

공벽변형법에 의한 이방성 암반의 초기응력 측정에 관한 연구 - 횡등방성 암석에 대한 실험실 모형 실험 및 수치해석

민기복¹⁾, 이정인²⁾, 최해문³⁾

A study on the In-situ Stress Measurement of Anisotropic Rocks by Leeman Method - An Experimental and Numerical Simulation on Transversely Isotropic Rock

Ki-Bok Min, Chung-In Lee and Hae-Moon Choi

Abstract. A total of 18 stress measurements were performed in the rock and rock-like blocks in the laboratory to estimate the influence of anisotropy in rock. Full scale overcoring equipment, which consists of a coring machine and a biaxial loading system by flat jacks, was developed to simulate the in-situ rock stress condition in the laboratory. By comparing the isotropic analysis with the anisotropic analysis in measuring the stress, conclusions have been drawn as to the influence of anisotropy. The maximum difference between the isotropic and the anisotropic analysis was 34% and it was shown that the stress measurement considering the anisotropy was needed. To confirm the validity of the observed data, a diagnostic analysis of stress relief curve by overcoring was conducted using the three dimensional finite difference program, FLAC 3D.

KeyWords: In-situ Stress, Anisotropy, Transversely Isotropic, Stress Relief Curve

초 록. 암반의 이방성이 초기응력 측정결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 현지암반의 응력 상태를 실험실에서 이축상태로 재현하여 초기응력 측정을 실시하였다. 이축가압장치는 플랫폼(flat jack)을 이용하여 제작하였으며, 등방성과 이방성 암석, 모르타르 및 인공이방성 암석 등 4 종류의 시료에 대하여 총 18회의 초기응력 측정을 실시하였다. 초기응력 측정 결과 이방성을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 최고 34%의 차이가 발생함으로써 이방성을 고려한 초기응력 측정이 필요함을 확인하였다. 또한 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D를 이용하여 오버코어링에 따른 응력개방곡선의 적합성에 대한 분석을 실시하여 실험실 모형실험의 결과가 수치해석에 의한 결과와 유사함을 확인하였다.

핵심어: 초기응력, 이방성, 횡등방성, 응력개방곡선

1. 서 론

암반의 초기응력을 측정하는 방법 중 공벽변형법은 암반의 방향에 따른 탄성적 성질이 동일하다는 등방성을 가정하고 해석을 수행하는 경우가 많다. 그러나 암석은 엽리, 절리, 층리 등의 영향으로 인해 이방성을 띠는 경우가 많아서 이방성을 무시하고 초기응력을 측정

할 경우 응력값에서 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 암반의 이방성을 고려한 해석은 보다 정확한 초기응력 값을 구하기 위해 필요하다고 할 수 있다(Amadei, 1982, 1996, Heerden, 1983).

국내에서도 많은 지역에서 초기응력이 측정되어 왔으나(임한욱 외, 1980, 이정인, 1992) 아직 암반의 이방성을 고려한 응력측정은 실시된 바 없다. 그러나 많은 지하구조물이 편마암, 셰일 등 이방성을 띠는 암반에서 건설되고 있는 국내의 실정에 비추어볼 때(김호영, 1995) 이방성을 고려한 초기응력 측정은 필요하다.

본 연구에서는 암반의 초기응력 측정시 이방성의 영향을 살펴보기 위한 기초연구로서 실험실에서 현지암반의 응력상태를 이축상태로 재현하여 횡등방성*(tran-

¹⁾학생회원, 스웨덴 왕립공과대학

(Royal Institute of Technology, KTH), 박사과정.

연구당시 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정

²⁾정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

³⁾정회원, 삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원

접수일: 2002년 9월 2일

심사 완료일: 2002년 11월 15일

sversely isotropic) 암석과 인조 이방성 암석에 대하여 초기응력 측정을 실시하였다. 현지에서의 초기응력 측정시에는 초기응력의 참값을 확인하기 힘들지만, 모형 실험을 통한 초기응력 측정시에는 공벽변형법에 의해 측정된 응력값과 실제 가압한 응력의 참값과 비교가 가능함으로써 초기응력 측정에 미치는 여러인자를 비교 검토하기가 용이하다는 장점이 있다(Leeman, 1968, Cai, 1990). 모형실험에 사용된 이축가압장치는 플랫폼 (flat jack)을 이용하여 제작하였으며, 가압된 상태에서 오버코어링을 실시하여 공벽변형법에 의한 초기응력 측정을 실시하였다. 공벽변형법에 사용하는 삼축변형을 측정자(triaxial strain probe)로는 모형 실험에 적합한 패커(packer)형 셀을 시험제작하여 사용하였다. 사용된 시료는 등방성과 이방성을 띠는 시료로 나누어서 등방성 시료로는 화강암 5회 및 모르타르 2회씩, 이방성 시료로는 편마암 9회 및 인조 이방성 암석 2회 등 총 18회에 걸쳐서 초기응력 측정을 실시하여 초기응력에 미치는 이방성의 영향을 살펴보았다. 모르타르나 인조 이방성 암석 등과 같은 인조암석을 함께 제작한 것은 암석의 불균질성에 따른 오차를 피할 수 있고, 배합여부에 따라 원하는 탄성정수들을 정할 수 있는 장점이 있기 때문이다(Tien and Tsao, 2000).

또한 실험상에 발생할 수 있는 오차에 대한 점검과 응력해방과정에서 측정되는 변형을 응력개방곡선의 적합성 분석(diagnostic analysis)을 위해 3차원 유한차분 해석 프로그램인 FLAC 3D(Itasca, 1997)를 통하여 횡등방성 압반에 대한 오버코어링 과정을 모사하여 실험을 통해 구해진 응력개방곡선과 수치해석을 통해 나타난 응력개방곡선을 비교 검토하였다.

2. 이방성 압반의 초기응력 측정 이론

2.1. 이방성 암석의 구성방정식

탄성재료가 어떠한 축과 평면에 대해서도 탄성적 성질이 대칭하지 않을 때 그 재료는 완전 이방성 재료라고 할 수 있으며, 이 경우 변형을 텐서와 응력 텐서를 관계짓는 컴플라이언스 텐서(compliance tensor)는 식 (1)과 같은 형태로 표현된다.

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} \quad (1)$$

여기서 ϵ_{ij} 와 σ_{kl} 는 각각 변형을 및 응력 텐서이며, S_{ijkl} 는 컴플라이언스 텐서이다.

