

**통계적 접근법에 의한 수압파쇄 자료해석용  
통합 전산 프로그램 개발 및 그 적용**

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

- 1) 서울대학교 자원공학과 박사과정
  - 2) 한국자원연구소 암반공학연구그룹
  - 3) 서울대학교 자원공학과 교수
- 

## 1. 서론

장대 터널, 지하철, 양수발전소, 유류 비축기지, 핵폐기물 지하처분장 및 농축산물 지하 저장소 등 지하공간개발의 구상 및 그 건설이 활발한 가운데, 그 관련기술에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 지하공간개발을 위한 사전 설계단계 및 시공에 있어 국내·외적으로 현지암반 초기응력 측정은 중요한 요소로 대두되고 있다.

현장에 적용된 수압파쇄 현장시험시 지하암반내의 지질정보의 부족으로 인한 불확실성과 장비의 특성에 기인하는 잡음으로 인해 도해적 방법에 의한 수압파쇄 파라미터 결정에 있어 개연성과 그로 인한 주관성의 개입여지가 존재하였다. 도해적 방법은 나름대로 파라미터 결정에 있어 그 적용성이 높은 반면, 자료의 경향성이 명확하지 않은 경우 주관적 판단의 개입여지가 다분하다. 따라서, 수압파쇄 파라미터 결정에 있어 객관성의 확보가 요구된다. 앞으로 대규모 수압파쇄 현장시험시 해석의 신속성과 용이성 또한 요구되고 있으며, 이를 위해서는 자료해석용 통합 전산 프로그램의 개발이 필요하다.

*HYDFRAC*의 개발을 위해서 Lee와 Haimson이 제안한 통계적 접근법[4]과 Zoback 등이 제안한 접근법[3], 방향성 자료에 적용하는 통계이론[5]을 해석모델을 각각 이용하였다. *HYDFRAC*을 수압파쇄 현장시험 자료에 적용하였으며, 그 적용성 및 신뢰성을 검토하였다.

수압파쇄 파라미터 결정법에 따른 그 값들을 비교·분석하고자 하였으며, 가압주기별 파라미터를 결정함으로써 균열확장과 관련한 파라미터값의 변화를 확인하였다.

## 2. *HYDFRAC*의 구성

*HYDFRAC*은 사용자와의 인터페이스를 원활히 하기 위해 비주얼 베이직 버전 3.0 을 이용하여 윈도우용으로 개발하였다. Fig.1은 *HYDFRAC*의 구성도를 보여주고 있다. 각 수압파쇄 파라미터 결정과 관련해서 그 방법별로 독립적인 루틴들을 가지고 있는 균열폐쇄압력모듈, 균열개구압력모듈, 그리고 균열방향모듈 등 세 개의 모듈로 구성되어 있다. 또한, 새로운 파라미터 결정법을 추가시키기 위해 용의하도록 각 모듈별로 독립적인 루틴들로 구성되어 있다. 균열폐쇄압력모듈에는 지수압력감쇠법(EPD routine), 압력감쇠속도법(PDR routine), 압력-유량법(P-Q routine)의 독립적인 루틴들을 포함하고 있다. 균열개구압력모듈에는 압력 對 누적주입유량 곡선에 이중선형 회귀분석 방법을 적용한 결정법(P-V routine)을 포함하고 있다. 또한, 균열방향모듈에는 수직균열(Vertical routine)과 경

사균열(Inclined routine)을 포함하고 있다.

**HYDFRAC**을 이용한 파라미터 결정은 다음의 3단계를 통해 이루어진다.

- (1) 압력 및 유량이력곡선 출력 및 추정가압주기 결정 (Fig.2)
- (2) 파라미터 결정을 위한 자료화일 생성 및 초기값 결정 (Fig.3)
- (3) 취득 자료의 통계적 분석으로 통한 파라미터 결정

## 2.1. 균열폐쇄압력모듈

수압파쇄시 유체의 압입에 의해 초기파쇄압력 또는 균열개구압력까지 압력이 올라간 뒤에 가압을 중단하면, 압력은 저하하여 일정한 값으로 떨어지게 되는데, 이 때의 압력은 수압파쇄에 의해 생성된 균열을 유지하기에 필요한 최소한의 공내 압력이며, 따라서 균열면에 수직인 방향의 응력을 나타내는 지표로 사용될 수 있다. 따라서 이 때의 균열폐쇄압력은 수압파쇄 구간에 대한 최소 주응력을 직접적으로 나타낸다.

