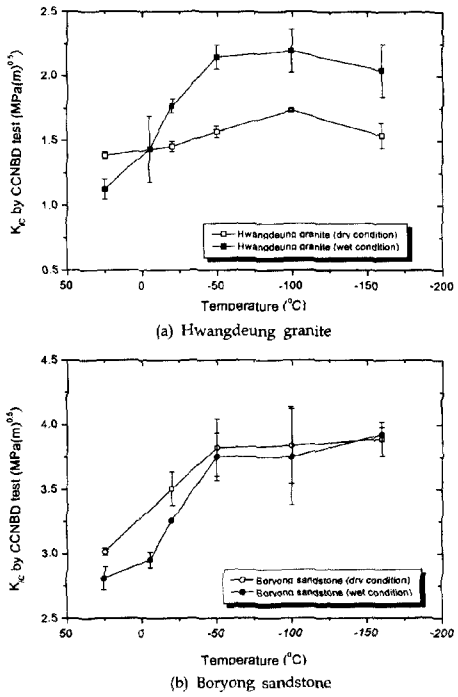
냉각온도가 하강함에 따라 암석의 파괴인성은 상온에서의 파괴인성에 비해서 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 9, 10). 파괴인성은 파괴하중에 비례하기 때문에



(a) Hwangdeung granite

(b) Boryong sandstone

Fig. 9. Mode I fracture toughness of frozen *BDT* specimens



(a) Hwangdeung granite

(b) Boryong sandstone

Fig. 10. Mode I fracture toughness of frozen CCNBD specimens.

이러한 경향은 암석의 강도나 탄성계수와 같은 역학적 특성이 온도하강에 따라 증가하는 현상과 동일한 것이다(Inada, 1989, Dahlström, 1992).

-100°C 이하에서는 파괴인성의 증가효과가 감소하거나 일정한 것으로 나타났다. Mellor(1973)는 암석의 최대강도를 -120°C 근처에서 얻었으며 그 이하의 온도에서는 증가율이 감소하거나 유지되는 것으로 보고하였다. 파괴인성의 경우도 유사한 결과를 보여주었다. 이러한 원인의 하나로서 Mellor(1973)는 -120°C 이하에서 암석입자와 얼음 사이에 새로운 공간이 형성되며 이로 인해 강도의 증가가 둔화되는 것으로 제시하였다. 또 다른 이유로는 온도가 계속해서 하강함에 따라 암석의 구성 광물간 열팽창 차이로 인한 변형률이 증가하고 이 값이 임계값에 도달할 때 광물간에 균열이 생성된다. 이러한 미세균열의 수가 증가하면 파괴강도의 저하를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 -70°C 범위까지 적용할 수 있는 AE 센서를 사용하여 냉각중에 AE를 측정하였다. -50°C까지는 AE 신호가 검출되지 않았으며 이하의 온도에 대해서는 AE 신호 측정이 불가능하여 SEM 분석 결과를 사용하여 미세균열 발생여부를 조사하였다. 암석의 종류나 입자의 크기, 구속 조건 등에 따라서 다르겠지만 화강암의 경우 대략 -100°C부터 구성광물간 열팽창 차이에 의한 것으로 추정되는 미세균열이 발생하였으며 사암의 경우에는 -160°C까지도 거의 균열이 발생하지 않았다.

파괴인성의 온도하강에 따른 증가 현상이 암석내의 불균질성에 의한 편차보다 크다고 말할 수 있는지 확인하기 위해 유의수준 5% 조건에서 분산분석(ANalysis Of VAriance, ANOVA)을 실시하였다(Irwin et al., 1990). Table 3은 분산분석 결과를 요약한 것이다. 모든 경우에 있어서 기각조건($F_{value} > F_{0.05}$)을 만족하므로 온도 하강에 따른 파괴인성의 증가는 유효한 것이다. 즉, 파괴인성의 변화는 온도에 의한 것이라고 유의수준 5% 범위에서 말할 수 있는 것이다.