*영문상의 표기 'transversely isotropic' 이 평면등방성으로 표기된 논문도 있다(김호영, 1995, 박철환, 2001).

컴플라이언스 텐서는 4차 텐서로서 총 81개의 성분을 가지나 변형을 및 응력 텐서의 대칭성과 변형을 에너지에 대한 고려를 하면 컴플라이언스 텐서는 총 21개의 독립적인 성분을 가지게 된다(Ting, 1996).

이방성 물체가 주어진 평면이나 축에 대하여 대칭적인 탄성적 성질이 존재할 경우 구성방정식이 갖는 21개의 독립상수의 숫자는 줄어드는데 세 개의 직교평면이 탄성적 성질의 대칭면이 되는 경우(orthogonally isotropic 혹은 orthotropic) 독립상수의 숫자는 9개로 줄어들며, 한 평면이 대칭면이 되고 그 평면에 수직인 모든 축에 대하여 탄성적 성질이 대칭인 경우에는 독립상수의 수는 5개로 줄어들고 이때의 물체는 횡등방성 (transversely isotropic, 혹은 평면이방성)으로 정의된다. 특히 횡등방성의 경우 퇴적암, 변성암 계열과 같이 층리, 엽리면이 횡등방평면(plane of transverse isotropy)이 되는 암석의 구성방정식에 적합하여 많은 연구의 대상이 되어 왔다 (Amadei, 1996). 이 경우 x-y 평면을 등방평면으로 하였을 때의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, E_1 은 x축 혹은 y축 방향의 탄성계수, E_2 는 z축 방향의 탄성계수, G_1 은 x-y 평면상에서의 전단계수, G_2 는 x-z 혹은 y-z평면상에서의 전단계수, ν_1 은 x-y평면상에서의 포아송비, ν_2 는 등방평면상에서 작용하는 응력에 대한 등방평면에 수직(z축)한 방향으로의 변형에 대하여 정의되는 포아송비이다. 만약 ν_2 를 등방평면에 수직하게 작용하는 응력에 대한 등방평면상에서의 변형에 대해서 정의하고, 등방평면을 다르게 설정할 경우 (김호영, 1995, 박철환, 2001) 식 (2)는 다소 다른 형태를 가질 수 있으나 내용적으로는 등가이다. 본 실험에서는 총 5개의 독립상수 중 탄성계수와 포아송비는 직각형시료와 원통형 시료를 엽리면에 수직한 방향과 평행한 방향으로 채취하여 구하였으며, G_2 는 Saint Venant가 제시한 다음의 경험식을 이용하여 결정하였다(Amadei, 1996).

$$\frac{1}{G_2} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + 2 \frac{\nu_2}{E_1} \quad (3)$$

위 식은 경험식이므로 적용시에 주의가 필요한데, 다양한 이방성 암석에 대한 검토를 통해 위 경험식의 적합성을 검토한 연구에 의하면 본 연구에서와 같이 이방성의 정도가 높지 않은 변성암 계열의 암석은 위 경험식에 의한 값과 직접 실험을 통해 구해진 값이 비교적 잘 일치함이 알려져 있다(Worotnicki, 1993).

2.2 횡등방성을 고려한 초기응력측정 이론

본 연구에서는 횡등방성 암반에서 보어홀이 등방평면에 수직한 경우와 평행한 경우를 구분하여 초기응력 측정식을 적용하였다. 횡등방 평면이 보어홀의 축과 수직한 경우 변형률과 초기응력의 관계에 관한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_w &= b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z + b_4 \tau_{xy} + b_5 \tau_{yz} + b_6 \tau_{zx} \\ b_1 &= \left[\frac{2}{E_1} \left(1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \cos 2\theta - \frac{1}{E_1} \right] \cos^2 w + \frac{\nu_2}{E_1} \sin^2 w \\ b_2 &= - \left[\frac{2}{E_1} \left(1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \cos 2\theta - \frac{1}{E_1} \right] \cos^2 w + \frac{\nu_2}{E_1} \sin^2 w \\ b_3 &= \frac{\nu_2}{E_1} \cos^2 w - \frac{1}{E_2} \sin^2 w \\ b_4 &= \frac{4}{E_1} \left(1 - \frac{E_2}{E_1} \nu_2^2 \right) \sin 2\theta \cos^2 w \\ b_5 &= - \frac{2}{G_2} \cos \theta \sin w \cos w, \quad b_6 = \frac{2}{G_2} \sin \theta \sin w \cos w \quad (4) \end{aligned}$$

여기서 변형률성분의 위치는 ISRM 표준시험법에 제시된 것(Kim, 1987)과 동일하며 w 는 보어홀 주변의 스트레인의 측정방향, θ 는 보어홀 주변의 위치를 나타낸다.

결국 보어홀 주위의 임의의 각도(θ)와 벽면에서의 임의의 각도(w)에서의 6개의 변형율을 측정함으로써 여섯성분의 응력값을 구할 수 있게 된다. 보어홀이 등방

평면에 평행한 경우에도 유사한 형태의 식에 의해 초기 응력값을 구할 수 있게 되며 이 또한 본 실험에서의 응력측정에 이용하였다. 일반적인 경우 하나의 시추공에서 획득되는 변형율의 값은 9개에서 12개 정도이며 이를 최소자승법을 이용하여 6개의 3차원 응력성분을 구하게 된다(Amadei 와 Stephansson, 1997). 본 연구에서는 최대 9개의 변형율 성분을 측정하여 응력성분을 구하였다.

3. 시료, 실험장치 및 실험방법

3.1 등방성 시료

등방성 시료로는 전라북도 황등지역의 화강암 5개(I1, I2, I3, I4, I5)와 모르타르 인조암 2개(M1, M2)를 제작하여 실험하였다(Fig.1). 탄성상수 결정을 위해 오버코어링 실험후 원통형 시료를 채취하여 실험하였으며, 화강암의 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 화강암은 이 축 실험장치의 크기에 맞추어 29 cm x 29 cm x 29 cm의 크기로 가공하였으며, 모르타르 인조암은 같은 크기의 철재거푸집을 통해 제작하였다. 모르타르 인조암은 급결제를 사용하여 양생시간을 단축하였으며, 실험실

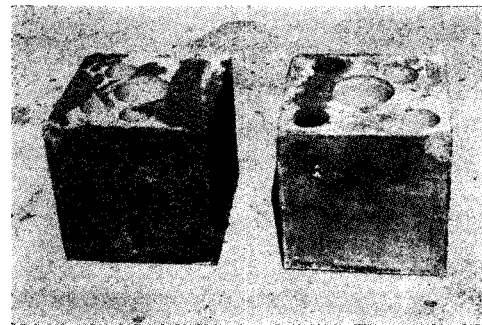


Fig. 1. Blocks after overcoring experiments (isotropic granite (in the left) & isotropic mortar (in the right)).

