

## 다중으로 분할된 수압파쇄균열의 상호작용에 관한 연구

### A Study on the Interaction of Segmented Hydraulic Fractures

심 영 종<sup>1</sup> Sim, Young-Jong

김 홍 택<sup>2</sup> Kim, Hong-Taek

#### Abstract

Recent observations based on geological evidence and laboratory tests confirm that complex segmentation of hydraulic fractures is common phenomena. It is expected that the segmentation causes mechanical interaction between the fractures and affects fracture opening and measured net pressure. In this study, therefore, the opening of the fractures is computed using boundary collocation method to evaluate the mechanical interaction quantitatively. Also, improved boundary collocation method is suggested to evaluate the displacement of the fracture wall accurately and the reliability of this method is confirmed by comparing with that of the finite element method.

#### 요 지

최근 지질학적 증거, 실내 및 현장 실험을 통해 복잡한 형태의 분할된 수압파쇄균열이 암반에서 자주 관찰되고 있다. 이러한 수압파쇄균열의 분할은 균열간의 기계적 상호작용을 유발하며 균열의 폭이나 측정되는 압력에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 연구는 균열간의 상호작용을 정량화하기 위하여 수압파쇄에 의해 다중으로 분할된 총변위를 경계병치법을 사용하여 계산하였다. 또한 기존의 경계병치법을 보정하여 정확한 균열의 상단과 하단 변위를 평가하였으며 유한요소법과의 비교를 통해 제시된 기법의 신뢰성을 확인하였다.

**Keywords :** Boundary collocation method, Displacement, Hydraulic fracture, Mechanical interaction, Opening, Segmentation

#### 1. 서 론

지난 수십 년 동안 수압파쇄(hydraulic fracturing)는 암반의 투수성을 증가시키기 위하여 석유나 가스의 생산(Veatch 등, 1983; Economides와 Nolte, 2000), 지하열의 추출(Nemat-Nasser, 1983), 광산 채굴 이전 가스제거(Diamond와 Oyler, 1987)에 이용되어 왔으며 지반을 보강하기 위하여 그라우팅(Soga 등, 2004)기법에 이용되어 왔다. 이외에도 현장 암반응력의 측정(Haimson, 1978;

Shin 등, 2001), 폐기물 처리(Withers 등, 1996), 오염된 지하수의 정화(Hocking와 Wells, 2002; Murdoch와 Slack, 2002) 등 많은 분야에 응용이 되어 왔다. 이러한 수압파쇄에 의한 적절한 결과는 생성되는 균열의 형태와 지각의 응력 상태에 따라 크게 좌우된다. 이것이 바로 유체(fluid)와 암반(rock mass) 사이의 상호작용을 명확히 하기 위한 수압파쇄 연구가 활발한 이유이다.

수압파쇄균열의 형태는 주위 암반의 기계적, 열적, 화학적 상태에 따라 주로 영향을 받아 지표면 근처나

1 정회원, 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터 연수연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Smart Infra-Structure Technology Center, KAIST, yjsim@kaist.ac.kr)

2 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지하 깊은 곳에서도 복잡한 구조 형태를 보인다. 따라서 유체를 주입하여 균열이 형성되는 과정을 이해하는 것은 실용적으로 이의 효과를 극대화하기 위해 매우 중요하다. 자연에서 형성되는 수압파쇄균열은 암맥(dike), 맥(vein), 또는 절리(joint)와 같은 형태로 모든 축척에서 나타나는데 이러한 균열들의 기계적 거동은 다방면으로 산업현장에서 응용되어 사용되는 수압파쇄균열의 거동과 유사하다. 그 이유는 자연적인 수압파쇄균열은 주위 암반에서 유체(마그마, 물, 가스)의 압력, 원응력(remote stress) 또는 두 압력의 결합에 의해 유발되는 opening mode로부터 생성되기 때문이다.

실제로 균열의 분할은 수압파쇄균열의 복잡성에 크게 기여하는 한 부분이다. 지질학적 증거, 실내 및 현장 실험을 통한 최근의 관찰에 의하면 다중으로 분할된 수압파쇄균열은 흔히 발견되는 현상임을 보여주고 있다. 이러한 수압파쇄균열의 분할은 균열간의 기계적 상호작용을 유발하여 생기는 총변위(opening or displacement discontinuity) 및 변위(discontinuity)에 직접적으로 영향을 끼치는 동시에 측정되는 압력에도 지대한 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 실제로 균열의 분할이 균열의 폭이나 측정되는 압력에 영향을 끼친다면 여러 응용분야에 직간접으로 영향을 끼칠 것이 예상되므로 설계나 해석단계 시 주의가 필요하게 된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 응용분야의 기초적인 연구를 제시할 목적으로 다중으로 분할된 균열의 총변위 및 변위를 계산하여 균열간의 기계적 상호작용의 영

