

## 방사성폐기물 지층처분을 위한 화강암의 열역학적 파괴거동 연구

양형식<sup>1)</sup> · 장명환<sup>2)</sup>

### A Study on Thermomechanical Failure Behavior of Granites for Radioactive Waste Repository

Hyung-Sik Yang and Myoung-Hwan Jang

**ABSTRACT** High temperature confined compressive tests for thermomechanical failure criteria were carried out for Iksan and Whandeung granites. Authors suggested new polynomial type failure coefficient functions by which conventional Hoek-Brown failure criteria was extended to thermomechanical one. Obtained results are as follow; 1) Failure coefficients,  $m$  and  $s$  of Hoek and Brown's empirical failure criteria were decreased as temperature increased. 2) Theoretically calculated values by suggested equations and experimented ones by confined compressive test were well coincided.

## 1. 서 론

고준위 방사성 폐기물 지층처분장은 그 특성상 심부(深部) 암반층에 위치할 수밖에 없고 특히 처분 후 canister의 발열로 높은 온도장이 형성되며 장시간 생태계와 격리되어야 하므로 작용 응력조건이 까다롭고 거동이 복잡하다. 암석의 열역학적인 거동을 예측하기 위해서는 해석에 필요한 재료정수들을 현장조건이 반영될 수 있도록 측정하여야 하고, 이 정수들을 이용한 열역학적 해석을 하기 위해서는 지하공동내의 온도변화 및 복잡한 경계조건 등이 반영될 수 있는 수치해석 모델을 선정할 필요가 있다.

삼축압축실험은 암석의 내부마찰각( $\phi$ )과 점착력( $c$ ), Hoek-Brown의 파괴조건계수( $m$ ,  $s$ ) 등을 결정하는 중요한 도구가 되므로 Murrell<sup>1)</sup>, Hoek<sup>2,3)</sup>, Franklin<sup>4)</sup>, Brook<sup>5)</sup>, Johnston<sup>6)</sup>, Turk<sup>7)</sup> 등에 의하여 꾸준히 연구되었다. 그러나 이러한 연구들은 온도에 의한 파괴정수의 변화가 고려되지 않아 수치해석상 온도변화에 의한 열응력장에서의 암석의 파괴거동을 적절하게 표현하기에는 무리가 있었다.

본 연구에서는 암석의 열파괴 거동을 예측하기 위하

여 일반 암반뿐만 아니라 풍화 암반에 대해서도 비교적 적용성이 높으며, UDEC(Universal Distinct Element Code)<sup>8)</sup>에서 전단파괴 모델식으로 사용하고 있는 Hoek-Brown의 경험파괴식의 파괴조건계수를 온도의 함수로 유도하여 열응력 및 심부상태의 지응력하에서도 적용할 수 있도록 제안하였다.

## 2. 온도함수로 확장한 Hoek-Brown의 파괴 조건식

암석이나 암반은 일반적으로 불균질하고 파괴양상이 취성적이며 봉압이 작용하면 파괴강도가 증가하므로 이를 고려할 수 있는 파괴조건식을 얻기가 쉽지 않다.

Hoek와 Brown은 Griffith의 이론에 기초를 두고 현장에서 수집된 삼축압축 실험자료들을 분석한 결과 신선암은 물론 이방성암, 불연속면이 심하게 발달된 암반에 대한 최대, 최소주응력 사이에 비선형관계가 있다는

- 1) 정회원, 전남대학교 자원공학과 부교수
  - 2) 정회원, 대한광업진흥공사 기술연구소 선임연구원
- \* 이 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구 과제 연구비 지원을 받아 이루어진 연구 결과의 일부임(과제번호 : 941-0800-018-2)

것을 밝혔으며 이로부터 경험적 파괴조건식

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

을 제안하였다.<sup>9)</sup> 여기서  $\sigma_1$ 은 최대주응력,  $\sigma_3$ 는 최소주응력 또는 봉압,  $\sigma_c$ 는 무결암의 단축압축강도를 나타내고,  $m$ ,  $s$ 는 파괴조건 계수이다.

