6. 암반의 초기응력

서론

- 지압의 특성: 수압처럼 깊이에 따라 증가하나 일반적으로 방향에 따라 지압의 크기가 다르므로 3차원 응력텐서를 구성하기 위해 6개의 독립성분을 구해야 한다.
- 초기응력(initial stress)과 유도응력(induced stress): 암반을 굴착하기 전, 즉 지압의 교란이 발생하기 전의 상태를 초기응력, 굴착으로 인해 초기응력이 교란되어 새로운 평형상태에 이른 것을 유도응력이라 함.
- 초기응력측정의 필요성: 초기응력을 알면 수치해석이나 물리모형 등을 이용해 공동굴착후의 유도응력을 예측할 수 있다.
- 초기응력에 영향을 미치는 요소: 피복암(overburden)의 두께, 지형, 지질구조, 판구조운동, 지열 등.

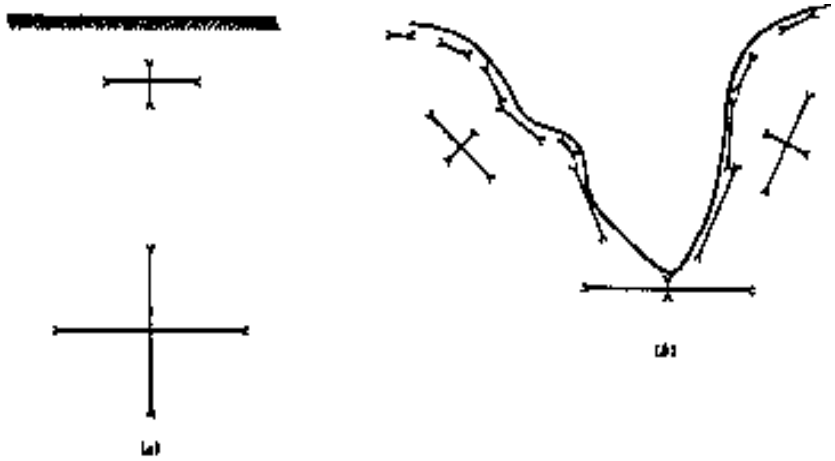
6.1 초기응력의 추정

– 지형의 영향

>지표면에는 전단응력이 0이므로 주응력면이라 할 수 있으며 이때의 주응력 방향은 지표면에 수직한 방향이다. 따라서 나머지 두 주응력은 지표면에 평행한 방향으로 형성된다.

>암반이 비교적 균질하고 지질학적 교란이 없었다면 깊은 지점에서도 연직방향이 주응력 방향이 될 것이다.

>언덕이나 계곡과 같이 평탄하지 않은 지표면에서는 (연직방향이 아닌) 지표면에 수직한 방향과 평행한 방향이 주응력 방향이 된다.



6.1 초기응력의 추정

– 연직방향 초기응력

>연직방향으로 주응력이 작용할 때 그 크기: $\sigma_v = \rho g z = \gamma z$

ρ: 암반밀도, g: 중력가속도, z: 심도, γ: 암반단위중량

– 수평방향 초기응력

>측압비: 연직방향 초기응력에 대한 수평방향 초기응력의 비($K = \sigma_h/\sigma_v$)

정암응력(lithostatic), 즉 정수압의 경우 $K = 1$

>암반이 등방성 탄성체일 경우: 무한 평면에서 수평방향 변위는 구속된 것으로 가정

$$0 = \frac{1}{E}\left(\sigma_h - \nu\left(\sigma_h + \sigma_v\right)\right) \quad \left(\text{c.f. } \varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right)\right)$$

$$\rightarrow \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_v \qquad \therefore K\left(= K_0\right) = \frac{\nu}{1-\nu}$$

ν = 0~0.5 이므로 K_0 =0~1이 되나 이는 교란되지 않은 층상퇴적암에 근사적으로 적용되며 K가 1이상인 경우도 흔히 볼 수 있다.

6.1 초기응력의 추정

- 측압비

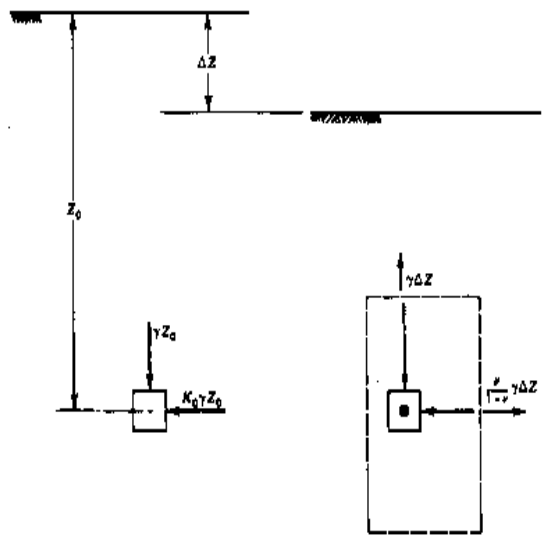
>암반의 상부가 침식될 경우:

K_0 :초기측압비, Δz: 침식두께, $z = z_0 - \Delta z$: 침식후 피복암 두께일 때

$$\sigma_h = K_0\sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu}\Delta\sigma_v = K_0\gamma z_0 - \frac{\nu}{1-\nu}\gamma\Delta z$$

$$\therefore K(z) = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{K_0\gamma(z+\Delta z) - \frac{\nu}{1-\nu}\gamma\Delta z}{\gamma z} = K_0 + \left(K_0 - \frac{\nu}{1-\nu}\right)\frac{\Delta z}{z}$$

암반이 초기에 등방 탄성체라면 침식에도 불구하고 $K = K_0$ 가 되나 $K_0 > \nu/(1-\nu)$ 인 경우에는 침식으로 인해 측압비가 증가할 수 있다.