5.1.2 흡수율 및 공극률 차이에 따른 파괴인성의 변화

포화 화강암의 경우 건조 화강암에 비해 온도하강에 따른 파괴인성의 증가가 현저하게 나타났다(Fig. 9(a), Fig. 10(a)). 이는 암석 공극내에 존재하는 공극수가 얼

Table 3. Analysis of variance for fracture toughness variation. (unit: MPa$\sqrt{m}$)

(a) dry granite

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Treatment	0.21424	4	0.05356	18.88508	0.00012	3.47805
Error	0.02836	10	0.00284			
Total	0.24261	14				

(b) wet granite

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Treatment	2.76990	5	0.55398	21.60256	0.00001	3.10587
Error	0.30773	12	0.02564			
Total	3.07763	17				

(c) dry sandstone

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Treatment	1.61662	4	0.40415	11.70319	0.00087	3.47805
Error	0.34534	10	0.03453			
Total	1.96196	14				

(d) wet sandstone

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Treatment	3.26352	5	0.65270	20.84052	0.00002	3.10587
Error	0.37583	12	0.03132			
Total	3.63935	17				

음으로 상변화하면서 결합력을 증가시키기 때문이다.

얼음의 인장강도는 온도하강에 따라 증가하는 것으로 보고되었다(Inada, 1989). 온도가 하강함에 따라 공극수는 점진적으로 얼음으로 변한다. 최종적으로 얼음은 그라우팅 역할을 하게 되며 이를 보통 'ice grouting'이라고 말한다(Dahlström, 1992).

사암의 경우 포화시료와 건조시료간의 차이가 화강암에 비해 명확하지 않다. 이는 실험에 사용된 사암의 공극률이 0.30%로 매우 낮아서 공극수의 역할이 크지 않은 것으로 판단된다. Dwivedi(2000)는 함수율이 증가함에 따라 저온에서 파괴인성이 증가하는 것을 보고하였다.

온도하강에 따른 파괴인성이 건조 및 포화 시료간에 차이가 있다고 말할 수 있는지를 결정하기 위해서 실험결과를 가지고 유의수준 5% 범위에서 분산분석을 실시하였다. 동일온도에서 수행한 포화 및 건조 시료에 대해서 분산분석을 수행한 결과를 Table 4에 표시하였다.

화강암의 경우 모든 실험 온도에서 기각조건이 성립하므로 포화시료와 건조시료간에 차이가 있다고 말할 수 있다. 즉 공극수에 의해 포화화강암에서 온도하강에 따른 파괴인성의 증가가 건조 화강암에 비해서 더 크게 나타났다고 말할 수 있는 것이다. 반면 사암의 경우에는 기각조건이 상온과 -20°C에서만 성립하고 나머지 온도범위에서는 성립하지 않는다. 즉 차이가 있다고 말할 수 없는 것이다.

이상의 결과로부터 공극률과 함수율이 저온하 암석의 파괴인성 변화에 영향을 주는 주요한 인자임이 판명되었다. 또한 온도와 포화도를 고려한 반복이 있는 이원분산분석결과 화강암의 경우 두 인자 사이에는 상호작용 효과가 있는 것으로, 사암의 경우에는 상호작용효과가 없는 것으로 나타났다(Table 5). 따라서 화강암의 경우 온도하강 조건과 포화도 조건을 결합할 경우 두 조건의 단순합으로 파괴인성의 변화를 표시할 수 없다. 사암의 경우에는 낮은 공극률로 인해서 상호작용효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

5.2 저온열처리(냉각-해빙) 실험 결과

일반적으로 저온저장시설의 경우 냉각과 해빙이 반복적으로 발생한다. 따라서 이러한 반복적인 열하중을 받는 암반의 역학적 특성변화를 파악하기 위해 냉각-해

Table 4. Analysis of variance for dry and wet samples. (unit: MPa$\sqrt{m}$)

