

## 통계적 접근법에 의한 수압파쇄 자료해석용 전산 프로그램 개발 및 적용

류동우<sup>1)</sup> · 최성웅<sup>2)</sup> · 이회근<sup>3)</sup>

### Development and application of Statistical Hydrofracturing Data Processing Program

Dong-Woo Ryu, Sung-Oong Choi, Hi-Keun Lee

Abstract Shut-in pressure, reopening pressure and fracture orientation are very important parameters to be evaluated precisely in in-situ stress measurement by hydraulic fracturing. Graphical methods on pressure-time curves have been conventionally used, even though these are seriously dependent on subjectivity of interpreters. So there have been many demands on new method to objectivity in determining parameters. We have developed integrated hydrofracturing data processing program (HYDFRAC), based on nonlinear regression analysis and can be invoked under the Window graphical user interface. HYDFRAC consists of three routines, that is shut-in pressure routine, reopening pressure routine, and fracture delineation routine. Each of routines include independent modules according to parameter determination methods. Its application to field tests ensured both objectivity and facility in determining of hydraulic fracturing parameters. Determining shut-in pressures at each pressurization cycles, we adopted the exponential pressure-decay method (EPD method), the bilinear pressure-decay-rate method (PDR method), and the tangent intersection method in order to find the pressurization-cyclic tendency of shut-in pressures. The estimated pressure by PDR method exists in the range of the upper and lower values by EPD method, and lies near to the upper value more than the lower. Being the pressurization cycle increased, the range of upper and lower limits come to be stabilized gradually. By graphical superposition method and bilinear pressure-accumulated volume method, reopening pressures were determined. Vertical and inclined fracture attitudes were determined by applying the directional statistics and sinusoidal curve fitting, respectively. The results of evaluation of hydrofracturing parameters showed that statistical methods could enhance the objectivity better than graphical methods.

### 1. 서 론

장대 터널, 지하철, 양수발전소, 유류 비축기지, 핵폐기물 지하처분장 및 농축산물 지하 저장소 등의 지하공간개발을 위한 사전 설계단계 및 시공에 있어 현지암반 초기응력 측정은 중요한 요소로 대두되고 있다. 현지암반 초기응력 측정법으로는 응력개방법, 응력보상법, 그리고 최근 국내에서의 적용사례가 증가하고 있는 수압

파쇄법 등으로 크게 분류된다. 이들 중에서 수압파쇄법의 경우, 시추공을 이용하므로 사전 설계단계에 적용이 가능하며, 응력을 직접 측정하므로 오차가 포함될 소지가 상대적으로 적다는 것에서 타 방법에 비해 적용상 몇 가지 유리한 점을 가지고 있다.

- 1) 서울대학교 공과대학 자원공학과 박사과정
- 2) 한국자원연구소 자원개발연구부 선임연구원
- 3) 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

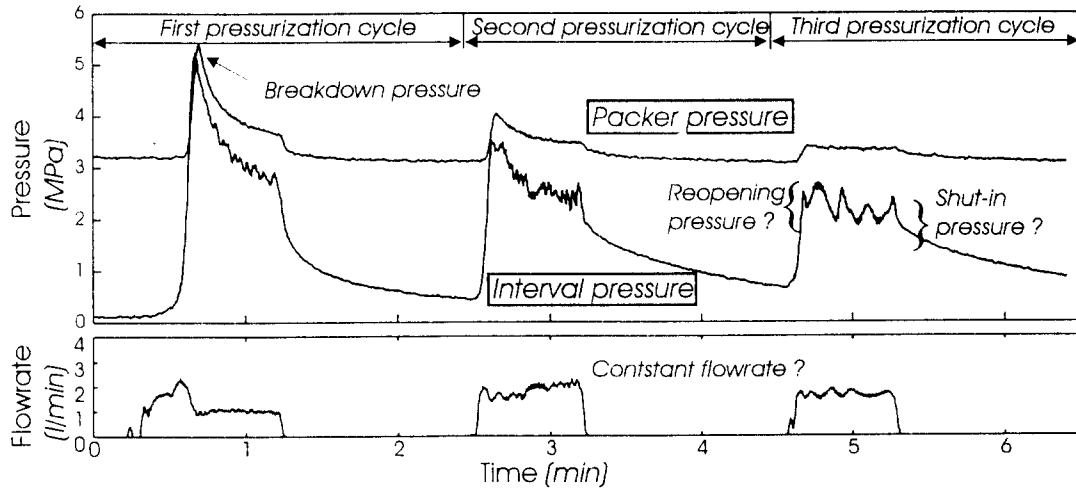


Fig. 1. Pressure and flowrate-time records during a field hydrofracturing test (HF borehole, depth 35.0 m).

초기응력 산정을 위한 수압파쇄 매개변수로는 균열 폐쇄압력, 균열개구압력, 그리고 균열방향이 있다. 지금까지 국내 현장 및 실험실 모델 시험에 적용된 수압파쇄 매개변수 결정에는 주로 도해적 방법이 주로 이용되어 왔다. 그러나, 현장 수압파쇄 시험시 압박에 대한 지질정보 부족과 장비의 특성으로 인한 noise 등으로 인하여 도해적 방법에 의한 수압파쇄 매개변수 결정에 있어 주관성의 개입가능성이 존재해 왔으며, 특히, Gronseth 등[7]이 적용한 접선 이탈법(Tangent divergence method), Enever 등[6]이 적용한 접선교차법(Tangent intersection method), Doe[5], Haimson과 Zoback 등[17]이 적용한 로그법(Logarithmic method) 등과 같은 도해적 방법은 매개변수 결정에 있어 주관적 판단의 개입여지가 다분하다.

따라서 향후 많은 수요가 예상되는 수압파쇄 시험자료의 신속하고 정확한 해석을 위해서는 자료해석용 전산 프로그램의 개발이 요구되는 바, 이를 위하여 Lee와 Haimson[14]이 제안한 통계적 접근법과 Zoback 등[3]이 제안한 접근법, 그리고 방향성 자료에 적용하는 통계이론[15]을 각각 해석모델로 이용하여 해석 프로그램을 개발하였다.

본 연구를 통하여 개발된 프로그램 HYDFRAC의 적용성과 신뢰성을 검토하기 위하여, 현장 시험으로부터 얻은 자료에 대한 해석을 실시하였으며, 특히 서로 다른 매개변수 결정법의 적용에 따른 압력치의 양상을 비교·분석하였고, 폐쇄압력의 변화에 따른 균열폐쇄압

력의 변화양상에 대하여 면밀히 검토하였다.

## 2. 수압파쇄 매개변수

수압파쇄 시험으로 통해 얻을 수 있는 매개변수로는 균열폐쇄압력, 균열개구압력, 그리고 균열방향 등이 있다.

Fig. 1은 수압파쇄 현장시험을 통해 얻은 압력 및 유량기록 곡선을 보여준다. 여기서 초기파쇄압력(Initial breakdown pressure)  $P_b$ 는 균열이 발생하는 순간의 압력이며, 균열확장압력(Fracture propagation pressure)  $P_p$ 는 파쇄 후 계속되는 유체의 주입으로 균열이 공벽에서부터 점차 발전하게 될 때의 압력을 의미한다. 가압을 중지하면 일정한 압력에 이르게 되는데, 이 압력이 균열폐쇄압력(Fracture shut-in pressure)  $P_{si}$ 이다. 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 대개 균열면에 수직으로 작용하는 최소 수평응력(Minimum horizontal principal stress)  $\sigma_{hmin}$ 을 나타낸다.

즉,

$$\sigma_{hmin} = P_{si} \quad (1)$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력보다는 낮은 일정 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 이차파쇄압력(Secondary breakdown pressure)  $P_{sb}$  또는 균열개구압력(Fracture reopening pressure)  $P_r$ 이

라 하며, 여기서 현지압반 인장강도(In-situ tensile strength) T를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_r \quad (2)$$

이 때의 T는 시추공 내에 균열이 발생한 개소의 인장 강도이며, 또한 시추공 벽면의 강도는 균일하지 않으므로, 시험편에 대한 직접인장시험 또는 압열인장시험으로 구한 인장강도와는 별도로 취급되는 것이 바람직하다.

