

수압파쇄를 이용한 초기지압측정과 기존경사균열의 영향

신중호¹⁾ · 신희순¹⁾ · 최성웅²⁾ · 이희근³⁾

Estimation of In-situ Stresses and the Effect of a Pre-existing Inclined Fracture by Hydraulic Fracturing

Joong Ho Synn, Hee Soon Shin, Sung Oong Choi and Hi Keun Lee

ABSTRACT

The hydraulic fracturing in a field site was performed for the measurement of in-situ stresses. For the estimation of the effect of a pre-existing inclined fracture, the test on a pre-existing fracture zone was also conducted. From the measurements at three shallow depths, the ratios of max. to min. horizontal stress showed the range of 1.19~1.56 and the K values showed the range of 2.62~3.86. In case of a pre-existing fracture with the inclination of 15 degrees, the stresses calculated as upper bound values by considering the inclination were overestimated by 4.5%~9% compared with those calculated by not considering it. It seemed from this that the inclination less than 15 degrees had small effect on the stress calculation.

1. 서 론

최근 국내에서도 지하공간의 활용성이 부각되면서, 지하 수십 m에서 수백 m에 이르는 다양한 지하공간의 활용방안과 개발구상안이 제시되고 있다. 이의 실현을 위해서는 지하공간의 합리적 설계, 시공 및 안전유지를 위한 공학적 기술의 확립이 우선적으로 요구된다. 특히 지하공간개발이 점차 심부화와 대규모화가 될 수록, 지하암반의 구조지질적, 역학적, 수리적 특성 및 특히 지압상태 등은 더욱 중요한 요소로 작용하게 되므로, 이에 대한 사전 정밀평가가 반드시 이루어져야 한다. 지하공간의 기본설계 및 기초조사 단계에서는 계획심도까지 인력접근이 불가능하므로, 이 단계에서 지하암반특성을 조사할 수 있는 기술이 필요하다. 수압파쇄기술은 시추공만을 이용하여 초기 지압상태 및 암반투수특성을 평가할 수 있으며, 지

하심부의 어떤 심도까지도 적용이 가능한 특징을 가지고 있다.

선진외국에서는 수십년 전부터 수압파쇄기술의 연구와 실용화가 이루어져 왔다. 수압파쇄를 이용한 지압측정이론은 Hubbert와 Willis에 의해 제안되었으며¹⁾ 이후 암반투수특성, 공극수압, 기존균열 및 응력조건 등의 수압파쇄 영향요인에 대한 연구와²⁻⁴⁾ 현장적용시험을 통한 검증을 거치면서 현재는 중요한 지압측정법으로 정립되었다. 최근에는 Mizuta등의 경사시추공을 이용한 3차원 지압측정기법⁵⁾ 및 Rummel등에 의한 수압파쇄에의 파괴역학적 적용해석연구도⁶⁾ 이루어지고 있다.

국내에서는 1980년대에 들어 이희근등에 의해 수압파쇄에 의한 초기지압측정의 이론적 연구⁷⁾가 시작된 이래, 수압파쇄균열내 유체순환에 대한 모형실험⁸⁾과 수치해석이나 3차원 지압측정을 위한 모형실험⁹⁾

* 1994년 5월 2일 접수

1) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부 선임연구원

2) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부 Post-Doc.

3) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

등의 기초실험적 연구가 이루어졌다. 현장적용은 1990년에 처음으로 국내 지하유류비축기지 건설현장에서 수행되었지만 외국장비와 외국기술진에 의한 것이었다.¹⁰⁾ 그후, 1992년에 국내 최초로 한국자원연구소에서 수압파쇄장비를 미국에서 도입하면서 현장기술연구가 이루어져 왔다.¹¹⁾

본 연구에서는 이 현장수압파쇄장비를 이용하여 자체기술확립과 아울러 실제 국내 지압평가를 위하여 1993년에 현장적용시험을 수행하였다. 여기서는 시추 심도가 100 m인 NX 시추공을 대상으로 심도별로 3개 위치를 선정하여 지압측정을 실시하였다. 그리고, 기존균열이 존재하는 구간에 대한 수압파쇄시험도 병행하여 기존균열의 영향과 그때의 응력관계도 함께 분석하였다.

