공저변형법에 의한 3차원응력측정 시스템의 개발
Development of 3-Dimensional Stress Measurement System by Bore hole Bottom Deformation Method

이기하[1], Ki-Ha Lee, Yoji Ishijima[2] , Yoshiaki Fujii[3]

[1] Graduate Student, Division of Structural and Geoterchnical Engineering Graduate school of Engineer, Hokkaido University (E-mail : kihalab@rock.eng.hokudai.ac.jp)
[2] Director, Horonobe Research Institute for the Subsurface Environment
[3] Professor, Research Group of Geoenvironmental Engineering Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering Graduate school of Engineer, Hokkaido University

SYNOPSIS : A 3-dimensional stress measurement system based on the bore hole bottom deformation method, which is one of the stress relief methods, was developed. A pilot bore hole is drilled from the bottom of a bore hole and the stress meter is inserted into the pilot bore hole in the method. The bore hole is advanced as an over coring and the deformations in seven directions are measured by cantilever type-sensors. Using the cantilever type-sensors saves time for hardening of glue. No cable connection between the stress meter and a data logger is necessary since a compact data logger is installed in the stress meter. The accuracy of the stress meter was confirmed by a biaxial test for a Shikotsu welded tuff block although in-situ tests have not been carried out yet.

Key words : Rock stress, Stress measurement, Stress relief method, 3-dimensional stress, Bore hole bottom deformation method

1. 서 론

암반응력을 측정하기위한 방법 중에 하나인 응력해방법에서는 응력해방에 따른 변위 또는 변형률이 계측되어진다. 변형률은 대부분에 경우 변형률게이지를 이용하여 계측하지만, 수중에서 암석분말이 존재하는 상황에서는 변형률게이지를 설치하는 것은 기술적 문제가 언제나 따라다닌다. 또한, 접착제의 경화시간도 필요하다.

이에 비해, 변위를 계측하는 방법의 경우, 방법에 따라 다르지만, 변형률에 비교해서 약간 감도가 떨어진다. 그러나 변위계를 설치하면 바로 응력해방에 따른 측정이 가능한 이점을 가지고 있다. 다만, 일회 응력해방으로 3차원응력을 측정하기 위해서는 공축에 직교하는 면에 대한 면외전단응력에 의한 변형성분을 반드시 측정해야 한다. 이 때문에, 예를 들면, 사거리 변화를 측정하는 전력중앙연구소식에서는 그라우트가 필요하다. 그라우트는 균열질 암반에 대해서 응력해방 성공률을 향상시키기 때문에 유효하다고 할 수 있으나, inclusion 문제가 발생되어지기 때문에 해가 복잡해진다. 또한, 신속한 측정이 가능

하다는 변위을 계측하는 방법의 장점이 손상되어진다.

Ghimire et al.(2004)는 그라우트가 필요 없이 일회 응력해방으로 3차원 응력을 측정하는 probe를 개발하였다. 그러나 over coring의 직경이 크고, 변위센서의 취급이 민감한 결점이 있다. 본 연구에서는 bore hole 공저에 측점을 설계하므로써 over coring 직경, pilot hole 직경을 보다 소형화 하고, 변위센서 설치에도 무리가 없도록 하였다.

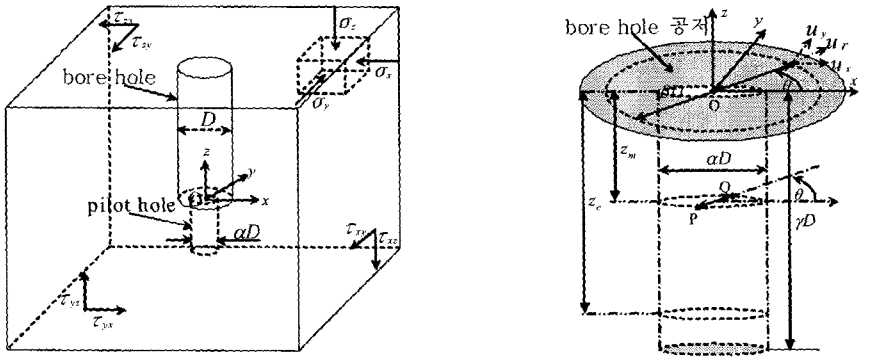
구체적으로는 직경86mm bore hole 공저에 직경 30mm, 깊이 150mm의 pilot hole 을 만든다. pilot hole에 측정기를 투입하고, bore hole과 같은 구경의 over coring을 수행한다. over coring에 따른 pilot hole의 적당한 심도에서 3방향 경변화 및 pilot hole 공벽과 bore hole 공저사이에 4방향의 신축을 포함하여 합계 7성분을 cantilever식 변위계에 의해 계측하고, 수치해석에 기초한 관측방정식을 이용하여 3차원응력을 결정한다.