균질 등방성이고 불투수성의 탄성체로 가정한 암반 내에 형성된 연직의 시추공에 대해 상부암반 자중에 의한 연직응력(Overburden pressure)을 시추공 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이 때의 이차원적 수압과쇄 조건식은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_p = -\sigma_{hmax} + 3\sigma_{hmin} - P_b = -T \quad (3)$$

$$\sigma_v = \gamma h \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_p$ 는 시추공 벽면에 작용하는 최소접선응력(압축을+로 함)이며,  $\sigma_v$ 는 연직방향의 주응력,  $\gamma$ 는 암반의 단위중량,  $h$ 는 지표로부터의 심도이다. 식(2)과 식(3)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -\sigma_{hmax} + 3\sigma_{hmin} - P_b &= -(P_b - P_{sb}) \\ \sigma_{hmax} &= 3\sigma_{hmin} - P_{sb} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 식(5)로부터 최대수평응력(Maximum horizontal principal stress)  $\sigma_{hmax}$ 을 구할 수 있다.

### 3. 균열폐쇄압력

수압과쇄시 유체의 압입에 의해 초기과쇄압력 또는 균열개구압력까지 압력이 올라간 뒤에 가압을 중단하면, 압력은 저하하여 일정한 값으로 떨어지게 된다. 이 때의 압력은 수압과쇄에 의해 생성된 균열을 유지하기에 필요한 최소한의 공내 압력이며, 따라서 균열면에 수직한 방향의 응력을 나타내는 지표로 사용될 수 있다. 따라서 이 때의 균열폐쇄압력은 수압과쇄 구간에 대한 최소주응력을 직접적으로 나타낸다.

그러나, 어떤 경우에는 압력감쇠가 점진적이고, 균열폐쇄압력( $P_s$ )이 불명확하여 압력이력곡선 상에서 이를 결정하기란 매우 어렵다. 일반적으로 도해적 방법들(Graphical methods)이 제안되어 왔으며, 압력이력곡선으로부터 균열폐쇄압력( $P_s$ )을 추정하기 위해 적용되

었다. 그 방법들로는 접선 이탈법(Tangent divergence method)[8], 접선교차법(Tangent intersection method)[7], 로그법(Logarithmic method)[3][18] 등이 있다.

Gronseth와 Kry[7]는 압력-시간 그래프 상에서 굴곡점으로부터 압력이력곡선 상에 접선을 그어 이탈개시점을 균열폐쇄압력으로 정의하였으며(Fig. 2a), Enever와 Chopra[6]는 각 가압주기의 압력-시간 그래프 상에 가압을 멈추고 압력라인을 폐쇄시킨 후 압력감쇠부분에서 두 개의 접선을 그어 교차하는 점을 균열폐쇄압력으로 간주하였고, Doe와 Hustrulid[5] 등은 압력을 로그 스케일의 시간에 대한 함수로 도시하여 그래프 상에 이중직선회귀를 이용하여 그 교차점을 균열폐쇄압력으로 간주한 바 있다(Fig. 2c).

그 밖에 McLennan과 Roegiers[16]는 압력을  $\log\left(\frac{t+\Delta t}{\Delta t}\right)$ 의 함수로 도시하여 균열폐쇄압력을 결정하였으며(Fig. 2b), Aamodt[1]는 로그스케일의 압력을 시간에 대한 함수로 도시하는 Muskat 방법의 이용 및 외삽법에 의해 균열폐쇄압력을 결정하도록 제안하였다(Fig. 2d).

상기 방법들은 많은 상황에서  $P_s$ 의 근사값을 제공함에도 불구하고, 명확한 굴곡점 없이 압력감쇠가 점진적으로 일어날 때 균열폐쇄압력을 결정하기 매우 힘들며, 이로 인해 해석시 주관적 해석에 의존해야 하는 경우가 많다. 따라서, Lee와 Haimson[14]이 제안한 통계적 분석방법을 아날로그-디지털 신호변환기를 통해 취득된 압력과 유량 자료에 적용하여 균열폐쇄압력  $P_s$ 을 결정하였다.

#### 3.1. 지수압력감쇠법

가압을 멈추기 전까지의 압력감쇠현상은 가압구간 및 발생한 균열로부터 인접 암반으로의 인입유체 침투와 수압과쇄균열의 추가적 확장의 결과이다. 가압을 멈춘 후, 압력은 현지 균열면의 수직응력과 같은 균열폐쇄압력에 도달할 것이며, 추가적 압력감쇠는 완전한 균열의 폐합을 일으킬 것이다. 추가적 압력감쇠는 주로 시추공을 통한 암반으로의 방사상 유동의 결과에 기인한다. 인입유체의 방사상유동에 기인하는 압력감쇠형태를 지수함수(Exponential function)로 표현한 Muskat 모델을 균열폐쇄압력  $P_s$ 를 결정하기 위한 목적

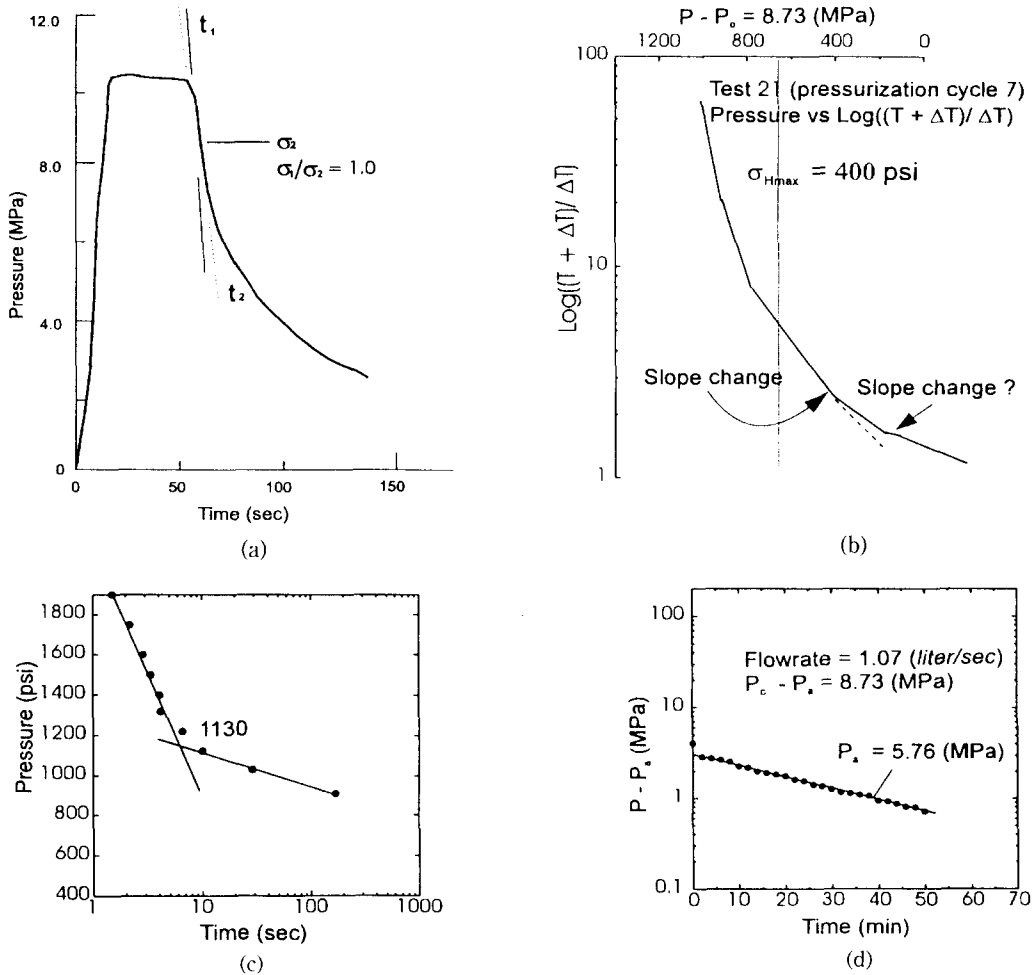


Fig. 2. Illustration of various methods for determining  $P_s$  when shut-in pressures are not distinct. (a) inflection point method (Gronseth and Kry, 1982), (b) pressure build-up method (McLennan and Roegiers, 1982), (c) pressure as a function of log time (Doe *et al*, 1983), (d) Muskat method (Aamodt and Kuriyagawa, 1982).

함수로 이용하였다. 이 모델은 다음 식으로 표현된다

$$P = \exp(d_1 t + d_2) + P_{ai} \quad (t \geq t_i) \quad (6)$$

$P$ 는 가압구간에서의 압력이며,  $d_1 (< 0)$ 와  $d_2$ 는 압력감쇠 속도를 특징짓는 미지의 매개변수이고,  $P_{ai}$ 는 압력감쇠의 점근값이고,  $t$ 는 가압을 멈추고 압력라인을 폐쇄한 후의 경과 시간이며, 그리고  $t_i$ 는 인입유체의 방사상 유동이 시작되는 시점의 시간이다. 즉, 완전한 균열폐쇄가 일어나는 시간을 의미한다.

