

수압파쇄를 이용한 현지암반 초기지압측정

신중호, 신회순 (한국자원연구소 자원개발연구부)
최성용, 이희근 (서울대학교 공과대학 자원공학과)

1. 서론

최근 국내에서도 지하공간의 활용성이 부각되면서 다양한 활용방안과 개발구상안이 제시되고 있는데, 이의 실현을 위해서는 지하공간의 합리적 설계, 시공 및 안전유지를 위한 공학적 기술확립이 우선적으로 요구된다. 또한 앞으로 심부 대규모 지하공간개발을 위해서는, 지금까지의 지하천부개발시 중요하게 인식되지 않았던 지하암반의 구조지질적, 역학적, 수리적 특성의 정밀평가가 필요하다. 이러한 현지암반특성 및 특히 지압상태는 기초골격설계와 안정성평가에 있어서 매우 중요한 요소이다.

지하공간의 기본설계단계에서, 인력접근이 어려운 지하건설심도까지 시추공만으로 초기지압 및 수리특성 조사가 가능한 수압파쇄기술이 외국에서는 많이 이용되고 있다. 당 한국자원연구소에서도 이를 위해 수압파쇄장비시스템을 도입하였으며, 실제 지압측정과 자체기술 확립을 위하여 현장수압파쇄시험을 수행하였다.

2. 대상지역 및 시험심도

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

시험구간은 상기 시추공에 대한 카메라촬영과 공경측정 결과를 토대로 심도별로 3구간(37m, 43m, 및 73m 구간)을 설정하였다. 43m구간과 73m구간은 기존균열이 없고 공벽상태가 비교적 양호한 구간으로서 통상적인 지압측정시험을 실시하였다. 그리고 37m구간은 연직방향에 대해 약 15° 경사진 기존균열이 존재하였는데, 이 구간에 대해서는 기존균열의 영향과 그 때의 응력관계를 조사하고자 하였다.

3. 수압파쇄장비시스템

본 시험에 사용된 수압파쇄장비는 시추공조사시스템(Borehole investigation system), 패카 및 펌프시스템(Packer and pump system), 그리고 계측 및 자료처리시스템(Measuring and data acquisition system)으로 구성되어 있다.

3.1. 시추공조사시스템

(가) 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 2~6in.의 시추공에 대해 적용이 가능하며, 1,500psi까지의 방수성과 50°C까지의 내온성을 가지고 있다. Fig.1은 본 시추공촬영카메라의 전체계통도이다.