여기서는 공저변형법의 이론과 개발한 계측기의 구조에 대해서 설명하다. 원위치에서의 실적은 아직 없지만, 암석블럭을 사용한 모의실내시험을 수차례 수행하였다. 1축압축시험에서는 암석의 비탄성 과 이방성에 기인한 것으로 판단되어지는 커다란 오차가 발생되었으나, 2축압축시험에서는 대체적으로 좋은 결과가 얻어져서 그 결과에 대해서 소개한다.

2. 공저변형법의 이론

2.1 좌표계와 측정대상변위

bore hole축을 좌표계의 z축으로 하고 over coring을 시작하는 시점의 공저중심에 원점을 취한다(그림 1(a)). 직교좌표계(x, y, z) 및 원주좌표계(γ, θ, z)는 그림 1(a), (b)에 표시한 것처럼 xy면을 공저면에 일치시키고 원주좌표계의 회전각는 x축으로부터 반시계 방향으로 회전시킨다.



(a) 전체도 (b) bore hole 공저와 pilot hole 의 확대도

그림 1. Bore hole 과 좌표계

직교좌표계에서의 변위성분을(u_x, u_y, u_z), 원주좌표계에서의 변위성분을(u_r, u_θ, u_z), 암반에 작용하는 초기응력을

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x,\ \sigma_y,\ \sigma_z,\ \tau_{xy},\ \tau_{yz},\ \tau_{zx}\}^{\mathrm{T}} \qquad (1)$$

라고 한다.

암반중의 bore hole(직경:D)의 저면과 그 중심에 뚫어놓은 pilot hole(직경:αD, 깊이:γD)에 복수의 측점을 설계한다. pilot hole의 $z = z_m$의 단면에서 경변화 및 $z = z_c$의 단면과 공저의 원상(직경:βD)의 측점사이의 축방향의 상대변위를 계측 대상으로 한다.

2.2 수치해석

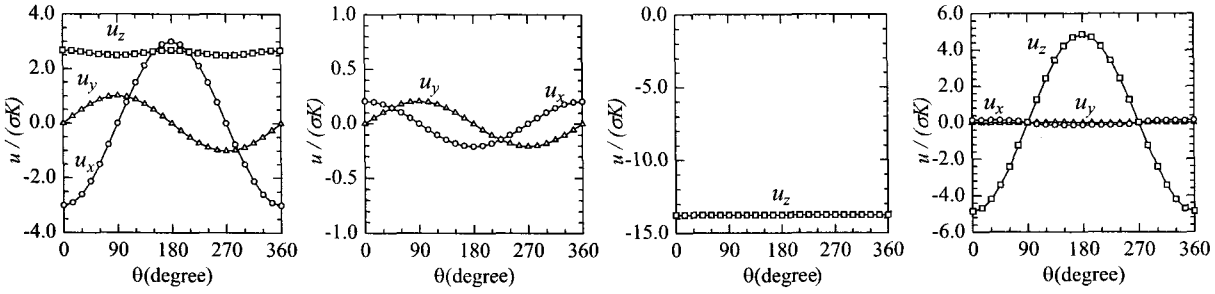
$z = z_m$단면에서의 경변화만을 이용하면 탄성이론해가 구해져있으나 본 연구에서는 bore hole의 공저의 변형을 이용하기 때문에 암반을 Young률E, Poisson's ratio υ의 균질한 등방탄성체로 가정하고 초기응력이 작용할 때 공저주변의 변형과 초기응력과의 관계식을 3차원 유한요소법에 의해 구했다. 해석영역의 대칭성을 고려하고 좌표변환공식을 이용하면 3개의 경계조건에 대해서 3차원 유한요소법에 의한 해를 구하는 것으로 공저주변의 변형과 응력과의 사이에 성립하는 관측방정식이 얻어 진다.

i) $\sigma_x \neq 0,\ \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$

ii) $\sigma_z \neq 0,\ \sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$

iii) $\tau_{zx} \neq 0,\ \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$

각 경계조건에 대해서 실시한 수치해석결과의 예를 그림 2에 표시하였다. 좌표변환과 중첩의 원리를 이용하기 편하게 수치해석에서 구한 해를 아래와 같이 삼각함수를 이용하여 근사하였다.