Table 1. Mechanical properties of isotropic granite.

Specimen	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Compressive Strength (MPa)	P-wave Velocity (m/sec)	S-wave Velocity (m/sec)
Granite	42.5	0.18	173.2	3321	1998

Table 2. Mixing ratio and mechanical properties of isotropic mortar.

Specimen	Cement : Sand	W/C (%)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Curing Period(day)
Mortar(M1)	1 : 3	63.3	23.7	0.13	26
Mortar(M2)	1 : 3	71.1	14.1	0.15	23

초기응력 측정용 블럭과 탄성상수 결정용 시료와의 양생시간 차이에 의한 오차를 줄이기 위해 오버코어링 실험과 동시에 시료를 채취하여 1일 후 탄성상수를 측정하였다(Table 2).

3.2 이방성 시료

이방성 시료는 충청남도 온양지역의 편마암(Fig. 2) 9개와 인공 이방성암석 2개를 준비하였다. 편마암은 엽리면이 보어홀과 수직인 경우 4개(V1, V2, V3, V4)와 엽리면이 보어홀과 평행한 경우 5개(P1, P2, P3, P4, P5)에 대해서 실험하였으며 시료는 화강암과 마찬가지로 이축실험장치의 크기에 맞게 가공하였다. 탄성계수와 포아송비는 편마암의 엽리면을 등방평면으로 설정하여 엽리면에 평행한 방향과 수직한 방향으로 코어를

채취하였다. 특히 횡등방성 암석의 탄성상수 결정시 등방평면상에서의 포아송비 (ν_1)결정이 원통형 시료에서는 용이하지 않기 때문에 직각시료를 추가로 제작(Fig. 3)하여 탄성상수 결정에 사용하였다. 총 24개의 원주형 시료와 8개의 직각시료에 대한 탄성계수, 포아송비 및 탄성과속도의 값은 Table 3에 나타나 있다. 측정결과 편마암에 존재하는 엽리면 때문에 이방성을 나타내었으며, 탄성계수의 비율은 평균 1대 1.2, 포아송비의 비율은 평균 1대 1.7이었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 탄성계수와 P파 속도를 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이 등방평면에 평행한 방향의 탄성계수가 수직한 방향의 탄성계수보다 대체로 큰 값을 나타내었으며, 이것은 편마암의 엽리면 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 P파 속도를 엽리면에 평행한 경우

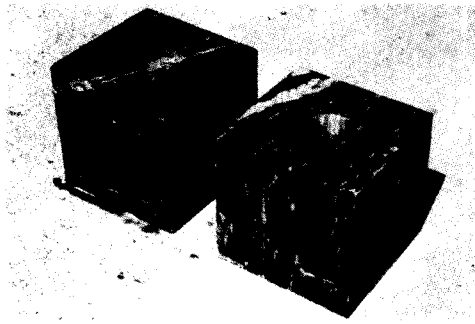


Fig. 2. Blocks after overcoring experiments (anisotropic gneiss with borehole vertical (in the left) & parallel (in the right) to isotropic plane).

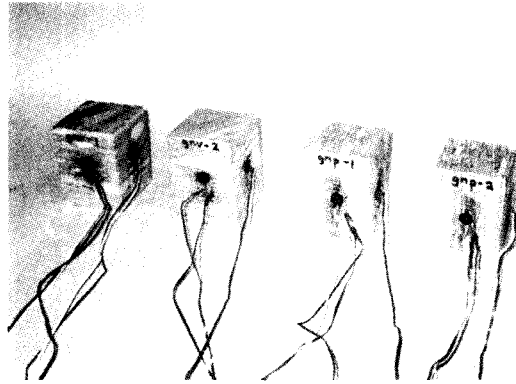


Fig. 3. Rectangular specimens for the determination of elastic constant in transversely isotropic rocks. Two specimens in the left were loaded in the vertical of the isotropic plane and the other two were loaded in the parallel of the isotropic plane.

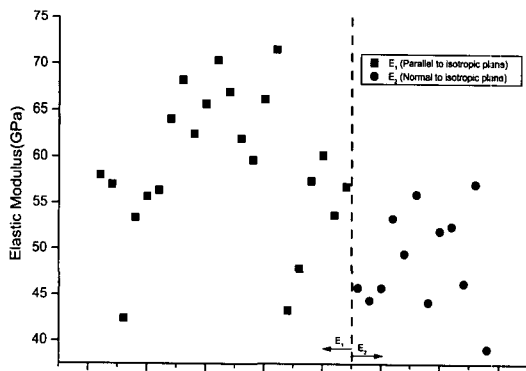


Fig. 4. Two sets of elastic moduli (E_1 & E_2) in different directions.

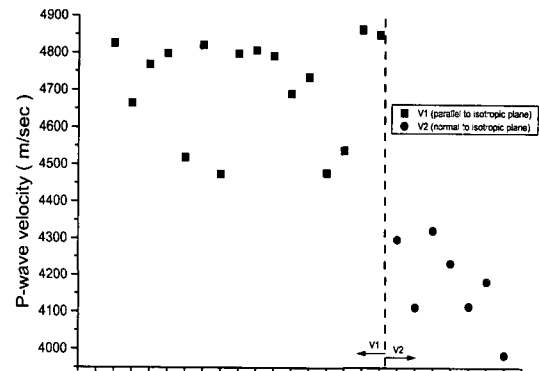


Fig. 5. Two sets of P-wave velocity (ν_1 & ν_2) in different directions.

(V_1)와 수직인 경우(V_2)에 대하여 표시한 것이다. 옆리면에 평행한 방향의 속도가 수직인 방향의 속도보다 큰 값을 나타내었으며, 탄성계수에서의 경향과 비교하여 볼때 옆리면의 영향이 더욱 뚜렷한 것을 볼 수 있다.

