

다중으로 분할된 자연수압파쇄 균열 모델링

Modeling of Highly Segmented Fluid-Driven Natural Fractures

심 영 종[†]

Sim, Young-Jong

ABSTRACT : Fracturing technique using fluid injection into the borehole is widely used technology in the industry for the geothermal heat, oil, and gas extraction. Dealing with fluid-driven natural fractures such as dike and vein indirectly, design technology would be improved by adapting their principles. In this paper, mechanical interaction between the segments is evaluated by modeling highly segmented and closely spaced fluid-driven natural fractures. The number of segments is 71 with 3,339 measured apertures in which the interaction is considerably predicted. To evaluate mechanical interaction, boundary collocation method is used and the net pressure is calculated by using least square method to fit measured apertures. As a result, in case that mechanical interaction is considered, two pressures as fitting parameters are sufficient to capture measured apertures.

Keywords : High segmentation, Fracturing technique using fluid injection, Fluid-driven natural fractures, Mechanical interaction, Boundary collocation method

요 지 : 수압파쇄기술은 주로 지열, 석유, 가스 추출 시 지반의 투수성을 증가시키기 위해 사용되는 공법으로 자연에서 생성된 수압파쇄균열의 원리를 적용함으로써 실제 설계기법을 발전시켜 나아가고 있다. 본 논문에서는 균열간 거리가 아주 근접한 다중으로 분할 생성된 자연 수압파쇄균열을 대상으로 균열간 기계적 상호작용의 영향을 평가하였다. 균열의 수는 71개이며 여기에 사용된 균열폭 자료는 3,339개로 균열간 아주 근접하여 생성 당시 상당한 기계적 상호작용이 예상되었던 균열이다. 이러한 상호작용을 정량적으로 평가하기 위해서 경계병치법을 사용하였으며 측정된 균열폭에 가까운 형상을 얻기 위해 최소자승법을 통한 압력(net pressure)을 계산하였다. 그 결과 상호작용을 고려한 경우 단 2개의 압력변수만으로도 측정치에 가까운 균열폭을 얻을 수 있음을 증명하였다.

주요어 : 다중분할, 수압파쇄기술, 수압파쇄균열, 기계적 상호작용, 경계병치법

1. 서 론

수압파쇄기술은 석유나 가스 및 지열발전을 위한 지열 추출을 위해 고압의 유체를 보어홀 내에 주입하여 암반을 파쇄시키는 공법으로 자연에서도 암맥(dike), 맥(vein), 그리고 절리(joint)와 같은 형태로 발견이 된다. 그러나 이러한 균열들은 생성 당시 주위응력과 암반의 비균질성 등으로 인해 복잡한 구조적 특징을 보이는데 그 대표적인 형태가 그림 1과 같은 에셀론(en echelon) 형태의 균열이다. 이러한 형태에서는 생성과 성장 시 균열간 기계적인 상호작용으로

인해 단일균열(single fracture)과는 달리 다른 형태의 거동을 보인다. 특히 기계적 상호작용(이후 상호작용)은 암반의 투수성(permeability)과 산업현장에서 응용되는 수압파쇄의 설계변수(균열폭, 길이, 압력)에 상당한 영향을 미치는 것으로 분석(Jeffrey 등, 1987; Nolte, 1987; Naceur와 Roegiers, 1990)되고 있어 실제 자연에서 생성된 수압파쇄균열을 대상으로 연구를 다수 진행하고 있다.

그러나, 수압파쇄로 형성된 단일균열의 기계적 거동에 대한 연구는 광범위하게 이루어진 반면 다중으로 분할된 형태의 균열은 해석상의 어려움으로 인해 단편적인 수치해석



그림 1. 미국 뉴멕시코에서 발견된 km축척의 암맥 일부(Delaney와 Pollard, 1981)

[†] 정희원, 대한주택공사 주택도시연구원, 책임연구원(E-mail : yjsim@jugong.co.kr)

등의 연구만이 진행되고 있는 실정이다. 이전 연구의 예를 들면, Delaney와 Pollard(1981)는 New Mexico주 Ship Rock의 35개의 북동쪽 에실론 형태의 암맥(그림 1)을 조사하여 균열간의 기계적 상호작용을 평가하였다.