탄성체 내의 원형공동 주변 암반의 2차원 응력분포를 나타낼 때, 응력은 초기지압의 크기와 거리의 함수로 표시되고, 탄성정수인  $E$  및 포아송비  $\nu$ 는 어느 식에도 포함되지 않는다. 즉, 무한한 암반내의 원형공동 주변 응력을 나타내는 식은 터널의 반경  $a$ 와 중심에서부터의 거리  $r$ 에대한 무차원 파라미터  $\frac{a}{r}$ 의 함수로서 결정되고, 공동주변내 암반이 선형탄성재료이면 응력패턴은 재료의 특성에 의존하지 않으며, 공동경계에서의 응력값은 공동반경의 크기와는 관계없이 같은 탄성암반내에 있으면 같은 값이 되는 것을 의미한다.

그러나 실제 암반에서 응력은 같을지라도 절리성 암반 또는 열응력 등에 의하여 암석의 강도가 저하된 암반에서는 공동의 크기와 암반의 지질학적 성질에 따라 공동의 안정성이 저하된다. 특히 방사성 폐기물의 지층 처분장 같이 수천년 동안 방사성 물질이 붕괴되어 높은 열이 작용하게되면 공동주변에서의 열응력 분포는 온도증가에 따른 암반의 파괴강도 저하에 의하여 암반구조물의 이완영역을 확대시킬 수 있다. 따라서 암반에 적용할 수 있는 열역학적인 파괴조건식이 필요하다.

본 연구에서는 열응력을 받는 암반구조물의 안정성을 평가하고자 Hoek-Brown의 파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 를

$$m_T = m(T) \quad (2)$$

$$s_T = s(T) \quad (3)$$

와 같은 온도의 함수로 가정하였다. (2)식, (3)식의 함수는 고온 삼축압축실험 결과로부터 최소자승법으로 구한 파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 들로부터  $T(^{\circ}\text{C})$ 를 변수로 하는 다항식 형태로 나타낸 것이다. 실험값과 근사식과의 오차가 최소로 되는 근사함수(近似函數)를

$$p_n(T) = c_0 + c_1T + \dots + c_nT^n = \sum_{i=0}^n c_i T^i \quad (4)$$

라 하면 실험값과 잔차제곱합

$$S = \sum_{i=0}^n (p_n(T) - y_i) \quad (5)$$

가 최소가 되는 조건에서  $p_n(T)$ 를 구할 수 있다. (5)식으로부터

$$S = \sum_{i=0}^n \left\{ \sum_{j=0}^m c_j T_j^i - y_i \right\}^2 \quad (6)$$

과 같이 표현할 수 있다.  $S$ 를 최소화하는 상수  $c$ 를 구하기 위하여 다변수 함수의 극소치가 존재하기 위한 필요조건

$$\frac{\partial S}{\partial c_i} = 0, \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (7)$$

을 이용하면 (6)식의 편미분식은

$$\frac{\partial S}{\partial c_k} = 2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \left\{ c_j T_j^i - y_i \right\} = 0 \quad (8)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이 식을 풀어쓰면  $n+1$ 원( $n$ )선형 연립방정식이 되므로 식(8)은 간단한 행렬식

$$Tc = y \quad (9)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $T$ 는  $n+1$ 차의 대칭행렬이 되므로  $T$ 의 역행렬을 구하면 상수  $c$ 의 값을 구할 수 있다. 그러므로  $m_T$ ,  $s_T$ 의 근사식은

$$m_T = m(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n \quad (10)$$

$$s_T = s(T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 + \dots + b_nT^n \quad (11)$$

과 같이 임의의 온도  $T(^{\circ}\text{C})$ 의 함수로 표시할 수가 있기 때문에 (1)식은

$$\sigma_{1T} = \sigma_3 + \sqrt{m_T\sigma_3\sigma_c + s_T\sigma_c^2} \quad (12)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

### 3. 실험 및 실험장치

한국자원연구소는 방사성 폐기물 관리대책방안에서 채택된 육지처분 원칙을 근거로 하여 처분부지 모암으로서 중생대화강암류와 화산암류를 선정하였는데<sup>10)</sup> 본 연구에서는 이에 해당하는 황등화강암 및 익산화강암을 실험대상으로 선정하였다. 압축시험, 삼축압축시험용 시험편은 블록시료에서 coring machine (SBEL M1150, USA)을 이용하여  $NX(54 \text{ mm}\phi)$  크기의 코어

를 제작하여 직경 대 길이의 비가 약 1 : 2가 되도록 절단한 후 시편 자동연마기(SBEL FL0.001, USA)를 사용하여 양단면을 ±0.001 mm의 정밀도로 자동 연마하였다.