본 모듈은 비선형 회귀분석을 이용하여 균열폐쇄압력 결정법에 따라 3개의 독립적인 루틴들로 구성되어 있다.

### - 지수압력감쇠법 (EPD routine)

가압을 멈추기 전의 압력감쇠는 시험구간 및 균열로부터 인접 암반으로의 인입유체 침투와 수압파쇄균열의 추가적 확장의 결과이다. 압력이 감쇠함에 따라 현지 균열면의 수직 응력과 같은 균열폐쇄압력에도 도달할 것이며, 추가적 압력감쇠는 완전한 균열의 폐합을 일으킬 것이며 이는 주로 암반으로의 방사상 유동의 결과에 기인한다. 인입유체의 방사상 유동에 기인하는 압력감쇠형태를 지수적 함수로 표현한 Muskat 모델을  $P_s$  [2]를 파악하는 방법으로 제안되었다. 이 모델은 다음 식으로 표현된다;

$$P = \exp(d_1 t + d_2) + P_{ai} \quad (t \geq t_1) \quad (2-1)$$

$P$  는 가압구간에서의 압력이며,  $d_1 (< 0)$  와  $d_2$  는 압력감쇠속도를 특징짓는 미지의 매개변수이고,  $P_{ai}$  는 가압구간에서의 압력감쇠의 점근값이고,  $t$  는 가압을 멈추고 압력라인을 폐쇄한 이후의 경과 시간이며, 그리고  $t_1$  는 인입유체의 방사상 유동이 시작되는 시점의 시간이다. 즉, 완전한 균열 폐쇄가 일어나는 시간을 의미한다.

디지털 신호로 취득된 자료와 모델에 근거한 예상압력사이의 최소자승합에 의해 압력감쇠변수( $d_1$ 와  $d_2$ )와 점근값( $P_{ai}$ )을 결정한다. 적합된 모델로부터 곡선의 평균편차를 나타내는 평균자승잔차(the residual mean square-RMS)로 적합정도를 평가한다.;

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

여기서,  $P_i$  은 디지털 압력 자료,  $P_{\mu}$  은 지수압력감쇠모델에 근거한 비선형 회귀분석으로 구한 압력값이고, 그리고  $n$  은 회귀분석에 이용된 자료의 수이다.

Fig.4.(a)는 지수압력감쇠법(EPD routine)의 흐름도를 보여준다. 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 ( $t < t_1$ ) 에 속하는 모든 압력자료는 적합과정에서 제거

된다고 가정한다. 적합된 압력-시간 곡선의 가장 큰 압력치( $P_s^{epd-l}$ )를 수압파쇄에 의한 균열이 완전히 닫힐 때의 압력으로 간주한다; 즉, 이것은 추정 균열 폐쇄 압력치의 하한값이다.

가압을 멈춘 후 바로 균열이 닫혀있다면, 시간  $t = 0$  ( $P_s^{epd-u}$ ) 에서 적합된 지수함수로부터 구한 추정압력치는 순수 방사상 유동이 시작되는 압력을 나타낸다(Fig.5); 즉,  $P_s$  를 얻을 수 있는 범위의 상한값이다;

$$P_s^{epd-l} < P_s < P_s^{epd-u} \quad (2-3)$$

여기서,

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

$$P_s^{epd-u} = \exp(d_2) + P_{al}$$

이다.

### - 이중압력감쇠속도법(PDR routine)

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

$$P = \exp(d_3 t + d_4) + P_{a2} \quad (t < t_s), \quad (2-4)$$

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

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 점근압력치를 나타낸다.