2. 대상지역 및 시험심도

본 현장수압파쇄시험의 대상지역은 대전직할시 대덕연구단지 한국자원연구소내의 부지로서, 연직방향으로 굴착된 NX 시추공을 이용하였다. 시추공 심도는 지하 100 m이며 지표면에서 30 m까지는 케이싱이 되어 있고 그 하부는 화강편마암이 분포하고 있었다. 본 시험이 수행되던 1993년 10월 중순 당시의 지하수면은 지표면에서 4 m 하부에 위치하고 있었다.

시험구간은 상기 시추공에 대한 카메라촬영과 공경측정 결과를 토대로 심도별로 3구간(37 m, 43 m, 및 73 m 구간)을 설정하였다. Fig. 1은 37 m 구간의 기존균열을 시추공촬영카메라로 촬영하여 영상화한 것이며, Fig. 2는 시추공경측정기를 이용하여 대상시

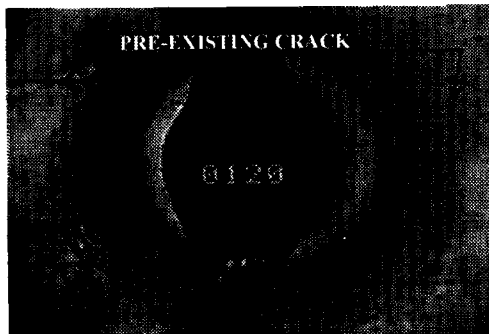


Fig. 1. Picture of the test hole wall containing a pre-existing fracture captured by the borehole TV camera at the interval BH1-1.

추공의 심도별 공경변화상태를 조사한 것이다. 43 m 구간과 73 m 구간은 기존균열이 없고 공벽상태가 비교적 양호한 구간으로서 일반적인 지압측정시험을 실시하였다. 그리고 37 m 구간은 연직방향에 대해 약 15° 경사진 기존균열이 존재하였는데, 이 구간에 대해서는 기존균열의 영향과 그때의 응력관계를 조사하고자 하였다.

3. 수압파쇄장비시스템

본 시험에 사용된 수압파쇄장비는 시추공조사시스

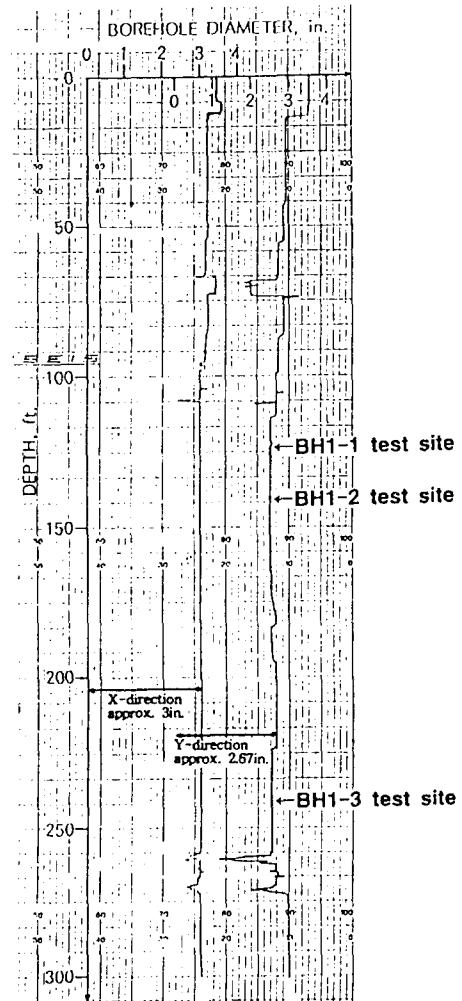


Fig. 2. Variation of the test hole diameter with depth measured by the X-Y caliper.

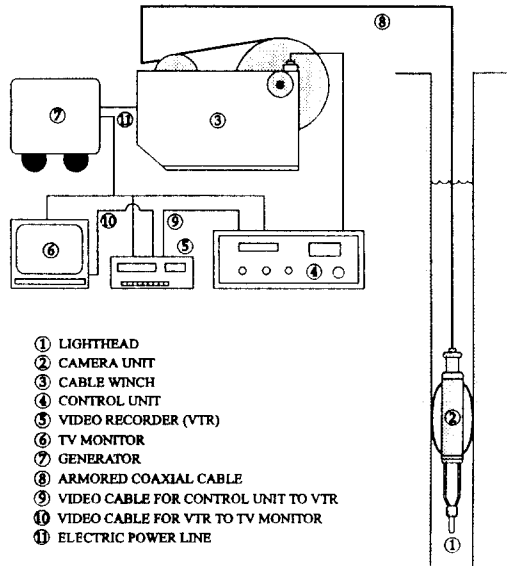


Fig. 3. Layout of the borehole TV camera inspection system.

