

수압파쇄법을 이용한 지열에너지 개발에 관한 연구*

이희근**

A Study on the Development of Geothermal Energy Using the Hydraulic Fracturing Method

Hi Keun Lee

Abstract To develop geothermal energy system, hot dry rock reservoirs are to be bored for both the inlet hole and the outlet hole to a depth at which the temperature is high enough to get the necessary thermal energy from underground. The inlet and outlet holes can be connected artificially through hydraulic fracturing process, and then the flow circulation loop is completed. As the basic experimental tests, the laboratory fluid circulation tests using hydraulic fracturing models were conducted to investigate behaviors of fracture, and fluid flow. Numerical analysis using coupled finite element model for flow analysis and displacement discontinuity method for stress analysis were carried out. The results of permeability tests on artificially fractured specimens showed that the permeability was increased with the temperature up to 100°C, which this rate was reduced remarkably with the increase of the confining pressure.

요 약 지열에너지 개발의 기본적 개념은, 지하 심부의 고온건조암체에 시추공을 이용한 수압파쇄를 실시하여 고온건조암체내에 인공 파쇄대를 형성함으로써 유체의 유동회로를 구축하여 지열에너지의 회수를 도모하는 것이다. 본 논문에서는 수압파쇄균열의 발전방향 조절문제와 관련하여, 초고압수 절삭장치를 이용, 수압파쇄공 내에 인공슬롯을 형성하여 수압파쇄를 실시함으로써 균열의 발전방향을 조사하였으며, 수압파쇄에 의한 파쇄대내로의 유체순환실험을 통해 지열수의 유동특성을 규명하였다. 이를 위해 모델에 종균열과 횡균열을 형성시키고 균열내에 주입되는 물의 주입률, 정상류압력, 흐름저항을 조사하고, 이 결과를 이용하여 전산모델링을 수행하였다. 인공절리면에 대한 투수시험에서는 100°C까지의 온도변화에 따라 투수계수가 증가하였으며, 봉압 증가에 따라 증가율이 현저히 감소하였다.

1. 서 론

석유류의 화석연료가 개발되지 않고 있는 우리나라에서는 화석연료를 대체하는 대체에너지를 개발하거나 재생 에너지의 이용 비율을 높여가는 것은 환경문제 완화 및 에너지 공급원의 다양화에 따른 에너지 수급의 안정화 차원에서 대단히 중요한 문제로 부각되고 있다. 대체 에너지 중에서도 특히 지열에너지의 경우 적절한 개발방법만 연구된다면 거의 무한정한 자원으로 평가되고 있는 실정이다.

지열에너지 개발에 있어서 고온건조암체 내로 인공적인 파쇄대를 형성하기 위해 수압파쇄는 필수적인 것

이며, 이에 시추작업 및 회수된 고온수의 적절한 수송 체계, 그리고 이러한 열의 보관 및 타 에너지로의 전환 등은 중요한 문제이나 투자의 위험등을 고려할 때 선행되어야 할 실험실 시험 및 전산 모델링 작업은 대단히 중요하다.

본 연구에서는 인공 슬롯(slot)에 의한 균열발전모델

*1995년 10월 15일 접수

이 연구는 '93-94년도 한국과학재단 연구비지원('93핵심전문연구과제; 2년단위 연구과제)에 의한 결과임
과제번호 : KOSEF 931-0800-009-2

**정희원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수(Dept. of Mineral and Petroleum Eng., Seoul National Univ.)

실험, 온도변화에 의한 암석의 수리역학적 거동의 모델 실험, 유체순환시험 및 유체순환에 대한 수치해석을 실시하였다. 즉 수압파쇄기법을 이용해서 지열에너지를 개발한다는 명제아래, 먼저 수압파쇄기구를 緋明하고, 물이 고온건조암체 내를 흐르게 되는 환경을 고려하여 온도변화에 의한 암석의 수리역학적 거동을 조사하며, 지열에너지 개발과정의 시뮬레이션(simulation)이 되는 유체순환시험과 유체순환에 대한 수치해석을 실시하여 유체의 유동거동을 究明하고자 하였다.