6.1 초기응력의 추정

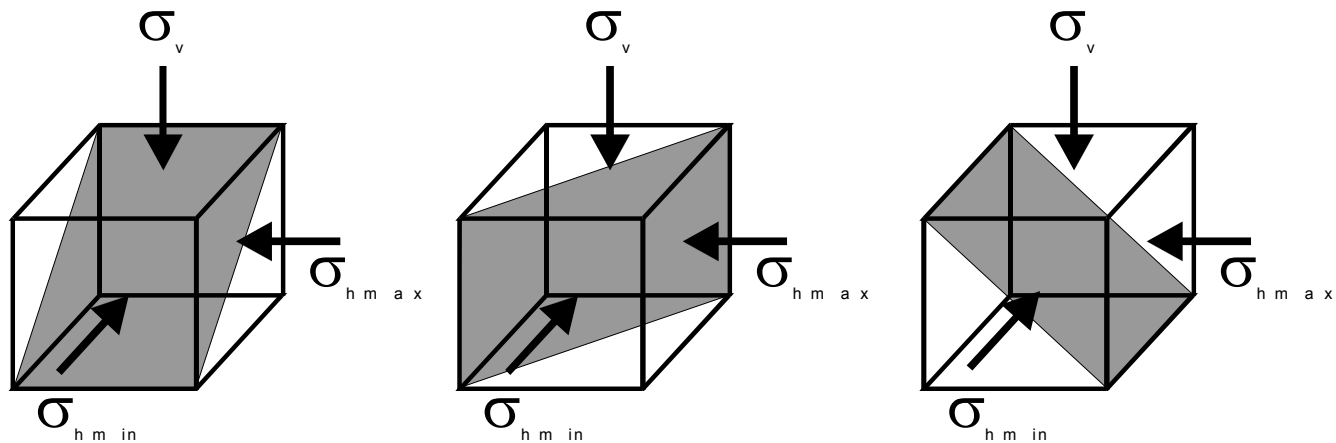
>초기응력과 단층과의 관계:

단층이 최대전단응력 방향으로 발생한다고 할 때 최대주응력과 최소주응력 방향을 통해 단층방향과 단층의 종류를 결정할 수 있다.

정단층: $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$

역단층: $\sigma_{hmax} > \sigma_{hmin} > \sigma_v$

주향이동단층: $\sigma_{hmax} > \sigma_v > \sigma_{hmin}$



(a) 정단층 조건 (b) 주향이동단층 조건 (c) 역단층 조건

6.1 초기응력의 추정

단층발생시 측압비의 변화:

측압비는 수평응력/수직응력이므로 정(역)단층발생조건에서 최소(대)가 된다.

(주향이동단층발생시는 수직응력이 단층발생에 영향을 주지 않음:Mohr-Coulomb 파괴기준)

정단층: $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$

역단층: $\sigma_{hmax} > \sigma_{hmin} > \sigma_v$

주향이동단층: $\sigma_{hmax} > \sigma_v > \sigma_{hmin}$

Mohr-Coulomb 파괴기준: $\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \phi/2\right) + 2c\tan\left(45^\circ + \phi/2\right) = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \phi/2\right) + \sigma_c$

$$K_{\min} = \frac{\sigma_{h\min}}{\sigma_v} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_1 (= \gamma z)}\right)\cot^2\left(45^\circ + \phi/2\right)$$

$$K_{\max} = \frac{\sigma_{h\max}}{\sigma_v} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2\left(45^\circ + \phi/2\right) + \frac{\sigma_c}{\sigma_3 (= \gamma z)}$$

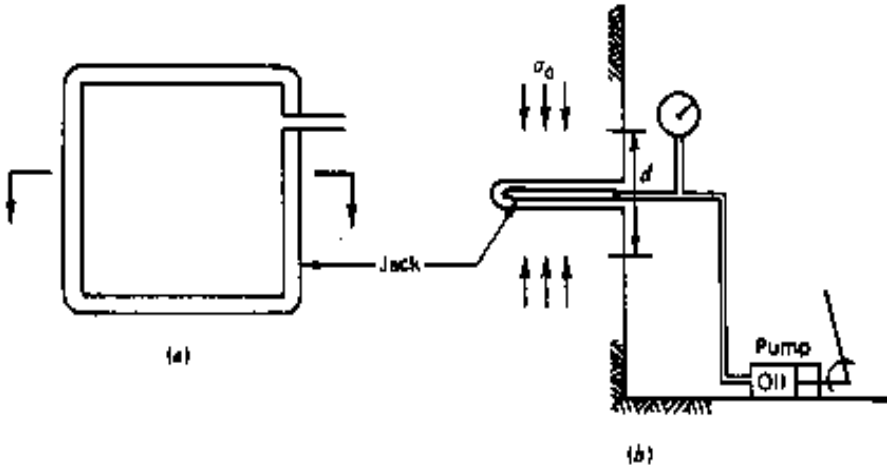
$K_{min} < K < K_{max}$ 인 경우에는 σ_3 이 파괴시에 비해 상대적으로 증가하므로 파괴가 발생하지 않는다. 즉 현지암반의 측압비로 유의한 범위임. 그러나 범위가 넓어 실용적이지 못함.