Temperature (°C)	25	-20	-50	-100	-160
F value of granite	29.54432	66.73846	90.37418	22.23685	16.75342
	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject
F value of Sandstone	14.44483	10.51099	0.179157	0.10535	0.18602
	Reject	Reject	Accept	Accept	Accept

* Level of significance = 0.05, F0.05(2,2) = 7.70865

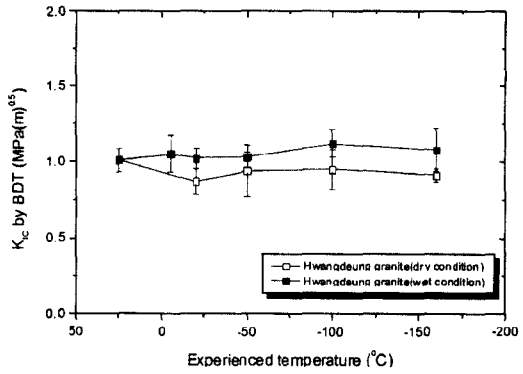
Table 5. Result of 2-way ANOVA for temperature and water content. (unit: MPa$\sqrt{m}$)

(a) Granite

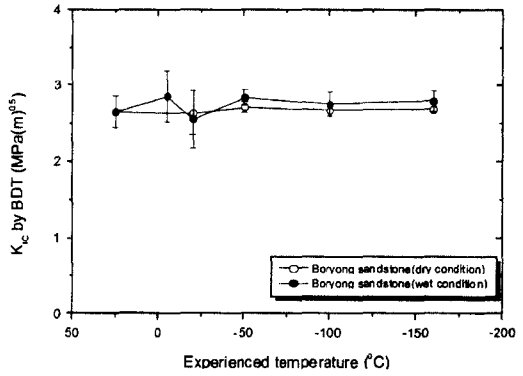
Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Temperature	0.796887	1	0.796887	77.709668	2.52175E-08	4.3512500
Dry-Wet	1.8424199	4	0.4606049	44.916582	1.01667E-09	2.8660807
Interaction	0.7011865	4	0.1752966	17.094312	3.07791E-06	2.8660807
Error	0.2050935	20	0.0102546			
Total	3.5455874	29				

(b) Sandstone

Source of variation	Sum of squares	DOF	Mean square	F	P-value	$F_{0.05}$
Temperature	0.0992335	1	0.0992335	2.7809481	0.110974507	4.3512500
Dry-Wet	4.0613770	4	1.0153442	28.454298	5.28631E-08	2.8660807
Interaction	0.0757626	4	0.0189406	0.5307983	0.714520113	2.8660807
Error	0.7136667	20	0.0356833			
Total	4.9500398	29				

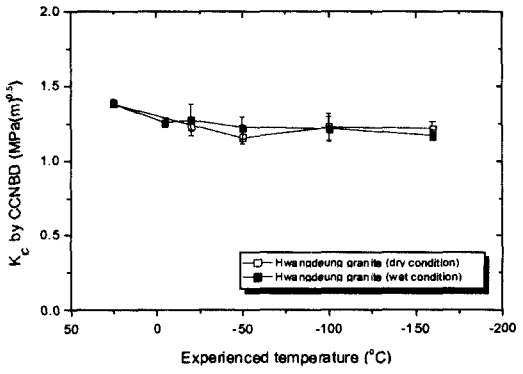


(a) Hwangdeung granite

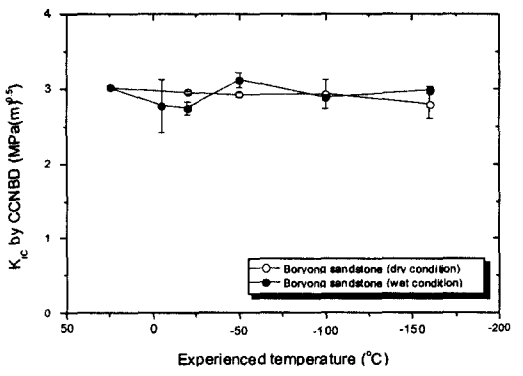


(b) Boryong sandstone

Fig. 11. Mode I fracture toughness by BDT after thermal treatment.