템(Borehole investigation system), 팩카 및 펌프시스템(Packer and pump system), 그리고 계측 및 자료처리시스템(Measuring and data acquisition system)으로 구성되어 있다.

3.1 시추공조사시스템

3.1.1 시추공촬영카메라(Borehole TV camera)

시추공벽 상태를 촬영하여 공벽상에 나타나는 기존균열이나 공벽의 파쇄와 같은 물리적 변형상태를 조사하는 장비로서, 미국 Laval Underground Surveys사의 CAM200 모델이다. 이 장비는 직경 2~6 in.의 시추공에 대해 적용이 가능하며, 1,500 psi까지의 방수성과 50℃까지의 내온성을 가지고 있다. Fig. 3은 본 시추공촬영카메라의 전체계통도이다.

3.1.2 시추공경측정기(Borehole X-Y caliper)

심도별 시추공경을 정량적으로 측정하여 시추공의 변형상태를 조사하는 장비로서, 미국 Mineral Logging Systems사의 200C 모델이다.

3.1.3 시추공방향측정기(Borehole orientation tool)

시추공의 경사와 수압파쇄균열의 방향 측정에 사용되는 장비로서, 미국 Kuster사의 3/4" Pee Wee 모델이다.

3.2 팩카 및 펌프시스템

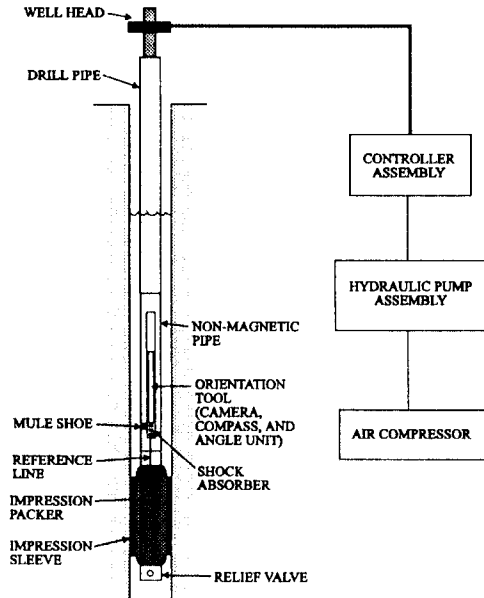


Fig. 4. Overview of fracture impression with the borehole orientation tool.

3.2.1 균열압인팩카(Impression packer)

시추공벽상의 기존균열이나 수압파쇄로 생성된 균열을 찍어내는데 사용하는 장비로서, 미국 Baker사 제품이다. 균열판독시에는 균열방향도 조사해야 하므로 시추공방향측정기와 함께 사용된다(Fig. 4 참조).

3.2.2 수압파쇄팩카(Straddle packer)

상하 한쌍의 고무슬리브를 선정된 시험구간에 일치시켜 공벽에 밀착하여 가압구간을 설정하고 실제 수압파쇄시험을 하는데 사용되는 장비로서, 미국 Baker사의 Lynes packer이다(Fig. 5 참조).

3.2.3 펌프시스템(Pump and control system)

수압파쇄시 팩카압력 및 시험구간에 가해지는 주입유량등을 조절하는 장비로서, 미국 Rockworks사에서 제작된 것이다. Fig. 5는 수압파쇄팩카 및 펌프시스템의 전체계통도이다.

3.3 계측 및 자료처리시스템

가압구간과 팩카내로 유체를 압입, 조절하는 펌프 시스템을 제어하며, 압력 및 주입유량을 기록하는 장비이다. 압력과 유량은 각각 압력변환기와 유량계를 통하여 전기적 신호로 바뀐 뒤, 컴퓨터로 저장되거나 4-채널 레코더로 기록된다.