2. 고온건조암체에서의 지열에너지 개발을 위한 수압파쇄기법의 적용성 고찰

지열에너지는 일차적으로 암반내에 저장되어 있으며 분산된 형태로 부존되어 있어서 잠재성 에너지 자원으로 볼 수 있다. 이를 실제로 자원화 하기 위해서는 특정한 장소로 수집, 운반해야 한다. 여기에 다공질 암석, 미세균열, 파쇄균열, 절리, 단층 등에 내포되어 있는 지하수는 암석으로부터 열을 흡수하여 이를 전달하는데 필요한 운반매체가 되는 것이다. 그러나 이러한 地熱帶는 항상 적당한 수리학적 체계를 갖추고 있는 양호한 지열에너지 운반시스템을 이루고 있는 것은 아니고 부분적으로 혹은 전반적으로 운반시스템은 오히려 불량하고 제한적이다. 특히 본 연구에서 고려하고 있는 고온건조암체는 그 특성상 불투수성체로 간주되고 있기 때문에 자연적인 운반시스템은 불량한 경우이다. 그래서 본 연구에서는 천연열수 운반시스템은 논외로 하고 인공열수 운반시스템만을 고려하기로 한다.

불투성의 고온건조암체에 저장되어 있는 지열에너지를 채취하기 위해서는 불투수성 암반에 파쇄대를 형성시켜서 유체 즉 물의 유동채널을 만들어 물로 하여금 採熱과 운반의 기능을 수행토록 하는 것이다. 불투성 암반에 유체의 유동채널을 형성시키는 방법으로는 爆藥과 核을 이용하여 파쇄대를 형성시키는 방법도 있겠지만 깊은 심도에 직접 접근하지 않고 발파하는 방법이 어려울뿐만 아니라 안전과 공해에도 문제가 있으므로 이들 문제를 해소하는 방법으로서 수압파쇄기법¹⁴⁾이 도입되는 것이다. 일반적으로 깊은 심도에 있는 불투성의 고온건조암체 중에 시추에 의하여 주입정(injection well)과 생산정(production well)을 뚫고 이들 두 시추공 사이에 수압파쇄기법에 의하여 다중 유동채널을 형성시킨다. 그래서 주입정으로 들어간 물은 다중 유동채널을 통과

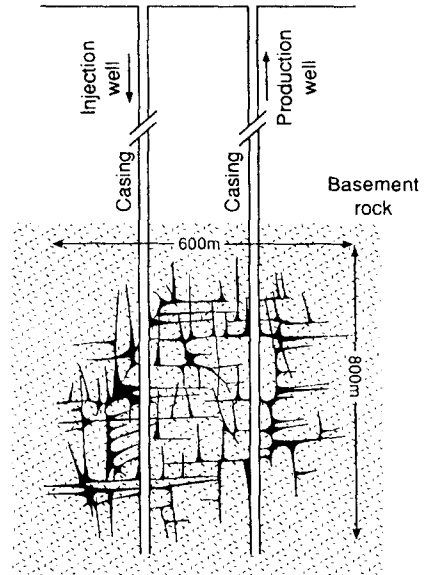


Fig. 1. A conceptual sketch of a hot dry rock(HDR) reservoir in hydraulically fractured rock mass.

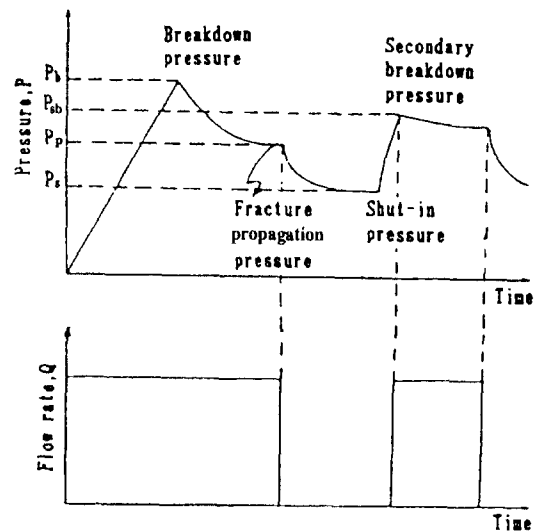


Fig. 2. Pressure and flow rate as a function of times.