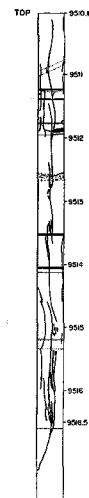
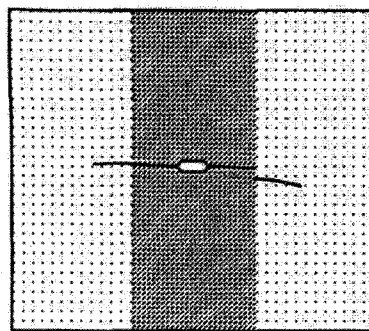
향을 정량화하여 이의 중요성을 제기하였다. 동시에 이러한 균열 해석을 위한 수치해석기법으로 경계병치법을 사용하였으며 정확한 변위를 계산하기 위한 방법도 제시하였다. 또한 유한요소법과의 결과를 비교하여 경계병치법에 의해 계산된 총변위와 변위의 신뢰성도 언급하고자 하였다.

## 2. 수압파쇄균열의 분할

서론에서 간단히 언급하였듯이 자연에서 생성되는 수압파쇄균열은 흔히 암맥이나 맥, 또는 절리의 형태로 발견된다. 이러한 수압파쇄균열의 관찰을 통해 수압파쇄에 대한 다양한 연구가 시도되고 있다. 예를 들어, 암맥의 형태를 관찰하면 다중으로 분할된 형태의 암맥이 흔히 나타남을 알 수 있다.

또한 수압파쇄균열의 형상 및 진행을 연구하기 위한 많은 실험이 행해져 왔다. 그림 1(a)는 비교적 균질한 재료인 젤라틴(gelatin)에 액체인 슬러리를 주입하였을 때 수압파쇄균열의 발생을 보여주는 실험이다. 균열의 분할과 중첩(overlap)이 균열단(점선부분)에서 발생했음을 보여주고 있다. 그림 1(b)는 균열이 다른 재료와의 경계면을 지날 때 균열이 불연속적으로 갈라져 진행하고 있는 실험결과이다. 그림 1(c)는 현장에서 보어홀내에 수압파쇄 실시 이후 생성된 균열의 모습을 스케치한 그림으로 많은 수의 균열이 분할되어 있는 모습이다.

이상과 같이 지질학적 증거나 다수의 실내의 실험 결



(a) 균질한 재료에서의 균열의 분할(Hubbert와 Willis, 1957) (b) 경계면에서의 균열의 Offset(Renshaw와 Pollard, 1995) (c) 보어홀내의 다중분할 균열(GRI, 1991)

그림 1. 수압파쇄 균열의 분할

과에 의하면 다중으로 분할된 수압파쇄균열의 생성은 흔히 발견되는 현상이므로 이에 대한 영향을 고려해야 함을 알 수 있다. 이러한 균열의 분할은 불안정한 균열의 진행, 암반의 비균질성 및 암반내 응력의 비균질성에 기인한다고 볼 수 있다.

### 3. 경계병치법의 원리 및 보장

본 논문에서는 암반을 균질한 탄성체라 가정하고 McCartney와 Gorley(1987)가 제시한 수치해석기법인 경계병치법(Boundary Collocation Method)의 원리를 간단히 소개하고 보장하여 서로 교차하지 않는 임의의 복수균열에 대한 문제를 해석하고자 한다. 대부분의 탄성균열이론의 주요목적은 총변위나 변위를 계산하기보다는 응력집중계수(Stress Intensity Factor)를 계산하는 데에 초점이 맞춰져 있다. McCartney와 Gorley(1987)가 제시한 경계병치법 역시 응력집중계수를 검증하는 데에 중점을 두고 있으며 총변위나 변위를 계산하는 식에 대한 검증이 이루어지지 않았다. 그러나 수압파쇄와 같이 유체의 주입에 의한 대부분의 응용분야에서는 압력과 직접적으로 관련이 있는 균열의 총변위와 변위를 계산하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 균열간의 기계적 상호작용을 고려한 균열의 총변위 및 변위를 경계병치법을 사용하여 계산할 수 있도록 유한 요소와의 비교를 통하여 신뢰성을 확보하고자 한다.

#### 3.1 경계병치법의 원리

경계병치법은 규정된 경계면, 즉 균열면에 유한개의 점을 병치하여 주위의 경계조건을 만족시키는 방법으로, 체비셰프 다항식을 근사함수로 이용하여 응력집중계수(stress intensity factor)뿐만 아니라 균열의 변위를 쉽게 구할 수 있어 일련의 탄성문제를 간단하게 해결할 수 있는 장점을 가지고 있다.