이상의 기본 시스템과 함께 현장시험을 위해서는

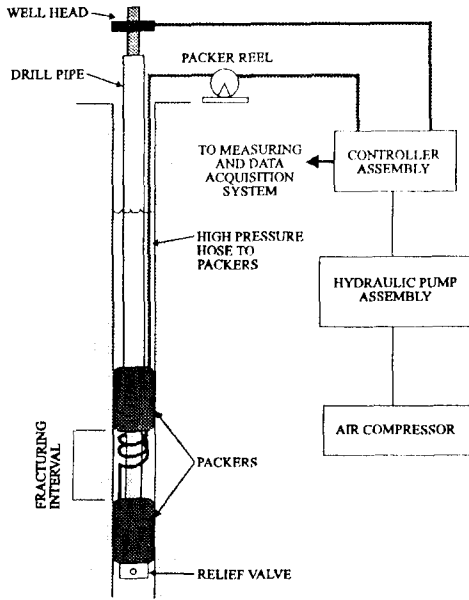


Fig. 5. Overview of hydraulic fracturing system.



Fig. 6. General view of field hydraulic fracturing test.

발전기, 공기압축기(공기압 7 bar 이상, 용량 120 cfm 이상), 물탱크 및 시추장비들이 필요하다. 이들 장비들을 포함한 본 수압파쇄 현장시험의 전경은 Fig. 6과 같다.

4. 시험결과자료 해석

4.1 압력-시간곡선 해석

4-채널 레코드로 기록된 73 m 구간의 압력-시간곡선은 Fig. 7과 같다. 압력-시간곡선에서 초기파쇄압력(P_0)은 1차 가압사이클에서의 최고치로 결정하였으며,

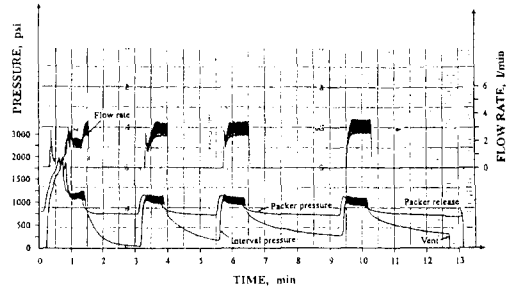


Fig. 7. Pressure-time record for the interval BH1-3.

균열개구압력(P_0)은 2차 이후의 가압사이클에서의 최고치로 결정하였다. 한편, 파쇄 후 Shut-in 곡선에서는, 가압중지에 따른 급격한 압력저하와 함께 유체의 압반대 침투로 인한 압력감소가 복합되어 나타나므로, 정확한 균열폐쇄압력(P_c)결정을 위해서 지금까지 여러가지 기법들이 연구되고 있다.^{9,12)} 즉, Shut-in 곡선에서 1차변곡점을 택하는 방법(inflexion point method)과 압력-시간곡선, 압력-log(시간)곡선, log(압력)-시간곡선, log(압력)-log(시간)곡선, 압력-log(시간증분)곡선, 압력-log(압력증분/시간증분), 압력-주입유속곡선 등에서 균열이 닫히는 구간과 이후의 유체침투구간을 각각 선형분석하여 두 직선의 교점을 택하는 방법(bilinear fitting) 등이다. 본인의 모형실험연구⁹⁾에 의하면, 변곡점법과 압력-log(시간증분)곡선법은 상대적으로 10~20% 정도 크게 나타났고, 그외 방법들은 10% 이내의 비슷한 범위를 보였다. 여기서는 비교적 자료처리가 용이한 압력-시간기록을 이용한 쌍일차분석(bilinear fitting)에 의하여 균열폐쇄압력을 결정하였다(Fig. 8 참조). 이상으로부터 결정된 압력값들은 Table 1과 같다. 지압산정시 균열개구압력(P_0) 및 균열폐쇄압력(P_c)는 비교적 안정된 4차 사이클 때의 값을 이용하였다.