(a) 경계조건 i　　b) 경계조건 ii(u_x, u_y)　　(c) 경계조건 ii(u_z)　　(d) 경계조건iii

그림 2. $z_m = -40(mm)$단면에서의 변위성분($K = \alpha D/(2E)$)

경계조건 i)

$$u_x = m_x \sigma_x K cos\theta \qquad (2(a))$$

$$u_y = n_x \sigma_x K sin\theta \qquad (2(b))$$

$$u_z = \sigma_x K(s_x + t_x \cos 2\theta) \qquad (2(c))$$

경계조건 ii)

$$u_x = m_z \sigma_z K cos\theta \qquad (3(a))$$

$$u_y = m_z \sigma_z K sin\theta \qquad (3(b))$$

$$u_z = s_z \sigma_z K \qquad (3(c))$$

경계조건 iii)

$$u_x = m_{zx}\tau_{zx}Kcos\theta \qquad (4(a))$$

$$u_y = n_{zx}\tau_{zx}Ksin2\theta \qquad (4(b))$$

$$u_z = t_{zx}\tau_{zx}Kcos\theta \qquad (4(c))$$

여기서, $K = \frac{\alpha D}{2E}$

m, n, s, t는 α, β, γ, z(그림 1 참조), ν에 의존한 정수이다. σ_y, τ_{xy}, τ_{yz}에 의한 변위성분은 좌표변환과 중첩의 원리에 의해 구해지고, 정리하면, 측점P(그림 1(b))에서 발생하는 면내, 축방향의 변위성분은 다음의 식으로 표현하는 것이 가능하다.

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x\cos\theta & n_x\cos\theta & m_z\cos\theta & (m_x-n_x)\sin\theta & n_{zx}\sin2\theta & m_{zx}\cos\theta \\ n_x\sin\theta & m_x\sin\theta & m_z\sin\theta & (m_x-n_x)\cos\theta & m_{zx}\sin\theta & n_{zx}\sin2\theta \\ s_x+t_x\cos2\theta & s_x-t_x\cos2\theta & s_z & 2t_x\sin2\theta & t_{zx}\sin\theta & t_{zx}\cos\theta \end{bmatrix} \{\sigma\} \quad (5)$$

2.3 관측방정식

공저변형법에서 계측하는 over coring에 따른 7개의 측선을 따라 발생되는 신축에 관한 관측방정식은 아래와 같다.

a) pilot hole의 $z = z_m$ 단면에서의 3방향의 경변화 $U(\theta)$

$z = z_m$ 단면상에서 θ의 방향을 가지는 직경의 양단을 측점P, Q라고 한다. 측점P, Q의 직경방향의 신축에 의한 경변화($U(\theta)$) 는 측점P, Q의 반경방향의 변위성분$u_r(\theta)$, $u_r(\theta+\pi)$을 이용하여 다음과 같이 표현되어 진다.

$$U(\theta) = u_r(\theta) + u_r(\theta+\pi)$$

$$= 2K[(m_x\cos^2\theta + n_x\sin^2\theta)\sigma_x + (m_x\sin^2\theta + n_x\cos^2\theta)\sigma_y + m_z\sigma_z$$

$$+ (m_x - n_x)\tau_{xy}\sin2\theta + m_{zx}\tau_{yz}\sin^2\theta + m_{zx}\tau_{zx}\cos^2\theta] \qquad (6)$$

b) pilot hole의 단면 $z = z_c$와 공저($z = 0$)에 있는 원(직경:βD)위에 서로 90°떨어져 있는 4개의 축방향 상대변위 $\Delta u_z(\theta)$

$$\Delta u_z(\theta) = u_z(\theta) - u_z^{**} \qquad (7)$$

이다. 여기서, $u_z(\theta)$는 공저 원상에서의 점의 축방향 변위, $u_z(\theta)^{**}$는 pilot hole의 단면$z = z_c$의 공벽에 설계한 측점의 4방향($\theta = 0,\ \pi/2, \pi,\ 3\pi/2$)의 축방향 변위의 평균값이다.

$$u_z^{**} = \{u_z(r_m,0,z_c) + u_z(r_m,\pi/2,z_c) + u_z(r_m,\pi,z_c) + u_z(r_m,3\pi/2,z_c)\}/4$$

$$= K\{s_x(r_m, z_c)(\sigma_x + \sigma_y) + s_z(r_m, z_c)\sigma_z\} \qquad (8)$$

여기서, $r_m = \frac{\alpha D}{2}$ 이다.