McCartney와 Gorley(1987)가 제시한 경계병치법의 원리를 간단히 소개하면, 우선 두 균열이 무한평면에 그

림 2처럼 각각  $z_1 = x_1 + iy_1$ 와  $z_2 = x_2 + iy_2$ 의 위치에 있다고 가정하자. 여기서  $i$ 는 복소수를 나타내며, 기지의 두 힘,  $p_1(z_1) = \sigma_1 + i\tau_1$ 과  $p_2(z_2) = \sigma_2 + i\tau_2$ 가 각각 두 균열에 작용하고 있다. 여기서,  $\sigma$ 와  $\tau$ 는 수직력과 전단력이다. 중첩의 원리에 의하여 이 문제는 그림 2처럼 각각 한 개의 균열이 있는 두가지 경우의 보조문제로 나뉘어 질 수 있다. 첫 번째 보조문제에서, 첫 번째 균열에 작용하는 미지의 힘  $q_1 = s_1 + it_1$ 은 두 번째 균열이 위치한 자리( $z_2$ )에 응력의 변화를 유발한다. 마찬가지로, 두 번째 보조문제에서 두 번째 균열에 작용하는 미지의 힘  $q_2 = s_2 + it_2$ 는 첫 번째 균열이 위치한 자리( $z_1$ )에 응력의 변화를 유발시킨다. 결과적으로 원래의 문제는 두 보조문제의 합으로 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} p_1(z_1) &= q_1(z_1) + \Delta q_2(z_1) \\ p_2(z_2) &= \Delta q_1(z_2) + q_2(z_2) \end{aligned} \quad (1)$$

위와 같은 방법으로 N개의 균열에 대해서도 N개의 보조문제의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 연립 방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & - \sum_{m=1}^{M_n} (\alpha_m^n + i\beta_m^n) U_{m-1}(z_n^j) + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq n}}^N \sum_{m=1}^{M_r} (\alpha_m^r I_m^r(z_n^j) + \beta_m^r J_m^r(z_n^j)) \\ & + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq n}}^N e^{2i(\theta_r - \theta_n)} \left[ \sum_{m=1}^{M_r} \beta_m^r (iI_m^r(z_n^j) - J_m^r(z_n^j)) + \sum_{m=1}^{M_r} (\alpha_m^r - i\beta_m^r) (K_m^r(z_n^j) + iL_m^r(z_n^j)) \right] \\ & = \sigma_n(z_n^j) - \sigma_\infty + i[\tau_n(z_n^j) - \tau_\infty] \end{aligned} \quad (j=1, \dots, M_n, n=1, \dots, N) \quad (2)$$

위의 식에서  $\alpha_m$ 과  $\beta_m$ 은 결정되어야 할 미지수이며 M은 각 균열에 사용된 병치점의 수이다.  $U_m(\xi) = \sin((m+1)\arccos(\xi))/\sin(\arccos(\xi))$ 은 m차 체비셰프의 제 2종 다항식이며,  $\xi = x/c$ 은 균열의 무차원 좌표이다. 또한  $z_n^j = x_n^j + iy_n^j$ 은 균열경계면에 존재하는 병치점이며,  $\theta_r$ 과  $\theta_n$ 은 각각 r번째와 n번째 균열의 x축에 대한 각도이다. 그리고 함수,  $I_m^r, J_m^r, K_m^r$ 과  $L_m^r$ 은 다음과 같이 각각 정의된다.

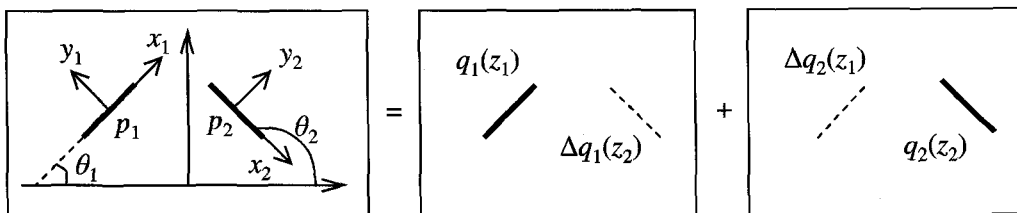


그림 2. 상호작용하는 두 균열의 한 개의 균열이 있는 보조문제로의 분리

$$I_m^i(z) + iJ_m^i(z) = \frac{G_m(\zeta_r)}{\sqrt{\zeta_r^2 - 1}} \quad (3.a)$$

$$K_m^i(z) + iL_m^i(z) = \frac{1}{2}(\zeta_r - \bar{\zeta}_r) \left\{ \frac{m}{\sqrt{\zeta_r^2 - 1}} + \frac{\zeta_r}{\zeta_r^2 - 1} \right\} \frac{G_m(\zeta_r)}{\sqrt{\zeta_r^2 - 1}} \quad (3.b)$$

$$G_m(\zeta_r) = \{\zeta_r - \sqrt{\zeta_r^2 - 1}\}^m, \quad (m \geq 1) \quad (3.c)$$

$$\zeta_r = \frac{2z - t_1^r - t_2^r}{t_2^r - t_1^r} \quad (3.d)$$

$$z = \frac{1}{2}(t_2^r + t_1^r) + \frac{1}{2}\zeta_r(t_2^r - t_1^r) \quad (3.e)$$