압력이력곡선의 감쇠부분에 비선형 회귀분석(NLRA)을 적용함으로써 균열폐쇄와 관련한 구간압력

$P_s^{app}$ 를 먼저 결정한다. 비선형 회귀분석은 임의의 비선형 함수[예, 식(6)]를 주어진 자료점들에 적합시키기 위한 통계적 기술이다[2, 13]. 디지털 신호로 취득된 자료와 모델에 근거한 예상압력사이의 최소사승합에 의해 압력감쇠변수( $d_1$ 와  $d_2$ )와 점근값( $P_{ai}$ )을 결정한다. 적합된 모델로부터 곡선의 평균편차를 나타내는 평균잔차합(the residual mean square-RMS)으로 적합정도를 평가한다.

$$RMS = \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - P_{pi})^2 / (n - 3) \right]^{0.5} \quad (7)$$

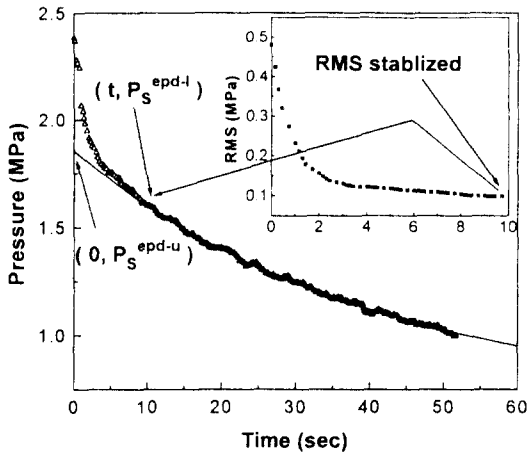


Fig. 3. Shut-in pressure determination during the exponential pressure-decay method. Nonfitting data are shown as blank triangles. The stabilized residual mean square (RMS) value determines pressure level at which pure radial flow initiates ( $P_s^{epd-l}$ ). The extrapolated shut-in pressure ( $P_s^{epd-u}$ ) to time  $t=0$  is also shown.

여기서,  $P_i$ 은 디지털 압력 자료,  $P_{in}$ 은 지수압력감쇠모델에 근거한 비선형 회귀분석으로 구한 압력값이며,  $n$ 은 회귀분석에 이용된 자료의 수이다.

균열이 폐쇄되기 전의 압력-시간 자료를 제외시킬 목적으로 반복법을 이용한다. 가압을 멈추었을 때의( $t=0$ ) 압력치에서 출발하여 자료점들은 매 반복과정에서 순차적으로 제거된다. 이 적합과정은 RMS값이 안정화될 때 멈춘다. 이 점에서 균열이 열려져 있을 시간대( $t < t_s$ )에 속하는 모든 압력자료는 적합과정에서 제거된다고 가정한다(Fig. 3). 적합된 압력-시간 곡선의 가장 큰 압력치( $P_s^{epd-l}$ )를 수압파쇄에 의한 균열이 완전히 닫힐 때의 압력으로 가정하며, 이 값을 균열폐쇄압력의 하한값으로 정의한다.

가압을 멈춘 후 바로 균열이 닫히었다면, 적합된 지수함수로부터 외삽하여 시간  $t=0$  ( $P_s^{epd-u}$ )에서 구한 추정압력치는 순수 방사상유동이 시작되는 압력을 나타내며(Fig. 3), 이 값을  $P_s$ 를 얻을 수 있는 범위의 상한값으로 정의한다. 따라서, 균열폐쇄압력이 존재하는 범위는 다음과 같다

$$P_s^{epd-l} < P_s < P_s^{epd-u} \quad (8)$$

여기서,

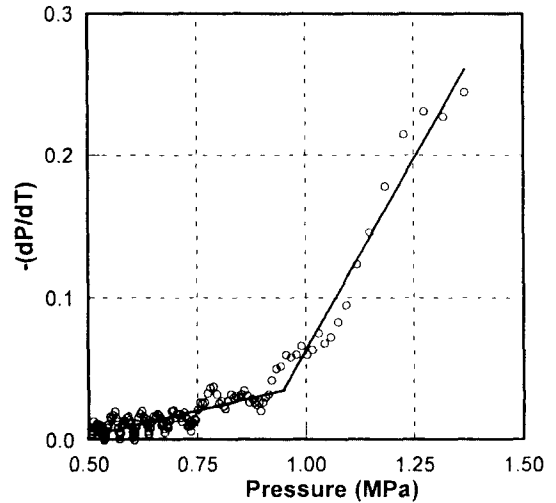


Fig. 4. Shut-in pressure determination using bilinear pressure-decay-rate ( $dP/dt$  vs  $P$ ) method. The bilinear curve resulting from NLRA determines  $P_s^{pdr-l}$ .

$$P_s^{epd-l} = \exp(d_1 t_1 + d_2) + P_{a1}$$

$$P_s^{epd-u} = \exp(d_3) + P_{a1}$$

이다.

### 3.2 이중선형 압력감쇠속도법

균열폐쇄전 압력감쇠의 함수형태는 일반적으로 알려져 있지 않다. 압력감쇠부분은 지수함수에 의해 근사적으로 나타낼 수 있다는 가정 하에서 전체 압력감쇠를 두개의 지수함수곡선으로 구성할 수 있다.

$$P = \exp(d_3 t + d_4) + P_{a2} \quad (t < t_s),$$

$$P = \exp(d_5 t + d_6) + P_{a3} \quad (t > t_s) \quad (9)$$

여기서,  $t_s$ 는 압력이  $P_s$ 에 도달할 때의 시간이다;  $d_3 (< 0)$ 와  $d_4$ 는 시간  $t_s$ 이전의 압력감쇠의 특성을 나타내는 미지의 매개변수이다;  $d_5 (< 0)$ 와  $d_6$ 는 시간  $t_s$ 이후에 일어나는 압력감쇠를 나타내는 미지의 매개변수이다;  $P_{a2}$ 과  $P_{a3}$ 는 미지의 점근 압력치를 나타낸다.

식 (9)을 시간에 대해 미분을 함으로써,  $dP/dt$ 와  $P$ 사이의 이중선형 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} dP/dt &= d_3 \exp(d_3 t + d_4) + P_{a2} \quad (t < t_s) \\ &= d_3(P - P_{a2}) \end{aligned}$$

$$dP/dt = d_5 \exp(d_5 t + d_6)$$

$$= d_s(P - P_{a3}) \quad (P < P_s) \quad (10)$$

현장기록치에 적용된 전형적인  $dP/dt$ 대  $P$  그래프는 균열폐쇄압력을 찾을 수 있는 전이대에 의해 연결된 두 개의 선형부분을 나타낸다(Fig. 4). 객관적으로 균열폐쇄압력  $P_s$ 을 얻기 위해  $dP/dt$ 대  $P$ 자료에 비선형 회귀분석(NLRA)을 적용함으로써 최적 적합곡선을 정의할 수 있다. 자료점들을 두 개의 집단으로 분리시키는 초기 전이점을 먼저 결정한다 다음, 각각 최적 적합직선을 얻어서 자료점들과 적합직선 사이의 오차자승합(SSE)을 계산한다. 비선형 회귀분석을 통해 두 개의 일차회귀식에 의한 추정값과 자료값에 대해 계산된 오차자승합을 최소로 하는 최적적합 전이점  $P_s^{pred}$ 을 결정할 수 있다(Fig. 4).

#### 4. 균열개구압력

암반의 인장강도를 결정하는데 있어서 균열개구압력을 이용하는 것이 일반적이다. 균열개구압력을 결정하기 위해 2가지 방법을 적용, 비교하였다.

첫번째 방법인 도해적 중첩은 유속이 일정하다는 가정 하에서, 연속되는 가압주기(일반적으로 2 혹은 3번째 가압주기)의 압력상승부분 기울기가 초기균열유도곡선의 압력상승부분으로부터 이탈되는 점에서의 압력으로 균열개구압력  $P_r$ 을 정의하는 방법이다[8,12]. 따라

서, 이 방법을 이용한 해석은 균열개구압력으로 생각되는 이탈점의 결정이 해석자의 주관성에 의존해야 되는데, 이는 대부분의 경우 기울기의 변화가 일어나는 이탈개시점이 명확하지 않기 때문이다(Fig. 5). Lee와 Haimson[14]은 도해적 방법에 의한 해석과정에서의 불확실성을 최소화하기 위해, 두 곡선의 이탈개시점이 불명확한 경우에도 적용 가능한 통계적 기법을 이용하여 균열개구압력  $P_r$ 를 결정한 바 있다.