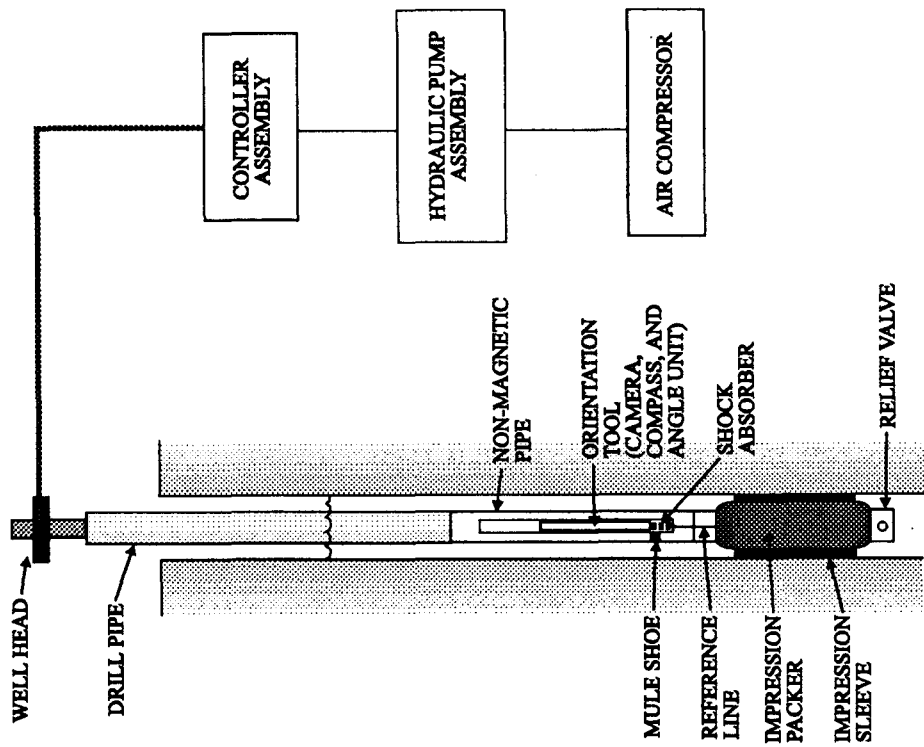


Fig.2 Overview of fracture impression with the borehole orientation tool

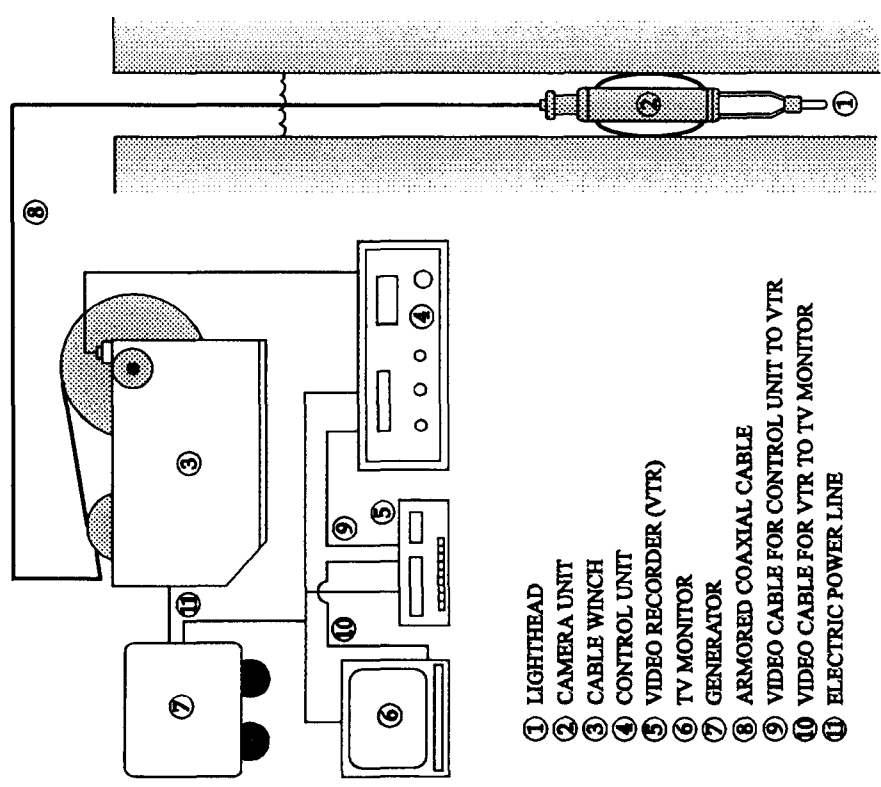


Fig.1 Layout of the borehole TV camera inspection system

- ① LIGHTHEAD
- ② CAMERA UNIT
- ③ CABLE WINCH
- ④ CONTROL UNIT
- ⑤ VIDEO RECORDER (VTR)
- ⑥ TV MONITOR
- ⑦ GENERATOR
- ⑧ ARMORED COAXIAL CABLE
- ⑨ VIDEO CABLE FOR CONTROL UNIT TO VTR
- ⑩ VIDEO CABLE FOR VTR TO TV MONITOR
- ⑪ ELECTRIC POWER LINE

(나) 시추공경측정기(Borehole X-Y caliper) : 심도별 시추공경을 정량적으로 측정하여 시추공의 변형상태를 조사하는 장비로서, 미국 Mineral Logging Systems사의 200C 모델이다.

(다) 시추공방향측정기(Borehole orientation tool) : 시추공의 경사와 경사방향 측정과 수압파쇄균열의 방향 결정에 사용되는 장비로서, 미국 Kuster사의 3/4" Pee Wee 모델이다.