Olson과 Pollard(1991)는 에실론 형태의 균열발달 과정을 모델링하였다. 이들은 균열간의 기계적 상호작용, 즉, 균열단 근처에서 국부적으로 변한 응력변화로 인해 균열의 성장형상이 곡선으로 변하게 되었으며 평행한 에실론 형태인 두 개의 균열을 선택하여 모델링을 실시하였다. 그 결과 두 균열 사이의 상호작용이 균열단에서 국부변형을 일으키며 이로 인해 균열벽면에서 균열의 곡선형태로 발달시키는 전단 변형(shear offset)을 확인하였다.

Bai 등(2000)은 층을 이루고 있는 퇴적암에서 간격이 일정한 수평 절리의 상호작용에 대해 연구하였다. 유한요소 프로그램 FRANC 2D(Wawrzynek과 Ingraffea, 1987)를 사용하여 절리와 층두께에 따른 aspect ratio(균열폭과 길이의 비)를 계산하였다. 계산에 사용된 절리의 수는 3개부터 23개로 절리간의 간격을 변화시켜가며 분석하였다. 그 결과 균열간의 간격과 층 두께의 비가 1.3보다 작게 되면 상호작용의 영향은 상당히 크게 증가하며 그 비율이 증가할수록 aspect ratio는 점근적인 경향을 띠게 됨을 밝혀 내었다.

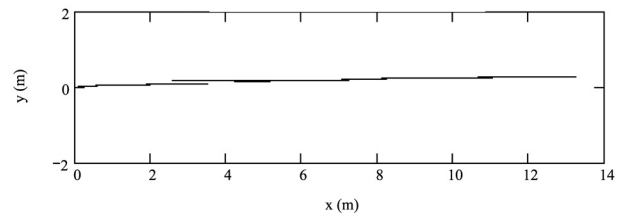
그러나 균열간의 간격이 실제로 작아 1개의 균열처럼 보이는, 즉, 상당히 큰 상호작용이 예상되는 다중으로 분할된 자연 수압파쇄 균열에 대한 연구는 지금까지 없는 것으로 분석되었다. 이러한 상호작용을 정량화하기 위하여 본 연구에서는 아주 가깝게 위치한 균열간의 상호작용을 경계병치법(boundary collocation method)을 사용하여 고려하였으며 계산된 균열폭(aperture)은 측정치와 비교하였다. 또한 상호작용을 고려하여 계산된 균열내 압력(net pressure)과 그렇지 않을 경우의 압력과 비교하여 그 차이점을 비교·분석하였다.

2. 다중분할 수압파쇄 균열

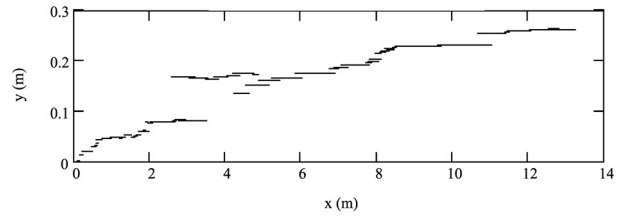
2.1 수압파쇄균열의 상대적 위치 및 폭

모델링 대상이 될 균열은 Vermilye와 Scholz(1995)가 버지니아주 컬페퍼 채석장에서 발견된 71개의 방해석맥(calcite vein) 균열이다(그림 2(a)). 71개 균열의 총 길이는 13.23m이며 상향 분할 생성되어 첫번째 균열과 마지막 71번째 균열간 약 30cm 정도의 높이 차를 형성하고 있다. 이 균열은 표면에 뚜렷이 잘 드러나 있으며 단면은 층리면(bedding plane)에 수직하게 놓여있는 것으로 분석되었다.