인조 이방성 암석의 경우 Fig. 6과 같이 탄성계수의 성질이 서로 다른 모르타르와 강화석고를 4.5 cm(A1시료) 혹은 5.5 cm(A2시료)씩 교대하도록 철재거푸집내에서 제작하였으며 블록의 전체 크기는 앞서 살펴본 모르타르의 경우와 같다. 인조 이방성 암석의 탄성계수 결정은 Salamon(1968)이 제시한 식을 이용하여 개별층의 두께와 탄성정수로부터 등가탄성정수를 결정하여 사용하였다(Table 4). 본 실험에서는 파일럿 홀이 인조 이방성 암석의 모르타르 부분에만 위치하고 있으므로, 등방평면에 평행한 방향의 탄성계수인 E_1 은 등가연속체의 물성으로부터, 수직인 방향의 탄성계수인 E_2 은 모르타르의 물성을 사용하여 응력해석을 실시하였다.

현실에서 많은 횡수의 실험을 하기에는 경제적인 어려움이 있다(Cai, 1991). 본 실험에서는 고무패커의 팽창 특성을 이용하여 공벽에 효과적으로 스트레인 게이지를 부착할 수 있는 패커형 셀(Fig. 7)을 시험제작하여 실험에 이용하였다. 패커형 셀에 의한 스트레인 게이지의 부착원리는 Fig. 8과 같으며 본 연구에서는 삼방향의 변형율을 측정할 수 있는 로제트(rossette)형 스트레인 게이지 3개와 온도센서 1개를 설치하여 온도변화를 측정하였다. 오버코어링 도중의 변형율 데이터는 미국 Measurement Group 사의 System 5000을 통하여 획득하였으며, 오버코어링 과정에 발생하는 변형율의 변화를 연속적으로 측정하기 위하여 오버코어링이 완료할 때까지 0.5초 간격으로 데이터를 획득하였다. 이를 오버코어링이 진행되는 길이로 환산하면 약 0.4 mm의 오버코어링이 진행될 때마다 데이터를 획득하는 것으로써 거의 연속적인 데이터 측정이 가능하다.

3.3 초기응력 측정용 패커형 셀 및 자료획득장비 (data acquisition system)

공벽변형법에 쓰이는 셀(cell)은 비교적 고가여서 실

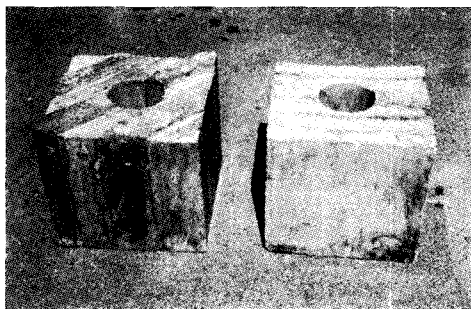


Fig. 6. Blocks after overcoring experiments (Artificial anisotropic rocks, A2 specimen (in the left) and A1 specimen (in the right)).

3.4 이축실험장치

현저 암반의 응력상태를 이축으로 재현하기 위해서 플랫폼을 이용한 이축실험장치를 제작하였다. Fig. 9에서 보는 것처럼 이축실험장치는 플랫폼을 통해서 암석에 이축상태의 응력이 작용하도록 해주며, 플랫폼을 받치는 강철 프레임은 지지하중 1.8 MN이며 플랫폼에 전달되는 유압은 최대유압 20 MPa 용량의 수동 유압펌프를 사용하였다. 이축실험장치에 삽입되는 시료의 파일럿홀의 직경은 33 mm, 오버코어링 비트의 외경은 105 mm, 내경은 90 mm이다. Fig. 10은 모형실험의 전경을 보여준다.

4. 실험결과 분석

4.1 이축응력과 응력개방에 따른 변형률 변화 추이 곡선

앞서 살펴본 이축실험장치에 시험용 블록을 설치하여

Table 3. Mechanical properties of anisotropic gneiss.

Specimen	Elastic Modulus(GPa)		Poisson's Ratio		P-wave Velocity (m/sec)		S-wave Velocity(m/sec)	
	E_1	E_2	ν_1	ν_2	V_1	V_2	V_1	V_2
Gneiss	54.1	45.7	0.15	0.25	4714	4178	2471	2190

Table 4. Mechanical properties of artificial anisotropic rock.

Specimen	Elastic Modulus(GPa)		Poisson's Ratio		Equivalent Elastic Modulus(GPa)		Equivalent Poisson's Ratio	
	Mortar	Diastone	Mortar	Diastone	E_1	E_2	ν_1	ν_2
A1	14.1	3.6	0.19	0.28	8.5	14.1	0.2	0.25
A2	14.8	8.9	0.15	0.26	11.3	14.8	0.2	0.22

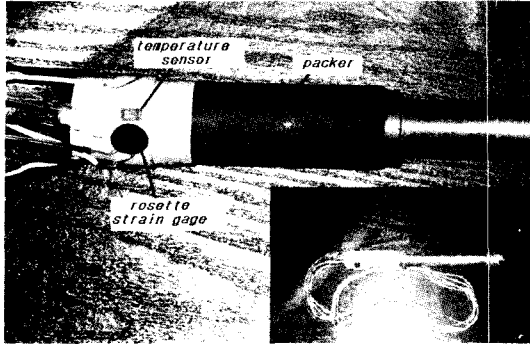


Fig. 7. Devised packer type cell.

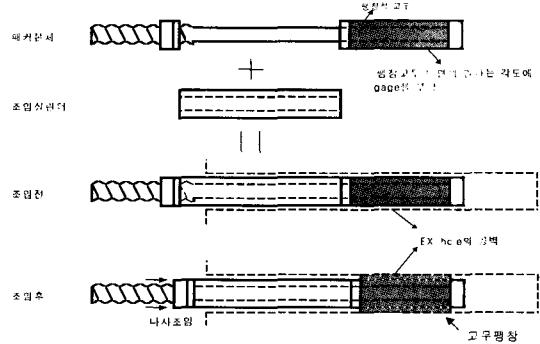


Fig. 8. Procedure of strain gage attachment by Packer type cell.