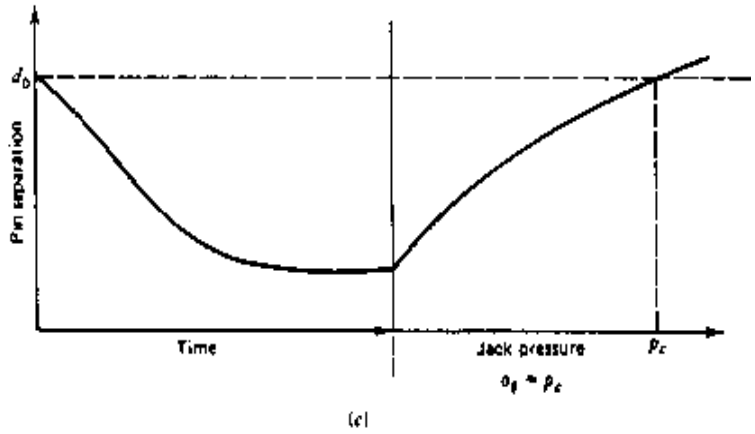
6.2 초기응력의 측정방법

측정원리에 따른 분류: 응력보상법, 응력개방법, 수압파쇄법, 변형률회복법

(1) 응력보상법 (stress compensating method)

- 슬롯을 설치할 위치 상하에 기준점을 정한 후 슬롯절삭에 따른 변위발생을 기록한다.
- 슬롯에 플랫잭(flat jack)을 삽입, 암반과 밀착시키고 초기변위를 회복할때 까지 가압함.
- 6개 독립 응력성분을 알아내기 위해 6방향의 수직응력을 측정할 필요가 있음.
- 장점: 암석의 탄성정수를 알 필요가 없고(알아낼 수 있다), 시험이 간단하고 저렴하다.
- 단점: 굴착면 부근의 교란된 응력을 측정하게 된다.

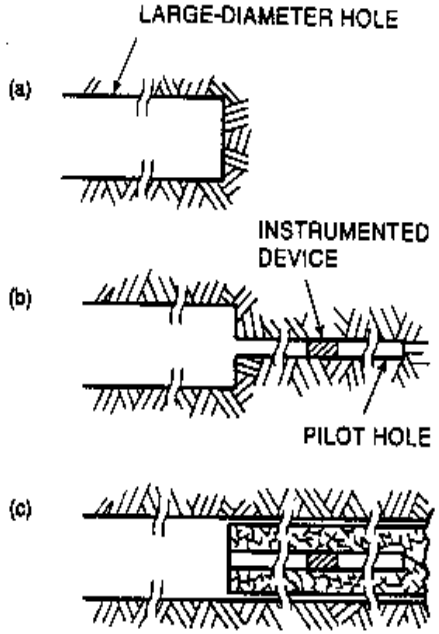




6.2 초기응력의 측정방법

(2) 응력개방법 (stress relief method)

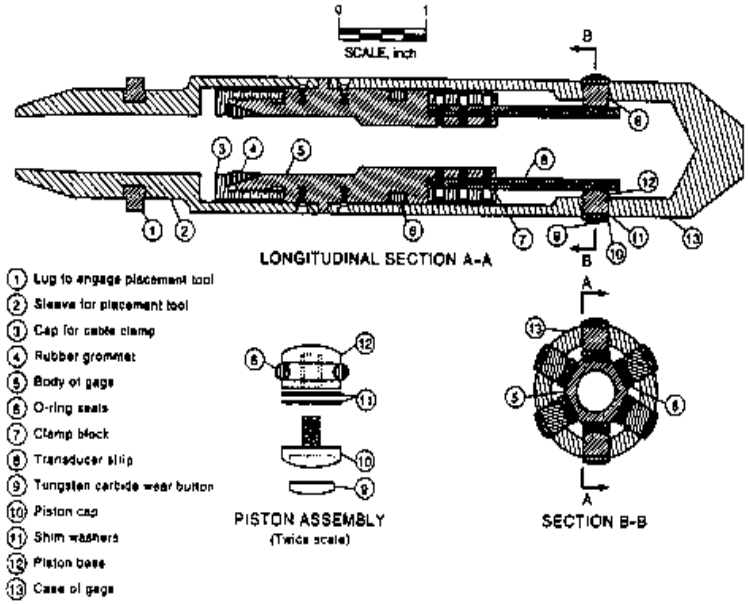
- 암반에 변형률 측정기/변위계/응력계를 설치한 후 응력개방에 따른 변화량을 측정하고 암석의 탄성정수를 이용하여 암반의 응력을 계산.
- 오버코어링, undercoring, 슬롯형성법 등이 있다.
- 오버코어링(overcoring): 공경변형법, 공벽변형법, 공저변형법, CSIRO HI Cell 이용법, 반구/원뿔형 공저변형법 등이 있다.

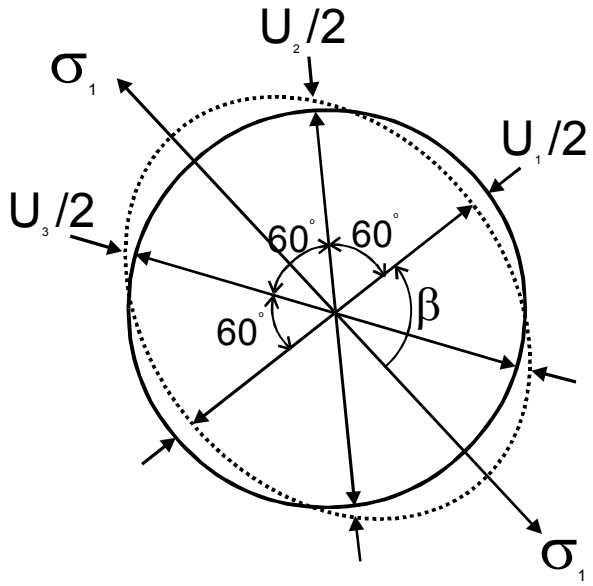


6.2 초기응력의 측정방법

1) 공경변형법 (USBM method)

- USBM 게이지를 이용하여 38mm (EW) 측정공을 60°간격으로 측정한 후 오버코어링 후 변화를 측정, 측정공에 수직한 평면에서의 변위를 얻는다.
- 서로다른 방향으로 3개의 측정공을 이용할 경우 3차원 초기응력상태를 계산할 수 있다.
- 평면변형률 조건을 만들기 위해 측정공 입구부터 지름의 3~4배 거리에서 측정한다.