하는 과정에서 고온건조암체로부터 열을 채취하여 생산정을 통해서 회수되는 것이다(Fig. 1참조). 수압파쇄기법에 의하여 유체의 다중유동채널을 효율적으로 형성시키기 위해서는 현지 암반의 강도, 응력조건 등을 알아야 한다. 이러한 측정자료에 의하여 수압파쇄시스템구성,

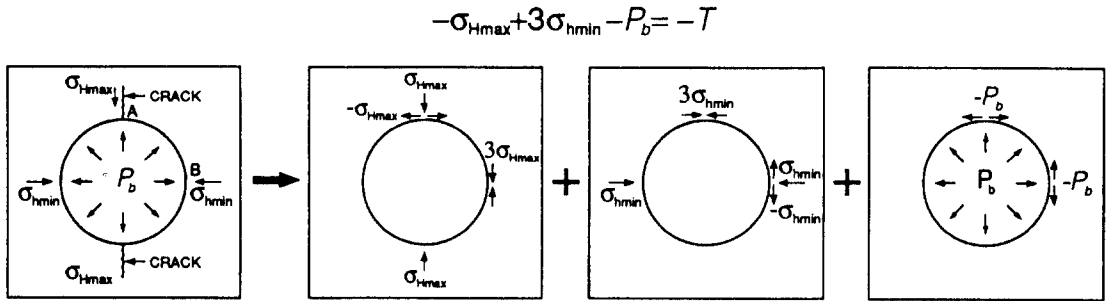


Fig. 3. Explanation of equation (3) by the principle of superposition.

파쇄대 형성, 유동채널방향⁵⁾, 등을 조절할 수 있다. 이에 현지응력측정원리를 간단히 소개하면 다음과 같다.

Fig. 2는 수압파쇄에 의한 압력, 유량-시간곡선을 모식적으로 나타낸 것이다. 여기서 초기파쇄압력 (breakdown pressure, P_b)은 균열이 발생하는 순간의 압력이며, 균열확장압력(fracture propagation pressure, P_p)은 파쇄후 계속되는 유체의 주입에 의해 균열이 점차 확장하게 될 때의 압력을 의미한다. 가압을 중지하면 일정한 압력에 이르게 되는데, 이 압력이 균열폐쇄압력(shut-in pressure, P_s)이다. 이 압력은 원리적으로 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같기 때문에 균열면에 수직으로 작용하는 최소 주응력 (σ_{Hmin} ; 압축을 (+)로함)을 나타내게 된다. 즉,

$$\sigma_{Hmin} = P_s \tag{1}$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력 보다는 낮은 일정 압력에서 균열이 재차 開口되는데 이 압력을 이차파쇄압력(secondary breakdown pressure, P_{sb}) 또는 균열개구압력(fracture reopening pressure, P_r)이라 하며, 이 때 현지암반 인장강도(in-situ tensile strength, T)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = P_b - P_{sb} \tag{2}$$

균질 등방성, 불투수성의 탄성체로 가정한 암반의 자중에 의한 연직응력을 시추공의 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이차원적 수압파쇄조건식은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_r = -\sigma_{Hmax} + 3\sigma_{Hmin} - P_b = -T \tag{3}$$

$$\sigma_v = \gamma h \tag{4}$$

여기서, σ_v 는 시추공 벽면에 작용하는 최소접선응력이

며, σ_v 는 연직방향의 주응력, γ 는 암반의 단위중량, h 는 지표로부터의 심도이다. 식(2)와 식(3)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -\sigma_{Hmax} + 3\sigma_{Hmin} - P_b &= -(P_b - P_{sb}) \\ \sigma_{Hmax} &= 3\sigma_{Hmin} - P_{sb} \end{aligned} \tag{5}$$

따라서, 식(5)로부터 최대 수평주응력 (σ_{Hmax})을 구할 수 있다. 식(3)은 탄성론에 근거하여 중첩원리에 의해서도 설명할 수 있다. 즉 Fig. 3에서 A점에서의 응력은 중첩의 원리에 의하여 식(3)과 같게 됨을 알 수 있다. 상기와 같은 원리에 의하여 현지암반의 응력상태와 강도를 알게되면 이에 적절한 수압파쇄장치와 파쇄압력을 설정할 수가 있다. 또한 인공슬롯에 의하여 원하는 위치와 방향으로의 유체의 유동채널형성여부, 온도변화에 의한 암석의 수리역학적 거동, 유체순환시험 그리고 유체유동에 대한 수치해석등은 지열에너지 개발을 효과적으로 수행하기 위하여 규명되어야 할 중요한 과제들이다. 이들에 대한 시험연구결과는 다음과 같다.

3. 인공슬롯(artificial slot)에 의한 균열발전의 모델시험

3.1 시료 및 시험모델

암석시료는 경남 함양군 마천면에서 생산되고 있는 마천반려암으로서 주로 사장석, 흑운모, 각섬석, 감람석 등으로 구성되어 있으며, 물성은 Table 1과 같다.