온도변화에 따른 화강암 시편의 단축압축강도시험을 위하여 고온시험조(高溫試驗槽)를 제작하였다. 고온시험조는 전면 개방식으로 몸체상부에 3 kW용량의 매물식 전기히터를 장치하였다. 고온조의 온도조절은 열전대(K-Type)를 통하여 시편의 표면온도를 감지한 기전력(mV)을 받아 프로그래머블 조절기(digital program controller)에 의하여 기입력된 가열속도로 설정온도까지 시편의 온도를 상승시키고 유지시켜 준다.

고온삼축압축실험은 특수 제작한 Hoek cell을 이용하였다. 실링을 고온용 우레탄 고무로 만든 NX(54 mmφ)용 Hoek cell로서 유류와 시료가 차단된 상태로 봉압을 가할 수 있기 때문에 시료를 삼축셀에 쉽게 장착할 수 있을 뿐만 아니라, 시험준비시간이 비교적 짧다. 고온 시험조를 이용한 고온단축압축실험에서는 암석가열시 상승온도에 대한 열충격을 억제하기 위하여 적정가열속도로 시편의 온도를 상승시킨 후 암석내의 온도를 균등하게 하기 위하여 최고온도에서 적절한 유지시간을 두게 된다. 이러한 유지시간은 연구자에 따라 30분~4시간까지로 각각 다르다.<sup>11,12)</sup> 본 연구에서 사용한 화강암과 비슷한 조직과 조성의 국내 화강암에 대한 열과괴 연구 결과 설정온도에 대하여 1시간 이상에서 대체로 온도구배에 의한 영향이 무시될 수 있는 것으로 보고되었고,<sup>13)</sup> 최근 국내의 화강암에 대한 고온하 강도 실험에서는 90분의 유지시간을 주고 90~120분 사이에 실험을 실시한 것으로 되어 있다.<sup>13)</sup> 본 연구에서는 설정온도까지 가열속도를 2 °C/min로하여 120분의 유지시간을 두고 120~150분 사이에 시험을 실시하였다. 시편의 가열온도는 물의 상전이(相轉移) 온도로 알려진 100°C와 방사성폐기물 처분장 설계온도로서 많이 사용되는 200°C<sup>14)</sup>와 이들의 중간 온도인 70, 150°C에 대하여 실험을 실시하였다. 하중속도는 1 kg/cm<sup>2</sup>/sec 이하로 하여 하중속도에 의한 충격의 영향을 최소화하고자 하였다.

고온삼축압축실험은 암석시편을 고온시험조에 넣고 프로그래머블 자동승온장치로 상승온도를 1°C/min로 조정한 후 12시간 이상 유지 시킨 후 Hoek cell에 장착하여 실험하였다. 시료의 예열온도를 70, 100, 150, 200°C로 하고 봉압은 5, 10, 15 MPa로 설정하였다. 특

히 예열된 시료를 Hoek cell에 장착할 때 상온으로 노출됨에 따라 발생될 수 있는 온도강하에 의한 열팽창을 최소한으로 억제하기 위하여 고온용 보온장갑을 이용하여 최대한으로 공기 중에 노출되지 않도록 주의하였다. 시료가 Hoek cell에 장착되면 uretan실링에 시료가 장착된 틈이 0.5 mm 이하가 되므로 상하부 하중플레이트에 의하여 외부공기와는 차단이 된다. 셋팅에서 실험까지 1~2분 안에 완료되도록 하였다.