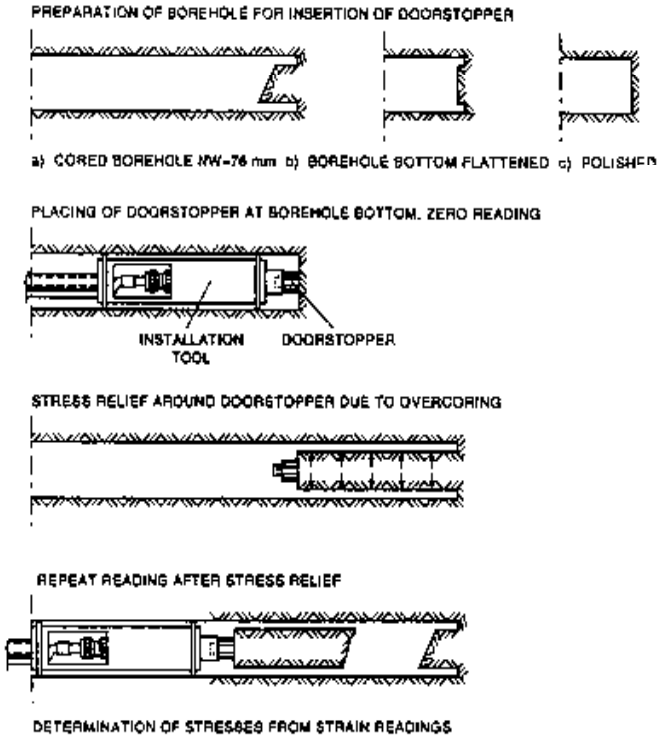


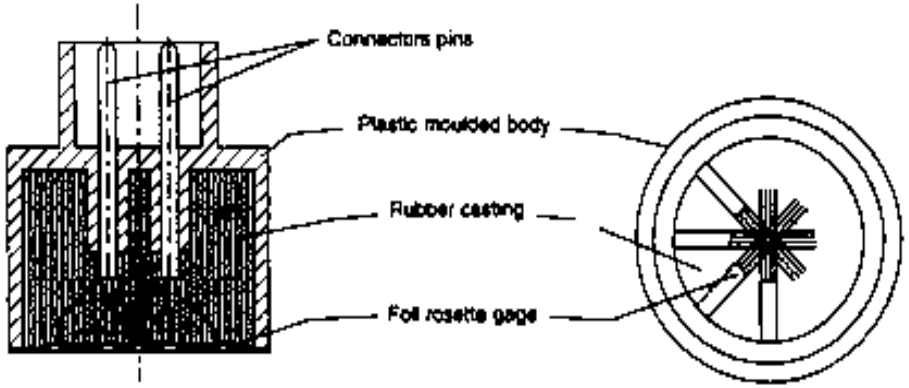


6.2 초기응력의 측정방법

2) 공저변형법 (Doorstopper method)

- 공저에 rosette 게이지를 부착한 후 오버코어링하여 응력개방 전후의 변형률을 구한다.
- 서로다른 방향으로 3개의 측정공을 이용할 경우 3차원 초기응력상태를 계산할 수 있다.
- 오버코어링길이가 상대적으로 짧아 연약암반이나 절리가 발달한 경암에 적용 용이.

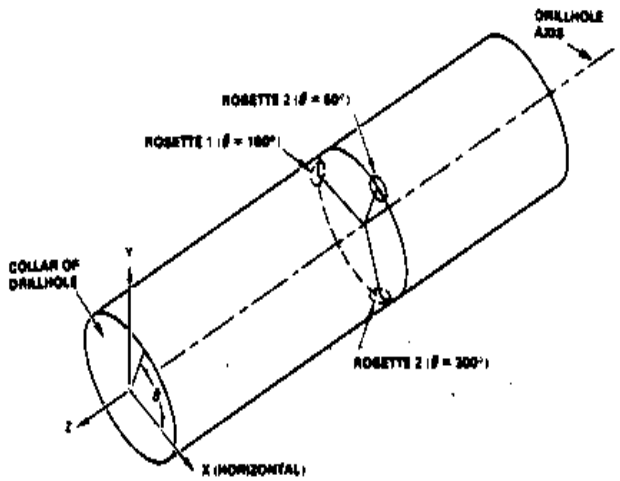


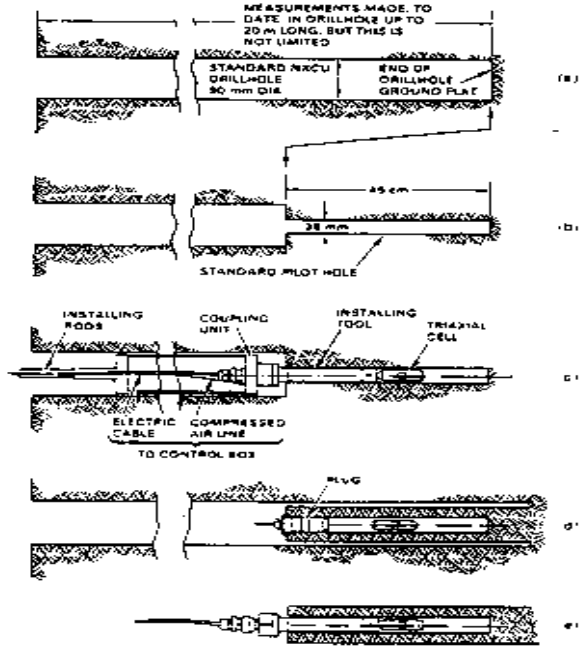


6.2 초기응력의 측정방법

3) 공벽변형법 (Leeman method)

- 공벽의 3지점에 rosette 게이지를 부착한 후 오버코어링하여 응력개방 전후의 변형률을 구한다.
- 단일 측정공을 이용하여 3차원 초기응력상태를 계산할 수 있다는 장점이 있다.
- 공벽이 매끄럽지 않거나 출수가 있는 경우 게이지부착이 어려움.