시험모델은 300×300×300 mm의 정육면체로 제작하여 시험체의 상단중심에 다이아몬드 코어 드릴로 직경 26mm의 수압파쇄공을 천공한 다음, 초고압수 절삭장치(water jet system)를 이용하여 수압파쇄공의 중간 부분에 폭 2 mm, 길이 80 mm, 깊이 7 mm 및 13 mm

Table 1. Physical properties of Machon gabbro

Properties	Value
Unit weight (kN/m^3)	28.1 ± 0.06
Apparent porosity (%)	0.48 ± 0.06
Uniaxial compressive strength (MPa)	120 ± 10
Indirect tensile strength (MPa)	9.8 ± 1.0
Young's modulus (GPa)	58 ± 1.3
Poisson's ratio	0.21 ± 0.009

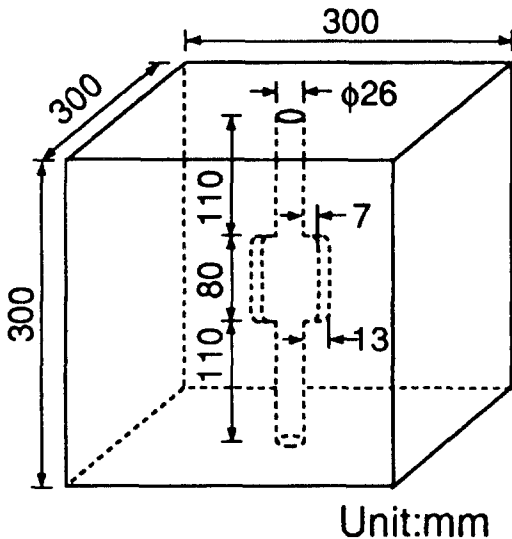


Fig. 4. Dimensions of the rock specimen showing a long slot (length:13 mm) and a short slot (length:7 mm).

의 인공슬롯을 형성한 두 종류로 제작하였다. Fig. 4는 이러한 두 종류 모델의 비교를 위하여 함께 작도한 것이다. 이와 같이 인공슬롯의 길이를 변화시킨 것은 수압파쇄공의 반경 대 슬롯길이의 비의 변화가 수압파쇄균열의 발전에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이다. 또한 인공슬롯의 방향에 따른 수압파쇄균열의 발전양상을 조사하기 위하여, 슬롯의 방향을 최소주응력의 방향에 대해서 0° , 22.5° , 45° , 67.5° 로 변화시켜 슬롯을 형성하였다.

3.2 시험장치 및 방법

수압파쇄 모델시험 장치는 외부압력부, 유체압입부, 자료처리부로 구성되어 있다. 외부압력부는 수평방향으로의 측압(側壓)을 작용시키기 위하여 4개의 플랫폼(flat jack)과 강철프레임으로 구성되어 있는데 플랫폼은 두께 1 mm의 스테인레스 판을 가로, 세로 각각 300

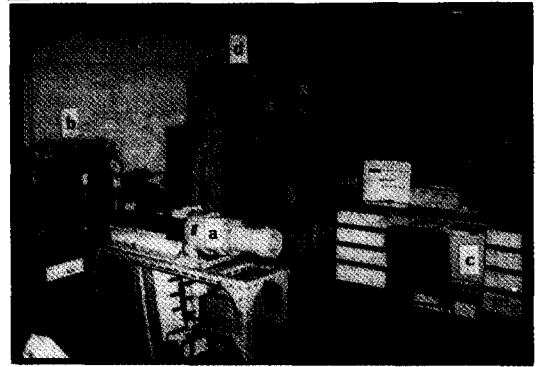


Fig. 5. A general view of the hydraulic fracturing test apparatus: (a) internal pressure pump unit, (b) external pressure pump unit (c) data processing unit and (d) MTS.

mm로 하여 가장자리를 용접해서 물주머니 형태로 제작한 것이다. 플랫폼의 상부 양모서리에는 외경이 7 mm인 두 개의 스테인레스관을 용접하여 한 관에는 플랫폼 내의 공기를 제거하기 위한 밸브를 설치하고 다른 한 관에는 유압관 및 압력변환기를 연결시켜서 시험체에 작용하는 측압을 측정하도록 하였다.