$\triangle u_z(\theta)$와 일정한 응력$\{\sigma\}$과의 관계는 다음과 같다.

$$\triangle u_z(\theta) = K[\{s_x + t_x\cos 2\theta\}\sigma_x + \{s_x - t_x\cos 2\theta\}\sigma_y + s_z\sigma_z$$

$$+ 2t_x\sin 2\theta\tau_{xy} + t_{zx}\sin\theta\tau_{yz} + t_{zx}\cos\theta\tau_{zx}] - u_z^{**} \qquad (9)$$

3. 측정기의 구조와 측정순서

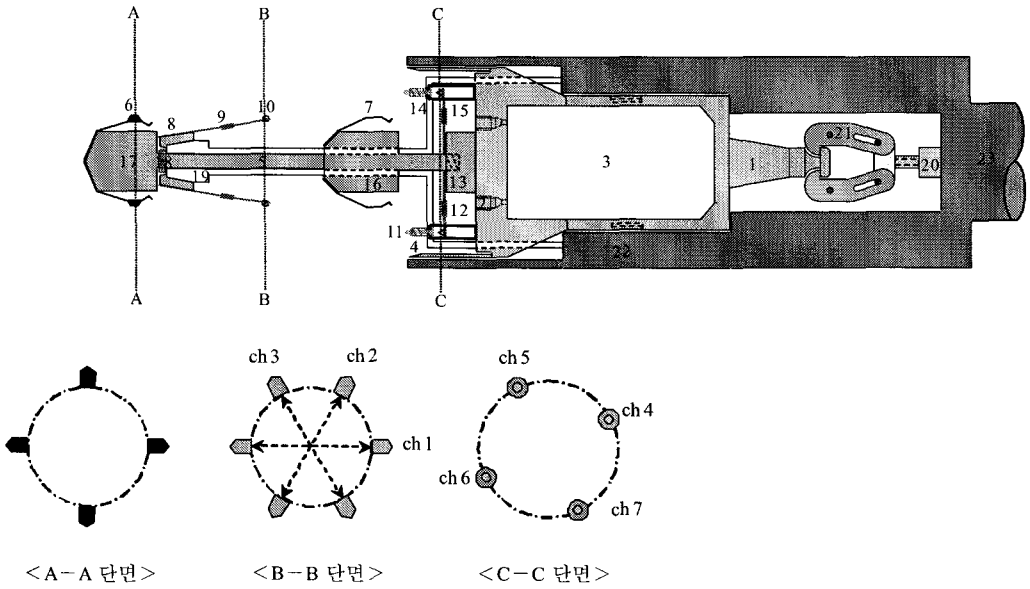


그림 3. 측정기의 구조.

1:측정기(수납부), 2:연결선공, 3:데이터 기록장치, 4:보호용 원통, 5:측정기(계측부), 6:고정용 판형스프링1, 7:고정용 판형스프링2, 8:받침1(공경변화 센서용), 9:cantilever식 센서(공경변화 센서), 10:측정용 핀(공경변화 측정용), 11:측정용 핀(축변화 측정용), 12:cantilever식 센서(축변화 센서), 13:받침4(축변화 센서용), 14:코일 스프링, 15:측정핀 가이드, 16:받침2(고정용 판형스프링2용), 17:받침3(고정용 판형스프링1용), 18:코일 스프링, 19:고정용 쐐기(공경변화 받침 고정용), 20:에어 피스톤, 21:후크, 22:투입부, 23:rod

측정기의 구조는 그림 3에 표시하였다. 3방향의 경변위는 받침1에 등간격60°로 고정되어 있는 6개의 cantilever식 센서에 의해서 계측되어진다. 각 cantilever식 센서는 두 장의 변형률게이지가 앞뒤에 붙어있다. 한 개의 경방향 성분은 두 개의 cantilever식 센서가 직경의 양단이 되어 경방향으로만 움직이도록 되어 있다.