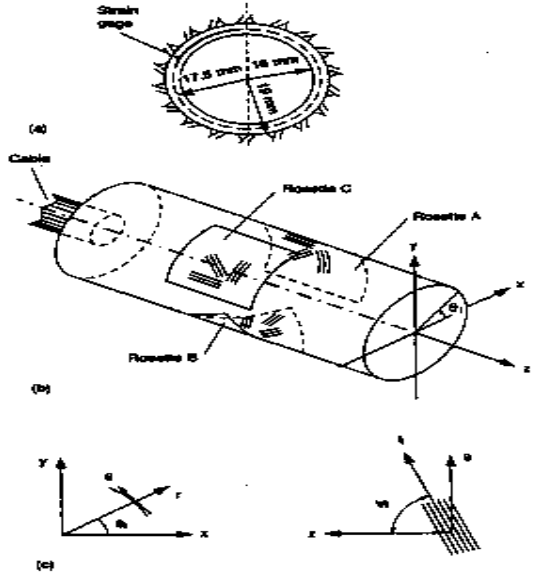




6.2 초기응력의 측정방법

4) CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) HI 셀 방법

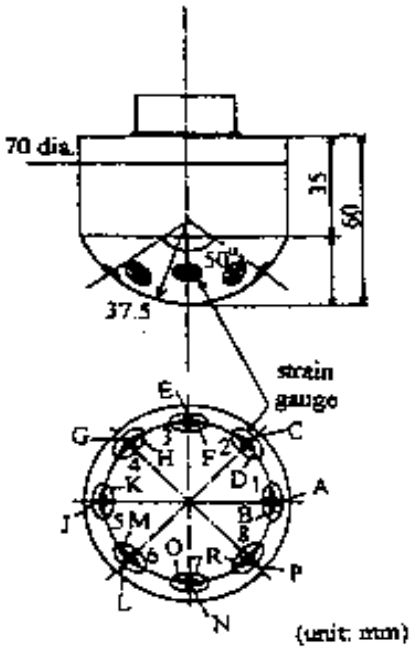
- 일종의 공벽변형법이나 3(4)지점의 rosette 게이지를 두께 2mm의 에폭시파이프내에 0.5mm 심도에 묻어놓고 공벽과 파이프를 1mm두께로 접착한다는 점이 다르다.
- 오버코어링 중에도 연속적인 변형률측정이 가능하며 오버코어링된 시료의 원형보존이 용이함.
- 게이지가 공벽에 직접부착되는 것이 아니므로 해석과정이 복잡하고 Leeman method 에 비해 비용이 많이 든다 .

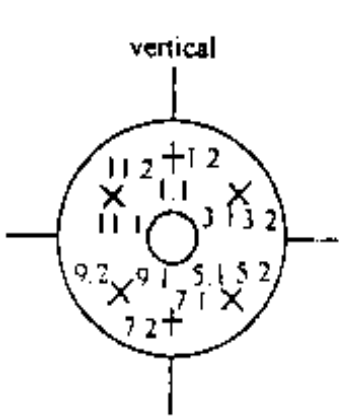


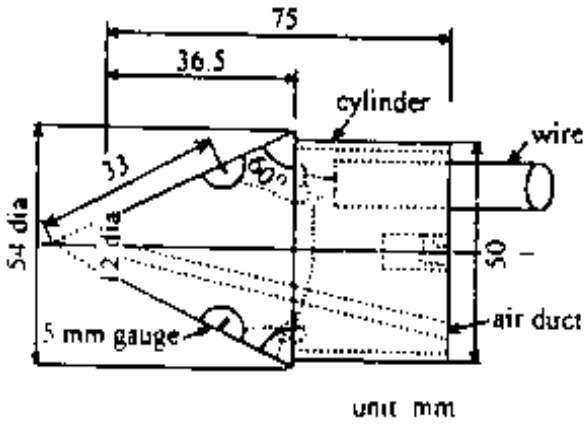
6.2 초기응력의 측정방법

5) 반구/원뿔형

- 일종의 공저변형법이나 바닥면을 반구 혹은 원뿔형으로 절삭하여 축방향 성분을 측정함으로써 한 개의 측정공을 통해 3차원 응력상태를 구함.