두번째 방법으로, 압력 對 주입수 누적부피 곡선에 이중 선형회귀를 실시하여 교차점을 균열개구압력으로 정의하였다. 이는 일정한 강성의 수압파쇄시스템에서 유체압력( $P$ )은 주입수 누적부피에 대해 선형적인 관계가 있다는 가정에 근거한다. 균열면에 대해 수직으로 작용하는 응력을 이겨내면서 균열이 개구되고, 이로 인해 균열상호간의 연결성은 향상된다. 따라서, 주입수는 균열내부로 유동하여 수압파쇄시스템의 강성을 감소시킨다. 이와 같이 수압파쇄시스템의 강성이 변화하는 전이대에서 균열개구압력을 결정하는 방법이다. 전이점을 정의하기 위해 Baumg ärtner와 Zoback[3]은 도해적으로 판단하였고, 이어 명확한 전이점 정의를 위해 미분에 의한 불연속성을 이용하여 균열개구압력을 결정하였다. 이 방법 역시 해석자의 주관적 판단 하에 전이점을 판단하는 방법이다. 보다 객관성을 향상하기 시키기 위해 유체압력과 주입수 누적부피간의 이중선형 관계에 근거하여 비선형회귀분석을 적용, 균열개구압

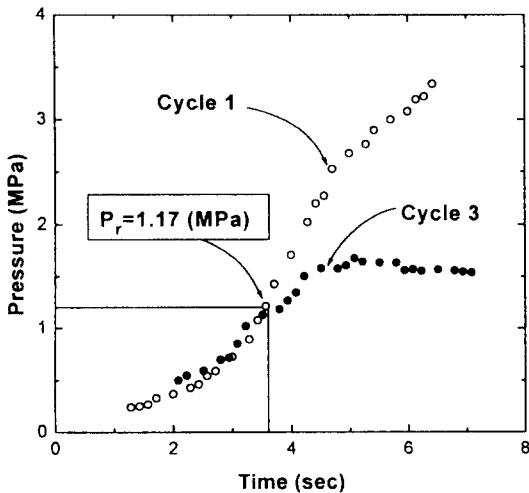


Fig. 5. Reopening pressure determined using graphical superposition method.

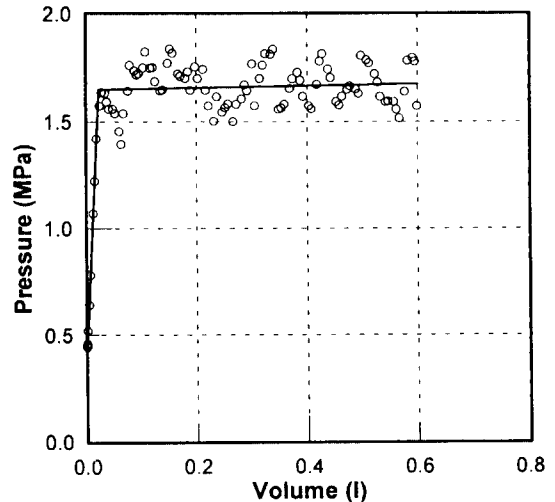


Fig. 6. Reopening pressure determined using P-V bilinear method.

력을 정의 내렸다(Fig. 6).

### 5. 균열방향

압인패카, 시추공 텔레뷰어, 시추공 카메라, 혹은 다른 검층장비들이 시추공내의 균열 방향을 결정하는데 이용될 수 있다. 이 정보는 현지 응력텐서를 정의하는데 있어 매우 중요하다. 그러나 압인패카 상에 나타난 균열양상이 단절적이거나 불명확할 경우, 균열방향을 결정하는데 어려움이 따른다. 따라서 경사균열이나 수직균열의 균열방향을 결정하기 위하여 각각 사인곡선에 의한 적합기법과 방향성 자료에 대한 통계적 이론에 근거한 기법을 이용하였다.

#### 5.1 경사균열

경사균열을 포함한 시추공의 절단면은 타원의 형상을 나타낸다. 이는 압인패카의 펼친그림을 사인곡선으로 근사시킬 수 있으며, 따라서 경사균열의 경사방향은 사인 곡선의 하한극점의 방위에 의해 결정되고, 경사각은 사인곡선의 진폭을 시추공반경으로 나눈 값의 탄젠트역함수로부터 계산된다. 그러나, 균열형태가 부분적으로 나타나거나 단일 균열면을 나타내지 않는 경우 경사균열을 묘사하기란 매우 어렵다. 즉, 극점방향과 균열의 높이와 관련한 불확실성은 균열특성을 파악하는데 심각한 오차를 초래한다. 이런 어려움을 최소화하기 위해 사인함수에 의한 비선형 회귀분석 방법을 사용한다. 시추공을 절단하는 2차원 경사균열은 공벽에 다음의 사인곡선의 형상을 남긴다는 가정 하에 다음 식을 목적함수로 비선형 회귀분석을 수행한다.

$$D = e_1 + e_2 \sin(E + e_3) \tag{11}$$

여기서,  $e_1, e_2, e_3$ 은 균열형상과 관련한 미지의 매개변수들이고,  $D, E$ 는 균열형상을 구성하는 각 점들의 심도와 방위각을 나타낸다.

현장실험으로부터 얻은 균열형태를 D-E좌표축으로 수치 자료화한다. 세 개의 매개변수를 결정하기 위하여 사인함수를 모델로 비선형 회귀분석 방법을 적용하여 식(11)에 적합 시킨다(Fig. 7). 평균 경사방향과 그것의 불확실성은 매개변수  $e_3$ 과 표준편차로부터 각각 계산된다. 평균 경사각과 그것의 불확실성은 매개변수  $e_1$ 와  $e_2$  그리고 표준편차로부터 각각 계산된다.

Fig. 7은 시추공의 내경을 76 mm일 때에 적용한 것

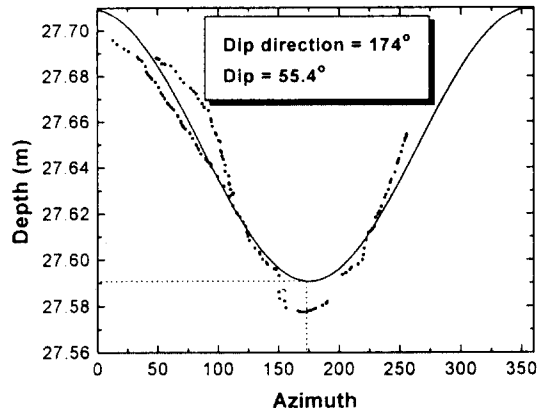


Fig. 7. Unwrapped impression packer image showing digitally-traced incomplete inclined fracture with the optimum fracture plane obtained by sinusoidal curve fitting.

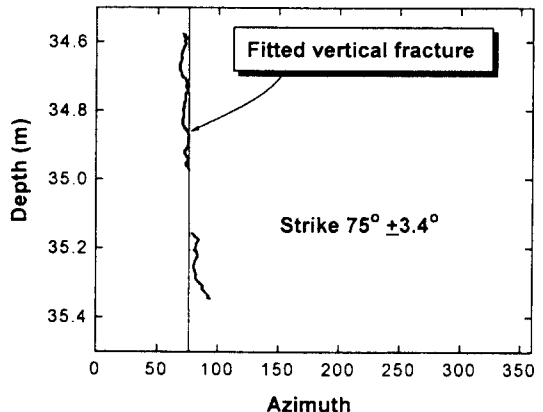


Fig. 8. Unwrapped impression packer image showing digitally-traced fracture with the mean direction and standard deviation of the fracture determined by circular statistics.

으로, 하한 극점의 방위가 균열면의 경사방향이 된다. 균열면의 경사는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\text{Dip} = \tan^{-1} \left( \frac{h}{d} \right) \tag{12}$$

여기서,  $h$ 는 상·하한 극점의 높이차이며,  $d$ 는 시추공의 내경이다.