식 (2-4)를 시간에 대해 미분을 함으로써,  $dP/dt$  와  $P$  사이의 이중선형 관계식을 얻을 수 있다.

$$dP/dt = d_3 \exp(d_3 t + d_4) \quad (P > P_s),$$

$$= d_3(P - P_{a2}) \quad (P > P_s),$$

$$dP/dt = d_5 \exp(d_5 t + d_6) \quad (P < P_s),$$

$$= d_5(P - P_{a3}) \quad (P < P_s) \quad (2-5)$$

현장기록치에 적용된 전형적인  $dP/dt$  대  $P$  그래프는 균열폐쇄압력을 찾을 수 있는 전이대에 의해 연결된 두개의 선형부분을 나타낸다(Fig.6). 균열폐쇄압력  $P_s$  을 얻기 위해  $dP/dt$  대  $P$  자료에 비선형 회귀분석(NLRA)을 적용함으로써 최적적합곡선을 정의할 수 있다. 자료값들을 두개의 집단으로 분리시키는 초기 전이점을 먼저 결정한다. 각 그룹사이에 최적적합직선을 얻고, 자료점들과 적합직선 사이의 오차자승합(SSE)을 계산할 수 있다. 반복법을 이용함으로써 비선형 회귀분석을 통해 효과적으로 두개의 일차회귀에 의한 추정값과 자료값에 대해 계산된 오차자승합의 최소로 하는 최적적합 전이점  $P_s^{pdr-II}$  을 결정할 수 있다(Fig.4.(b)).

## 2.2. 균열개구압력모들

균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력보다는 낮은 일정 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 이차파쇄압력(Secondary breakdown pressure),  $P_{sb}$  또는 균열개구압력(Fracture reopening pressure),  $P_r$  이라 하며, 여기서 현지압반 인장강도(In-situ tensile strength),  $T$  를 다음과 같이

구할 수 있다.

$$T = P_b - P_r \quad (2-6)$$

여기서,  $P_b$ 는 초기파쇄압력(Initial breakdown pressure)로서 균열이 발생하는 순간의 압력이다.

균열개구압력모듈에서의 지원되는 결정법은 압력 對 누적주입유량 자료에 이중선형회귀를 적용함으로써 균열개구압력을 결정하는 방법이며, Fig.7.(a)는 균열개구압력이 본 모듈에서 결정되는 과정의 흐름도를 보여준다. 이 결정법은 일정한 강성의 수압파쇄시스템에서 유체압력( $P$ )은 누적주입 유량에 대해 선형적인 관계를 가진다는 사실에 기초한다. 균열면에 대해 수직으로 작용하는 수직응력을 이겨내고 다시 균열이 열리고, 이로 인해 균열상호간에 연결성이 향상된다. 따라서, 주입수는 균열내부로 유동하여 수압파쇄시스템의 강성을 감소시킨다. 이와 같이 수압파쇄시스템의 강성이 변화하는 전이대에서 균열개구압력을 결정하였다(Fig.8).

### 2.3. 균열방향결정모듈

압인페카, 시추공 텔레뷰어, 시추공 카메라, 혹은 다른 검층장비들이 시추공내의 균열 방향을 결정하는데 이용될 수 있다. 이 정보는 현지 응력텐서를 정의 내리는데 매우 중요하다. 그러나 압인페카 상에 나타난 자국이 부분적으로 나타나거나 곡선이 불명확할 경우 균열방향을 결정하는데 어려움이 따른다. 경사균열이나 수직균열의 자국이 명확하지 않을 때 균열방향의 결정을 위해 사인곡선에 의한 적합과 방향성 자료에 대한 통계적 이론에 근거한 기법들을 이용하였다. Fig.7.(b)는 균열방향결정모듈의 흐름도를 보여주고 있다.

#### - 경사균열

경사균열을 포함한 시추공의 절단면은 타원의 형상을 나타낸다. 이는 압인페카의 펼친 그림 상에 사인곡선으로 나타난다. 경사균열의 경사방향은 사인 곡선의 하한극점의 방위에 의해 결정된다; 경사각은 사인곡선의 진폭을 시추공반경으로 나눈 값의 탄젠트역함수로부터 계산된다. 그러나, 균열형태가 부분적으로 나타나거나 단일 균열면을 나타내지 않는 경우 경사균열을 묘사하기란 매우 어렵다. 극점방향과 균열의 높이와 관련한 불확실성들은 균열특성을 파악하는데 심각한 오차를 초래한다. 이들 어려움을 최소화하기 위해 사인함수에 의한 비선형 회귀분석 방법을 사용한다. 시추공을 절단하는 2차원 경사균열은 공벽에 다음의 사인곡선의 형상을 남긴다.