(a) Hwangdeung granite



(b) Boryong sandstone

Fig. 12. Mode I fracture toughness by CCNBD after thermal treatment.

빙을 거친 시료에 대해서 상온에서 파괴인성을 구하였다. 냉각-상온 실험 결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 표시하였다.

대부분의 결과가 상온에서의 파괴인성에 비해서 크게 변하지 않는 것으로 나타났으며 건조 및 포화시료 사이의 차이도 크게 나지 않았다. 그러나 화강암의 경우 사암에 비해 변화폭이 약간 크게 나타났다(Fig. 11, Fig. 12). 5.1절에서 언급한 동일한 방식의 분산분석(유의수준 5%) 결과 저온열처리 온도에 따른 파괴인성의 차이는 포화 및 건조 화강암에서만 유효한 것을 나타났으며 사암의 경우에는 저온열처리 온도에 따른 파괴인성의 차이가 없는 것으로 나타났다.

화강암과 사암에서 나타난 이러한 현상은 구성광물의 열팽창차이에 기인한 것으로 추정된다. 즉, 화강암의 경우 두 종류의 광물이 주성분이며 사암은 거의가 석영으로 이루어져 있다(Table 1). 따라서 열팽창 차이에 의한 열균열의 발생확률이 화강암에서 더 높다. 이러한 현상은 다음의 주사전자현미경 분석을 통해서 확인하였다.

5.3 주사전자현미경 분석

-100°C 및 -160°C로 저온열처리를 한 시료를 가지고 SEM 시편을 제작한 뒤 20배 확대사진을 촬영하여 열균열을 분석하였다. 각각의 이미지로부터 열균열의 밀도(D)를 다음 식을 이용하여 계산하였다(Homand-etienne, 1989).

$$D = \frac{\sum a_i}{A} = \frac{N \cdot a_{avg}}{A} \quad (5)$$

여기서 A는 조사대상 면적이며 a_i는 각 균열의 길이, N은 전체 균열의 수, a_{avg}는 전체균열길이의 평균치이다.

촬영 이미지를 분석한 결과 화강암에서만 열균열이 발생하였다. 따라서 균열밀도는 화강암에 대해서만 계

Table 6. Results of SEM image analyses of granite.

	Mean(mm)	SD(mm)	No.	$D(mm^{-1})$
Reference	0.29	0.17	138	2.71
Dry, -100°C	0.32	0.26	183	4.01
Wet, -100°C	0.43	0.27	185	5.45
Dry, -160°C	0.42	0.30	187	5.36
Wet, -160°C	0.41	0.28	230	6.49

산을 하였으며 저온열처리 온도가 낮을수록 균열밀도가 증가한 것으로 나타났다(Table 6). 이러한 열균열로 인해 저온열처리 온도 하강에 따라 화강암의 파괴인성이 감소한 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 저온열처리(냉각-해빙)를 거친 암석의 경우 저온열처리 온도와 조암광물간의 열팽창계수 차이가 암석의 파괴인성에 영향을 미치는 주된 인자임을 확인하였다. 본 연구에서는 일회의 저온열처리만을 시행하였으나 좀더 현실적인 역학적 특성의 변화를 파악하기 위해서는 열처리 회수를 증가시킨 추가적인 연구가 요구된다.

6. 결 론

저온하 암석의 파괴인성에 대한 실험 및 영향요소 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

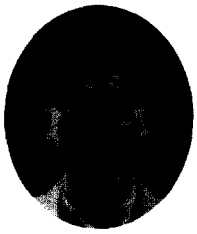
1) 0°C 이하의 저온조건에서 화강암과 사암의 모드 I 파괴인성은 상온에서의 값에 비해 모두 크게 나타났으며 포화 암석의 경우 온도하강에 따른 파괴인성 증가 현상이 건조 암석에 비해 크게 나타났다. 또한 공극률이 사암에 비해 큰 화강암에서 온도하강에 따른 파괴인성증가 현상이 더 현저하게 나타났다. 실험 자료에 대한 분산분석 결과, 이러한 현상의 원인으로 온도하강에 따른 조암광물 자체의 강도 증가 효과와 공극수의 결빙에 따른 결합력의 증가 효과가 주된 것으로 나타났다.