유체압입부는 팩커(packer)와 유압펌프 및 그 사이에 연결된 압력변환기로 구성되어 있으며 이 압력변환기는 자료처리부의 변형률 증폭기로 연결된다. 자료처리부에서는 플랫폼에 의하여 가해지는 두 수평방향의 측압을 두 개의 압력변환기를 통해서 변형률 증폭기로 입력시키며, 가압구간의 압력은 유압펌프와 팩커사이의 압력변환기를 통해서 또 다른 변형률증폭기로 입력시킨다. Fig. 5는 수압파쇄 모델시험장치의 전반적인 모습이다.

3.3 시험결과 및 고찰

Fig. 6은 최대주응력 대 최소주응력의 비, 인공슬롯의 길이의 변화에 따른 균열발전 양상을 설명하는 모식도이다. 일반적으로 시험조건에 따라 슬롯의 선단에서부터 바로 최소주응력에 수직한 방향으로 균열이 발생하는 경우(Case I), 슬롯 연장선상으로 다소 발전하다가 최소주응력에 수직한 방향으로 휘어지는 경우(Case II), 슬롯의 연장선상으로 발전해가는 경우(Case III), 그리고 슬롯이외의 공벽 상에서부터 최대주응력 방향으로 균열이 발전하는 경우(Case IV) 중의 하나로 나타날 것이다. Table 2는 시험체에 대한 여러 가지 시험조건을 나타낸 것이다. Table 2에서 긴 슬롯

(13 mm)의 경우, 최소주응력 방향에 대한 슬롯의 각도 0°, 22.5°, 45°, 67.5°에 대하여 시험편 번호를 LS-1,2,3, 4로 표시하고 짧은 슬롯(7 mm)의 경우, 같은 방법으로 SS-1,2,3,4로 표시하였으며, 이 때 최대주응력 대 최소 주응력의 비(P_1/P_3)는 1.71~1.79이다. 시험결과 LS-1, SS-1을 제외하고는 모두 Case I이나 Case II로 나타났다. LS-1, SS-1의 경우는 Case III로 나타났지만 이들 경우도 시험체를 충분히 크게 하면 Case II로 나타날 것으로 기대된다. LS-4와 SS-4를 비교해보면 전자

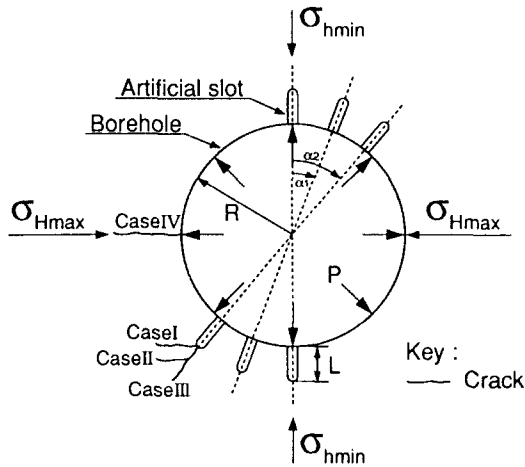


Fig. 6. Crack development patterns by artificial slots and their inclination in the hydraulic fracturing test.

Table 2. Conditions of external pressures and slots.

Sample No.*	External pressure**			P_1/P_3	Slot angle*** (degree)	Slot length (mm)
	P_1	P_2	P_3			
LS-1	4.94	3.5	2.79	1.77	0.0	13
LS-2	4.90	3.5	2.86	1.71	22.5	13
LS-3	4.94	3.5	2.81	1.76	45.0	13
LS-4	4.91	3.5	2.74	1.79	67.5	13
SS-1	4.94	3.5	2.79	1.77	0.0	7
SS-2	4.93	3.5	2.79	1.77	22.5	7
SS-3	4.95	3.5	2.79	1.77	45.0	7
SS-4	4.90	3.5	2.83	1.73	67.5	7
SS-5	4.80	2.5	0.97	4.95	0.0	7
SS-6	4.89	2.5	1.92	2.55	0.0	7
NS	3.90	3.0	2.00	1.95	-	-

Key *LS; long slot, SS; short slot, NS; no slot.
 ** P_1, P_2, P_3 ; the horizontal maximum, the vertical intermediate and the horizontal minimum principal stresses,
 ***Slot angle; the angle between P_3 direction and slot direction.