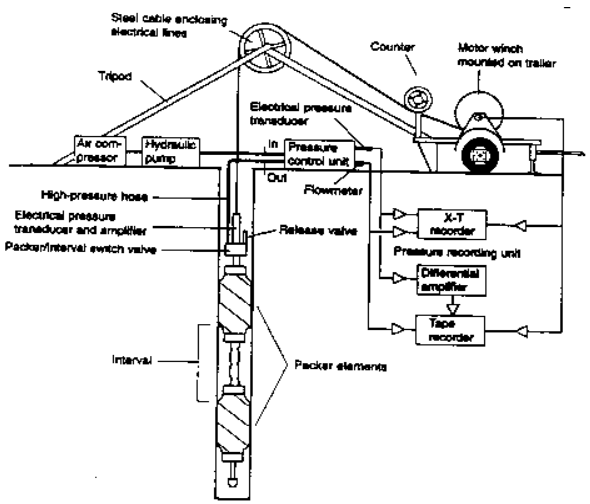




6.2 초기응력의 측정방법

(3) 수압패쇄법 (Hydraulic fracturing method)

- 시추공의 일부를 패커로 격리시킨후 물을 주입, 수압에 의해 공벽에 균열을 발생시킴.
- 균열의 발생, 전파, 재벌어짐(reopening), 벌어짐 유지에 필요한 수압을 측정, 초기지압의 크기와 방향을 추정한다.
- 장점: 암반 변형계수를 알 필요가 없다, 지하수면 아래에서도 시험가능, 대심도 시추공에서 수행가능한 유일한 방법.
- 가정(조건): 연직방향이 최대주응력방향이 되어 수직균열이 발생해야 한다.



6.2 초기응력의 측정방법

– 초기응력 추정원리:

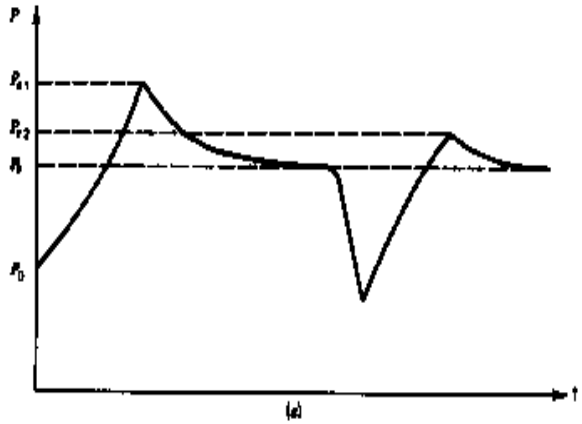
$\sigma_A = 3\sigma_{h\min} - \sigma_{h\max}$: The least stress around the borehole

$p_{c1} = 3\sigma_{h\min} - \sigma_{h\max} + \sigma_t$

$p_s = \sigma_{h\min}$

$p_{c2} = 3\sigma_{h\min} - \sigma_{h\max}$

$\sigma_t = p_{c1} - p_{c2}$



– 수직균열 발생조건:

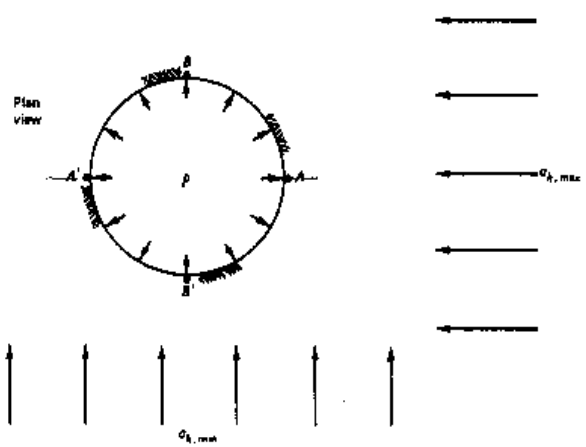
$\sigma_v + \sigma_t \geq 3\sigma_{h\min} - \sigma_{h\max} + \sigma_t$

$\rightarrow \sigma_v \geq 3\sigma_{h\min} - \sigma_{h\max} = (3\omega - 1)\sigma_{h\max}$

$\left(\omega = \sigma_{h\min} / \sigma_{h\max} \right)$

$K = \dfrac{\sigma_{h\min} + \sigma_{h\max}}{2\sigma_v} = \dfrac{\omega + 1}{2}\dfrac{\sigma_{h\max}}{\sigma_v}$

$K \leq \dfrac{\omega + 1}{2(3\omega - 1)}$



6.2 초기응력의 측정방법

– 국내 초기응력측정값

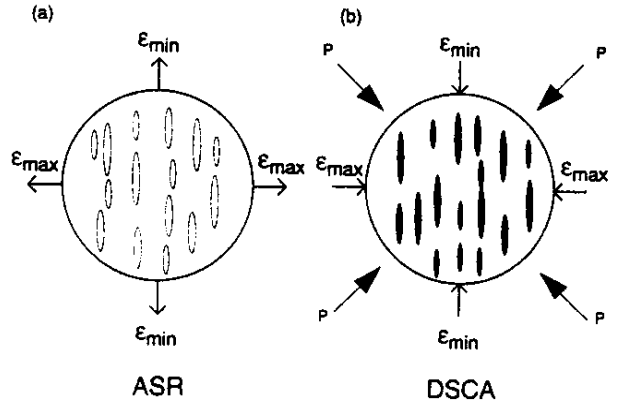
No.	Location	Depth (m)	Rock	Sv (MPa)	Sh (MPa)	SH (MPa)	Direction of SH (degree)	Investigator
1	Daejeon	37 43 73	granitic gneiss " "	-0.99 -1.15 -1.96	-2.99 -3.38 -4.70	-4.65 -4.85 -5.57	S87°W-N87°W	Syn & Choi et als
2	Yeong-dong	17 34 43 52	" " " "	-0.45 -0.90 -1.14 -1.38	-0.64 -1.35 -1.79 -1.72	-0.80 -1.75 -2.01 -2.28	138°± 27 70°± 21 " "	Choi& shin et als
3	Pyong-tack	104 - 140 156 - 180	" "	-3.75 -4.70	-6.00 -6.50	-11.60 -11.60	74° 98°	Lee & Haimson
4	Yosu	91 - 106 94 - 110 103 - 126	granite andesite "	-2.60 -2.80 -3.10	-5.83 -4.37 -6.00	-11.00 -6.20 -8.15	22° 87° 83°	"
5	Goje	69 - 119 119 - 175 108 - 244	granodiorite " "	-2.83 -4.10 -5.14	-3.70 -4.53 -4.09	-6.70 -7.78 -7.27	101° 76° 132°	"