#### 5.2 수직균열

균열형태가 수직일 때 식(11)의 사인함수 모델을 적

용할 수 없다. 압인패카로부터 얻어진 수직균열의 형상은 항상 두 개의 직선으로 나타나지 않는다. 직선들은 단절적인 경우도 있으며, 직선의 형태가 아닐 수 있다. 균열방향을 결정할 때 주관성을 배제시키기 위해 방향성 자료에 적용하는 통계학적 이론을 이용하였다(Fig. 8). 먼저 기준 방위(예, 북쪽)에 대해 균열형상을 타블릿을 이용하여 수치화 한다. 수치화된 균열의 자료점에 대응하는 각각의 각도( $E_i$ )는 원상의 단위벡터로 나타낼 수 있다. 이렇게 함으로써 두 부분의 수직균열을 나타내는 두 집단의 벡터를 얻을 수 있다. 균열의 주향은 부호에 독립적임으로( $E_i = E_i + 180^\circ$ ),  $180^\circ$ 의 차를 두고 이들 그룹 중 하나를 회전시킴으로써 주향의 범위를  $0-180^\circ$ 로 제한할 수 있다. 벡터합을 이용함으로써 합벡터의 방향과 길이를 계산할 수 있다. 균열의 평균방향( $E_0$ )은 합벡터 방향으로 정의 내려지며, 평균방향의 표준편차(SD)는 합벡터의 길이로부터 얻어진다.

$$E_0 = \cos^{-1}[X/L], SD = \frac{[2\ln(L)]^{0.5}}{2},$$

$$X = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \cos E_i\right)}{n}, Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sin E_i\right)}{n} \quad (13)$$

식 (13)에서 X, Y는 각각  $0^\circ$ 와  $90^\circ$  방향을 따라 합벡터의 평균성분들이며, n는 수치화된 자료의 수이며,  $L = X^2 + Y^2$ 는 합벡터의 평균길이이다.

### 6. HYDFRAC의 개요 및 적용

HYDFRAC은 사용자와의 인터페이스를 원활히 하기 위해 비주얼 베이직 버전 3.0 을 이용하여 윈도우용으로 개발하였다. Fig. 9는 HYDFRAC의 구성도를 보여주고 있다. 각 수압파쇄 매개변수별로 그 방법에 따라 독립적인 루틴으로 구성하였다. 균열폐쇄압력 결정을 위한 루틴은 지수압력감쇠법(EPD module), 압력감쇠속도법(PDR module), 압력-유량법(P-Q module) 등의 모듈을 이용하고, 균열개구압력의 결정을 위한 루틴은 압력 對 주입수 누적부피 곡선에 이중선형 회귀분석 방법을 적용한 결정법(P-V routine)의 모듈을 이용한다. 또한, 균열방향 결정을 위한 루틴은 수직균열(Vertical crack routine)과 경사균열(Inclined crack routine)의 방향 결정법의 모듈을 이용한다.

HYDFRAC을 이용한 수압파쇄 매개변수 결정 과정

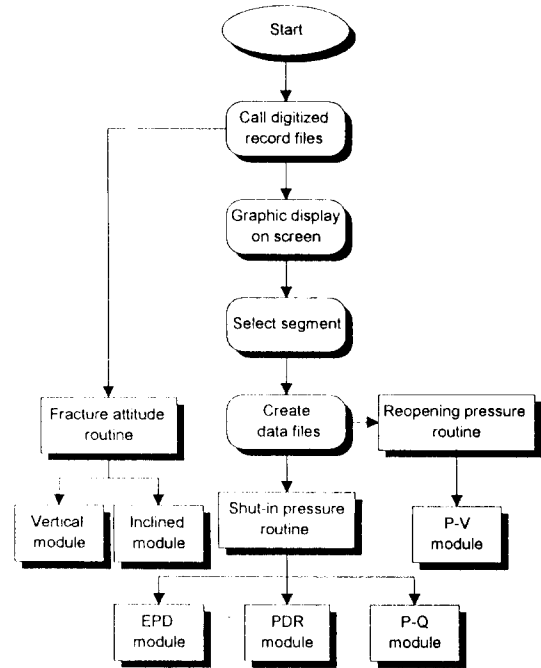


Fig. 9. Schematic flow-chart of integrated hydrofracturing data processing program, HYDFRAC.

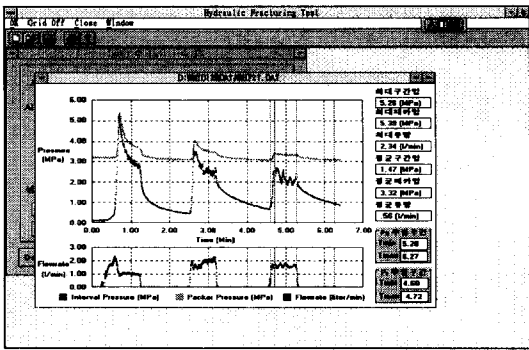
은 다음의 단계별 과정을 걸쳐 이루어진다.

- (1) 전시간대 압력 및 유량이력곡선 출력 및 추정가 압주기 결정
- (2) 매개변수 결정을 위한 자료파일 생성 및 초기값 결정
- (3) 취득 자료의 통계적 분석으로 통한 매개변수 결정

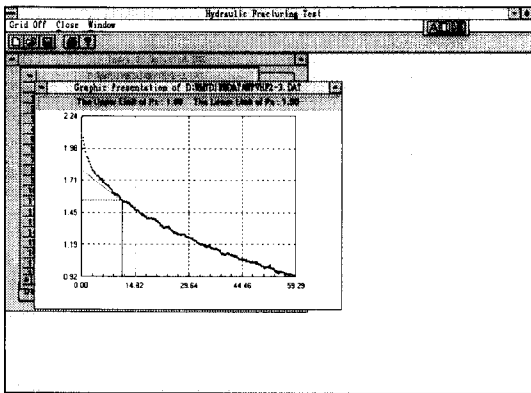
아날로그-디지털 신호변환기를 통해 취득된 자료를 전시간대 압력 및 유량곡선으로 출력하여 화면상에 통계적 분석을 적용할 가압구간을 결정한다. 해석 가압구간이 결정되면 통계적 방법을 적용할 수 있도록 수치적 분 및 미분을 이용하여 해석에 필요한 자료화일을 생성시킨다. 생성된 자료화일을 불러서 각 자료별 방법별로 비선형 회귀분석의 부프로그램을 통해 매개변수들을 결정하며, 이와 관련한 통계적 정보를 출력한다.

Fig. 10은 HYDFRAC을 이용하여 수압파쇄 매개변수의 결정과 관련한 몇 가지 단계별 화면 출력 예를 보여 준다. 현장 수압파쇄 자료에 대해 적용하여, 전시간대 압력 및 유량 이력곡선의 분석 및 가압주기별 매개변수 값의 변화 양상을 분석하였다. 프로그램의 검증은

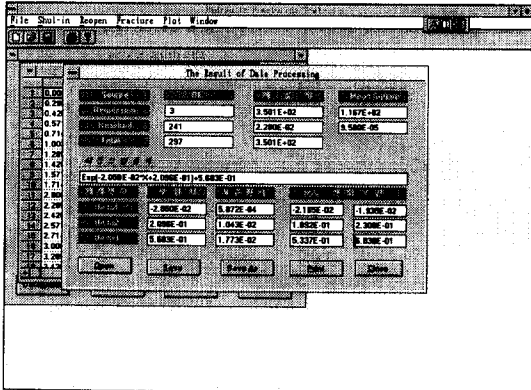




(a)



(b)



(c)

Fig. 10. (a) Pressure-time record during a field hydrofracturing, (b) Shut-in pressure by EPD routine and (c) Statistical information about the result in HYDFRAC.

위해서 기존의 도해적 방법에 의해 구한 매개변수 값과 비교를 통해 이루어졌다.

6.1 전시간대 압력 및 유량 이력곡선 분석

Fig. 11, Fig. 12 그리고 Fig. 13은 각각 시추공 HF에서의 심도 29.0 m과 35.0 m, 시추공 BH에서의 심도 27.0 m와 39.5 m, 그리고 시추공 BN에서의 심도 22.5 m 지점에서 실시한 전시간대 압력 및 유량이력곡선이다. 시추공 HF에서 실시한 수압파쇄시험은 패카압력이 균열파쇄압력보다 낮은 경우를, 그리고 시추공 BH에서 실시한 수압파쇄시험은 패카압력이 균열파쇄압력보다 높은 경우를 보여준다. 시추공 BN에서 실시한 수압파쇄시험에서는 일차균열파쇄 이후 균열확장의 양상이 나타나지 않은 경우이다. 시추공 HF와 BH의 경우 가압을 멈추었을 때 뚜렷한 패카압력의 반향현상(Packer pressure rebound)은 나타나지 않았으나, 시추공 BN의 경우 두 시추공과 비교하면 미미하지만 반향현상을 확인할 수 있다(Fig. 13). 이런 반향현상과 균열개구현상이 분명하지 않은 것은 가압구간에서 발전하기 시작한 균열에 대한 패카의 지지효과(Propping effect)와 관련이 있는 것으로 보인다[6].

시추공 HF에서 심도 29.0 m와 35.0 m의 일차가압 주기에서의 압력이력곡선을 비교·분석하면, 심도 35.0 m에 비해 심도 29.0 m에서 순간적이며 보다 날카로운 초기균열발생(Crack initiation)을 보여준다(Fig. 11(a), Fig. 13). 시추공 HF의 29.0 m의 경우는 35.0 m에 비해 펌핑 유량 및 가압속도를 일정하게 유지하기 힘들었기 때문에 상대적으로 압력의 진폭이 컸다.