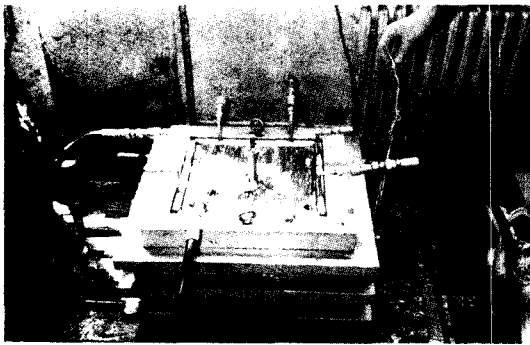


Fig. 9. Biaxial loading equipment. Electric lines are connected through the bottom of the equipment.

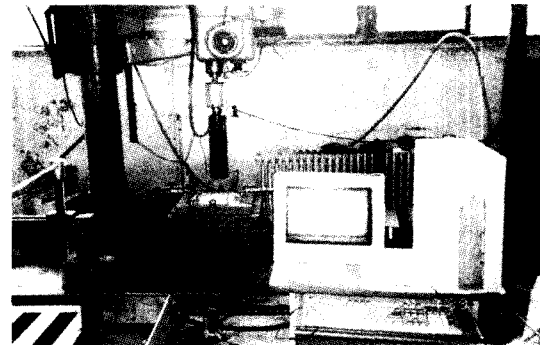


Fig. 10. Laboratory overcoring equipment with data acquisition system.

3 MPa에서 7 MPa의 이축응력을 가한 상태에서 오버코어링을 실시하면서 공벽에서 변형율의 변화를 측정하였다. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13과 Fig. 14는 각각 등방성 화강암, 이방성 편마암(보어홀이 등방평면에 평행한 경우와 수직인 경우) 그리고 인공 이방성암석에 대해서 플랫폼으로 양쪽에서 단계별로 가압하고 주어진 응력하에서 오버코어링을 했을 때 나타나는 공벽에서의 변형율의 변화를 보여주고 있다. 오버코어링 도중 9개의 스트레인 게이지중 일부 게이지가 파손되는 경우가 있었으며 이 경우 파손된 게이지의 값은 해석에서 제외하였다.

오버코어링이 시작되기전 파일럿 홀과 평행한 방향으로 부착된 변형율 성분($\epsilon_1, \epsilon_4, \epsilon_7$)은 이축조건하에서 포아송 효과에 의해 (+)의 변형율 값을, 파일럿 홀에 수직인 방향으로 부착된 변형율 성분($\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_8$)과 파일럿 홀에 45° 방향으로 부착된 변형율 성분($\epsilon_3, \epsilon_6, \epsilon_9$)은 가압된 응력변화에 따라 (-)의 변형율 값을 보이고 있다. 파일럿 홀에 45° 방향으로 부착된 변형율 성분($\epsilon_3, \epsilon_6, \epsilon_9$)은 이론식을 통해 예측되는 값과 유사하게 대략 파일럿 홀에 평행한 변형율 성분과 수직인 변형율 성분의 중간

정도의 변형율을 나타낸다.

오버코어링의 직경(10.5 cm)을 D로 했을 때 게이지 부착 위치로부터 코어링 진행거리 -1D ~ +1D 구간인 오버코어링 거리 4.0 ~ 24.5 cm구간에서 오버코어링에 따른 영향이 감지되고, -0.5D ~ +0.5D 구간인 9.25 ~ 19.75 cm구간에서 대부분의 변형율 변화가 발생하는데 이는 Worotnicki(1993)등이 제시한 구간과 유사한 경향을 보이는 것으로 보인다. 또한 오버코어링에 따른 응력재분배에 따라 오버코어링이 게이지 부착구간(14.5 cm)을 지날 때 변형율의 급격한 상승과 하강의 경향이 관찰됨을 알 수 있다.

온도센서를 설치하여 온도변화를 측정하였으며 비트에 대한 냉각수의 공급으로 인해 약 3-5도 정도의 온도 하강이 일어났다. 오버코어링이 완전히 진행된 후 변형율 성분은 일정한 값으로 수렴이 되어 응력이 완전히 개방되었음을 알 수 있는데 암석의 비탄성적 거동, 잔류응력의 영향 등으로 인해 이론상 예측치인 0으로 완전히 수렴되지는 않았다. 특히 모르타르와 인공이방성 시료는 온도하강에 따른 스트레인 게이지의 열출력(thermal output)의 영향으로 모두 (-)의 값으로 수렴을

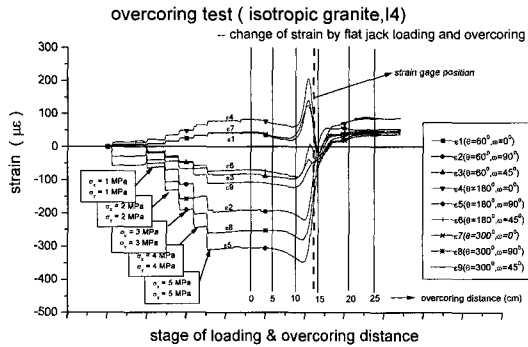


Fig. 11. Strain changes during loading & overcoring (isotropic granite).

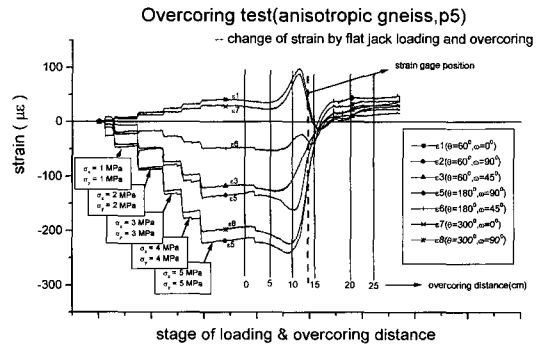


Fig. 12. Strain changes during loading & overcoring (anisotropic gneiss borehole parallel to isotropic plane).

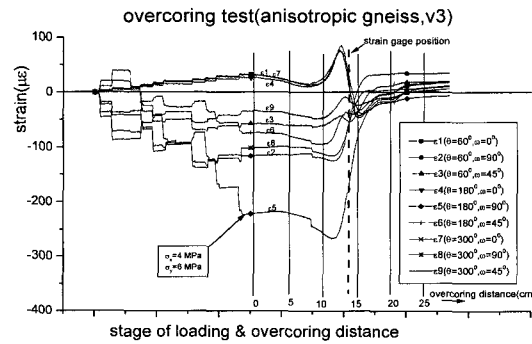


Fig. 13. Strain changes during loading & overcoring (anisotropic gneiss with borehole vertical to the isotropic plane).