### 5. 결과 및 고찰

Table 1은 황등화강암의 봉압압축실험 결과를 나타낸 것이다. 상온의 실험조건과 마찬가지로 각각의 설정 온도에서 봉압이 증가할수록 파괴강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 수치는 1조에 5개씩 수행한 것에 대한 평균값이다.

Table 2는 Table 1의 결과로부터 파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 를 계산한 것이다. 제안파괴조건계수  $m_T$ ,  $s_T$ 를 계산하기 위한 기준 단축압축강도는 실온 25°C에서의 189 MPa를 적용하였다. 표에서 상관계수가 높을수록 파괴정수들이 파괴조건에 잘 부합되는 것을 의미한다.

Table 2에서 경험파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 는 온도의 증가에 따라 감소하였다. 봉압압축실험에서 주응력선도의 기울기와 관계 있는  $m$ 값은 상온 25°C에 대하여 100°C에서는 15%정도 감소를 보였으며, 200°C에서는

Table 1. Results of confining compressive tests for Whangdeung granite

Temp.(°C)	25	70	100	150	200
$\sigma_b$ (MPa)					
0	189±23	187±19	181±17	160±24	152±23
5	269±13	266±15	251±11	227±18	216±21
10	324±18	317±22	302±16	267±13	255±19
15	390±16	382±18	364±19	331±17	311±22

Table 2. Empirical failure coefficients of Whangdeung granite

Temp.(°C)	25	70	100	150	200	Remark
$m$	36.36	34.42	30.89	25.35	22.88	
$s$	0.97	0.96	0.88	0.68	0.62	Calculated
$r^2$	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	
$m_T=m(T)$	36.94	33.25	30.77	26.58	22.35	Estimated
$s_T=s(T)$	0.99	0.92	0.86	0.74	0.59	

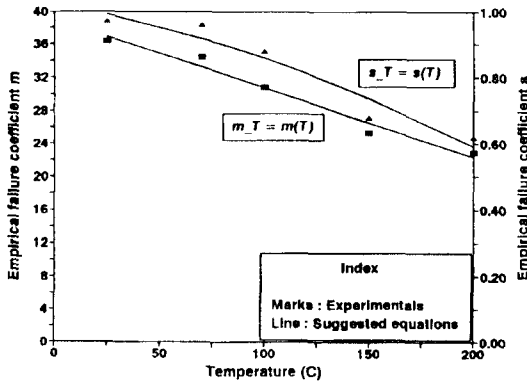


Fig. 1. Empirical failure coefficients  $m$  and  $s$  at various temperatures for Whangdeung granite.

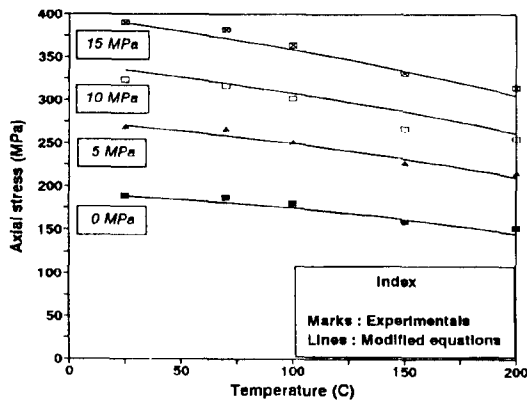


Fig. 2. Evaluated strength curves and experimental data for Whangdeung granite.

약 37%정도 감소하였다.  $s$ 값도  $m$ 값과 비슷한 율로 감소하였다. 이는 온도의 상승에 따라 봉압하 파괴강도가 감소하기 때문에 파괴조건계수 또한 온도의 영향에 의하여 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 1은 Hoek-Brown 파괴조건계수를 온도의 함수로 나타낸 것이며 관계식은 다음과 같다.

$$m_T = 38.97 - 0.081T - 1.06 \times 10^{-5}T^2 (r^2 = 0.93) \quad (13)$$

$$s_T = 1.02 + 0.0011T - 5.07 \times 10^{-6}T^2 (r^2 = 0.95) \quad (14)$$

Fig. 2는 Hoek-Brown의 파괴조건계수를 온도의 함수로 구한  $m_T$ ,  $s_T$ 를 이용하여 강도 곡선을 계산하고 실험치와 비교한 것이다. 그림에서 실험결과와 계산치는 잘 부합하였으며 이는 제안 방식이 200°C까지의 온도 영역에서 성공적으로 적용될 수 있음을 나타낸다.