여기서,  $t_1^r$ 과  $t_2^r$ 은  $r$ 번째 균열단의 위치를 나타내는 복소수이며  $\zeta = z/c$ 이다. 식 (2)에서 좌변의 첫째 항은  $n$ 번째 균열의 미지의 힘  $q$ 를 나타내며, 두번째와 세번째 항은 다른 균열에 의한 상호작용의 영향을 의미한다. 식 (2)의 우변은 기지의 힘으로 경계조건에서 구해진다. 다시 말해,  $\sigma_n(z) + i\tau_n(z) = p_n(z)$ 은  $n$ 번째 균열면에 직접 작용하는 힘이며  $\sigma_\infty + i\tau_\infty = p_\infty$ 은 원거리에서 작용하는 힘을 의미한다. 결과적으로 식 (2)로부터 미지의 실계수  $\alpha_m$ 과  $\beta_m$ 을 계산하면 균열의 응력집중계수는 물론 균열의 변위를 쉽게 계산할 수 있다. 응력집중계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_I + iK_{II} = \sqrt{\pi c} \sum_{m=1}^M (\pm 1)^{m+1} (\alpha_m + i\beta_m) \quad (4)$$

여기서,  $K_I$ 과  $K_{II}$ 는 각각 mode I과 mode II의 응력집중계수,  $c$ 는 균열의 절반크기이며 “+”와 “-”는 균열단에서  $\xi > 0$ 와  $\xi < 0$ 인 경우의 응력집중계수를 나타낸다. 전단변위( $u$ )와 수직변위( $v$ )를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$u - iv = \frac{c}{4G} e^{i\theta} \left[ \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} (\alpha_m + i\beta_m) (G_m(\zeta) - \kappa \overline{G_m(\zeta)}) + (\zeta - \bar{\zeta}) \sum_{m=1}^M (\alpha_m - i\beta_m) \frac{G_m(\zeta)}{(\zeta^2 - 1)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

여기서,  $G = E/[2(1+\nu)]$ 는 전단강성계수,  $\nu$ 는 포아송 비,  $\kappa = 3 - 4\nu$ 이다. 위의 식 (5)로부터 균열의 총수직변위( $\Delta v = v^+ - v^-$ )와 총전단변위( $\Delta u = u^+ - u^-$ )는 다음과 같다.

$$\Delta v + i\Delta u = \frac{4c(1-\nu^2)}{E} \sqrt{1-\xi^2} \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} (\alpha_m + i\beta_m) U_{m-1}(\xi) \quad (6)$$

### 3.2 경계병치법의 보정

McCartney와 Gorley(1987) 의해 제시된 식 (5)는 원

래의 문제가 아닌 한 개의 균열이 있는 보조문제에서의 균열의 변위임을 확인하였다. 따라서, 원래의 문제에서의, 즉,  $N$ 개의 균열이 동시에 존재하는 상태에서의 균열의 변위를 구하기 위해서는 다른 모든 보조문제에서 발생하는 변위를 그 자리에 위치한 균열의 변위에 보정하여 균열간의 기계적 상호작용의 영향이 제대로 고려되어야 한다. 다음 절에서 경계병치법에 의해 보정되어 계산된 변위를 유한요소에 의해 계산된 값과 비교하여 보정되어 계산된 변위의 신뢰성을 확인하였다.