3.2. 패카 및 펌프시스템

(가) 균열압인패카(Impression packer) : 시추공벽상의 기존균열이나 수압파쇄로 생성된 균열을 찍어내는데 사용하는 장비로서, 미국 Baker사 제품이다. 균열판독시에는 균열방향도 조사해야 하므로 시추공방향측정기와 함께 사용된다(Fig.2 참조).

(나) 수압파쇄패카(Straddle packer) : 상하 한쌍의 고무슬리브를 선정된 시험구간에 일치시켜 공벽에 밀착하여 가압구간을 설정하고 실제 수압파쇄하는데 사용되는 장비로서, 미국 Baker사의 Lynes packer이다(Fig.3 참조).

(다) 펌프시스템(Pump and control system) : 수압파쇄시 패카압력 및 시험구간내에 가해지는 주입유량등을 조절하는 장비로서, 미국 Rockworks사에서 제작된 것이다. Fig.4는 수압파쇄패카 및 펌프시스템의 전체계통도이다.

3.3. 계측 및 자료처리시스템

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

4. 시험결과자료 분석

4.1. 압력-시간곡선 분석

4-채널 레코더로 기록된 압력-시간곡선은 Fig.5와 같다. 압력-시간곡선에서 초기파쇄압력은 1차 가압사이클에서의 최고치로 결정하였으며, 균열개구압력은 2차 이후의 가압사이클에서의 최고치로 결정하였다. 한편, 파쇄후 Shut-in 곡선에서는, 가압중지에 따른 급격한 압력저하와 함께 유체의 암반내 침투로 인한 압력감소가 복합되어 나타나므로, 정확한 균열폐쇄점을 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 균열폐쇄압력결정을 위해서 지금까지 여러가지 기법들이 연구되고 있다. 여기서는 시험결과 얻어진 압력-시간곡선의 Shut-in 구간에서 시간에 따라 압력저하율이 바뀌는 점을 Linear fitting으로 구하여(Double tangent method), 이를 균열폐쇄압력으로 결정하였다(Fig.6 참조). 이상으로부터 결정된 압력값들은 Table 1과 같다. 지압산정시 P_r 및 P_s 는 비교적 안정된 4차 사이클때의 값을 이용하였다.

Table 1 Test results of field hydraulic fracturing

No.	Depth, m	Flow Rate, l/min	P_b , MPa	P_o , MPa	P_r , MPa			P_s , MPa		
					2nd	3rd	4th	2nd	3rd	4th
1	37	3.0	4.90	0.33	4.76	4.20	3.99	-	3.29	2.86
2	43		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 = 4m deep)