$$D = e_1 + e_2 \sin(E + e_3) \quad (2-7)$$

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  $D-E$  좌표축으로 수치자료화한다. 세 개의 매개변수를 결정하기 위하여 사인함수를 모델로 비선형 회귀분석 방법을 적용하여 상기 식(2-7)에 적합시킨다 (Fig.9). 이를 통해 균열의 주향과 경사를 객관적으로 결정할 수 있다. 균열방향의 불확실성의 정도는 균열의 평면성과 균열을 형성하는 수치자료점들에 의해 결정된다. 평균 경사방향과 그것의 불확실성은 매개변수  $e_3$ 과 그것의 표준편차로부터 계산된다. 평균 경사각과 그것의 불확실성은 매개변수  $e_1$ 와  $e_2$  그리고 그것들의 표준편차로부터 계산된다.

Fig.3.9는 시추공의 내경을 76 mm일 때에 적용한 것으로, 하한 극점의 방위가 균열면의 경사방향이 된다. 균열면의 경사는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$Dip = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (2-8)$$

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

### - 수직균열

균열형태가 수직일 때 식(2-7)의 사인함수 모델을 적용할 수 없다. 압인패카로부터 얻어진 수직균열의 형상은 항상 두개의 직선으로 나타나지 않는다. 직선들은 불연속일 수도 있고, 또는 양장형으로 나타날 수 있다. 균열방향을 결정할 때 주관성을 배제시키기 위해 방향성 자료에 적용하는 통계학적 이론을 이용하였다. 먼저 기준 방위(예, 북쪽)에 대해 균열형상을 타블렛을 이용하여 수치화한다. 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 독립적으로( $E_i = E_i + 180^\circ$ ),  $180^\circ$ 의 차를 두고 이들 그룹 중 하나를 회전시킴으로써 주향의 가능한 범위를  $0 - 180^\circ$ 로 제한할 수 있다. 벡터합을 이용함으로써 합벡터의 방향과 길이를 계산할 수 있다. 균열의 평균방향( $E_o$ )은 합벡터 방향으로 정의 내려지며, 평균방향의 표준편차( $SD$ )는 합벡터의 길이로부터 얻어진다.

$$E_o = \cos^{-1} [X/L] \quad , \quad SD = \frac{[2\ln(L)]^{0.5}}{2} \quad , \quad (2-9)$$

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

식 (2-9)에서  $X, Y$  는 각각  $0^\circ$  와  $90^\circ$  방향을 따라 합벡터의 평균성분들이며,  $n$  는 수치화된 데이터의 수이며,  $L = (X^2 + Y^2)^{0.5}$  는 합벡터의 평균길이이다.

## 3. HYDFRAC의 적용 및 분석

**HYDFRAC**을 시추공 HF, BH, BN에서 얻은 자료에 적용하였다. 균열폐쇄압력의 경우, 압력감쇠 속도법으로 결정한 균열폐쇄압력( $P_s^{pdc}$ )과 도해적 방법인 접선교차법으로 결정한 균열폐쇄압력( $P_s^{tan}$ ) 모두가 지수압력감쇠법으로 결정한 압력범위 내에 존재하였다. 따라서, 균열폐쇄압력치가 존재할 상· 하한값을 결정하는 방법으로서 지수압력감쇠법은 타당함을 확인할 수 있었다. 도해적 방법인 접선교차법의 적용시 압력이력곡선에서 뚜렷한 기울기 변화를 찾기 힘든 경우 주관성 개입여지가 많았다. 시추공 HF, BH의 경우 접선교차법으로 구한 균열폐쇄압력( $P_s^{tan}$ )과 큰 차이는 없었으며, 객관적인 결정이 가능하였다. 세 가지 결정법을 적용한 결과, 압력감쇠속도법과 접선교차법에 의해 결정된 균열폐쇄압력은 지수압력감쇠법으로 결정한 범위의 중간 내지 상한값에 보다 가까웠음을 확인할 수 있었다. 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.10). 균열이 패카의 상· 하부까지 종방향으로 일어난 뒤 더 이상의 균열확장을 멈추고, 이 균열을 따라 주입수가 방사상 유동을 통해 시추공내로 유입에 의한 결과로 추정된다.