4.2 수압파쇄균열 판독

37 m 구간의 시험에서는 기존균열의 영향으로 새로운 파쇄균열이 생성되지 않았고, 43 m 구간과 73 m 구간에서만 파쇄균열을 확인하였다. 파쇄균열의 판독은 압인패카와 시추공방향측정기를 이용하여 조사하였다. Fig. 9는 시추공방향측정기를 이용하여 시추공의 경사와 방향측정기내에 장착되어 있는 기준선을 촬

Table 1. Test results of field hydraulic fracturing

No.	Depth, m	Flow Rate, l/min	P _b , MPa	P _{co} , MPa	P _r , MPa			P _s , MPa		
					2nd	3rd	4th	2nd	3rd	4th
1	37		4.90	0.33	4.76	4.20	3.99	--	3.29	2.86
2	43	3.0	8.40	0.39	5.25	5.60	4.90	3.61	3.35	3.38
3	73		13.30	0.69	8.05	8.05	7.84	4.80	4.71	4.70

Water table level=4 m deep

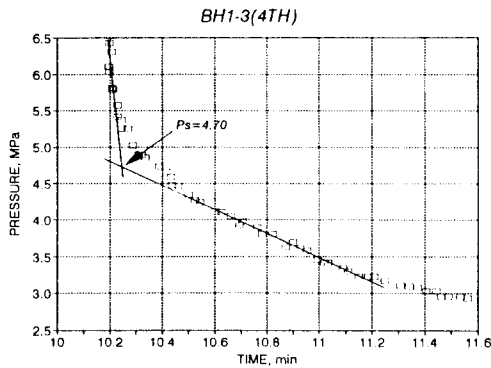


Fig. 8. Determination of shut-in pressure for the interval BH1-3.



Fig. 9. A film showing dip of the test hole and direction of reference line captured by the borehole orientation tool.

영한 필름이다. 시추공은 연직방향에 대하여 서쪽으로 약 2° 정도 기울어져 있었고 기준선의 방향은 N18° W로 나타났다. Fig. 10은 43 m 구간에 대한 수압파쇄로부터 생성된 파쇄균열을 압인패카로 찍은 모습으로, 서로 반대쪽에 2개의 수직균열이 발생하였다. 균열방향조사를 위하여 압인패카의 고무슬리브에는 미리 시추공방향측정기의 기준선과 시추공방향측정

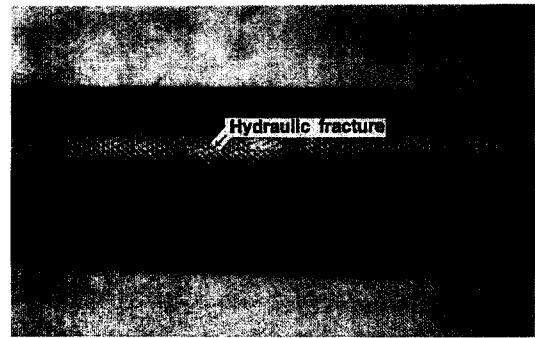


Fig. 10. Pattern of the hydraulic fracture on the impression sleeve.

기가 안착되는 시추파이프내의 Mule shoe와 일직선이 되도록 기준선이 표시되어 있는데, 이 기준선에 대한 2개의 파쇄균열의 가방향(Apparent orientation)은 약 70°와 260°로 나타났다. 그런데, 시추공방향측정기로 측정된 기준선의 방향이 N18°W이었으므로 실제 수압파쇄균열방향은 N88°W 및 N82°E가 된다. 이렇게 결정된 43 m 구간(BH1-2)의 파쇄균열형태 및 방향을 Fig. 11에 나타내었다. 그리고 73 m 구간(BH-3)에서도 2개의 수직균열이 발생하였으며 그 방향은 같은 방법에 의하여 N80°W 및 N86°E로 나타났다. 수직균열의 경우, 2개의 균열은 이론적으로 서로 180°를 이루어야 하나 실제현장조건에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다. 이때는 위의 두값을 이용하여 범위로 나타내거나, 또는 다음과 같이 평균값으로 나타내기도 한다.¹¹⁾

$$\theta = \frac{1}{2} \left[\frac{(L_1 + L_2)}{r} - \pi \right] = \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta_2 - \pi) \quad (1)$$