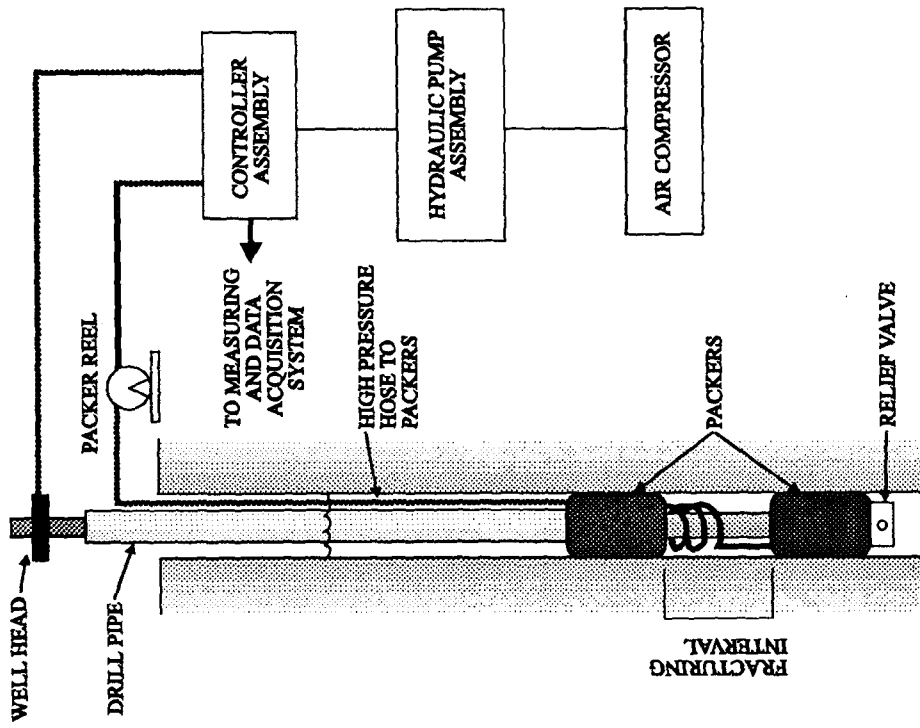
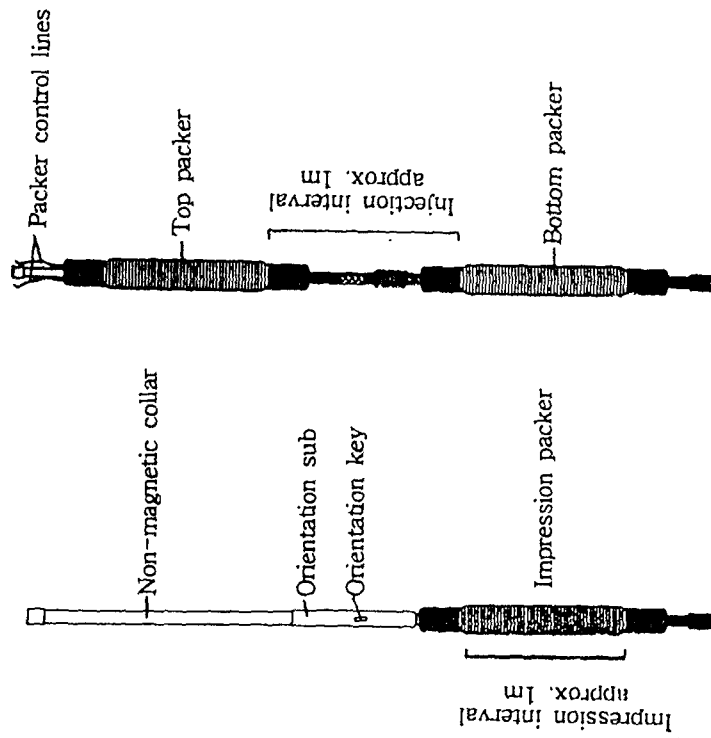