2) 저온열처리를 거친 암석의 파괴인성은 상온에서 구한 자료의 15% 이내에서 변하였다. 화강암의 경우 저온열처리 온도가 낮아짐에 따라 파괴인성이 점차적으로 감소하였으며 사암의 경우에는 거의 변화를 보이지 않았다.

3) 조암광물의 열팽창 차이로 인해 발생한 미세균열을 SEM 분석을 통해 확인하였다. 사암의 경우 이러한 열균열이 거의 발생하지 않았으며 화강암의 경우에만 가시적으로 확인되었다. 화강암의 SEM 이미지에 대한 균열밀도 계산 결과, 저온열처리 온도가 하강할수록 균열밀도가 증가하였다. 이러한 열균열로 인해 화강암의 파괴인성이 저온열처리 온도 하강에 따라 감소한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Inada, Y., 1989, Low temperature storage of gases in underground openings, Storage of Gases in Rock Caverns, 259-266.
2. Lindblom, U. and Glamheden, R., 1997, Development of design criteria for low temperature gas storage, Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, 317-321.
3. Ishizuka, Y., Hibi, K. and Kinoshita, N., 1984, Fracture toughness test of rocks under low temperature, 16th Symp. On Rock Mechanics, Japan, 61-65.
4. Dwivedi, R.D., Soni, A.K., Goel, R.K. and Dube, A.K., 2000, Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions, Int. J. Rock Mech. & Ming. Sci., 37, 1267-1275.
5. Guo, H., Aziz, N.I. and Schmidt, L.C., 1993, Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test, *Engineering Geology* 33, 177-188.
6. ISRM, 1995, Suggested methods for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc specimens, Int. J. Rock Mech. & Ming. Sci. & Geomech. Abstr. 32(1), 57-64.
7. Bieniawski, Z.T., 1977, Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, Int. J. Rock Mech. & Ming. Sci. & Geomech. Abstr. 15(3), 99-103.
8. 정용복, 2000, 저온하에서의 암석의 변형 거동 및 파괴특성에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문.
9. Dahlström, L., 1992, Rock mechanical consequences of refrigeration a study based on a pilot scale rock cavern, Ph.D. thesis, Chalmers University.
10. Mellor, M., 1973, Mechanical properties of rocks at low temperatures, Int. Conf. On Permafrost 2nd, 334-344.
11. Irwin, M., John F. and Richard J., 1990, Probability and Statistics for Engineers, Prentice-Hall.
12. Homand-etienne, F. and Houpert, R., 1989, Thermally induced microcracking in granite: characterization and analysis, Int. J. Rock Mech. & Ming. Sci. & Geomech. Abstr. 26(2), 125-134.

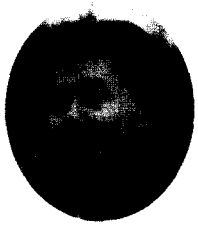


정 용 복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부, 공학박사
Tel: 02-880-7232
E-mail: cozy@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공학연구소 특별연구원

신 중 호

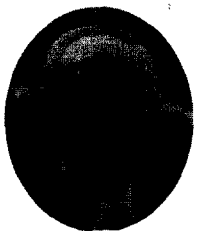
1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1990년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부, 공학박사
Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 책임연구원



박 찬

1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과, 공학사

Tel: 042-868-3245
E-mail: chan@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 선임연구원



이 희 근

1970년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學) 대학원 자원공학과, 공학박사
Tel: 02-880-7222
E-mail: irram@plaza.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 명예교수