는 Case II를 나타낸 반면에 후자는 Case I을 나타내었다. 이는 슬롯의 길이의 영향을 설명해주는 결과이다. SS-5, SS-6의 경우는 Case IV로 나타났다. 본 시험에 의하면 P_1/P_3 가 1.7이상이면 슬롯의 장단과 방향의 영향을 받으면서 응력장에 의하여 균열을 발생시키고⁶⁾, 2.5 이상이면 슬롯에 구애받지 않고 NS의 경우와 같이 탄성학적 이론에 근거한 균열발생을 유도한다는 것을 알 수 있다.

본 시험에서 얻어진 초기파쇄압력(P_b), 균열개구압력(P_r)등을 정리한 것이 Table 3이다. 이 표에서 보면 2차 파쇄압력보다 3차파쇄압력이 더욱 안정된 상태로 나타났다. 따라서 3차파쇄압력을 균열개구압력으로 택하는 것이 바람직하다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 위의 여러 가지 시험결과 중 대표적으로 슬롯길이 13 mm의 경우에서 각각 슬롯의 각 0°, 67.5°에 대한 압력-시간곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 압력-시간곡선 상에서 최대압력점까지의 압력의 증가양상이 거의 직선적이어서 P_b 및 P_r 은 각각의 최대압력점으로 결정하였다. 그리고 슬롯 각이 0°와 67.5°인 경우를 비교해 볼 때, P_b 는 각각 17 MPa, 15 MPa, P_r 은 각각 10.8 MPa, 8 MPa로 나타나 전자의 경우가 높게 나타났다. 탄성학적 근거에 의하면 균열은 최소주응력 방향에 직각방향으로 발전한다는 사실을 고려할 때, 최소주응력 방향에 대하여 67.5°의 경우가 0°인 경우보다 90°에 가까워서 균열발전에 보다 유리한 상태에 있으므로 P_b 및 P_r 이 낮게 나타난다는 것을 쉽게 유추할 수 있다.

Table 3. Breakdown pressures(P_b) and reopening pressures(P_r) obtained by the hydraulic fracturing test.

Sample No.	Slot angle (degree)	P_1 (MPa)	P_3 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)		
					2nd	3rd	4th
LS-1	0.0	4.94	2.79	17.0	10.9	10.2	10.1
LS-2	22.5	4.90	2.86	16.3	7.9	7.1	6.9
LS-3	45.0	4.94	2.81	13.7	8.8	8.0	6.1
LS-4	67.5	4.91	2.74	15.2	8.1	6.8	6.6
SS-1	0.0	4.94	2.79	16.5	10.4	9.8	9.2
SS-2	22.5	4.93	2.79	16.9	10.8	8.9	8.1
SS-3	45.0	4.95	2.79	16.8	9.1	7.9	7.1
SS-4	67.5	4.90	2.83	17.6	7.9	6.8	6.0
SS-5	0.0	4.80	0.97	11.8	4.9	3.8	3.0
SS-6	0.0	4.89	1.92	18.6	6.8	5.8	5.8
NS	No slot	3.90	2.00	15.2	5.2	5.2	5.2

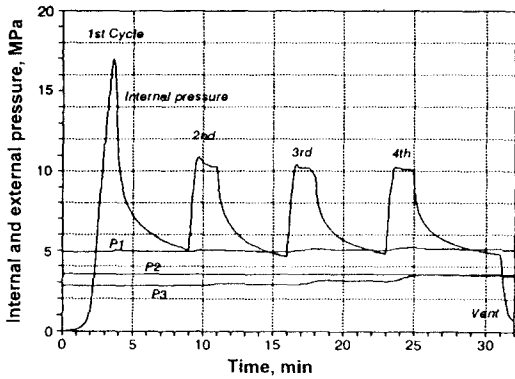


Fig. 7. The pressure-time curve for LS-1 at slot length=13 mm and slot angle=0.0°.

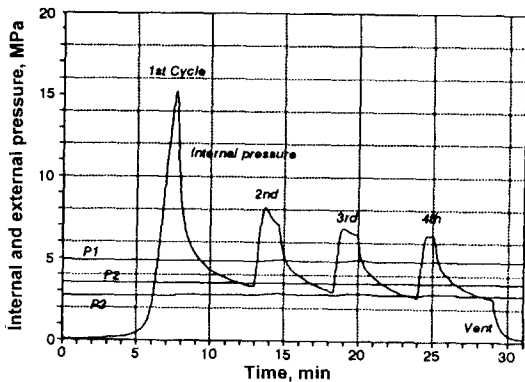


Fig. 8. The pressure-time curve for LS-4 at slot length=13 mm and slot angle=67.5°.