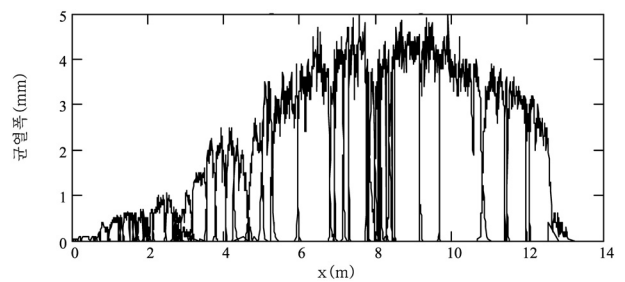
그림 2(a)는 동일한 축척에서의 균열의 평면도를 나타내



(a) 동일한 축척에서의 균열의 평면도



(b) 수직으로 확장되었을 경우의 균열의 평면도



(c) 균열폭(aperture)

그림 2. 71개 균열의 평면도와 균열폭 분포도(Vermilye과 Scholz, 1995)

고 있다. 균열은 약간의 분할과 함께 단순한 것처럼 보이나 그림 2(b)와 같이 y축으로 확대된 평면도에서는 균열이 뚜렷하게 분열되어 복잡한 형태를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 균열은 어둡고 적색계통의 결정이 작은 미사암에서 흰색의 방해석맥으로 채워져 있어 뚜렷한 대조를 이루고 있다. 따라서 미세한 균열폭의 측정이 가능하였다. 방해석맥의 길이는 최소 3.4 cm에서 최장 142 cm이며, 균열폭의 평균 수치는 최소 0.017mm에서 최고 3.88mm에 이른다.

그림 2(c)는 길이방향의 균열을 따라 측정된 3,339개의 균열폭을 나타낸다. 개개 균열폭을 살펴보면 일반적인 타원형의 형태가 아닌 것을 알 수 있는데 이는 균열간의 상호작용이 상당히기 때문이다.

2.2 오프셋과 오버랩 특성

다중으로 분할된 균열의 기하학적 특성을 그림 3에 정의하였다. 균열의 길이는 $2c$ 로, 균열폭은 Δv 로, 오프셋(offset)은 균열간 수직간격으로, 오버랩(overlap)과 분리(separation)는 균열간 수평간격으로 각각 정의하였다. 이에 따라 균열간의 상대적 위치는 오프셋, 오버랩, 그리고 분리의 크기로 결정된다. 표 1은 모델링 대상이 될 본 71개 균열간의 오프

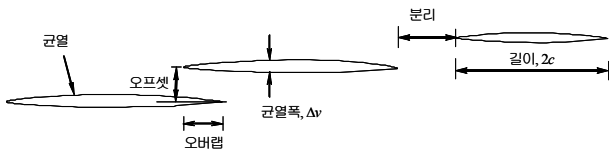


그림 3. 다중으로 분할된 균열의 기하학적 특성의 정의

셋과 오버랩의 크기를 왼쪽에서 오른쪽 순으로 나타내고 있다. 음(-)의 오프셋은 오른쪽에 위치한 균열과 길이방향으로 중첩되지 않은 분리를 의미한다.

본 균열의 기하학적 특성을 좀 더 살펴보면 32번과 33번 균열에서 최대 86.55mm의 오프셋이 측정되었으며 70번과 71번 균열에서 280 mm의 최대 오버랩이 측정되었다. 또한 본 균열의 오프셋과 오버랩의 비는 10^{-1} 에서 10^{-3} 으로 아주 작아 기계적 상호작용의 영향이 상당할 것으로 예상되며 균열폭에도 상당한 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

한편 큰 오프셋을 가진 두 균열은 비교적 큰 오버랩을 가지는 경향을 보이는데 본 균열에서도 20번과 21번, 32번과 33번, 43번과 44번, 55번과 56번, 65번과 66번 균열들은 다

표 1. 버지니아주 컬페퍼 채석장에서 발견된 수압파쇄균열 길이, 오프셋, 그리고 오버랩 데이터(Vermilye, 1996)