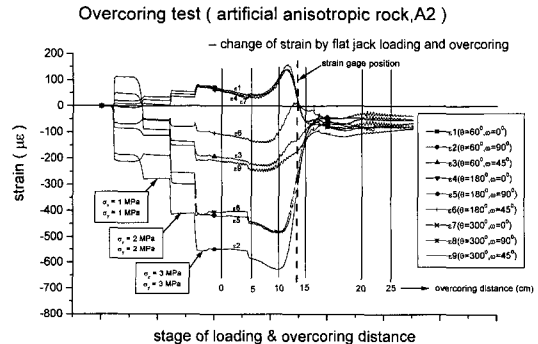


Fig. 14. Strain changes during loading & overcoring (artificial anisotropic rock).

한 반면, 암석시료의 경우 모두 (+)의 값으로 수렴하였는데 이는 암석시료에 존재하는 잔류응력의 영향인 것으로 판단된다.

4.2 응력측정 결과 및 해석

4.2.1 등방성 블럭

실험실에서 재현된 이축가압장치에 대한 적합성을 살펴보기 위하여 등방성 블럭에 대하여 먼저 실험을 실시

하였으며, 등방성 모르타르와 화강암의 초기응력 측정 결과는 Table 5와 같다. 해석결과 나타난 주응력(σ_1 , σ_2)의 크기는 모르타르의 경우 실제로 가해진 응력에 비하여 92%-110%의 범위를 나타내었으며 화강암의 경우 주응력(σ_1 , σ_2)이 82%-156%의 범위를 나타내었다. 본 연구와 유사한 실험실내에서 초기응력 결과(Cai, 1990)와 비교해보면 양호한 수준의 오차가 발생한 것으로 생각되며 실제 가해진 응력과 측정된 응력결과간의 오차

Table 5. Results of applied and measured stresses (Isotropic blocks).

Blocks	Applied Stress(Mpa)			Measured Stress(MPa)			Ratio of Measured and Applied Stresses			
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1/σ_x	σ_2/σ_y	σ_3/σ_m^*	
Mortar	M1	3.00	3.00	0.00	3.04	3.20	-0.32	1.01	1.07	-0.11
	M2	3.00	3.00	0.00	2.76	3.31	-0.96	0.92	1.10	-0.32
Granite	I1	5.00	5.00	0.00	4.75	4.78	-0.19	0.95	0.96	-0.04
	I2	5.00	5.00	0.00	7.78	4.31	-0.25	1.56	0.86	-0.05
	I3	5.00	5.00	0.00	4.08	5.52	-0.59	0.82	1.10	-0.12
	I4	5.00	5.00	0.00	6.09	4.66	0.34	1.22	0.93	0.07
	I5	4.00	6.00	0.00	6.09	8.52	1.16	1.52	1.41	0.29

*: $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y) / 2$

가 발생하는 이유는 스트레인 게이지 부착시의 오차, 탄성상수 결정시의 오차, 오버코어링시의 충격 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 등방성 재료에 대한 측정결과를 살펴볼 때 암석에 비해서 비교적 균질한 모르타르에서 보다 정확한 응력값이 측정된 것을 알 수 있다.

4.2.2 이방성 블록

이방성 편마암과 인조 이방성암석에 대한 초기응력 측정결과는 Table 6과 같다. Table 6에서 알 수 있듯이 보어홀이 등방평면에 평행한 경우(P1,P2,P3,P4,P5)와 수직인 경우(V1,V2,V3,V4)는 각각 가해진 응력대비 56%-105%, 72%-102%의 값을 나타내었으며 등방성해석을 실시했을 때(ISO)와 이방성 해석을 실시했을 때 (ANISO)의 차이는 각각 최고 6%와 16%로써 이방성을 고려하지 않은 해석을 수행할 경우 오차가 더 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 인공이방성 암석의 경우 가해진 응력대비 61%-97%의 값을 나타내었으며 등방성해석을 실시했을 때와 이방성해석을 실시했을 때의 차이는 최고 34%로 나타났으며, 이는 인공이방성 암석의 경우 이방성의 정도가 더욱 크기 때문인 것으로 판단되며 이방성의 정도가 클수록 이방성을 고려한 초기

응력측정이 필요함을 알 수 있다. 주응력의 방향은 이방성 해석과 등방성 해석의 차이가 크지 않았으며, 이는 실험조건이 이축상태이기 때문인 것으로 판단된다.

등방성 해석을 위해 사용한 탄성계수는 엽리면에 수직인 방향의 값(E_2)을, 포아송비는 엽리면에 평행한 하중에 대한 수직인 방향의 변형율로부터 구한 값(ν_2)을 이용하였으며, 등방성 해석을 실시하더라도 탄성계수의 값을 엽리면에 수직인 방향과 수평인 방향의 평균값을 사용한 경우 해석의 차이는 더욱 줄어드는 것으로 나타났다.

5. 3차원 유한 차분법에 의한 응력개방과정에 대한 수치해석

3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D(Itasca, 1997)를 이용하여 오버코어링에 의한 응력개방시 나타나는 변형을 곡선의 적합성에 대한 검증을 실시하였다. Wang(1987)이나 Blackwood(1978)등의 연구에 의하면, 측정된 초기응력값을 입력치로 채택한 수치해석을 수행하여 얻은 응력개방곡선이 현장에서의 응력개방곡선의 적합성을 판별하는데 이용할 수 있음이 알려져 있다. 본 연구에서는 오버코어링의 과정을 3차원으로 모

Table 6. Results of applied and measured stresses (Anisotropic blocks).