4방향의 축변위는 받침4에 90°의 등간격으로 고정되어 있는 4개의 cantilever식 센서에 의해 계측되어 진다. 각 cantilever식 센서는 받침4에 고정되어 축방향으로만 움직인다.

7성분의 변위중 경방향의 3성분을 ch1, ch2, ch3, 축방향의 4성분을 ch4, ch5, ch6, ch7로 한다. 마이크로미터를 사용하여 평가한 감도계수를 표 1.에 표시하였다.

공저변형법에 기초한 암반응력측정 작업은 다음과 같다(그림 4.).

표 1. cantilever식 변위계의 감도 계수(μstrain/mm)

	1회	2회	3회	4회	평균
ch1	-2482	-2511	-2525	-2525	-2511
ch2	-2578	-2609	-2617	-2619	-2606
ch3	-2564	-2600	-2603	-2601	-2592
ch4	-4734	-4721	-4744	-4741	-4735
ch5	-4638	-4642	-4643	-4663	-4646
ch6	-4773	-4792	-4801	-4785	-4788
ch7	-4812	-4829	-4836	-4823	-4825

표 2. 1축 압축시험에 의한 Young률

공 시 체	shikotsu -결응회암
공시체 1	4.666 GPa
공시체 2	7.723 GPa
공시체 3	4.417 GPa
공시체 4	3.823 GPa
평 균 값	5.517 GPa

1) 데이터 기록장치의 전원을 켜고 측정기를 투입부(22)에 끼워 넣는다. 투입부의 뒷부분에는 로드(23)를 연결시킨다. 투입부와 측정기를 관측공내에 밀어 넣는다. 필요에 의해서 로드을 추가로 연결한다.
2) 측정기의 선단이 pilot hole 안에 들어가고 투입부의 선단이 공저에 닿은 것(그림 4.(a)) 을 확인한 후, 압축공기를 주입한다. 에어피스톤(20)의 작용으로 후크(21)이 열리면(그림4.(b)) 로드(23)을 관측공 밖으로 빼낸다.
3) 비트를 공저에 투입하고(그림 4(c)) over coring작업을 실시한다.
4) 코아튜브를 회수한다. 측정기는 코아튜브 안에 수납되어진 상태에 있다.
5) 데이터 기록장치 을 회수하여 컴퓨터에 연결하고 측정결과를 해석한다.

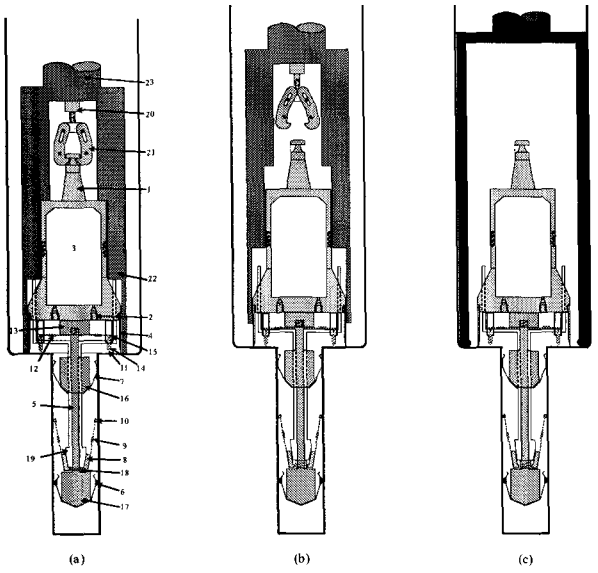


그림 4. 측정순서의 모식도

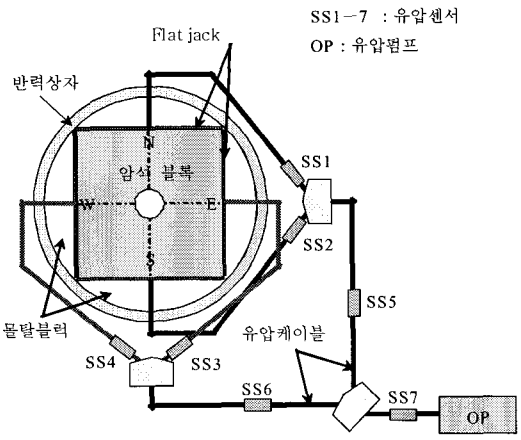


그림 5. 2축 압축시험의 모식도

4. 모형시험

측정기의 신뢰성을 확인하기 위해서 암석 블럭을 이용한 2축 압축시험을 실시하였다. 시험에는 원형의 반력상자, 250mm×250mm의 flat jack, 유압펌프 등을 이용하여 응력해방을 모의하였다.