균열개구압력의 결정에는 시추공 HF의 경우 중첩을 이용한 도해적 방법과 압력-누적주입유량에 이중선형 회귀분석을 적용한 방법을 비교하였다. 시추공 BH와 BN에는 P-V법을 적용하였다. 중첩에 의한 도해적 방법으로 구한 시추공 HF의 3차 가압주기에서의 균열개구압력은 29.0m에서 1.17 MPa, 35.0m에서 2.55 MPa로 결정되었다. 하지만, 도해적 방법으로는 이탈개시점을 객관적으로 정의 내리기 힘들었다.

Table 1에 나타나듯이 가압주기별로 균열개구압력의 차이가 큰 경우가 있다. 이는 균열확장에 필요한 추가적인 압력을 의미한다. 따라서, 인장강도를 결정하기 위한 균열개구압력은 더 이상의 균열확장이 일어나지 않은 가압주기에서 결정되어야 한다. 압력 대 주입수 누적부피 자료를 이용한 해석의 경우, 유량 및 압력의 진폭이 컸지만, P-V 그래프 상에서 지배적으로 나타나는 이중선형관계를 이끌어낼 수 있었다. 따라서, 적절한 전이점의 결정을 위해 이중선형 회귀분석을 적용하였다.

균열방향의 결정에는 시추공 HF에서 발생한 수직균열에 대해 방향성 자료에 대한 통계적 이론을 적용하였다. 시추공 HF 29.0 m의 경우 균열형상이 단절적이고 양장형으로 나타났으나, 통계적 접근법에 의해 평균방향을 정의 내린 결과 진북방향을 기준으로 75°로 나타났으며, 표준편차는 5.7°로 나타났다. 또한, 시추공 HF 35.0 m의 경우 진북방향을 기준으로 시계방향으로 75°로 나타났으며, 표준편차는 3.4°로 나타났다.

#### 4. 결론

수압파쇄 현장시험을 통해 얻은 자료를 해석할 때, 균열폐쇄압력, 균열개구압력, 균열방향의 결정에 있어 해석자의 주관성이 개입될 여지가 많다. 따라서, 본 연구에서는 수압파쇄 파라미터 결정시 통계적 기법들을 적용함으로써, 객관성을 보완하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 아래와 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 줄이기 위해 압력 對 누적주입유량 곡선에 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, 수직균열에는 방향성 자료에 대한 통계적 이론을 적용하였으며, 경사균열에는 사인함수를 이용한 회귀분석을 이용하여 균열의 주향과 경사를 결정하였다. 단절적이거나 양장형의 균열에 대해 명확한 방향의 결정이 가능하였다.
- 4) 가압주기별 균열폐쇄압력의 상한값과 하한값의 변화양상을 살펴본 결과, 균열확장이 더 이상 발생하지 않는 가압주기에서 보다 안정화되어 감을 확인할 수 있었다.
- 6) 아날로그-디지털 신호변환기를 통해 취득된 자료에 포함된 잡음을 제거하기 위한 필터링 기법의 개발, 수압파쇄 장비와 관련한 시스템의 개선, 파라미터에 미치는 패카압력의 영향에 대한 정량적 분석 등 추가적인 연구가 필요하다.

## 5. 참고문헌

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, 1989, 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. 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.
5. Mardia, K. V., 1972, *Statistics of directional data*, Academic press.
6. 신중호, 1990, 수압파쇄에 의한 삼차원 응력측정과 균열전파특성에 관한 모델실험 및 수치해석적 연구, *서울대학교 박사학위논문*, pp.52-61.
7. 최성웅, 1994, 수압파쇄에 의한 인공슬롯모델의 균열전파 양상 해석과 현지암반 초기지압측정, *서울대학교 박사학위논문*, pp.57-116.