균열 NO	길이 (cm)	오프셋 (mm)	오버랩 (mm)	균열 NO	길이 (cm)	오프셋 (mm)	오버랩 (mm)
1	7.5	2.2	-2	37	48.5	2.7	60
2	5.5	11.3	-9	38	34.5	4.5	125
3	8	7.5	11	39	38.1	2.5	46
4	26.5	7.5	10	40	35.5	3.3	185
5	9.5	3.3	5	41	46.7	0.3	42
6	4.2	4.3	12	42	13	0.3	45
7	4.7	7.5	47	43	15.5	38.1	-95
8	14.3	2.5	8	44	38	15.1	85
9	19.2	1.3	7	45	62	10.5	275
10	6.6	2.5	36	46	54.5	5	190
11	26.5	1.1	10	47	80.5	8	200
12	6	1.6	16	48	106	9.3	170
13	12.5	5.2	46	49	25	3	115
14	20.9	5.5	24	50	37.5	4.5	175
15	11	2.1	23	51	26	0.8	50
16	7.7	2.8	21	52	52	3.9	85
17	10.9	7.8	64	53	14.5	1.8	70
18	17.1	1	22	54	27.5	6	260
19	6.2	0.6	5	55	31.5	10.5	150
20	9.3	16.9	54	56	15	1.6	50
21	7.6	0.6	16	57	8	0.5	30
22	12.9	1.1	49	58	13	4.3	105
23	15	0.5	65	59	20.5	0.7	70
24	36.4	0.5	47	60	20	3.3	200
25	24.8	1.5	50	61	24.5	1.3	50
26	9.6	1.85	51	62	11	2.5	35
27	29.5	0.5	112	63	73.5	1.52	70
28	11.2	0.3	20	64	55	2.48	80
29	28.2	0.95	32	65	142	21.4	380
30	3.4	0.5	14	66	76.5	3.3	40
31	22.8	0.5	3	67	12.5	2.5	70
32	14.5	86.55	-615	68	53	0.6	25
33	14.8	0.5	20	69	12	2.2	35
34	7.2	0.3	21	70	121	2	180
35	9.4	0.3	40	71	28	0.4	0.133
36	38.5	2	155				

른 균열의 간격에 비해 대체적으로 큰 오프셋과 오버랩을 보이고 있다.

3. 경계병치법을 사용한 균열폭 계산

본 모델링에서 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 균열폭 형상과 압력을 비교하여 기계적 상호작용의 영향을 검토하였다. 상호작용을 고려하지 않은 경우에는, 개개의 균열은 서로간 영향을 끼치지 않는 독립된 균열처럼 간주되어 길이가 $2c$ 인 균열폭은 $\Delta v_s = v_s^+ - v_s^-$ 무한평면의 균질한 등방성 압반에서 다음과 같이 계산된다(Tada 등, 2000).

$$\Delta v_s = 4c \frac{(1-\nu^2)\Delta p}{E} \sqrt{1 - \frac{x_n^2}{c^2}} \quad |x_n| \leq c \quad (1)$$

여기서 E 는 탄성계수, ν 는 포아송비, Δp 는 압력, 그리고 x_n 은 균열에 따른 거리이다.

균열간의 상호작용을 고려하게 되면 n 번째 균열폭 Δv_n 은 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\Delta v_n = 4c_n \frac{(1-\nu^2)\Delta p}{E} \sqrt{1 - \frac{x_n^2}{c_n^2} \left(\sum_{m=1}^{M_n} \frac{\alpha_m^n}{m} U_{m-1} \left(\frac{x_n}{c_n} \right) \right)} \quad |x_n| \leq c_n \quad (2)$$

여기서 M_n 은 n 번째 균열의 병치점의 수, α_m^n 은 결정되어야 할 미지계수, $U_m(x/c_n) = \sin((m+1)\arccos(x/c_n))/\sin(\arccos(x/c_n))$ 은 m 차 체비셰프의 제2종 다항식이다. 심영중 등(2005)에 언급된 바와 같이 α_m^n 은 임의의 Δp 를 사용하여 선형방정식으로로부터 그 값들을 계산할 수 있다.

(1)식과 (2)식 모두의 경우 측정된 균열폭에 가까운 형상을 얻기 위한, 즉, 계산된 Δv_n 과 측정치(그림 2(c))와의 오차를 최소화할 압력 Δp 를 최소자승법을 사용하여 계산할 수 있다. 만약 한 개의 압력으로 충분하지 않을 경우, 2개 이상의 압력을 사용하였다. 이러한 방법으로 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 압력 Δp 를 비교하였다. 암석의 물성치로는 탄성계수 $E = 2.5 \times 10^{10}$ Pa와 포아송비가 $\nu = 0.21$ 를 사용하였다.