Fig.4 Overview of hydraulic fracturing test



(a) Impression packer (b) Straddle packer

Fig.3 Impression packer and straddle packer

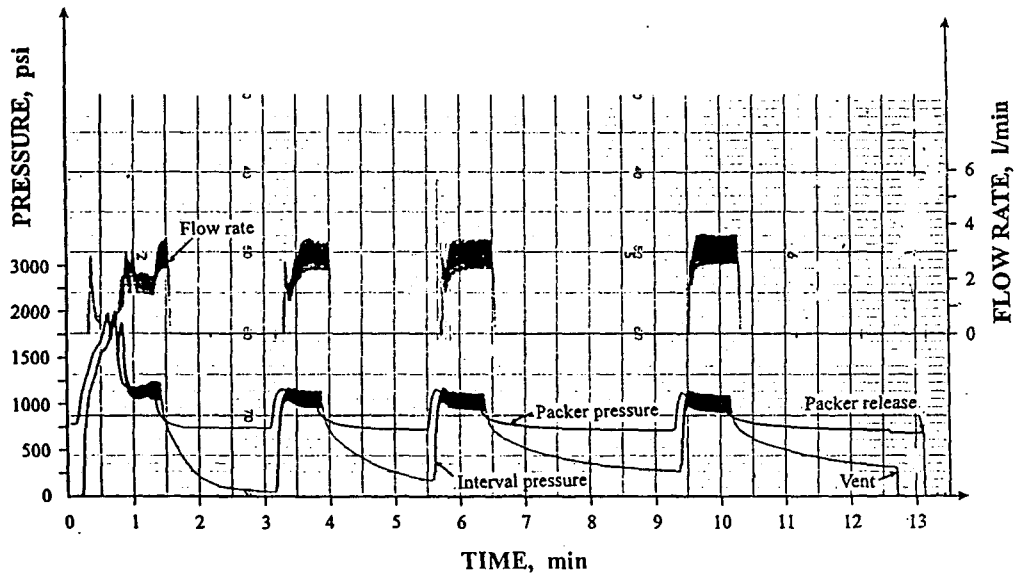


Fig.5 Pressure-time record for the interval BH1-3

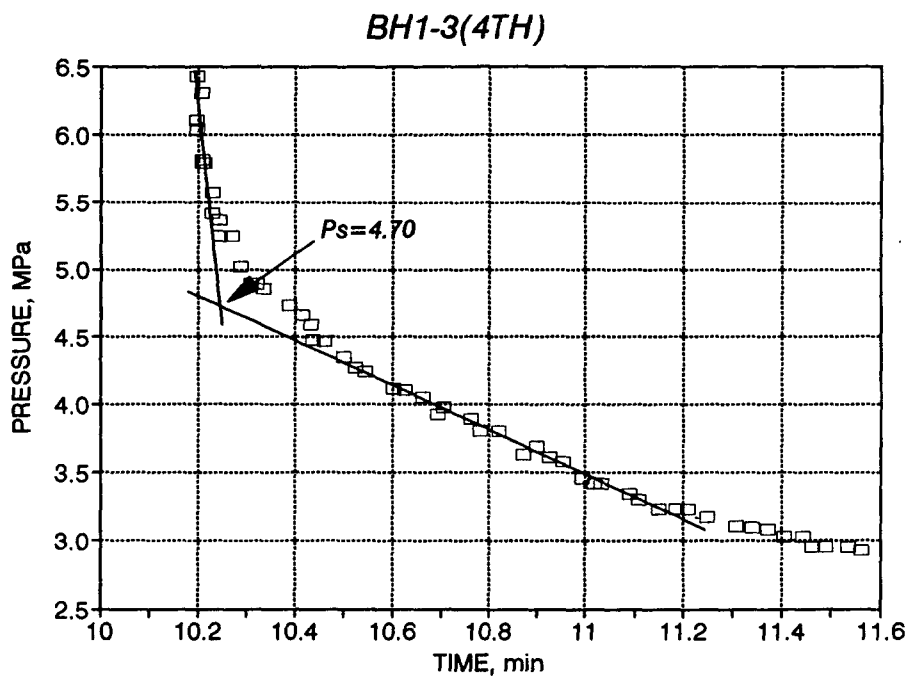


Fig.6 Determination of shut-in pressure for the interval BH1-3

4.2. 수압파쇄균열관측

37m구간의 시험에서는 기존균열의 영향으로 새로운 파쇄균열이 생성되지 않았고, 43m구간과 73m구간에서만 파쇄균열을 확인하였다. Fig.7은 43m구간(BH1-2)의 파쇄균열을 압인패카로 찍어서 펼친 모습이다. 그림에서 0° Scribe 및 360° Scribe는 조사시 설정한 기준선을 나타내며, 따라서 압인슬리브상에 나타난 수압파쇄균열의 가방향(Apparent orientation)은 약 70°가 된다. 그러나, 시추공방향측정기로 측정된 기준선의 방향이 N18°W이었으므로 실제 수압파쇄균열의 방향 즉, 최대주응력의 방향은 N88°W가 된다. 이는 시추공방향측정기의 기준선과 시추공방향측정기가 안착되는 시추파이프내의 Mule shoe, 압인슬리브상에 미리 표시된 기준선 등이 모두 일직선에 놓이도록 하였기 때문이다. 그리고 73m구간(BH-3)에서의 균열방향은 같은 방법에 의하여 N80°W로 나타났다.

5. 지압산정 및 검토

연직시추공을 이용한 수압파쇄시험에서 종균열이 생성된 경우, 압력-시간곡선에서 얻어진 초기파쇄압력, 균열개구압력 및 균열폐쇄압력 등으로부터 지압성분이 계산된다. 이 때, 실제 지하압반에 지하수가 존재할 때는 응력해석시 지하수에 의한 공극압의 효과도 고려해야 한다. 본 시험시추공의 경우에는 지하 4m 하부에 지하수면이 형성되어 있어서 시험심도까지 미치는 수두(Water head)를 고려하였다. 계산된 최대수평응력의 방향은 조사된 균열방향이며 최소수평응력은 균열면에 직각방향이 된다. 그리고, 수직응력은 통상 시험심도까지의 압반자중(심도x단위중량)으로 계산된다. 본 시험지역 압반의 단위중량은 실험실내 측정결과 0.0268MN/m³로 얻어졌다.