여기서, L₁, L₂ ; 압인슬리브상의 기준선에서 각 균열까지의 호의 길이
r ; 압인슬리브의 반경

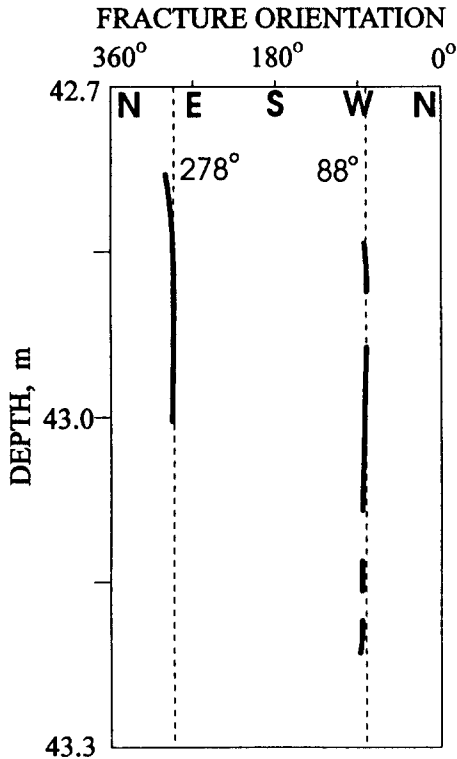


Fig. 11. Orientation of hydraulic fractures for the interval BH1-2.

θ_1, θ_2 ; 압인슬리브상의 기준선에서 각 균열까지의 방향각

이 식에 의한 43 m 구간 및 73 m 구간의 파쇄균열 방향은 각각 S87°W(또는 N87°E) 및 N87°W(또는 S87°E)로서 거의 동서방향으로 나타났다. 이 균열방향은 곧 최대수평응력의 방향이기도 하다.

5. 지압산정 및 분석

연직시추공을 이용한 수압파쇄시험에서 수직균열이 발생한 경우, 압력-시간곡선에서 얻어진 초기파쇄압력, 균열개구압력 및 균열폐쇄압력 등으로부터 (2)식에 의해 지압성분이 계산된다. 이 때, 실제 지하암반에 지하수가 존재할 때는 응력해석시 지하수에 의한 공극수압의 효과도 고려해야 한다. 본 시험시추공의 경우에는 지하 4 m 하부에 지하수면이 형성되어 있어서 시험심도까지 미치는 수두(Water head)를 고려하였다. 계산된 최대수평응력의 방향은 조사된 균열 방향이며 최소수평응력은 균열면에 직각방향이 된다.

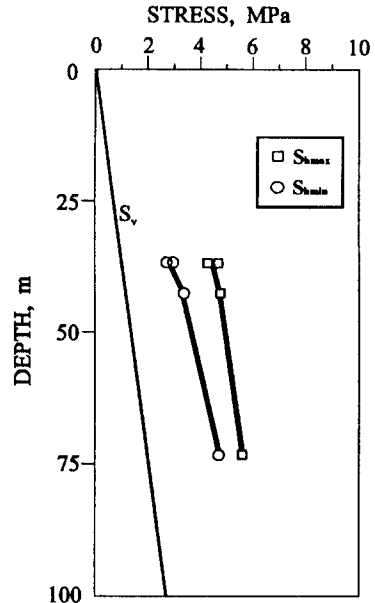


Fig. 12. Vertical and horizontal stresses versus depth.

그리고, 수직응력은 통상 시험심도까지의 암반자중(심도×단위중량)으로 계산된다. 본 시험지역 암반의 단위중량은 실험실내 측정결과 0.0268 MN/m³로 얻어졌다.

(2)식에서 $\sigma_{h_{min}}$ 는 최소수평응력, $\sigma_{h_{max}}$ 는 최대수평응력, σ_v 는 수직응력, P_s 는 균열폐쇄압력, P_r 는 균열개구압력, P_o 는 공극수압, γ 는 암반의 단위중량, h 는 심도이다.

$$\sigma_{h_{min}} = P_s, \quad \sigma_{h_{max}} = 3\sigma_{h_{min}} - P_r - P_o, \quad \sigma_v = \gamma h \quad (2)$$

경사균열이 생성된 경우, 경사가 비교적 작을 때는 상기 이론식을 적용하기도 하지만 균열경사를 고려하면 다음식이 이용된다. 여기서, 천부에서와 같이 수직응력이 수평응력보다 작을 경우에 P_s 은 수직균열이 발생할 경우보다 낮은 값일 것이므로, 따라서 계산되는 $\sigma_{h_{max}}^M$ 은 최대수평응력의 상한값을 나타낸다.