균열폐쇄압력의 결정을 위해 도해적 방법인 접선교차법을 적용시 시추공 HF, BH 그리고 BN의 경우에서 1차 접선 기울기 변화에 대한 정확한 결정이 힘들었다. 따라서, 접선교차법에 의한 균열폐쇄압력의 결정은 다소 주관적일 수밖에 없었다. 시추공 BH의 경우 패카압력이 균열파쇄압력보다 높게 유지되었으며, 시추공 BH의 27.0 m에 비해 39.5 m의 경우는 패카압력의 변화가 전혀 나타나지 않았다. 종균열 발생시 패카와 밀착된 암반의 응력변화 및 주입수의 유동으로 인해 패카압력의 변화를 초래하는 경우와 대조적이다. Fig. 11(b)에 보여주듯이 시추공 HF 심도 35.0 m에서는 균열확장동안에 패카압력 곡선 상에 흑모양의 압력변화양상이 구간압력의 변화와 비슷하였으며, 이는 종균열의 발생을 확인시켜주는 경향이다. Fig. 11에서의 패카압력의 반향현상이 분명하지 않은 것은 패카의 지지효과(propping effect)가 가압구간에서 발생한 균열에 영향을 미치기 때문이다. 패카압력 곡선 상에 나타난 흑(hump)모양의 압력기록은 가압구간에서 발생한 균열

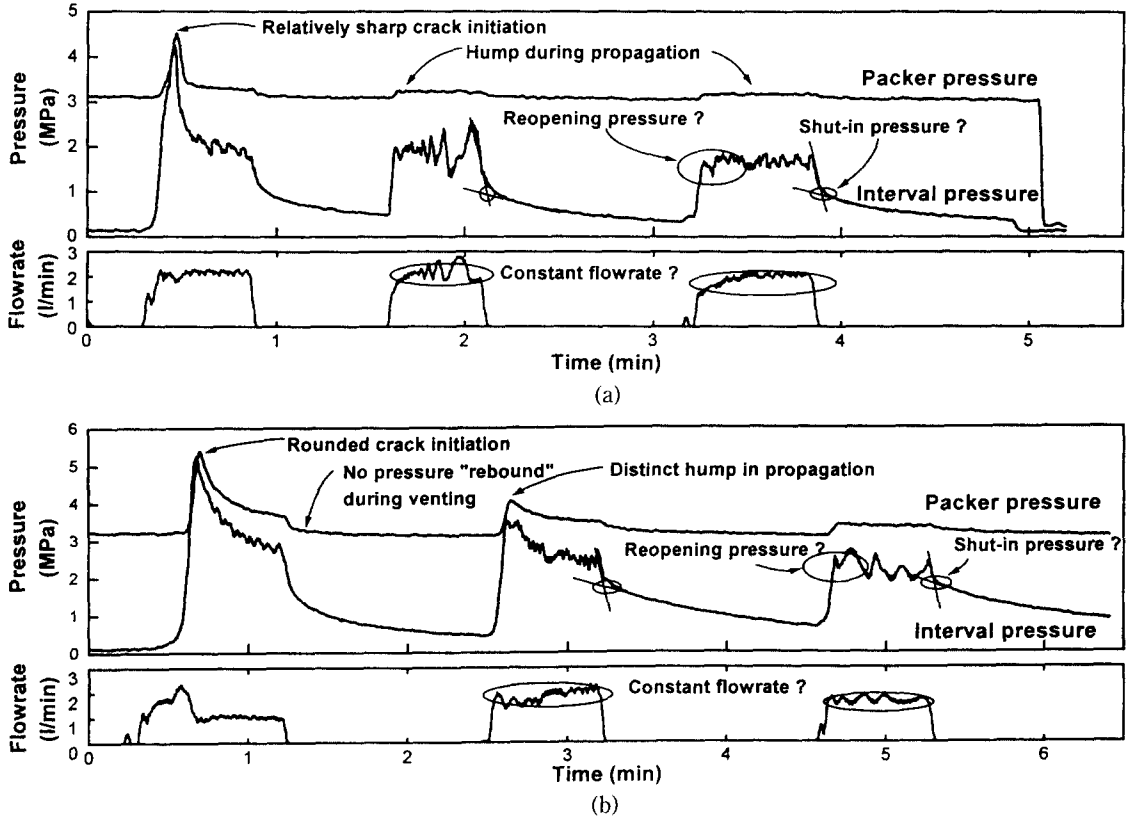


Fig. 11. Pressure and flowrate-time record during a field hydrofracturing test in HF borehole, depth (a) 29.0 m and (b) 35.0 m.

이 주입수가 직접 통과할 수 있는 지점까지 시추공벽을 따라 확장하는데 필요한 초과압력으로 간주할 수 있다. 또한, 이는 가압시 패카와 밀착된 암반사이에 응력집중 특히 전단응력의 발생과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

이런 현상과 관련하여 Roegiers[17]과 Warren 등은 패카에 의해 발생한 응력들이 균열파쇄압력에 영향을 미칠 가능성을 제안하였다. 특히, 균열파쇄압력이 패카의 팽창압력보다 매우 작을 때 발생할 수 있는 오차에 대해 언급하였으며, Wilson은 이런 문제들을 실험을 통해 증명하였다. Wilson의 실험 결과 구간압력이 변화함에 따라 패카압력도 함께 변화함을 보였다. 또한, 패카의 팽창압력이 균열파쇄압력보다 낮은 수준이면 패카압력의 영향을 최소화할 수 있음을 보였다.

본 현장 실험을 통해서 구간압력이 초기 패카압력에 도달하면 초기 패카압력 이상에서는 가압구간 압력과

패카압력이 거의 근사적으로 일치함을 보였다. 즉, 초기 패카압력 이상의 수준에서 패카압력은 구간압력과 함께 증가하여 균열파쇄압력에 도달하였음을 확인할 수 있다. 그러나, 시추공 BH의 경우 정량적으로 패카압력의 영향을 확인할 수 없었으나, 심도 27.0 m의 경우 균열파쇄압력이 명확하지 않았으며, 이는 이미 존재 하던 균열의 영향 혹은 패카압력의 영향에 기인한다고 유추할 수 있다.

전시간대 압력 이력곡선 상에서 접선교차법에 의해 균열폐쇄압력을 각 가압주기별로 구했으며, 이 값들은 이후 통계적 방법(statistical method)에 의해 구한 균열폐쇄압력값들과 비교하여, 최종적인 균열폐쇄압력 범위를 결정하는데 이용하였다. 접선교차법에 의한 균열폐쇄압력치는 Table 1에 요약하였다.

HYDRAC을 시추공 HF, BH, BN에서 얻은 자료에 각각 적용하였다. 균열폐쇄압력의 경우, 압력감쇠속

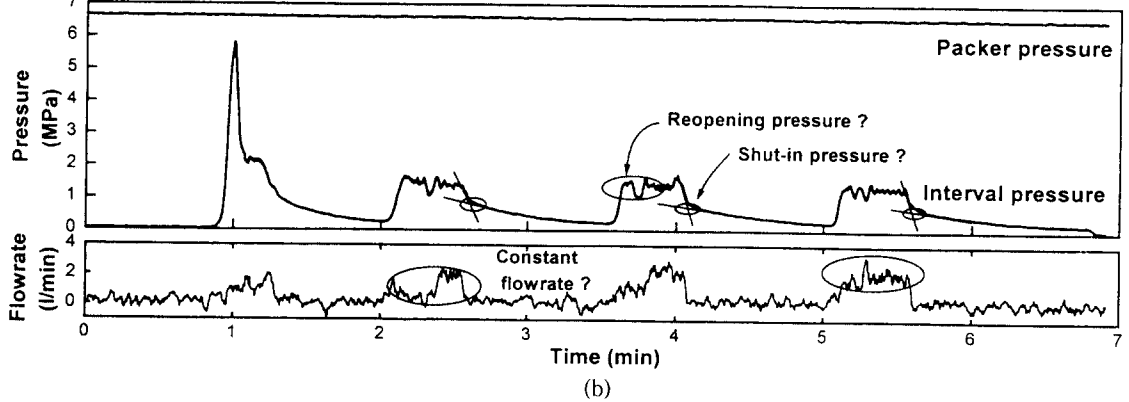
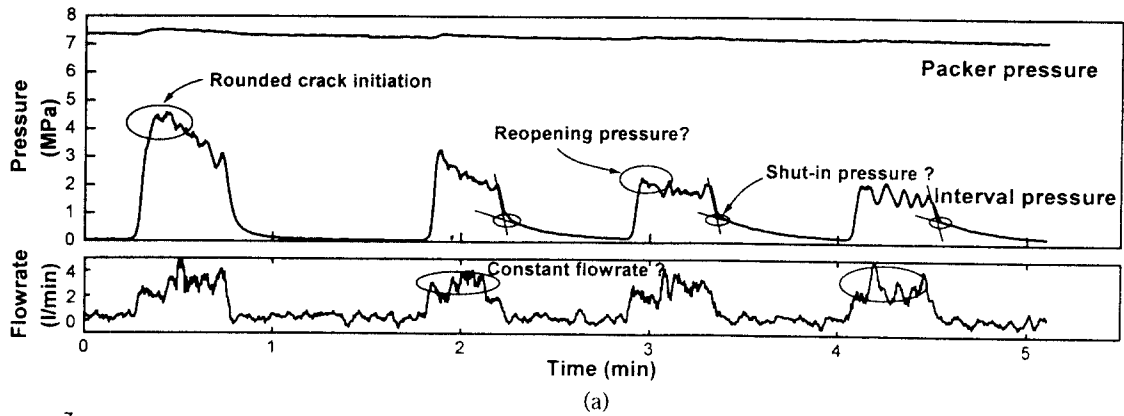