## 4. 균열간의 기계적 상호작용 및 유한요소법과의 결과 비교

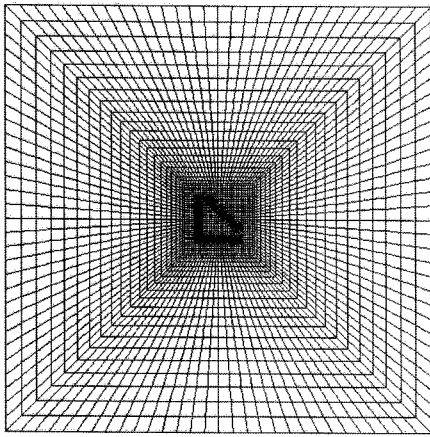
### 4.1 세 방향 균열의 총변위

균열간의 기계적 상호작용을 정량적으로 평가하기 위하여 균열의 총변위를 계산하여 상호작용을 고려하지 않은 경우와 비교하였다. 우선 McCartney와 Gorley(1987)가 제시한 경계병치법의 변위에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 세 개의 균열이 있는 간단한 경우의 총수직변위와 총전단변위를 계산하였다. 그러나 가장 간단한 경우인 임의의 두 개의 균열을 다루는 데 있어서 변위를 정확히 계산할 수 있는 이론식이 존재하지 않으므로 Wawrzynek과 Ingraffea(1987)에 의해 개발된 2차원 유한요소 프로그램인 FRANC(FRACTURE ANALYSIS CODE)2D를 사용하여 그 결과를 경계병치법에 의해 계산된 값과 비교하였다. 우선 크기와 각도가 서로 다른 세 개의 균열의 제반사항과 유한요소망이 표 1과 그림 3(a)에 각각 나타나 있다. 균열 내부에 작용하는 순압력(net pressure: 원응력과 균열내부에 작용하는 응력의 차이)은 모두 같은  $p_1 = p_2 = p_3 = 1 \text{ Pa}$ 을 사용했으며 재료의 포아송비와 탄성계수는 각각  $\nu = 0.21$ 과  $E = 1 \text{ Pa}$ 을 사용하였다. 그 결과 변형된 균열의 열린 모습이 그림 3(b)에 나타나 있다. 또한 경계병치법을 위한 각 균열의 병치점의 수와 밀도도 각각 표 1과 그림 4에 나타나 있다.

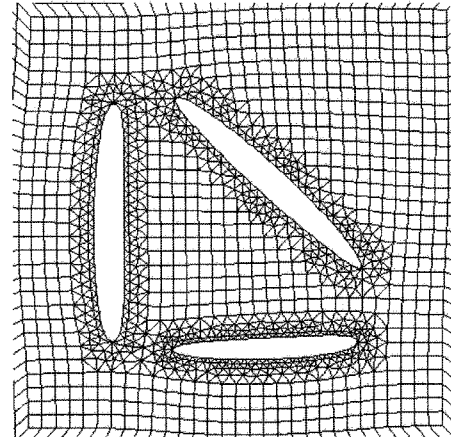
식 (6)과 유한요소에 의해 계산된 총수직변위와 총수평

표 1. 세 방향 균열의 배열

균열형태	중심좌표 (x, y)	각도 (°)	크기 2c (m)	병치점 수 M
수평균열	(1.7, 0.6)	0	1.4	30
수직균열	(0.6, 1.5)	90	1.8	35
경사균열	(1.7, 1.75)	-42.89	1.91	40



(a) 유한요소망



(b) 변형된 세 개의 균열

그림 3. 유한요소해석을 위한 세 균열

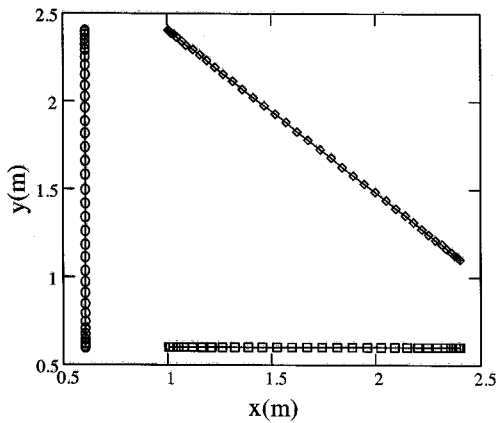
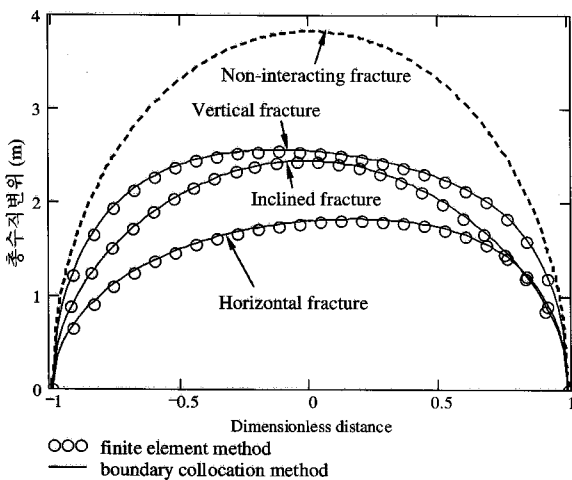


그림 4. 각 균열에서 병치점의 밀도

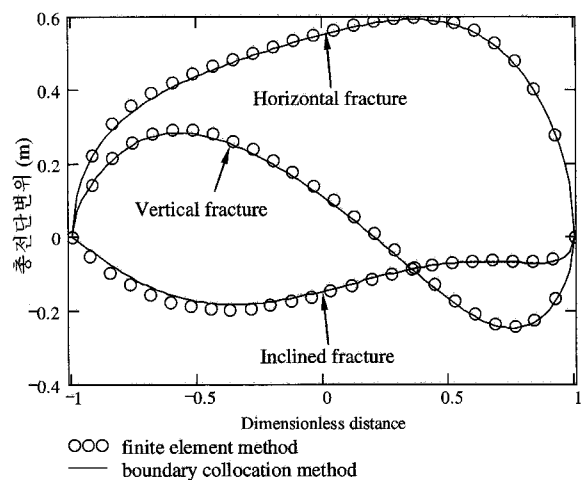
변위를 비교한 결과 그림 5에 나타난 바와 같이 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 5에서 세 균열 모두 서로 다른 크기이지만 각 균열의 크기로 무차원화시켜 x축에 나타내었다.