(3)식에서 θ 는 수직으로부터의 균열경사각이다.

$$\begin{aligned} \sigma_{h_{min}} &= (P_s - \sigma_v \sin^2 \theta) / \cos^2 \theta, \\ \sigma_{h_{max}}^M &= 3\sigma_{h_{min}} - P_r - P_o, \quad \sigma_v = \gamma h \end{aligned} \quad (3)$$

이상의 측정자료와 이론식으로부터 계산된 심도별 지압성분은 Table 2와 같다. 수직균열이 발생한 43 m

Table 2. Calculated stress states in three hydraulic fracturing intervals

Test site	Depth, m	σ_v , MPa	$\sigma_{h_{min}}$, MPa	$\sigma_{h_{max}}$, MPa	$\frac{\sigma_{h_{max}}}{\sigma_{h_{min}}}$	$\frac{\sigma_{h_{avg}}}{\sigma_v}$ **	Fracture type
BH1-1	37	0.99	2.86 2.99*	4.26 4.65*	1.49 1.56*	3.60 3.86*	15° Inclined
BH1-2	43	1.15	3.38	4.85	1.43	3.58	Vertical
BH1-3	73	1.96	4.70	5.57	1.19	2.62	Vertical

*: Calculated using equation (3), **: $\sigma_{h_{avg}} = (\sigma_{h_{max}} + \sigma_{h_{min}})/2$

구간과 73 m 구간에 대해서는 (2)식을 적용하였고, 기존의 경사균열이 존재하는 37 m 구간의 경우는 (2)식 및 (3)식을 함께 적용하여 계산값을 비교하였다. 37 m 구간의 경사균열의 경우, 계산된 최대 및 최소수평응력의 범위는 4.26~4.65 MPa 및 2.86~2.99 MPa로 나타났고, 그 비는 1.49~1.56이었다. 43 m 심도에서의 최대수평응력, 최소수평응력 및 수직응력은 4.85 MPa, 3.38 MPa, 1.15 MPa였고, 최대 및 최소수평응력의 비는 1.43으로 나타났다. 73 m 심도에서의 응력값은 각각 5.57 MPa, 4.70 MPa, 1.96 MPa였고, 최대 및 최소수평응력의 비는 1.19로 나타났다. 그리고, 참고로 지하수로 인한 공극수압을 고려하지 않은 경우의 최대수평응력 계산값은 이를 고려한 Table 2의 계산값보다 약 10% 정도 크게 나타났다.

심도증가에 따른 지압증가양상은 Fig. 12와 같다. 여기서 수직응력은 (심도)×(암반의 단위중량)으로 계산된 값이다. 최대수평응력 대 최소수평응력의 비를 보면, 37 m에서는 1.49~1.56, 43 m에서는 1.43, 73 m에서는 1.19로서 심도가 깊어질수록 점차 비가 감소하는 경향을 보였다. 그리고, 평균수평응력 대 수직응력의 비(K값)를 보면, 37 m에서는 3.60~3.86, 43 m에서는 3.58, 73 m에서는 2.62로서 역시 천부에서 비가 크게 나타났다. 이러한 결과는, 천부일수록 수평응력이 크고 특히 100 m 이내에서는 K값이 대부분 2 이상인 세계적 지압측정자료(Brown & Hoek, 1978)¹³⁾와 비교해서도 같은 분포양상을 보였다.

6. 기존균열영향의 검토

37 m 구간의 기존균열은 연직방향에 대해 15°의 경사를 이루고 있었다. 압력-시간곡선에서 보듯이 시험시에 새로운 균열은 생성되지 않았고 기존균열의 열림과 확장만이 있었음을 알 수 있다. 상기의 (2)식

및 (3)식에 의한 지압계산결과를 비교해 보면, 균열 경사를 고려한 (3)식을 이용한 경우에 최대수평응력은 약 9%, 최소수평응력은 약 4.5% 크게 나타났다. 최소수평응력의 경우는 15°의 경사에 따른 차이가 매우 작았고, 최대수평응력의 경우에 차이가 상대적으로 큰 것은 계산식에서 기인한 것이다. 즉, (3)식에서 P_1 은 경사균열에 대한 실제측정값인데, 수직응력이 수평응력보다 작을 경우에는 측정된 P_1 이 수직균열일 때의 값보다 작게 나타난다. 따라서 (3)식에서 보듯이 계산되는 최대수평응력값은 수직균열일 때보다 커지게 된다. 이를 고려하면, (3)식에 의한 계산값은 최대수평응력의 상한값으로 생각할 수 있다. 그렇지만 이 9%의 차이 또한 크지는 않으며, 따라서 15° 이내의 경사균열에서는 지압산정시 경사로 인한 오차가 크게 초래되지는 않을 것으로 보인다.