Table 3. Results of confining compressive tests for Iksan granite

Temp.(°C)	25	100	150	200
$\sigma_3$ (MPa)				
0	152±18	143±13	140±18	135±13
5	233±13	209±12	205±13	178±19
10	277±17	259±15	247±15	222±17
15	334±13	312±18	302±17	275±21

Table 4. Empirical failure coefficients of Iksan granite

Temp.(°C)	25	100	150	200	Remark
$m$	33.59	29.43	26.90	21.47	
$s$	1.00	0.84	0.82	0.68	Calculated
$r^2$	0.99	0.99	0.98	0.98	
$m_T=m(T)$	34.10	29.10	25.76	22.42	Estimated
$s_T=s(T)$	1.00	0.88	0.78	0.69	

Table 3은 익산 화강암의 봉압압축실험 결과를 나타낸 것이다. 익산화강암 또한 실온조건과 마찬가지로 각각의 설정온도에서 봉압이 증가할수록, 온도가 낮아질수록 파괴강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 수치는 1조에 5개씩 실험을 실시한 것의 평균값이다.

Table 4는 Table 3의 결과로부터 파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 를 계산한 것이다. 제안파괴조건 계수  $m_T$ ,  $s_T$ 를 계산하기 위한 기준단축압축강도는 실온 25°C에서의 152 MPa를 적용하였다. 표에서 상관계수가 높을수록 파괴정수들이 파괴조건에 잘 부합되는 것을 의미한다

Table 4에서 경험파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 는 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 봉압압축실험에서 주응력신도의 기울기와 관계있는  $m$ 값은 상온 25°C에 비하여 유체의 상전이 온도인 100°C에서는 12%정도 감소를 보였으며, 200°C에서는 약 36%정도 감소하였다.  $s$ 값 또한 마찬가지로 감소하는 경향을 보이고 있다.

익산화강암 또한 황등화강암과 마찬가지로 온도의 상승에 따라 봉압하 강도가 감소하기 때문에 파괴조건 계수 또한 온도의 영향에 의하여 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 Hoek-Brown 파괴조건계수를 온도의 함수로 나타낸 것으로 관계식은 다음과 같다.

$$m_T = 35.77 - 0.067T (r^2 = 0.97) \quad (15)$$

$$s_T = 1.065 - 0.00188T (r^2 = 0.95) \quad (16)$$

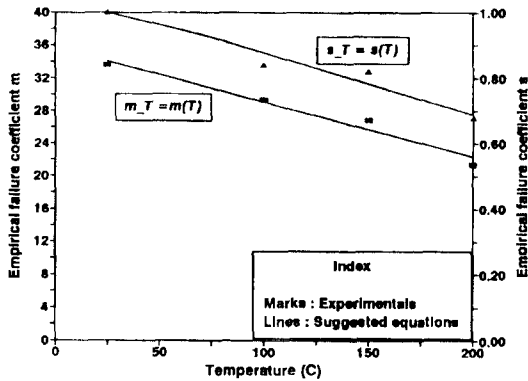


Fig. 3. Empirical failure coefficients  $m$  and  $s$  at various temperatures for Iksan granite.

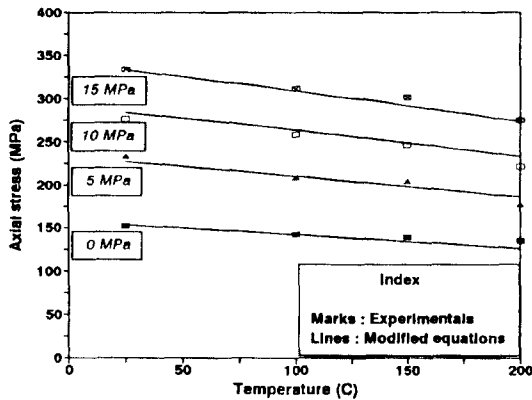


Fig. 4. Evaluated strength curves and experimental data for Iksan granite.