4.1 암석시료

250mm×250mm×250mm의 shikotsu응결응회암 입방체블럭 한면 중앙에 직경30mm, 깊이120mm의 pilot hole을 작공한다. 시료표면을 공저면으로 간주하고 중심점을 원점O로 정한다. 시료표면에는 N, E,

W, S의 방향표시를 표시한다. pilot hole의 축방향을 직교좌표계의 z축으로 한다. E, N을 각각 x, y축으로 한다.

블럭의 Young률는 원주형 공시체을 이용하여 1축압축시험을 실시하여 평가하였다. 직경30mm, 길이 60mm의 원주형 공시체를 4개 만들고 80℃의 항온조에서 24시간 건조시킨 후, 2일간 상온 대기중 정치한 후 시험에 사용하였다. 변형률은 공시체의 중앙에 유효길이 5mm의 변형률 게이지를 붙인 후 계측하였다. Instron사제 5586형 재료시험기(300kN, 기계식)을 사용하고 공시체에 0.520MPa/min의 제하속도로 부하하였다. 응력이 1.040MPa에 도달하였을 때 그 값을 1분간 유지, 그 후 제하하는 과정을 2회 반복하여 얻은 Young률를 표 2에 표시하였다.

4.2 2축 압축시험 방법

암석 블럭과flat jack을 반력상자에 설치한다(그림 5). 본 시험에서는 1개의 유압펌프를 가압하는 것으로 전체의 flat jack에 동등한 유압이 작용하도록 하고 있다. 각 유압케이블에는 압력센서를 연결시켜 작용하는 유압을 확인하였다.

측정기는 그림 6에 표시한 것처럼 경방향의 ch1성분을 블럭의 방향표시 EW에 일치시켜 pilot hole안에 설치하였다. 2.030MPa의 응력을 작용시킨 후 1분간 기다린다. 그 후 하중을 제거하였을 때의 변형을 계측한다.

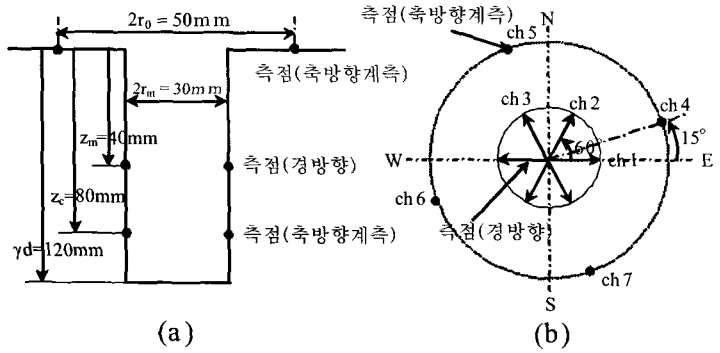


그림 6. 시험에 사용한 블럭의 계측단면

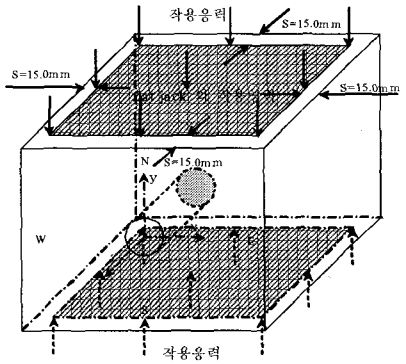


그림 7. 블럭과 flat jack의 작용영역

4.3 측정내용 및 관측방정식

본시험에서는 $z_m = -40(\text{mm})$, $z_c = -80(\text{mm})$, $r_0 = 25(\text{mm})$이다. 상기의 조건으로 시험에서 사용한 블럭에 대해서 3차원 유한요소법에 의한 수치해석을 실시하고 관측방정식을 구하였다. 또한, 계산은 flat jack의 단면적 220mm×220mm에 작용하는 하지만, 블럭의 단면적 250mm×250mm에 평균적으로 작용하고 있는 것으로 가정하여 실시하였다(그림 7)