6.2 초기응력의 측정방법

(4) 시추코어 이용법

1) ASR (Anelastic Strain Recovery) 법

- 시추코어 회수시 회복되는 변형률은 순간적인 탄성성분과 시간의존적인 비탄성 성분으로 구분할 수 있다.
- 응력개방이 클 수 록 변형률 회복량이 클 것이므로 주변형률 방향과 주응력 방향이 일치한다고 가정하여 초기응력의 방향을 추정.
- 하중제거와 변형률발생의 관계를 설명하는 점탄성 모델을 이용할 경우 회복된 변형률을 이용해 초기응력의 크기를 추정할 수 있음.
- 심부지압 측정에 활용
- 단점: 변형률 측정결과가 온도, 함수비 변화, 공극수압, 암석이방성, 잔류변형률, 측정시간 등에 영향을 받으며 미소량의 변형량을 측정해야 함



6.2 초기응력의 측정방법

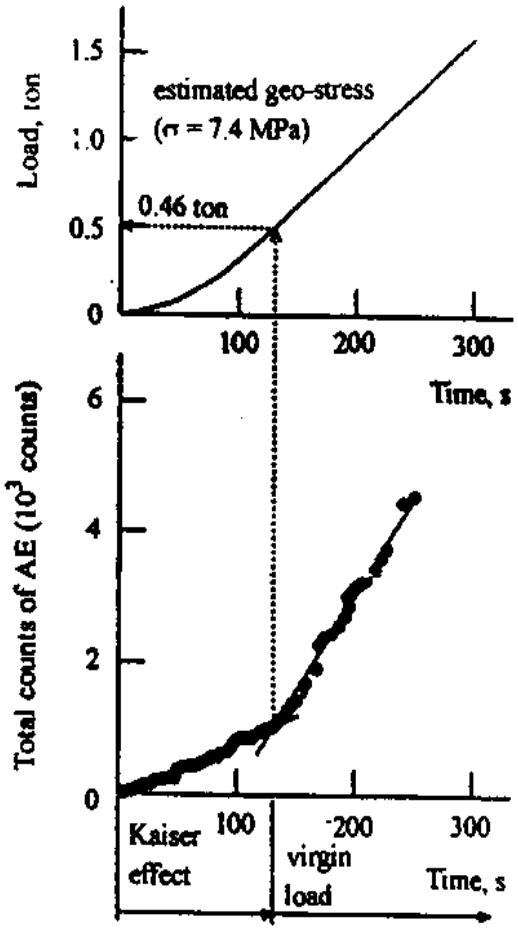
2) DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 법

- 회수된 시추코어가 응력개방에 따른 변형발생 후 정수압을 가할때 관찰되는 주변형률 방향이 초기지압의 주응력 방향과 일치하는 것으로 가정
- 응력개방과정에서 발생한 미세균열은 초기 비선형(응력-변형률)구간을 이루는데 이 미세균열의 양이 클 수 록 해당 방향으로의 초기 응력이 크다고 가정하여 각 주응력의 상대적인 크기를 추정
- ASR법과 마찬가지로 심부 암반 초기지압 추정에 적합.

3) AE (Acoustic Emission) 법

- 재료에 응력을 가하는 경우 응력증가에 따라 AE회수가 증가한다.
- 응력제거 후 재가압시에는 첫째 재하과정에서의 최대응력이전까지는 AE가 작다가 그 이후에 급격히 커지는 현상이 나타난다: Kaiser 효과.
- 하중(시간)증가에 따른 AE발생량을 두개의 직선으로 근사시킬때 그 교점에서의 응력으로 초기지압을 추정한다.