$$\sigma_{h_{min}} = P_s, \quad \sigma_{h_{max}} = 3\sigma_{h_{min}} - P_r - P_o, \quad \sigma_v = \gamma h \quad (1)$$

경사균열이 생성된 경우, 경사가 크지 않은 경우(보통 15° 이내)는 상기 이론식의 적용이 가능하다. 본 시험에서 37m구간은 15° 경사의 기존균열이 존재하였는데, 여기서는 이 경사를 고려한 응력해석도 병행하여 비교하였다. 경사균열시는 다음과 같이 계산된다. 단, 여기서 P_r 은 수직균열이 발생될 경우보다 낮은 값일 것이므로, 따라서 계산되는 $\sigma_{h_{max}}^M$ 은 최대수평응력의 상한값을 나타낸다.

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

이상의 측정자료와 이론식으로부터, 심도별 지압성분은 Table 2 및 Fig.8과 같이 계산되었다. 여기서, BH1-1의 경우는 (1)식과 (2)식을 이용한 계산값을 동시에 나타내어 경사균열시에 계산되는 응력값의 범위를 보이고자 하였다.

37m구간의 경사균열의 경우, 계산된 최대 및 최소수평응력의 범위는 4.26-4.65MPa 및 2.86-2.99MPa로 나타났고, 그 비는 1.49-1.56이었다. 그리고, 43m심도에서의 최대수평응력, 최소수평응력 및 수직응력은 4.85MPa, 3.38MPa, 1.15MPa였고, 최대 및 최소수평응력의 비는 1.43으로 나타났다. 73m심도에서의 응력값은 각각 5.57MPa, 4.70MPa, 1.96MPa였고, 최대 및 최소수평응력의 비는 1.19로 나타났다. 그리고, 참고로 지하수로 인한 공극압을 고려하지 않은 경우의 최대수평응력 계산값은 약 10% 정도 크게 나타났다.