결과적으로 경계병치법에 의한 총수직변위와 총전단변위는 유한요소와 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있다.

세 균열간의 상호작용을 무시하였을 경우(그림 5(a)의 점선)의 수직균열의 중앙에서의 총수직변위를 유한 요소에 의해 계산된 값과 비교한 결과 50%정도까지 차이를 보이며, 수평균열에서는 110%정도까지 큰 차이를 보여 균열간의 상호작용이 균열의 변위에 상당히 영향을 끼침을 알 수 있다. 결과적으로 균열간의 상호작용을 고려하지 않는다면 각 균열의 변위는 과다하게 평가될 수 있음을 알 수 있다. 이는 석유나 가스 생산과 지하열의 추출을 위해 투수성을 증가시키는 응용분야에서 균열간의 상호작용을 고려하지 않는다면 세 개의 균열이 발생하였을 경우 주어진 유체 주입량에 목표로 하는 균열의 변위에 미치지 않음을 그림 5(a)의 결과로부터 알 수 있다.



(a) 총수직변위



(b) 총전단변위

그림 5. 유한요소법과의 총변위 비교치

#### 4.2 평행한 두 균열의 변위

경계법치법에 의해 계산된 수압파쇄균열의 변위를 유한요소 프로그램인 FRANC2D를 사용하여 계산된 값과 비교하기 위하여 그림 6과 같이 서로 평행한 두 균열을 예로 들었다. 총변위가 아닌 변위를 계산하게 되면 균열의 형상을 정확하게 예측할 수 있다. 두 균열의 간격은  $S=0.1\text{ m}$ 로 가깝게 위치해 있어 균열간의 상호작용이 상당할 것으로 예상된다. 균열의 크기와 균열 내부에 작용하는 순압력은 각각  $2c=2\text{ m}$ 와  $p=1\text{ Pa}$ 을 사용하였다. 재료의 포아송비와 탄성계수는 각각  $\nu=0.25$ 와  $E=1\text{ Pa}$ 을 사용하였으며 사용된 병치점의 수는  $M=200$ 이다. 비록

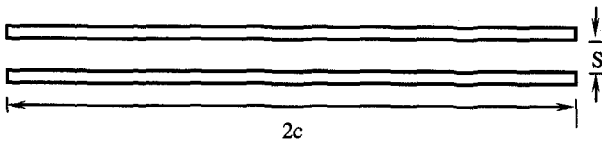
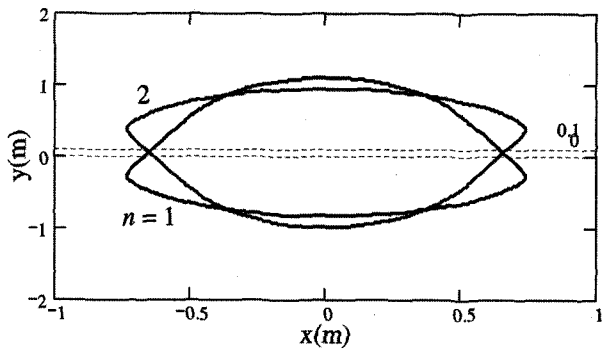
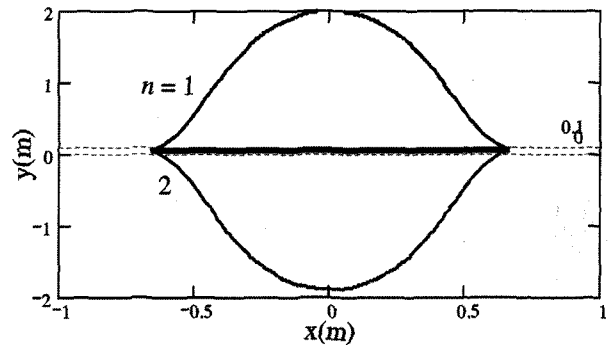