Fig. 12. Pressure and flowrate-time record during a field hydrofracturing test in BH borehole, depth (a) 27.0 m and (b) 39.5 m.

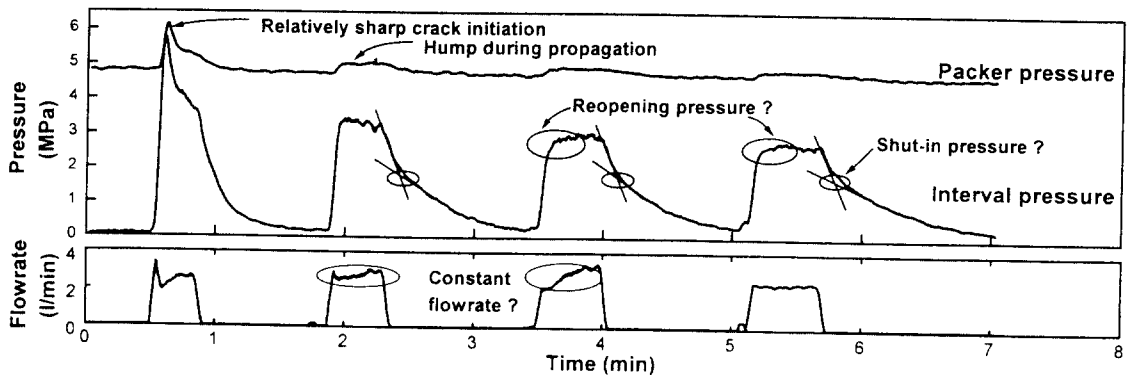


Fig. 13. Pressure and flowrate-time record during a field hydrofracturing test in BN borehole, depth 22.5 m.

도법으로 결정한 균열폐쇄압력( $P_s^{pdr}$ )과 도해적 방법인 접선교차법으로 결정한 균열폐쇄압력( $P_s^{tan}$ ) 모두가 지수압력감쇠법으로 결정한 압력범위 내에 존재하였다. 따라서, 균열폐쇄압력치가 존재할 상·하한값을 결정

하는 방법으로서 지수압력감쇠법은 타당함을 확인할 수 있었다. 도해적 방법인 접선교차법의 적용시 압력곡선에서 뚜렷한 기울기 변화를 찾기 힘든 경우 주관적 판단에 의존해야 했으며, 지수압력감쇠법으로 결정

Table 1. Summary of shut-in pressures and reopening pressures determined by different techniques using NLRA and graphical method in five tests

No. of borehole	Depth (m)	Cycle	$P_s^{epd-l}$ (MPa)	$P_s^{epd-u}$ (MPa)	$P_s^{pdr}$ (MPa)	$P_s^{tan}$ (MPa)	$P_s^{avg-l}$ (MPa)	$P_s^{avg-u}$ (MPa)	$P_r^{pv}$ (MPa)
HF	29	2	0.76	1.08	0.99	0.96	0.90	1.01	2.02
		3	0.74	0.98	0.92	0.94	0.88	0.95	1.65
	35	2	1.53	1.81	1.75	1.70	1.70	1.75	3.24
		3	1.61	1.88	1.76	1.77	1.71	1.80	2.43
BH	27.0	2	0.66	1.04	0.782	0.79	0.72	0.85	3.10
		3	0.72	1.03	0.85	0.87	0.81	0.92	2.03
		4	0.74	0.95	0.80	0.84	0.79	0.86	1.96
	39.5	2	0.61	0.89	0.81	0.82	0.75	0.84	1.48
		3	0.67	0.83	0.75	0.74	0.72	0.77	1.32
		4	0.61	0.75	0.69	0.68	0.66	0.71	1.33
BN	22.5	3	1.45	2.45	1.88	1.78	1.70	2.04	2.88
		4	1.73	2.24	1.96	1.74	1.81	1.98	2.68

$P_s^{epd-l}$  and  $P_s^{epd-u}$  are the lower and the upper limits of shut-in pressure estimated from the exponential pressure-decay (epd) method.

$P_s^{pdr}$ =shut-in pressure estimated from the pressure-decay-rate (pdr) method using bilinear best-fit

$P_s^{tan}$ =shut-in pressure estimated from tangent intersection (tan) method

$P_s^{avg-l}$ =average shut-in pressure using  $P_s^{epd-l}$ ,  $P_s^{pdr}$  and  $P_s^{tan}$

$P_s^{avg-u}$ =average shut-in pressure using  $P_s^{epd-u}$ ,  $P_s^{pdr}$  and  $P_s^{tan}$

$P_r^{pv}$ =reopening pressure estimated from P-V bilinear method

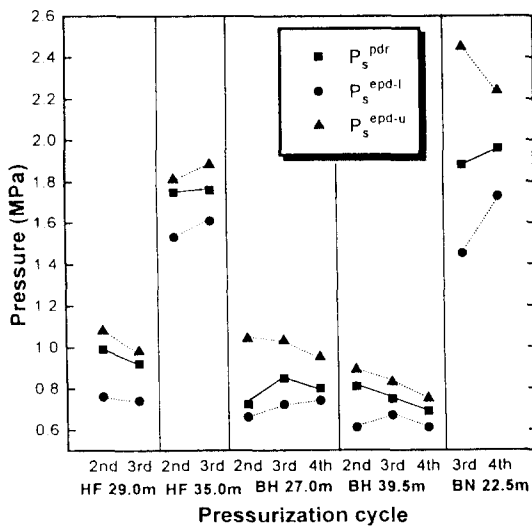


Fig. 14. Upper and lower limits of shut-in pressure by EPD method and shut-in pressure by PDR method in each pressurization cycle.

한 범위는 접선교차법의 적용시 참고지표가 될 수 있었다. 시추공 BN의 경우와 같이 접선교차법으로 균열폐쇄압력의 결정이 힘든 경우에도 압력감쇠속도법의 적용을 통해 명확하게 결정할 수 있었다. 시추공 HF, BH의 경우 접선교차법으로 구한 균열폐쇄압력( $P_s^{tan}$ )과

큰 차이는 없었으나, 접선교차법과 비교해서 객관적 매개변수 결정이 가능하였다. 세 가지 결정법을 적용한 결과, 압력감쇠속도법과 접선교차법에 의해 결정된 균열폐쇄압력은 지수압력감쇠법으로 결정된 범위의 중간 내지 상한값에 보다 가까웠음을 확인할 수 있었다.

상기 결정법들을 적용해 본 결과, 적용방법에 따라 균열폐쇄압력의 값에 차이가 존재하기 때문에 균열폐쇄압력을 특정 값으로 결정하기 보다, 순간 균열폐쇄압력(instantaneous shut-in pressure)이 존재할 수 있는 범위로 제시하는 것이 가능하였다.

가압주기별 균열폐쇄압력의 범위를 살펴보면, 가압시 균열의 확장으로 인해 주입수가 유출되고, 이로 인해 압력감쇠현상이 일어나는 가압주기에 비해, 더 이상의 균열확장이 일어나지 않는 가압주기에서 균열폐쇄압력의 상·하한값의 범위가 안정화되었다(Fig. 14). 이는 균열이 패카의 상·하부까지 종방향으로 일어난 뒤 더 이상의 균열확장을 멈추고, 이 균열을 따라 주입수가 방사상유동을 통해 시추공내로 유입된 결과로 추정된다.