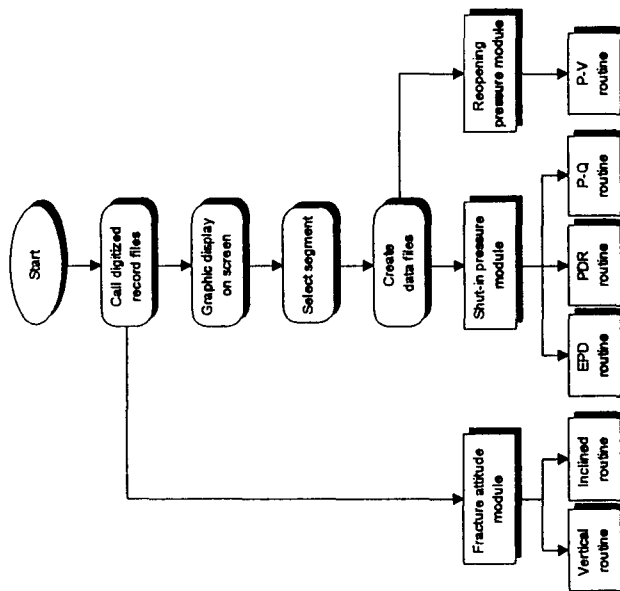


Fig.1 Schematic flow-chart of integrated hydrofracturing data processing program, *HYDFRAC*.

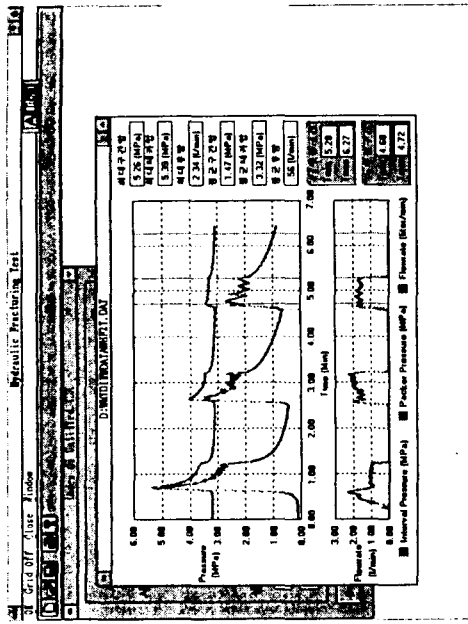


Fig.2 Digitized records of packer and interval pressure-time(top) and flowrate-time(bottom) in *HYDFRAC*.

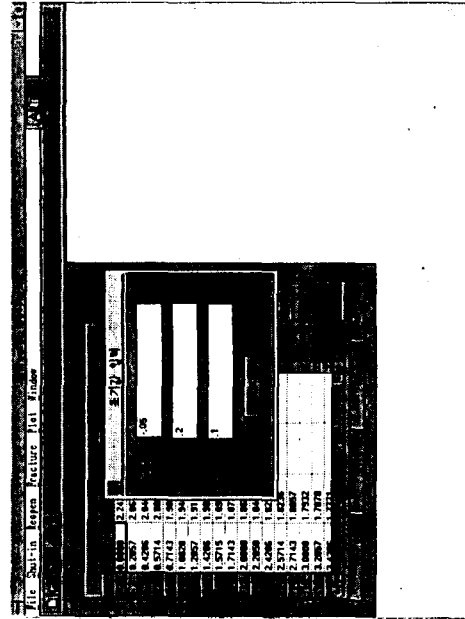


Fig.3 Datasheets of digitized records to be analyzed by NLRA and input panel for initial values(EPD routine) in *HYDFRAC*.



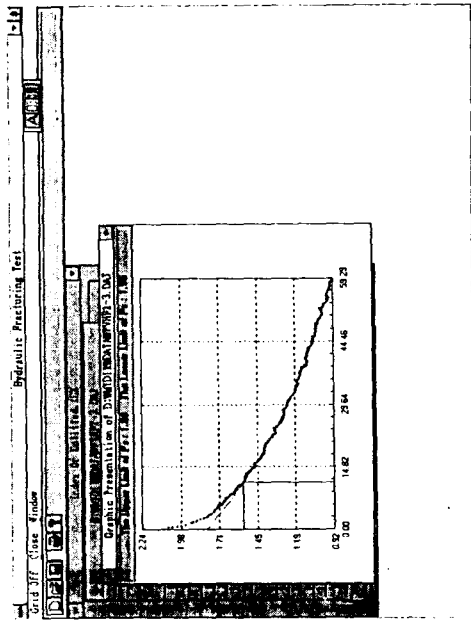


Fig.5 Shut-in pressure determination by exponential pressure-decay method routine in *HYDRAC*.