구한 관측방정식은 다음과 같다.

$$\{U\} = K[A]\{\sigma\} \tag{10}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 4.647 & -1.567 & -0.320 & 0.000 & 0.000 & -0.254 \\ -0.014 & 3.094 & -0.320 & 5.382 & -0.191 & -0.064 \\ -0.014 & 3.094 & -0.320 & -5.382 & -0.191 & -0.064 \\ -0.604 & -0.949 & 4.111 & 0.199 & 1.136 & 4.235 \\ -0.949 & -0.604 & 4.111 & -0.199 & 4.235 & -1.136 \\ -0.604 & -0.949 & 4.111 & 0.199 & -1.136 & -4.235 \\ -0.949 & -0.604 & 4.111 & -0.199 & 4.235 & 1.136 \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, $\{U\}=\left\{U(0),\ U(\frac{\pi}{3}),\ U(\frac{2\pi}{3}),\ \Delta u_z(\frac{\pi}{12}),\ \Delta u_z(\frac{7\pi}{12}),\ \Delta u_z(\frac{13\pi}{12}),\ \Delta u_z(\frac{19\pi}{12})\right\}^{\mathrm{T}}$

$\{\sigma\}$는 블럭에 제하된 응력이다. $\{\sigma\}$는 아래와 같이 계산하는 것이 가능하다.

$$\{\sigma\}=\frac{1}{K}\{[A]^{\mathrm{T}}[A]\}^{-1}[A]^{\mathrm{T}}\{U\} \qquad (12)$$

5. 실험결과

응력과 변위는 대략 선형관계를 나타내고 있다(그림 8.). 하중제거에 따른 변위량의 계측결과를 표 3.에 표시하였다. 이들 변형량을 공시체를 이용한 일축 압축시험에서 얻은 Young률과 가정한 Poisson's ratio υ0.25와 함께 식(12)에 대입해서 구한 응력을 작용시킨 응력과 비교해서 표 4, 그림 9에 나타냈다. 주응력 값에 대한 최대 오차는 9.8%이다.

표 3. 측정기에의해 계측된 변위 (μm)

변위 센서	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
계측 변위	38	51	49	-51	-40	-51	-47

표 4. 관측방정식을 이용해서 평가한 응력 (MPa)

	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
작용응력	2.030	2.030	0	0	0	0
평가응력	1.830	2.145	-0.081	0.018	0.042	-0.016

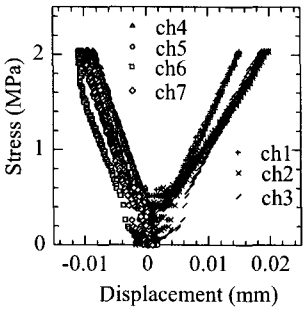


그림 8. 응력-변위 선도

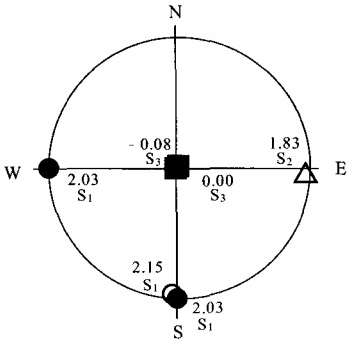


그림 9. 측정된 최대(S_1), 중간(S_2), 최소(S_3) 주응력(백색)과 작용시킨응력(검정색)(하반구스테레오네트)

6. 결 론

공저변형법에 의한 3차원응력 측정방법의 이론을 제시하고 개발한 측정기의 구조에 대해서 설명을 하였다. 또한, 용결응회암 블럭을 이용한 2축 압축시험에 의한 측정정도를 검토한 결과를 표시하였다.
본 방법은 변위계를 이용하고 있기 때문에 응력해방에 의한 변형이 비교적 커다란 암반에 있어서도 신속하게 암반응력을 측정하는 것이 가능하다고 판단되어지지만, 이후 2축 등방압축이외의 측정정도에 대한 검토와 원위치 시험에 대한 응용등에 대해서 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. H. N. Ghimire, 石島 洋二, 菅原 隆之 (2004), 中間 茂雄, 資源と素材, Vol. 120, No.1,pp.32-38.