4. 모델링 절차 및 결과

4.1 계산 절차

자연수압파쇄 균열폭을 모델링하기 위해 71개 균열간 오프셋이 비교적 큰 곳을 선택하여 다음과 같이 여섯 개의 그룹으로 분류하여 모델링을 시도하였다(그림 4).

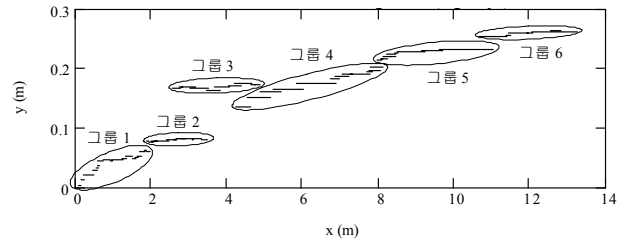


그림 4. 71개 균열의 그룹분류

그룹 1 : 균열 NO. 1 ~ 20

그룹 2 : 균열 NO. 21 ~ 32

그룹 3 : 균열 NO. 33 ~ 43

그룹 4 : 균열 NO. 44 ~ 55

그룹 5 : 균열 NO. 56 ~ 65

그룹 6 : 균열 NO. 66 ~ 71

균열에 따른 경계병치점의 수는 균열간 오프셋과 오버랩을 고려하여 결정되었다. 예를 들어, 두 균열간의 간격이 가깝게 위치한다면 균열간의 병치점의 수는 조밀하게 된다. 이에 71개 균열에 사용된 병치점의 총 수는 $M = 12,465$. 따라서, 계산되어야 할 선형방정식의 수는 $2M = 24,930$ 개가 된다(심영중 등, 2005). 이러한 대형방정식을 풀기 위해 다중 프로세서를 사용하는 병렬프로그램(parallel computation)를 사용하였다.

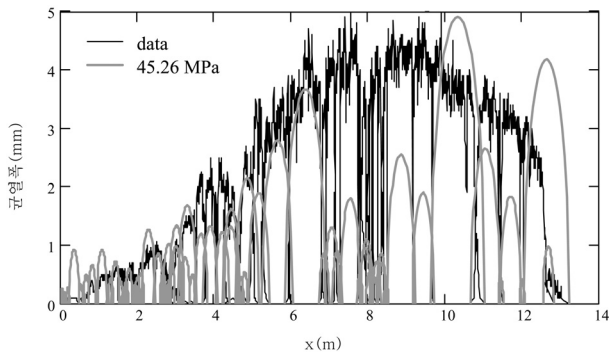
4.2 상호작용을 고려하지 않은 경우

그림 5는 균열간 상호작용을 고려하지 않은 경우의 결과를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 한 개의 압력 변수를 전 균열에 동일하게 사용하였을 경우 계산치와 측정치와의 비교를 나타낸 그림이다. 이 경우 개개 균열의 폭은 타원형상으로 대표될 수 있고 최소자승법에 의해 계산된 압력의 크기는 $\Delta p = 45.26$ MPa이다. 또한, 개개의 균열은 주위 균열에 의해 영향을 받지 않기 때문에 균열폭의 형상은 어떠한 경향도 찾아 볼 수 없다.

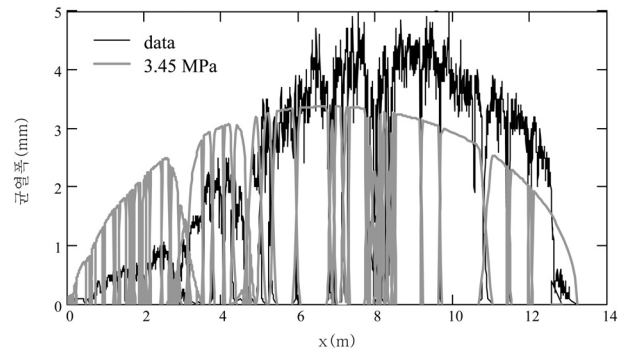
이에 보다 적합한 결과를 얻기 위해 두 개의 압력 변수를 사용하였지만 이 역시 측정치와 일치하지 않는 경향을 나타내고 있다(그림 5(b)). 심지어 71개의 서로 다른 압력을 개개의 균열에 적용하였지만(그림 5(c)) 전체적인 균열폭 형상은 비슷하다 하더라도 타원형의 모습을 가진 개개의 균열폭 형상은 측정치와 일치하지 않는 경향을 나타내고 있다.