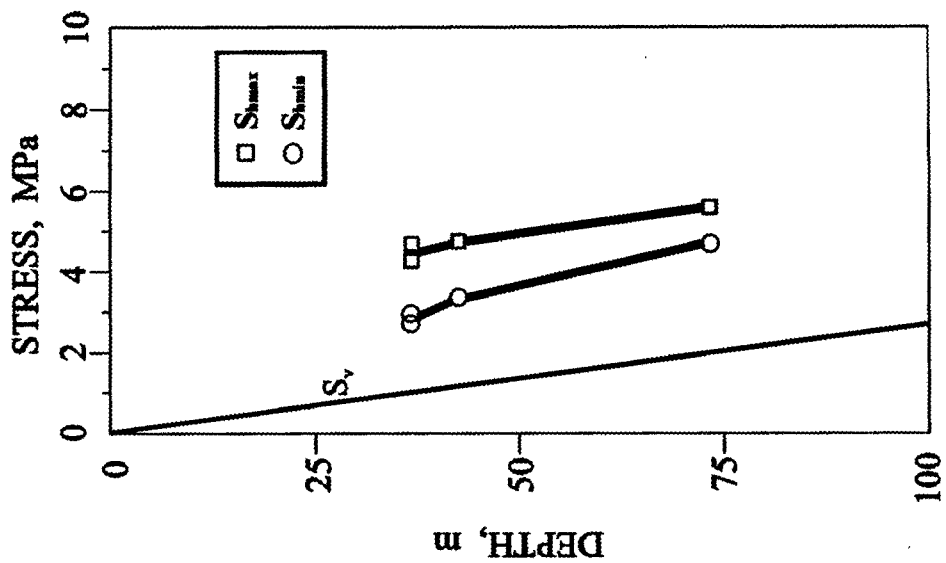


Fig.8 Vertical and horizontal stresses versus depth

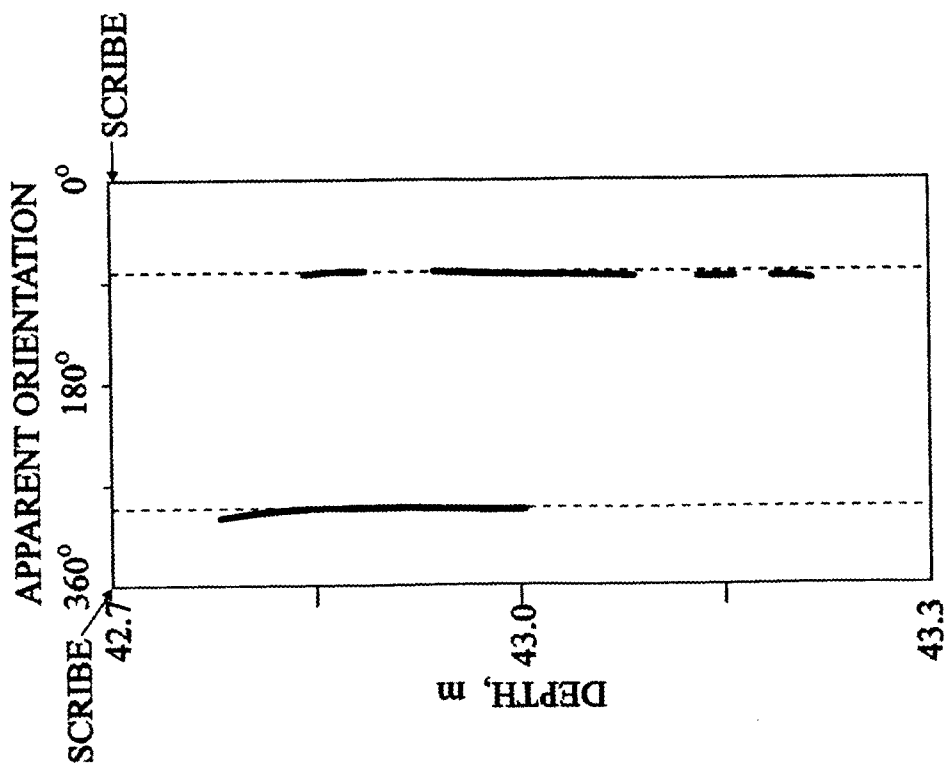


Fig.7 Orientation of hydro-fractures for the interval BH1-2

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 (2)

** : $\sigma_{h_{avg}} = (\sigma_{h_{max}} + \sigma_{h_{min}}) / 2$

6. 결론

본 연구에서는 국내 자체의 장비와 기술에 의해 현장수압파쇄시험이 수행되었으며, 이로 부터 얻어진 지압측정결과는 다음과 같다.

(1) 시추공방향측정기 및 균열압인패카를 이용한 조사결과, 시추공은 연직방향에 대해 약 2° 정도 경사를 가졌고, 파쇄균열은 수직균열로서 그 방향 즉, 최대수평응력방향은 N80°W와 N88°W 사이인 것으로 나타났다.

(2) 지압측정결과, 최대 및 최소수평응력의 비는 전체적으로 1.19-1.56의 범위를 보였다. 평균수평응력 대 수직응력의 비는 2.62-3.86의 범위였으며, 천부일수록 비는 크게 나타났다.

(3) 본 현장시험은 1개 시추공내의 3가지 심도에서만 수행되었다. 앞으로 심도별 지압증가 경향등 보다 정확한 지압평가를 위해서는 지역별로 3-4회 이상의 시험을 통한 해석이 바람직할 것이다.

참고문헌

1. Haimson, B.C., 1980, "Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo Quartzite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, No.2, pp.81-88.
2. 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.
3. 한국자원연구소 보고서, KR-92-(B)-7, 1992, 수압파쇄에 의한 지압측정 및 균열제어기술 개발연구, 76p.
4. 윤건신, 송승호, 1992, "지하공간 설계를 위한 응력 측정결과", 대한토목학회 1992년도 학술발표개요집(I), pp.343-346.
5. 한국자원연구소 보고서, KR-93-(B)-17, 1993, 불연속압반특성 해석기술 개발연구, 127p.
6. 최성용, 1994, 수압파쇄에 의한 인공슬롯모델의 균열전파양상 해석과 현지암반 초기지압 측정, 서울대학교 박사학위논문, 175p.