그림 6. 평행한 두 균열

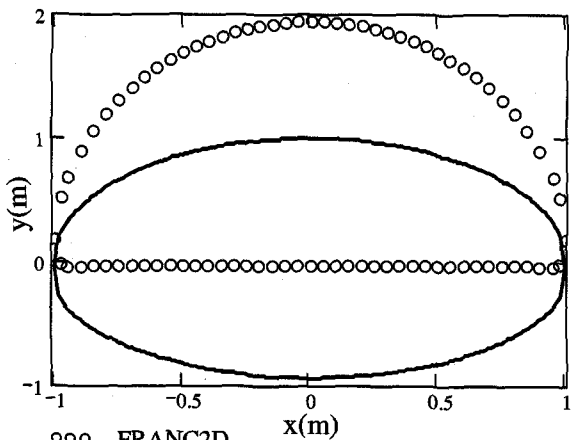


(a) 보정 전

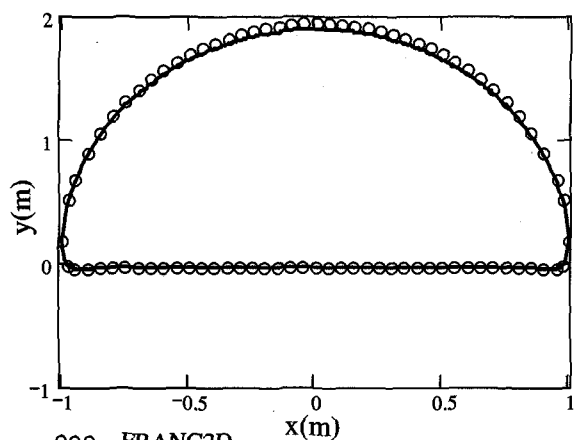


(b) 보정 후

그림 7. 평행한 두 균열의 변위 형상



(a) 보정 전



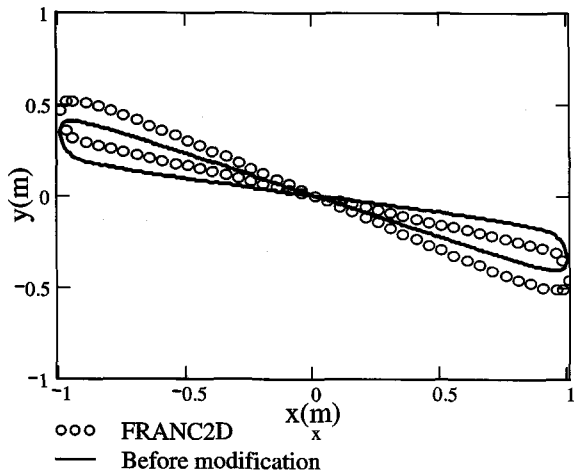
(b) 보정 후

그림 8. 유한요소법과의 수직변위 비교

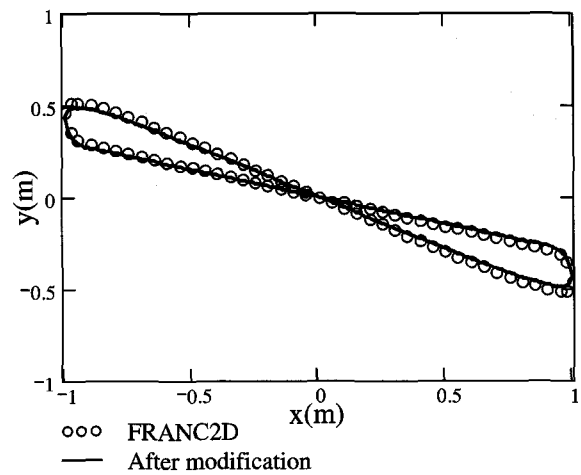
식 (6)에서 제시된 총변위는 유한요소법에 의해 계산된 값과 비교한 결과 정확하지만 제시된 식 (5)에 의한 변위는 해당하는 보조문제에서의 변위를 의미하므로 보정되어야 한다. 따라서, 원래의 문제, 즉 두 균열이 동시에 존재하는 상태에서의 변위를 구하기 위해서는 다른 보조문제에서 발생하는 변위를 동일한 위치의 균열의 변위에 더해 주는 방식으로 보정해주어야 한다.

그림 7은 이러한 수압파쇄균열의 보정 전과 후의 변위 형상을 나타낸다. 그림 7(a)에서 나타나듯이 보조문제에서의 변위형상을 나타내므로 실제의 변위형상이라고 할 수 없다. 그림 7(b)는 이러한 점을 보정한 변위형상으로 실제 수압파쇄균열이 변형이 되는 형상을 나타내고 있다. 그림 7에서 점선은 두 균열이 원래 내부압력을 받기 전의 위치를 나타내고 있다.

이렇게 보정되어 계산된 균열 변위의 신뢰성을 얻기 위하여 유한요소 프로그램인 FRANC2D와 비교하였다. 그림 8과 그림 9는 첫번째 균열의 보정 전과 후의 수직



(a) 보정 전



(b) 보정 후

그림 9. 유한요소법과의 전단변위 비교

변위와 전단변위를 각각 유한요소법과 비교한 결과를 나타내고 있는데 보정 후 잘 일치함을 보여주고 있다.