4.3 상호작용을 고려한 경우

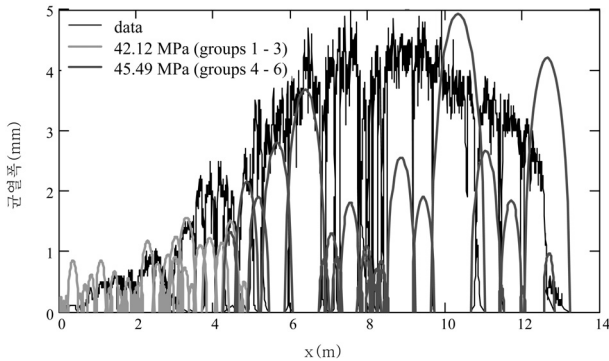
균열간 상호작용을 고려한 경우, 압력을 받는 개개의 균열은 다른 균열에 영향을 끼치게 된다. 상호작용을 고려하



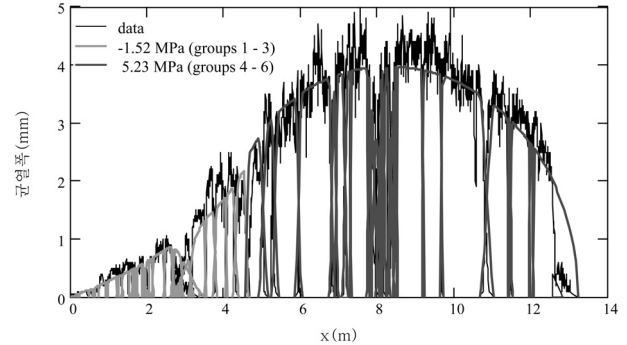
(a) 한 개의 압력변수를 사용하였을 경우



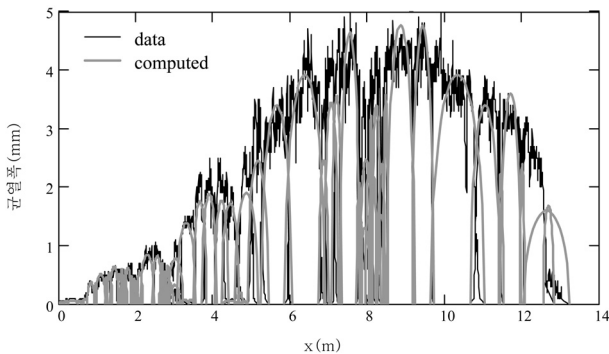
(a) 한 개의 압력변수를 사용하였을 경우



(b) 두 개의 압력변수를 사용하였을 경우



(b) 두 개의 압력변수를 사용하였을 경우



(c) 71개의 압력변수를 사용하였을 경우

그림 5. 상호작용을 고려하지 않은 경우의 모델링 결과

지 않은 경우와 동일한 방법으로 한 개의 압력을 사용하였을 경우에는 비록 개개의 균열은 측정된 균열과 비슷한 형상을 나타내고 있지만 전체적인 경향은 타원형 형상을 보이며 전체 균열의 형상과는 일치하지 않는 점을 알 수 있다(그림 6(a)).

그림 6(b)는 두 개의 압력변수를 사용하였을 경우의 결과를 나타내며 계산된 균열폭은 측정치와 비슷하게 일치하는 결과를 보이고 있다. 개개의 균열폭 형상뿐만 아니라 전체적인 형상도 대체로 일치하는 경향을 나타내고 있다. 첫 번째 압력은 $\Delta p_1 = -1.52$ MPa으로 그룹 1~3에 작용하는 압력으로 음의 값을 보이는 것이 특징이다. 두 번째 압력은 $\Delta p_2 = 5.23$ MPa으로 그룹 4~6에 작용하며 양의 값을 나타내고