균열개구압력의 결정에는 시추공 HF의 경우 중첩을 이용한 도해적 방법과 압력주입수 누적부피 자료에 이 중선형 회귀분석을 적용한 방법을 비교하였다. 시추공 BH와 BN에는 P-V법을 적용하였다. 중첩에 의한 도해

적 방법으로 구한 시추공 HF의 3차 가압주기에서의 균열개구압력은 29.0 m에서 1.17 MPa, 35.0 m에서 2.55 MPa로 결정되었다. 하지만, 도해적 방법으로는 이탈개시점을 객관적으로 정의하기가 힘들었다. 따라서, 압력 對 주입수 누적부피 자료에 이중선형 회귀분석을 적용함으로써 균열개구압력의 결정시 객관성을 확보하려 하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 가압주기별로 균열개구압력값은 점차 감소하여 안정화되어 감을 알 수 있는데, 이는 전시간대 압력 및 유량이력곡선 분석에서 알아보았듯이 균열확장을 위한 추가적인 압력이 필요함을 의미한다. 따라서, 인장강도를 결정하기 위한 균열개구압력은 균열폐쇄압력 결정과 마찬가지로 더 이상의 균열확장이 일어나지 않는 가압주기에서 결정되어야 한다. 압력 대 주입수 누적부피 자료를 이용한 해석의 경우, 유량 및 압력의 진폭이 컸지만, P-V 그래프 상에서 지배적인 이중선형관계를 이끌어낼 수 있었다. 따라서, 적절한 전이점의 결정을 위해 이중선형 회귀분석을 적용하여 균열개구압력을 결정할 수 있었다. 중첩법에 의한 균열개구압력과 P-V 그래프 상에서 결정한 균열개구압력값의 차이는 가압속도가 초기 가압시와 재가압시의 차이에 의한 결과로 보이며, 또한 압력 및 유량의 변화진폭이 상대적으로 커서 회귀분석에 영향을 미쳤기 때문으로 보인다. 따라서, 이 오차를 줄이기 위해서는 일정한 가압속도의 유지와 압력 및 유량의 변화진폭을 줄여야 한다.

균열방향의 결정에는 시추공 HF에서 발생한 수직균열에 대해 방향성 자료에 대한 통계적 이론을 적용하였다. 시추공 HF 29.0 m의 경우 균열형상이 단절적으로 나타났으나, 통계적 접근법에 의한 균열의 평균방향은 진북방향을 기준으로 75°로 나타났으며, 표준편차는 5.7°였다. 또한, 시추공 HF 35.0 m의 경우 진북방향을 기준으로 시계방향으로 75°로 나타났으며, 표준편차는 3.4°로 나타났다.

## 7. 결 론

수압파쇄 현장 자료를 해석시 균열폐쇄압력, 균열개구압력, 균열방향의 결정에 있어 해석자의 주관성이 개입될 여지가 많은 바, 본 연구에서는 수압파쇄 매개변수의 결정을 위하여 통계적 기법들을 적용함으로써 해석의 객관성을 확보하려 하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 균열폐쇄압력의 결정에 있어 도해적 방법인 접선교차법을 적용한 결과, 압력감쇠부분의 기울기 변화가 명확하지 않은 경우, 주관적 판단이 필요하였다. 반면, 통계적 접근법을 이용한 경우 균열폐쇄압력의 객관적 결정이 가능하였다. 지수압력감쇠법을 적용하여 균열폐쇄압력의 상한값과 하한값을 결정하였으며, 압력감쇠속도법에 의해 결정한 균열폐쇄압력이 이 범위의 상한값에 보다 가깝게 나타났다.

2) 균열개구압력의 결정에 있어 도해적 방법인 중첩법을 적용한 결과, 이탈개시점의 결정에 있어 주관적 판단이 필요하였다. 따라서, 이런 주관성을 배제시키기 위해 압력 對 주입수 누적부피 자료에 이중선형 회귀분석 방법을 적용하여 균열개구압력을 결정하였다. 가압속도가 일정하지 않은 경우와 압력 및 유량의 변화진폭이 큰 경우, 중첩법에 의해 구한 균열개구압력과 차이가 컸다.

3) 균열방향의 결정에 있어, 수직균열에 대해서 방향성 자료에 대한 통계적 이론을 적용하였으며, 경사균열에 대해서 사인함수를 이용한 회귀분석을 이용하여 균열의 주향과 경사를 결정하였다.

4) 가압주기별 균열폐쇄압력의 상한값과 하한값의 변화양상을 살펴본 결과, 균열확장이 더 이상 발생하지 않는 가압주기에서 보다 안정화되어 감을 확인할 수 있었다.

5) 전시간대 압력 및 유량이력곡선에 나타난 패카압력의 변화양상을 통해 가압시 패카 및 밀착된 암반사이에서 발생하는 전단강도의 증가 등으로 인한 응력집중현상을 확인할 수 있었다. 또한 이는 중균열의 발전을 확인시켜주는 현상으로 판단된다.

6) 아날로그-디지털 신호변환기를 통해 취득된 자료에 포함된 잡음을 제거하기 위한 필터링 기법의 개발, 수압파쇄 장비와 관련한 시스템의 개선, 매개변수에 미치는 패카압력의 영향에 대한 정량적 분석 등 추가적인 연구가 필요하다.

## 사 사

이 연구는 1994년도 한국과학재단 94년 특정연구과제(과제번호 94-0703-06-01-3) "방사성 폐기물의 지하 처분을 위한 암반공동의 부지선정 및 안정성 평가를 위한 연구"의 제1세부과제 중 일부이다.

연구비를 지원해 주신 한국과학재단에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Aamodt, R. and M. Kuriyagawa, 1983, Measurement of instantaneous shut-in pressure in crystalline rock, *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, pp. 139-142, National Academy Press.
2. Bates, M. and G. Watts, 1988, *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*, John Wiley & Sons.
3. Baumgärtner, J. and M. D. Zoback, Interpretation of Hydraulic Fracturing Pressure-Time Records Using Interactive Analysis Methods, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 26, No. 6, pp.461-469.
4. Bush, D. D. and N. Barton, 1989, Application of small-scale hydraulic fracturing for stress measurements in bedded salt, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 26, No.6, pp. 629-635.
5. Doe, T. W., W. A. Hustrulid, B. Leijon, 1983, Ingvald K. and Strindell L. Determination of the state of stress at the Stripa mine, *Sweden. Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, pp. 119-129. National Academy Press.
6. Enever, J. R. and P. N. Chopra, 1986, Experience with hydraulic fracture stress measurements in granite, *Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurement*, pp. 411-420. Centek, Lule
7. Gronseth, J. M. and P. R. Kry, 1983, Instantaneous shut-in pressure and its relationship to the minimum in situ stress, *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, pp. 55-60. National Academy Press,
8. Haimson, B. C., 1980, Near surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* 17, pp.81-88.
9. Haimson, B. C. and C. Fairhurst, 1967, Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, *SPE*, Vol. 7, pp.310-318.
10. Haimson, B. C. and M. Y. Lee, 1987, The state of stress and natural fractures in a jointed precambrian rhyolite in south-central Wisconsin, *Proc. 28th U.S. Symp. on Rock Mechanics*, pp. 231-240.
11. Haimson, B. C., L. Tunbridge, M. Y. Lee and C. Cooling, 1989, Measurement of rock stresses using the hydraulic fracturing method in Cornwall, U.K.-Part II. Data reduction and stress calculation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **26**, pp.595-604.
12. Hickman, S. H. and M. D. Zoback, 1983, The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data from in situ stress determination, *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, pp. 44-54, National Academy Press.
13. Himmelblau, D. M., 1972, *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill.
14. Lee, M. Y. and B. C. Haimson, 1989, Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 26, No. 6, pp.447-456.
15. Mardia, K. V., 1972, *Statistics of directional data*, Academic press.
16. Roegiers, J.-C. and J. D. McLennan, 1983, Factors influencing the initiation orientation of hydraulically induced fractures, *Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, pp. 176-180, National Academy Press.
17. Zoback, M. D. and B. C. Haimson, 1982, Status of hydraulic fracturing method for in situ stress measurements, *Issue in Rock Mechanics Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics*, pp. 143-156. Soc. of Mining Engineers of AIME, New York.
18. 신중호, 1990, 수압파쇄에 의한 삼차원 응력측정과 균열전파특성에 관한 모델실험 및 수치해석적 연구, *서울대학교 박사학위논문*, pp.52-61.
19. 최성웅, 1994, 수압파쇄에 의한 인공슬롯모델의 균열전파 양상 해석과 현지암반 초기지압측정, *서울대학교 박사학위논문*, pp.57-116.