Fig. 4는 Hoek-Brown의 파괴조건계수를 온도의 함수로 구한  $m_T$ ,  $s_T$ 를 이용하여 파괴강도 곡선을 계산하고 실험치와 비교한 것이다. 그림에서 계산결과와 실험치는 잘 부합하였으며 200°C까지의 온도영역에서는 제안방식이 성공적으로 적용될 수 있음을 나타낸다.

### 6. 결 론

암반내 방사성폐기물 처분장같은 특수목적 암반구조물을 시설하기 위해서는 설계기준 및 암반의 열역학적 거동에 대한 다양한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 처분장 모암으로서 가장 잠재성이 높은 결정질 암석인 심부화강암을 대상으로 고온물성 및 고온삼축압축 실험을 실시하고, 두 화강암에 대하여 제안식을 적용하

였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) Hoek와 Brown의 경험파괴조건계수  $m$ ,  $s$ 는 온도의 증가에 따라 감소하였다.

2) 두 화강암에 대하여 실온으로부터 200°C까지 제안 방식을 적용한 결과 계산치와 실험치가 잘 부합되었다. 이는 두 화강암에 대하여 200°C까지의 온도영역에서는 제안식이 성공적으로 적용될 수 있음을 나타낸다.

### 7. 감사의 글

본 연구가 수행될 수 있도록 많은 도움을 주신 대한 광업진흥공사 기술연구소 응용광물담당 이기형 차장님 및 직원여러분과, 시료제작에 도움을 주신 익산사업소 최승경씨, 문헌수집 및 시험장비 제작에 도움을 주신 선경건설(주) 이형원박사님께 감사드립니다.

### 8. 참고문헌

- Murrell, S.A.F., 1965, The Effect of Triaxial Stress System on the Strength of Rocks at Atmospheric Temperatures, *Geophysics* JI., 10, pp.231-281.
- Hoek E., 1968, *Brittle Failure of Rock*, Rock Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, London, pp.99-124.
- Hoek, E., 1983, Strength of Jointed Rock Masses, *Geotechnique* 33, 3, pp.187-222.
- Franklin, J.A., 1971, Triaxial Strength of Rock Materials, *Rock Mech.*, 3, pp.86-98.
- Brook, N., 1979, Estimating the Triaxial Strength of Rock, *Int. J. Rock. Mech, Min, Sci, and Geomech, Abst.*, Vol. 16, pp.261-264.
- Johnston, I.W., 1985, Strength of Intact Geomechanical Materials, *J. Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 111, 6, pp.730-749.
- Turk N. and Dearman W.R., 1986, A New Curve Fitting Method for the Triaxial Strength of Rocks, *Proceedings of the International Symposium Helsinki, Finland*, pp.1051-1062.
- Board, M., 1989, UDEC(Universal Distinct Element Code) Version Icc 1.5 Report NUREG/CR-5429, US NRC.
- Hoek, E. and Brown E.T., 1980, *Underground Excavations in Rock*, Inst. Min. Metall., London, 527p.

10. 유일현, 한대석, 김원영, 김윤중, 1987, 중저준위 방사성 폐기물 처분장 후보지의 지질공학적 연구(II), 한국동력자원연구소, KR-86-2-(B)-1, 171p.
11. Dmitriyev, A.P., Kuzyayev, L.S., Protasov, Y.I. and Yamshchikov, V.S., 1972, Physical properties of rocks at high temperatures, NASA Technical Translation, N72-2-26286, pp.1-13.
12. Homand, F. and Troalen, J.P., 1984, Behavior of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes, Eng. Geology, Vol. 20, pp.219-233.
13. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열과 피 특성연구, 한국자원공학회지 27, 31-42.
14. 양형식, 이춘우 1994, 암반내 열집중을 고려한 고준위 폐기물 캐니스터의 배열설계, 터널과 지하공간(한국암반역학회지) 4.3, 256-260.