그림 6. 상호작용을 고려한 경우의 모델링 결과

표 2. 상호작용을 고려하였을 경우 계산된 압력

압력 변수		2개	3개	6개
압력 (MPa)	그룹1	-1.52	-1.38	-1.17
	그룹 2			-1.89
	그룹 3		-1.59	-1.15
	그룹 4	5.23	5.24	4.90
	그룹 5			5.34
	그룹 6			5.55

있다. 따라서 그룹 3과 그룹 4사이에는 큰 압력차를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

비록 두 개의 압력 변수를 사용하여 나타난 균열폭 형상이 한 개의 경우보다 보다 나은 결과를 나타내고 있지만 3개 혹은 6개의 압력을 사용하여 최소 모델링에 필요한 압력 변수와 이에 따른 결과를 비교해 볼 수 있다. 그러나 두 개의 압력변수를 사용했을 경우와 비교하여 균열폭의 형상은 뚜렷이 나은 경향은 나타내지 않았다. 표 2는 이러한 결과에 의해 계산된 압력을 나타내고 있다. 이 역시 모든 경우에 있어서 음의 압력은 그룹 1~3에서 얻어지는 것을 알 수 있다. 결과적으로 두 개의 압력변수만으로도 71개 균열을 모델링하는데 균열간 상호작용을 고려하면 충분하다는 것을 알 수 있다.

표 3. 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 계산된 압력 비교

상호작용 고려 유무		상호작용을 무시		상호작용을 고려	
압력 변수		1개	2개	1개	2개
압력 (MPa)	그룹 1 - 3	45.26	42.12	3.45	-1.52
	그룹 4 - 6		45.49		5.23

5. 고찰

5.1 기계적 상호작용의 영향

71개 균열에 대한 균열폭을 모델링 한 결과 단 두 개의 압력변수만으로도 균열간 상호작용을 고려하면 측정치와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 전에 언급하였듯이 본 균열은 상호 아주 근접하였기 때문에 강한 상호작용이 예상되었다. 이와는 반대로 균열간의 상호작용을 무시하게 되면 다수의 압력변수를 사용하더라도 좋은 결과를 얻을 수 없었다.

표 3에 나타난 바와 같이 음영으로 처리된 부분은 모델링 결과가 가장 좋은 경우의 압력을 나타내며 상호작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 압력차이는 상당히 큰 것으로 나타났다. 또한, 상호작용을 고려하지 않았을 경우 압력은 상당히 과다하게 계산되는 것을 알 수 있다. 이외에도 상호작용을 고려하게 되었을 때 그룹 1~3에서는 음의 압력이 작용하는 것을 알 수 있는 반면 고려하지 않았을 경우에는 모두 양의 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 균열간의 수압파쇄해석 상호작용을 무시하게 되면 압력계산에 큰 오류를 범할 수 있게 되며 더 나아가 압력의 부호까지도 오류를 범할 수 있게 됨을 알 수 있다.

음(-)의 압력은 원응력(remote stress)이 균열내부에 이를 극복하는 내부압력(internal pressure)보다 큰 경우(Secor와 Pollard, 1975)이며 이러한 경우 균열은 닫혀 있어야 하지만 주위 균열(그룹 4~6)과의 상호작용으로 열려 있는 상황이다.

5.2 비타원형의 균열폭 형상

일반적으로 타원형의 균열형상은 균열내부에 균등한 압력분포를 가지고 있다. 그러나 균열은 불규칙적인 압력형태와 암반의 비균질성(Pollard와 Muller, 1976)으로 인하여 전형적으로 타원형 이외의 다양한 단면형태를 가지고 있다. 본 연구에서 모델링 대상이 된 71개 균열 역시 타원형 형태(그림 7(a))가 아닌, 왼쪽부분은 오목하고 오른쪽 부분은 볼

록한 형태인 눈물형(그림 7(b))임을 알 수 있다(Secor와 Pollard, 1975; Pollard와 Muller, 1976). 더 나아가 개개 균열의 형상은 타원형도 눈물형도 아닌 것을 알 수 있는데 이는 균열간의 상호작용으로 인한 것으로 볼 수 있다.