4. 온도변화에 의한 암석의 수리역학적 거동의 모델시험

4.1 시료 및 시험편

본 시험에서 사용한 암석시료는 황동화강암과 경기편마암이다. 황동화강암은 전북 황등에서 산출되고 있으며 석영, 정장석, 흑운모를 주 조암광물로 하고, 견운모, 녹니석 등의 2차광물을 포함하는 세립질의 회백색 화강암이다. 경기편마암은 경기 의정부에서 산출되고 있으며, 중립질의 흑갈색 호상 흑운모 편마암이다. 위의 시료로부터 NX 코어로 채취한 시험편의 직경 대 길이의 비를 1:2로 하여 정형도를 0.001 mm 이내로 하였다. 시험편의 수는 화강암, 편마암 각각 20개씩 총 40개를 제작하였다.

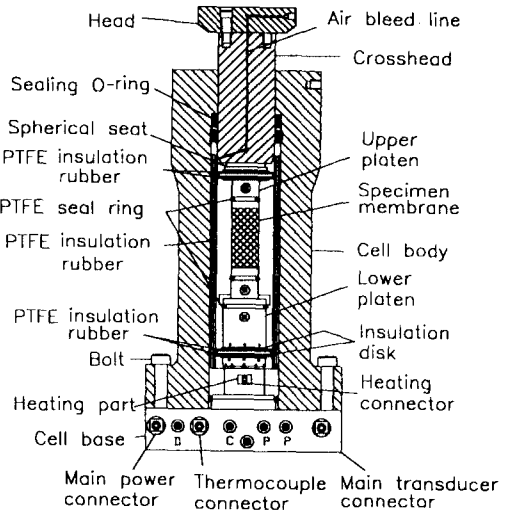


Fig. 9. Schematic diagram of triaxial cell.

4.2 시험장치 및 방법

본 시험에 사용한 시험장치는 고온용 암석역학 시험장치로서 Interlaken사에서 제작한 것이다. 이 시험장치는 시험 프레임, DDC(Dynamic Digital Control) 컨트롤러, UTP(Universal Test Program) 프로그램부, 펌프, 삼축 셀, 봉압 및 간극수압용 증폭기, 그리고 기타 악세서리 부품 등으로 이루어져 있다. DDC 컨트롤러는 모든 신호의 생성, 제어 및 측정을 하는 디지털 신호처리기로써 컴퓨터에 장착된 인터페이스 소프트웨어 UTP-4 프로그램으로 연결되어 일련의 시험을 수행한다. 삼축압축용 셀의 유효작용압력은 138 MPa까지의 봉압과 간극수압을 가할 수 있으며 내부 히터는 200°C 까지 온도를 올릴수 있다. 삼축셀 안에 수압기가 있고 구동 하중을 가할 수 있으며 익스텐소미터를 통해 축방향과 원주 방향의 변형율을 측정할 수 있다. Fig. 9는 삼축셀의 모식도를 나타낸 것이다.

투수율을 측정함에 있어서, 정수두하의 유동률 측정법과 정유동률하의 차등 압력측정법을 적용했는데 전자의 방법에서는 증폭기에 있는 고성능 변위변환기로 유체의 이동을 측정하여 유동률을 구하고 Darcy의 법칙을 적용하여 투수율을 계산하였다. 후자의 방법에서는 시료를 지나는 일정한 유동률하에서 시험하며 이 때 발생하는 차등압력을 측정하였다. 차등압력의 자료가 시간에 따라 기록되므로 이를 해석하여 투수율을 구하였다. 그런데 일반적으로 결정질 암석에서는 정상류상태에서 투수율을 정확히 측정하기가 어려우므로 인공

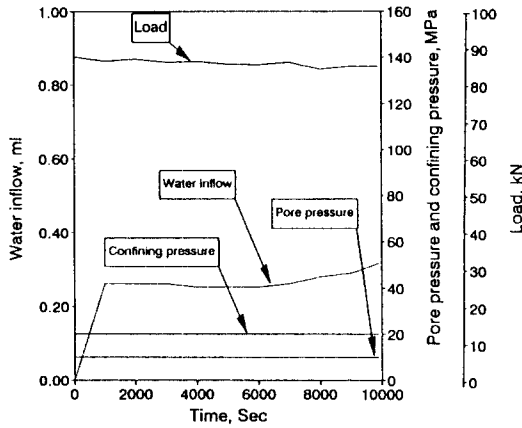


Fig. 10. The results of the constant head test for measuring permeability of artificially parallel-jointed Whangdeung granite.