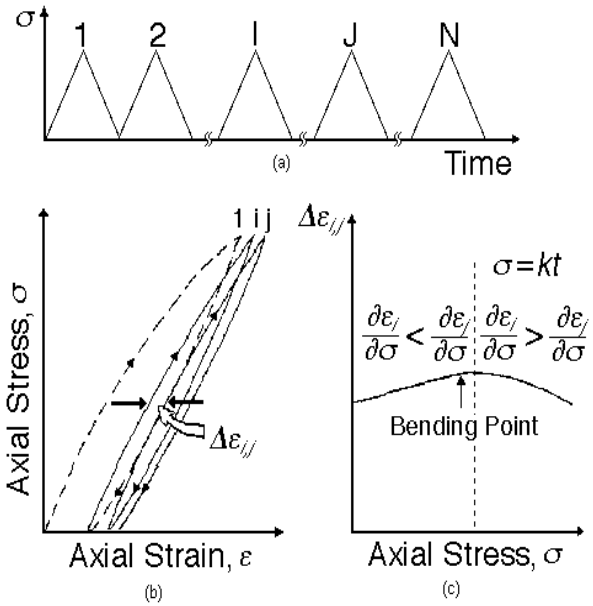
6.2 초기응력의 측정방법

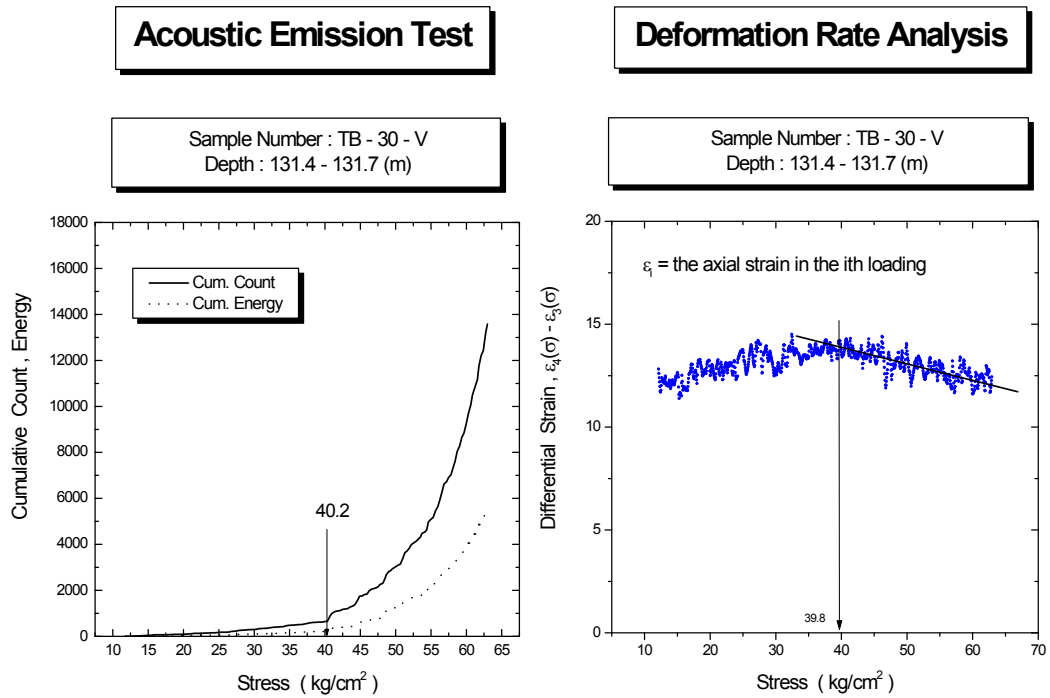


6.2 초기응력의 측정방법

4) DRA (Deformation Rate Analysis) 법

– 두 번 이상의 주기압축하중을 시료에 가할 때 발생하는 시료의 영구변형률(변형률차)이 초기응력이전까지는 증가하다가 그 이후에 감소하는 현상을 이용하여 초기응력을 추정함.





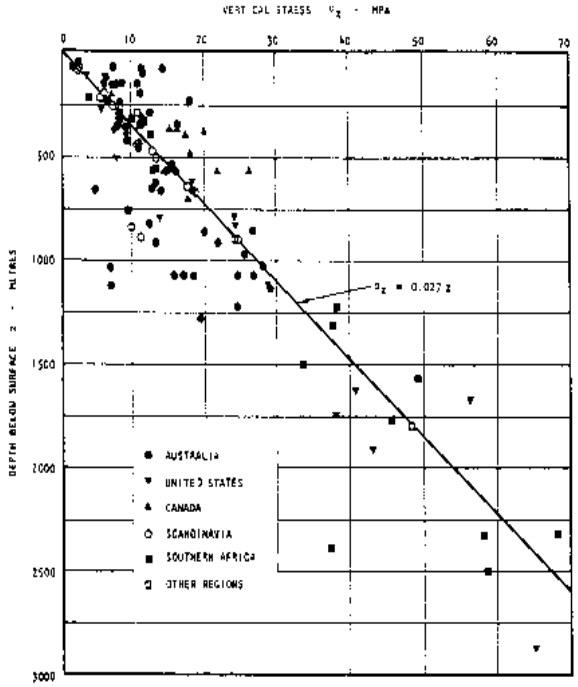
6.3 초기응력 측정치의 세계적 경향

1) 깊이에 따른 연직응력 측정치

– 적합식은 연직응력이 암반의 자중에 의해 발생함을 보임.

$$\sigma_v = 0.027z \text{ (MPa)}$$

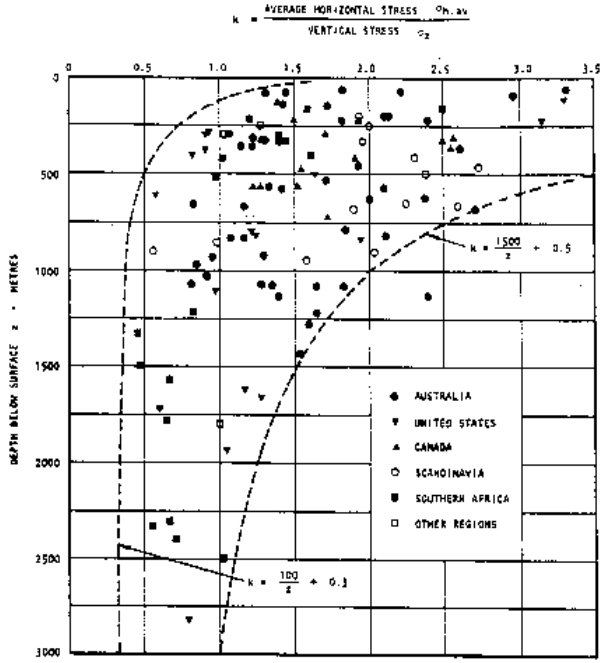
– 천부 측정치의 분산은 측정값의 크기가 작음으로 인한 오차증가와 관련이 있음.



6.3 초기응력 측정치의 세계적 경향

2) 깊이에 따른 측압비 변화

- 깊이에 따른 측압비는 두 쌍곡선을 경계로 하여 분포함.

$$100/z + 0.3 < K < 1500/z + 0.5$$

- 500m 이내에서는 측압비가 크나 깊이가 증가할 수록 감소한다.
- 천부에서는 초기응력을 직접 측정하는 것이 필요함.
- 표 6.3/6.4 참조