7. 결 론

본 연구에서는 국내 현지암반내 초기지압평가를 위하여 현장수압파쇄시험이 수행되었으며, 이로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 대상지역은 대전직할시 한국자원연구소내 화강편마암지대의 부지로서, 시추심도가 100 m인 NX 연직시추공의 37 m, 43 m 및 73 m 구간에 대하여 지압측정을 수행하였다.

(2) 수압파쇄에 의해 생성된 파쇄균열은 수직균열로서 그 방향 즉, 최대수평응력방향은 S87°W~N87°W(또는 S87°E~N87°E)로서 거의 동서방향으로 나타났다.

(3) 측정된 최대 및 최소수평응력의 비는 전체적으로 1.19~1.56의 범위를 보였다. 평균수평응력 대 수직응력의 비는 2.62~3.86의 범위였으며, 천부일수록 비는 크게 나타났다.

(4) 기존의 15° 경사균열구간의 경우는 새로운 파쇄균열이 발생하지 않았다. 그리고, 이 경사를 고려한 지압계산결과는 수직균열의 이론식에 의한 계산결과보다 최대 및 최소수평응력값이 9% 및 4.5% 정도 크게 나타났다. 그렇지만, 이 비교결과는 15° 이내의 경사균열에서는 지압계산시 경사의 영향이 크지 않음을 보여 주었다.

참 고 문 헌

- 1) Hubbert, M.K. and D.G. Willis, 1957, "Mechanics of hydraulic fracturing", Trans. AIME., Vol. 210, pp. 153-163.
- 2) Schmitt, D.R. and M.D. Zoback, 1989, "Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests-A proposed breakdown equation employing a modified effective stress relation for tensile failure", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 6, pp. 499-506.
- 3) Ikeda, R. and H. Tsukahara, 1989, "Hydraulic fracturing technique : pore pressure effect and stress heterogeneity", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 6, pp. 471-476.
- 4) Wu, M. and H.F. Wang, 1988, "Influence of nearby fractures on stress measurements by hydraulic fracturing", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, No. 1, pp. 15-23.
- 5) Mizuta, Y., O. Sano, S. Ogino and H. Katoh, 1987, "Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 1, pp. 15-29.
- 6) Rummel, F. and J. Hansen, 1988, "Interpretation of hydrofrac pressure recordings using a simple fracture mechanics simulation model", Proc. 2nd Int. Workshops on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Vol. 2, pp. 646-667.
- 7) 李喜根, 水田義明, 狹野正仁, 佐野修, 1984, "수압파쇄에 의한 삼차원 암반응력측정법 및 편평대공동천반의 탄성변위해석", 대한광산학회지, 제21권, 제4호, pp. 316-325.
- 8) 장주필, 신중호, 이희근, 1989, "수압파쇄기구에 관한 연구(제 2보)-수압파쇄균열내 유체순환시의 유체유동 및 균열거동에 관하여", 한국자원공학회지, 제26권 제4호, pp. 264-272.
- 9) 신중호, 1990, 수압파쇄에 의한 삼차원 암반응력측정과 균열전파특성에 관한 모형실험 및 수치해석적 연구, 서울대학교 박사학위논문, 154 p.
- 10) Korea Power Engineering Company, Inc. Report, 1990, Hydraulic fracturing stress measurements at Pyongtaek, Yosu, Goje in Korea, 75 p.
- 11) 신희순, 신중호 외, 1992, 수압파쇄에 의한 지압측정 및 균열제어기술 연구, 한국자원연구소보고서, 76 p.
- 12) Aggson, J.R. and K. Kim, 1987, "Analysis of hydraulic fracturing pressure histories : A comparison of five methods used to identify shut-in pressure", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 1, pp. 75-80.
- 13) Brown E.T. and E. Hoek, 1978, "Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 4, pp. 211-215.