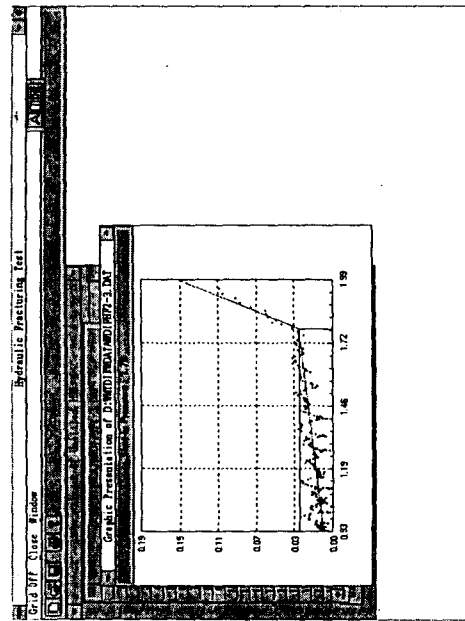


Fig.6 Shut-in pressure determination by bilinear pressure-decay-rate method routine in *HYDRAC*.

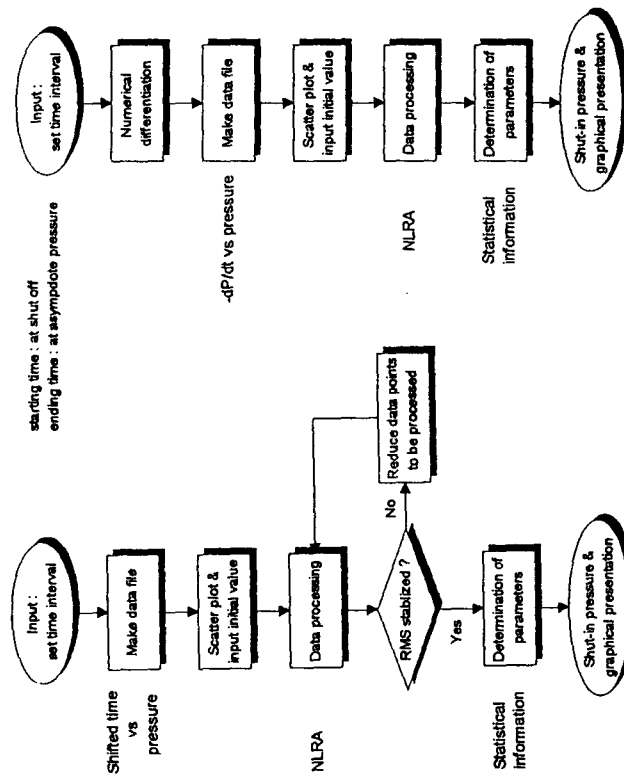


Fig.4 Schematic flow-chart of (a) exponential pressure-decay method routine and (b) bilinear pressure-decay-rate method routine in shut-in pressure estimation module.

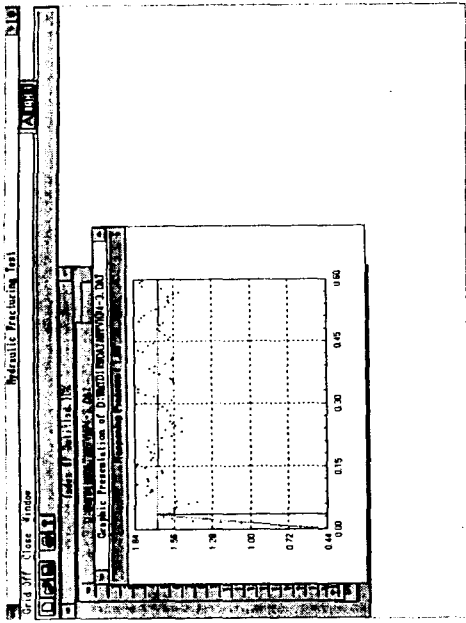


Fig.8 Reopening pressure determination by P-V bilinear method routine in *HYDFRAC*.