또한 균열간의 상호작용을 고려하지 않는다면 타원형 형태의 균열 형상을 예측할 수 있는데 그림 8(b)에 나타난 바와 같이 단순히 타원형 형상이 아니므로 균열간의 상호작용이 크게 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다중으로 분할된 수압파쇄균열의 기계적 상호작용의 영향을 정량화하기 위하여 경계병치법을 사용하여 균열의 총변위를 계산하였으며 유한요소법에 의한 결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다. 균열간의 상호작용을 고려하지 않은 경우 총변위는 실제의 경우와 100%가 넘는 오차를 나타냈으며, 이 결과로부터 균열간의 상호작용은 균열의 총변위에 상당히 영향을 끼침을 확인하였다.

또한 균열의 변위를 계산하기 위하여 보정된 기법의 경계병치법을 제시하였으며 유한요소와 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 이 경우에도 균열의 형상은 상호작용을 고려하지 않게 될 경우 나타나는 단순한 타원형이 아님을 확인할 수 있었다.

이와 같이 다중으로 분할된 균열의 총변위 및 변위 계산을 통해 본 결과 균열간의 상호작용은 균열의 변위에 상당히 영향을 끼침을 알 수 있으며 동시에 측정되는 내부 압력에도 상당한 변화가 예상됨을 알 수 있다. 결론적으로 수압파쇄에 의해 생성되는 균열은 다중으로 분할된 균열이 대부분이며 균열간의 상호작용이 예상

되는 바 이러한 상호작용은 고려가 되어야 함을 알 수 있다. 추후 수압파쇄와 관련된 응용분야에 적극 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. Diamond, W.P. and Oyler, D.C. (1987), "Effects of Stimulation Treatments on Coalbeds and Surrounding Strata, Evidence from Underground Observations", *Report of Investigations 9083*, U.S. Department of the Interior.
2. Economides, M.J. and Nolte, K.G. (2000), *Reservoir Stimulation*, 3rd Edition, John Wiley & Sons.
3. GRI (1991), *GRI staged field experiment no 3.*, Report #GRI-91\0048.
4. Haimson, B.C. (1978), "The Hydrofracturing Stress Measuring Method and Recent Field Results", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 15, pp.167-178.
5. Hocking, G. and Wells, S. (2002), "Design, Construction and Installation Verification of a 1200 Long Iron Permeable Reactive Barrier", *8<sup>th</sup> Annual Florida Remediation Conference*.
6. Hubbert, M.K. and Willis, D.G. (1957), "Mechanics of Hydraulic Fracturing", *Petroleum Transactions*, AIME, 210, pp.153-166.
7. McCartney, L.N. and Gorley, T.A.E. (1987), "Complex Variable Method of Calculating Stress Intensity Factors for Cracks in Plates", *Numerical Methods in Fracture Mechanics, Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference*, San Antonio, pp.55-72.
8. Murdoch, L.C. and Slack, W.W. (2002), "Forms of Hydraulic Fractures in Shallow Fine-Grained Formations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), pp.479-487.
9. Nemat-Nasser, S. (1983), "Thermally Induced Cracks and Heat Extraction from Hot Dry Rocks", in *Mechanics of Elastic and Inelastic Solids 5, Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy*, Martinus Nijhoff Publishers, pp.528, 1983.
10. Renshaw, C.E. and Pollard, D.D. (1995), "An Experimentally Verified Criterion for Propagation across Unbounded Frictional

- Interfaces in Brittle, Linear Elastic Materials”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(3), pp.237-249.
11. Shin, K., Sugawara, K., and Okubo, S. (2001), “Application of Weibull’s Theory to Estimating in Situ Maximum Stress  $s_H$  by Hydrofracturing”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, pp.423-420.
  12. Soga, K., Au, S.K.A., Jafari, M.R., and Bolton, M.D. (2004), “Laboratory Investigation of Multiple Grout Injections into Clay”, *Geotechnique*, 54(2), pp.81-90.
  13. Veatch, R.W. (1983a), “Overview of Current Hydraulic Fracturing Design and Treatment Technology-Part 1”, *Journal of Petroleum Technology*, pp.677-687.
  14. Wawrzynek, P.A. and Ingraffea, A.R. (1987), “Interactive Finite Element Analysis of Fracture Processes: An Integrated Approach”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 8, pp.137-150.
  15. Withers, R.J., Perkins, T.K., and Keck, R.G. (1996), “A Field Demonstration of Hydraulic Fracturing for Solids Waste Disposal, Part Two: Real-Time Passive Seismic Monitoring System and Data Analysis”, *Deep Injection Disposal of Hazardous and Industrial Waste, Scientific and Engineering Aspects*, Academic Press.

(접수일자 2005. 5. 2, 심사완료일 2005. 11. 5)