Blocks	Analysis Method	Applied Stress(MPa)			Measured Stress(MPa)			Ratio of Measured and Applied Stresses			
		σ_x	σ_y	σ_z	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1/σ_x	σ_2/σ_y	σ_3/σ_m^*	
Artificial Anisotropic rock	A1	ISO	3.00	3.00	0.00	1.41	1.31	-0.45	0.47	0.43	-0.15
		ANISO	3.00	3.00	0.00	1.99	1.84	-0.34	0.66	0.61	-0.11
	A2	ISO	3.00	3.00	0.00	1.58	1.93	0.16	0.53	0.64	0.05
		ANISO	3.00	3.00	0.00	2.36	2.92	0.45	0.79	0.97	0.14
Anisotropic Gneiss	P1	ISO	5.00	5.00	0.00	2.61	4.45	-0.05	0.52	0.89	-0.01
		ANISO	5.00	5.00	0.00	2.79	4.72	-0.61	0.56	0.94	-0.12
	P2	ISO	5.00	5.00	0.00	3.25	4.98	-0.81	0.65	1.00	-0.16
		ANISO	5.00	5.00	0.00	3.49	5.24	-1.56	0.70	1.05	-0.31
	P3	ISO	5.00	5.00	0.00	3.35	4.3	-0.07	0.67	0.86	-0.01
		ANISO	5.00	5.00	0.00	3.59	4.53	-0.67	0.72	0.91	-0.13
	P4	ISO	5.00	5.00	0.00	3.84	4.09	-0.06	0.77	0.82	-0.01
		ANISO	5.00	5.00	0.00	4.13	4.34	-0.72	0.83	0.87	-0.14
	P5	ISO	5.00	5.00	0.00	3.70	5.00	0.49	0.74	1.00	0.10
		ANISO	5.00	5.00	0.00	3.93	5.28	-1.00	0.79	1.06	-0.02
	V1	ISO	5.00	5.00	0.00	3.58	3.08	-0.14	0.72	0.62	-0.03
		ANISO	5.00	5.00	0.00	4.24	3.65	-0.16	0.85	0.73	-0.03
	V2	ISO	5.00	5.00	0.00	3.13	4.32	0.15	0.62	0.86	0.03
		ANISO	5.00	5.00	0.00	3.68	5.10	0.15	0.74	1.02	0.03
	V3	ISO	4.00	6.00	0.00	2.64	4.32	0.20	0.61	0.72	0.04
		ANISO	4.00	6.00	0.00	2.90	5.11	0.19	0.72	0.85	0.04
V4	ISO	4.00	7.00	0.00	2.53	5.13	-0.40	0.63	0.73	-0.07	
	ANISO	4.00	7.00	0.00	3.02	6.06	-0.40	0.75	0.87	-0.07	

*: $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y) / 2$

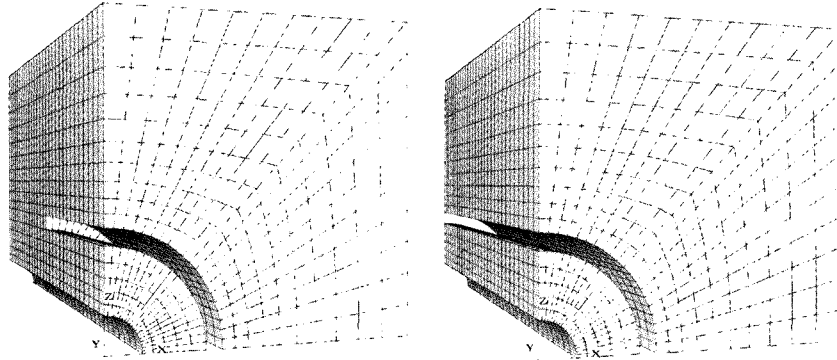


Fig. 15. Examples of Meshes for numerical analysis (overcoring depth 14 cm (in the left) & 29 cm (in the right), respectively).

사하여 본 실험에서 사용된 블록 중 보어홀의 방향이 등방평면과 평행한 경우의 횡등방성 암반에 대하여 수치해석을 실시하였다. 오버코어링 과정을 모사하기 위하여 최초 파일럿이 설치된 상태에서 수치해석을 실시한 후 실험에 사용된 오버코어링 비트의 두께와 직경을 고려하여 오버코어링이 1 cm 진행될 때마다 해석을 실시하고 변형률성분의 변화를 관찰 하도록 서로 다른 오버코어링 깊이에 따라 총 30개의 모델을 설정하였다 (Fig. 15). 모델의 크기와 물성치는 이방성 편마암과 같으며 5 MPa의 평면응력을 가하였다. Fig. 16은 이방성 편마암에 대해서 오버코어링을 시작하여 29 cm깊이로 완전히 진행될 때까지 변형률의 각 성분이 변화하는 모습을 보여주고 있다. 수치해석을 통해 나타난 결과를 Fig. 13의 결과와 변형률 성분의 상승, 하강의 경향을 비교하였을 때 정성적인 변형률의 변화추이가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 변형률 게이지의 설치 위치는 실험에서와 같이 $\epsilon_1, \epsilon_4, \epsilon_7$ 은 보어홀에 평행한 방향으로 부착된 변형률 성분을, $\epsilon_2, \epsilon_5, \epsilon_8$ 은 보어홀에 수직인 방향으로 부착된 변형률 성분을, $\epsilon_3, \epsilon_6, \epsilon_9$ 는 보어홀에 45° 방향으로 부착된 변형률 성분을 각각 나타낸다. 오버코어링이 진행됨에 따라 나타나는 변형률 성분의 변화의 추이는 실험에서와 같이 오버코어링 직경(10.5 cm)을 D라고 했을 때 -D에서 +D에 이르는 구간에서 변형률의 변화가 감지되고 약 -0.5D에서 +0.5D에 이르는 구간에서 대부분의 변형률 변화가 일어나는 것을 알 수 있다. $\epsilon_1, \epsilon_4, \epsilon_7$ 의 경우 오버코어링이 시작됨에 따라 점진적으로 하강하고 오버코어링 거리가 약 10 cm(-0.5D 지점)에 이르렀을 때쯤부터 급격히 상승하는 모습을 보여주며, 오버코어링이 게이지 부착지점을 지날때부터 급격한 응력의 개방이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이는 오버코어링이 진행되면서 보어홀 축

방향으로의 일시적인 인장대가 형성되고 오버코어링이 게이지 부착지점에 다다랐을때 쯤부터 본격적인 응력 개방이 이루어지기 때문으로 생각된다. 모든 응력성분에서 오버코어링의 직경을 지난 지점(오버코어링 거리 약 25 cm)부터는 응력의 개방이 완전히 이루어진 모습을 볼 수 있다.