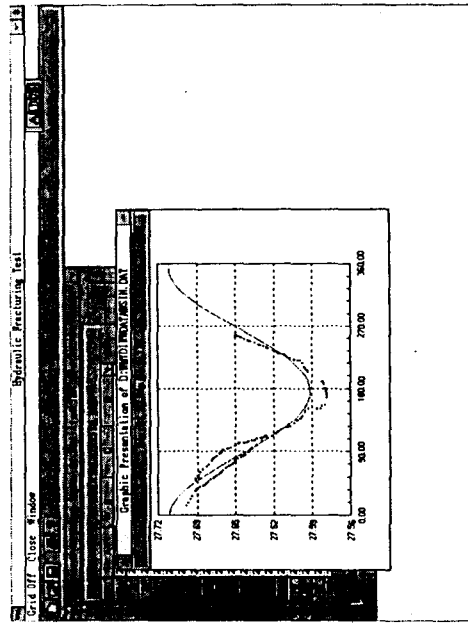


Fig.9 Unwrapped impression packer image showing digitally-traced incomplete inclined fracture and determination of dip and dip direction in *HYDFRAC*.

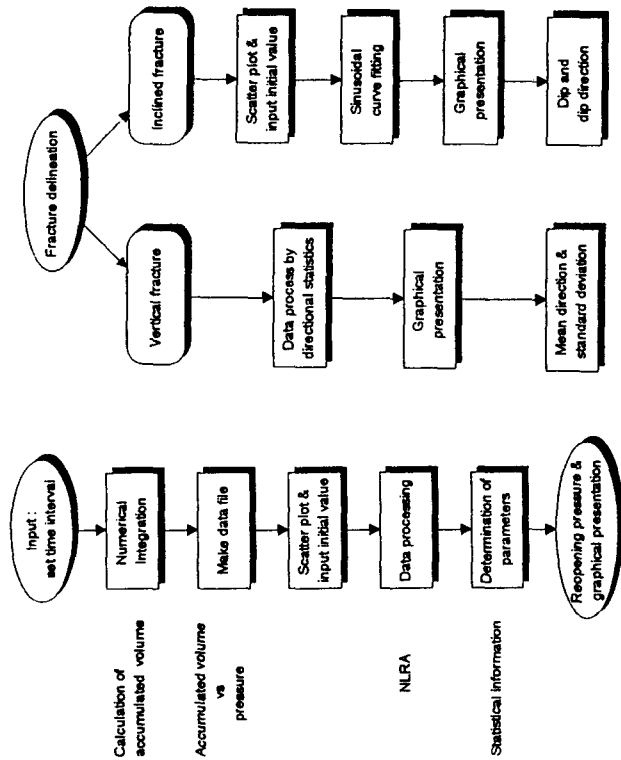


Fig.7 Schematic flow-chart of (a) P-V bilinear method routine in reopening pressure estimation module and (b) vertical routine and inclined routine in fracture delineation module.

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

No. of borehole	Depth (m)	Cycle	$P_s^{exp-1}$ (MPa)	$P_s^{exp-u}$ (MPa)	$P_s^{pdr}$ (MPa)	$P_s^{tan}$ (MPa)	$P_s^{avg-1}$ (MPa)	$P_s^{avg-u}$ (MPa)	$P_r^{pv}$ (MPa)	
HF	29.0	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	
	35.0	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	0.72	0.79	0.72	0.85	3.10
			3	0.72	1.03	0.85	0.87	0.81	0.92	2.03
39.5		4	0.74	0.95	0.80	0.84	0.79	0.86	1.96	
		2	0.61	0.89	0.81	0.82	0.75	0.84	1.48	
22.5		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	

$P_s^{exp-1}$  and  $P_s^{exp-u}$  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.

$P_s^{avg-1}$  = average shut-in pressure using  $P_s^{exp-1}$ ,  $P_s^{pdr}$  and  $P_s^{tan}$

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

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

Fig.10 Upper and lower limits of shut-in pressures by EPD method and shut-in pressures by PDR method in each pressurization cycles.