만일 두 개의 압력변수가 71개 균열의 비대칭을 유발하였다면 원응력은 일정하게 작용하면서 균열내부에 작용하는 압력이 변했을 가능성이 크다. 그 이유는 전체 균열의 길이가 13.23m로 원응력이 크게 영향을 끼칠 정도의 긴 길이를 갖고 있지 않기 때문이다. 다시 말해 그룹 1~3의 균열은 원응력이 균열 내부의 압력보다 크며 그룹 4~6의 균열은 균열 내부의 압력이 원응력을 극복하는 경우이다.

6. 결론

본 논문에서는 아주 가깝게 위치한 다중으로 분할된 균열을 대상으로 균열폭과 압력을 계산하였으며 균열간 기계적 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 분석결과를 비교하였다. 경계병치법을 사용하여 균열간 상호작용을 고려하였을 경우 단지 두 개의 압력변수만으로도 상당히 불규칙적인 3,339개의 균열폭 측정치에 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 이와는 반대로 상호작용을 고려하지 않았을 경우 압력은 상당히 과다하게 평가되었으며 균열폭 형상 역시 일치하지 않음을 알 수 있었다.

한편, 균열간 상호작용을 고려하였을 경우 왼쪽 부분(그룹 1~3)에 작용하는 압력이 음(-)인 경우로 계산되었는데 이는 원응력이 균열내부에 작용하는 압력보다 큰 상황이다. 이러한 경우 균열은 대부분 닫혀 있어야 하지만 높은 압력이 작용하고 있는 주위 균열(그룹 4~5)과의 상호작용으로 균열폭은 열려있게 된다.

참고 문헌

1. 심영중, 김홍택 (2005), 다중으로 분할된 수압파쇄균열의 상호작용에 관한 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제21권, 9호, pp. 45~52.
2. Bai, T., Pollard, D.D. and Gross, M.R. (2000), Mechanical Prediction of Fracture Aperture in Layered Rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B1, pp. 707~721.
3. Delaney, P.T. and Pollard, D.D. (1981), Deformation of Host Rocks and Flow of Magma during Growth of Minette Dikes



(a) 타원형



(b) 눈물형

그림 7. 균열의 형상

- and Breccia-bearing Intrusions near Ship Rock, New Mexico, *Geological Survey Professional Paper* 1202, p. 61.
4. Jeffrey, R.G., Vandamme, L., and Roegiers, J.-C. (1987), Mechanical Interactions in Branched or Subparallel Hydraulic Fractures, *SPE* 16422.
 5. Naceur, K.B. and Roegiers, J.-C. (1990), Design of Fracturing Treatments in Multilayered Formations, *SPE Production Engineering*, pp. 21~26.
 6. Nolte, K.G. (1987), Discussion of Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 998.
 7. Olson, J.E. and Pollard, D.D. (1991), The Initiation and Growth of En échelon veins, *Journal of Structural Geology*, Vol. 13, No. 5, pp. 595~608.
 8. Pollard, D.D. and Muller, O.H. (1976), The Effect of Gradients in Regional Stress and Magma Pressure on the Form of Sheet Intrusions in Cross-section, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, No. 5, pp. 975~984.
 9. Secor, D.T. and Pollard, D.D. (1975), On the Stability of Open Hydraulic Fractures in the Earth's Crust, *Geophysical Research Letters*, Vol. 2, No. 11, pp. 510~513.
 10. Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R. (2000), The Stress Analysis of Cracks Handbook, *American Society of Mechanical Engineers*, 3rd Ed., p. 696.
 11. Vermilye, J.M. (1996), *The Growth of Natural Fracture Systems: A Fracture Mechanics Approach*, Ph.D. Dissertation, Columbia University, p. 236.
 12. Vermilye, J.M. and Scholz, C.H. (1995), Relation between Vein Length and Aperture, *Journal of Structural Geology*, Vol. 17, No. 3, pp. 423~434.
 13. Wawrzynek, P.A. and Ingraffea, A.R. (1987), Interactive Finite Element Analysis of Fracture Processes: an Integrated Approach. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 8, pp. 137~150.

(접수일: 2009. 8. 26 심사일: 2009. 9. 1 심사완료일: 2009. 9. 15)