이처럼 오버코어링에 따른 응력 개방곡선을 역으로 계산하여 구하게 되면 초기응력 측정시 나타난 응력개방곡선에 대한 적합성을 판별할 수 있게 된다. 특히 현장에서 연속적인 데이터 측정이 힘들 경우 오버코어링 과정에서의 충격이나 기계적 결함에 따른 변형률 곡선의 특이점은 찾기 어려우나 본 연구에서와 같이 수치해석을 통한 응력개방곡선과 비교를 하면 측정된 데이터의 신뢰도를 높일 수 있게 될 것으로 판단된다.

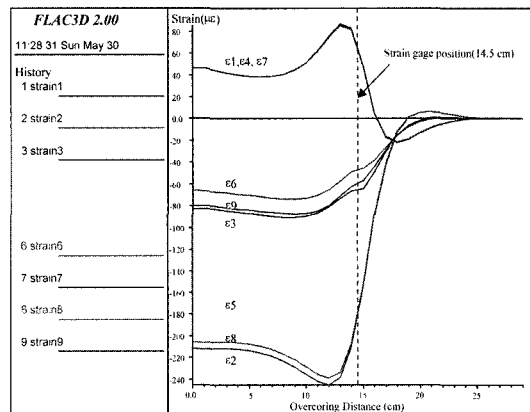


Fig. 16. Strain changes during overcoring by numerical analysis.

6. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 등방성 모르타르 인조암과 등방성 화강암에 대해 초기응력을 측정된 결과 주응력의 크기는 각각 가해진 응력대비 92-110%와 82-156%의 범위를 나타내었으며, 균질한 모르타르에서 더욱 정확한 초기응력값이 측정됨을 알 수 있었다.
- 2) 이방성 편마암에 대한 초기응력 측정 결과 보어홀이 등방평면에 평행한 경우와 수직인 경우는 각각 가해진 응력대비 56-105%, 72-102%의 값을 나타내었으며, 이방성을 고려하지 않은 해석은 이방성을 고려한 해석에 비하여 각각 최고 7%와 16%의 오차를 나타내었다. 따라서 이방성을 고려한 해석이 초기응력 측정시의 오차를 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 인공 이방성암석에 대한 초기응력측정 결과 가해진 응력대비 61-97%의 값을 나타내었으며 이방성을 고려하지 않은 해석은 이방성을 고려한 해석에 비하여 최고 34%의 오차를 나타내었으며 이방성의 정도가 클수록 이방성을 고려한 초기응력측정이 필요함을 알 수 있다.
- 4) 오버코어링에 의한 응력개방과정에 대한 3차원 유한차분 해석을 통해 본 실험에서 구한 응력개방곡선과 수치해석을 통한 적합성 분석이 현에서의 초기응력 측정과 함께 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1996년 한국학술진흥재단의 한·일 국제협력연구과제 학술연구비(KRF-96-E-100)에 의하여 지원되었다. 일본측 협력 연구자로서 많은 조언을 해준 산업기술총합연구소(産業技術総合研究所) 심부지질환경연구(深部地質環境研究) 센터 Masahiro Seto 박사와의 실험에 도움을 준 연구당시 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 박남수, 박배한 군에게 감사를 드린다.

참고문헌

1. 김호영, 1995, 이방성 암석에 대한 탄성계수의 실험적 결정, 한국암반공학회지 5, 318-322.
2. 박철환, 2001, 이방성 암석의 탄성상수 분석연구, 한국암반공학회지 11.1, 59-63.

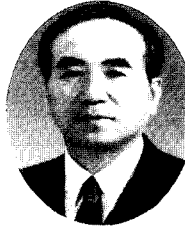
3. 이정인, 1992, 우리나라 지하암반의 초기응력 상태와 심부 지하공간 개발설계에의 응용, 대림기술정보, 가을'92, 2-19.
4. 임한욱, 이정인, 1980, 공벽변형법에 의한 암반내 초기응력 측정에 관한 연구, 대한광산학회지, 17, 30-17.
5. Amadei, B., 1982, The influence of rock anisotropy on measurement of stresses in-situ, PhD thesis, University of California, Berkeley, USA.
6. Amadei, B., 1996, Importance of Anisotropy When Estimating and Measuring In Situ Stress in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 33.3, 293-325.
7. Amadei, B., Stephansson, O., 1997, Rock stress and its measurement, Chapman & Hall, 490p.
8. Blackwood, R. L., 1978, Diagnostic Stress-relief Curves in Stress Measurement by Overcoring, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15, 205-209.
9. Cai, M., 1990, Comparative tests and studies of overcoring stress measurement devices in different rock conditions, PhD. thesis, University of New South Wales, Australia.
10. Cai, M., 1991, A technique for the recovery and re-use of CSIRO Hollow Inclusion Cells, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 28.2/3, 225-229.
11. Heerden, W. L. V., 1983, Stress strain relations applicable to overcoring techniques in transversely isotropic rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 8.6, 277-282.
12. Itasca Consulting Group, 1997, FLAC3D manual, Version 2.0.
13. Kim, K., Franklin, J.A., 1987, International society for rock mechanics commission on testing methods: Suggested methods for rock stress determination, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 24.1, 53-73.
14. Leeman, E. R., 1968, The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole - laboratory and underground measurements, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 5, 31-56.
15. Salamon, M. D. G., 1968, Elastic Moduli of a stratified rock mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 5, 519-527.
16. Tien Y. M., Tsao, P. F., 2000, Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 37, 1001-1012.
17. Ting, T. C. T., 1996, Anisotropic elasticity - Theory and applications, Oxford University Press, 570p.
18. Wang, Y. & Wong, T.-F., 1987, Finite Element Analysis of Two Overcoring Techniques for in situ stress measurement, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 24.1, 41-52.
19. Worotnicki, G., 1993, CSIRO triaxial stress measurement cell, in Comprehensive Rock Engineering (ed. Hudson J.A.), Vol. 3, 329-394.

민기복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 스웨덴 왕립공과대학, Licentiate
Degree(지질공학)
Tel: +46-8-790-6807
E-mail: kibok@kth.se
스웨덴 왕립공과대학(Royal Institute of
Technology, KTH), 박사과정(지질공학
전공)

이정인



1963년 서울대학교 공과대학 광산학과
공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과
공학석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)
대학원 자원공학과, 공학박사
Tel: 02-880-7221
E-mail: cilee@plaza.snu.ac.kr
서울대학교 공과대학 지구환경시스템공
학부 교수

최해문



1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과
박사 수료
Tel: 02-2145-6493
E-mail: hmchoi21@samsung.com
삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원