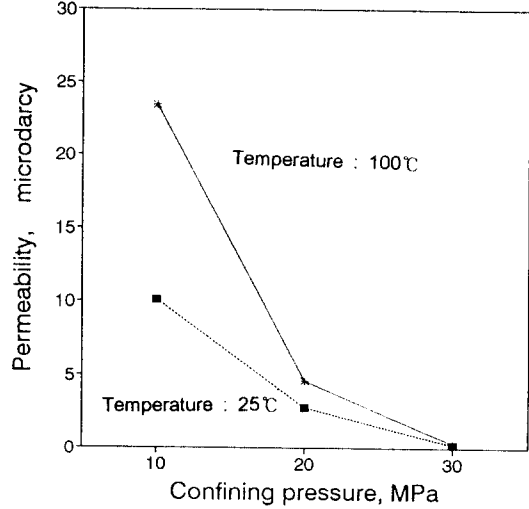


Fig. 12. Dependence of permeability on confining pressure with variety of temperature.

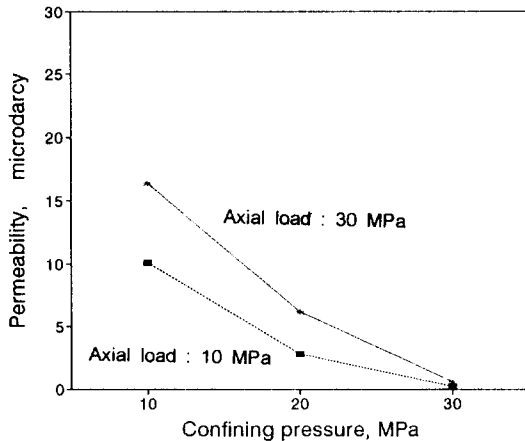


Fig. 11. Permeability of artificially parallel-jointed Whangdeung granite as a function of confining pressure with variety of axial load.

절리를 만들어서 투수시험을 실시하였다. 상온과 100°C의 온도범위에서 봉압의 크기는 10, 20, 30 MPa로 하였고, 축하중은 10, 30, 50 MPa까지 가하였다. 시험시간은 3~14시간 소요되었다.

4.3 시험결과 및 고찰

직경 NX 크기의 인공절리면을 갖는 시험편에 대하여 여러 가지 조건에서 투수계수를 측정하였으며, 그 중 대표적인 결과를 Fig. 10에 나타내었는데 이는 하중 90kN, 봉압 20MPa, 간극수압 10MPa일때 간극수압

피스톤의 시간에 따른 변위, 즉 유동수량을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 따라 유동수량은 거의 일차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 일차적 증가현상에 근거하여 유동률을 구하였다.

Fig. 11은 인공절리가 형성된 황등화강암에 대하여 축하중을 증가시키면서 투수율을 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 축하중이 증가함에 따라 투수율은 증가하고, 또한 봉압이 증가함에 따라 투수율은 현격하게 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 축하중의 증가는 인공절리면의 돌출부(asperity)의 부분적 파괴와 더불어 절리간극의 체적 팽창을 일으키며, 봉압은 유체의 유동을 억제하는 것으로 해석된다.

Fig. 12는 봉압 및 온도증가에 따른 투수를 측정결과이다. 온도를 상온에서 100°C로 증가시켰을때 10, 20, 30 MPa의 봉압하에서 투수율은 각각 약 2.3배, 1.6배, 1.5배로 증가하는 현상을 나타내었다. 즉 봉압이 낮을수록 투수율의 증가율은 크게 나타났다. 여기서 온도증가에 따라 압축은 열팽창을 일으켜 광물입자간의 체적 팽창이 일어나면서 절리의 맞물림현상(interlocking)이 발생하여 유체 유동 경로를 증가시킬 뿐만 아니라 간극의 상호연결을 유도함으로 투수율이 증가하는 것으로 생각된다⁷⁾. 또한 봉압이 증가함에 따라 열팽창에 의하여 넓혀진 간극이 다시 닫히게 되고 따라서 매우 큰 봉압에서는 온도 증가의 영향이 미미해지게 된다. 지열에너지 개발의 경우 이러한 투수율의 변화거동 메카니즘

은 지하 인공균열에 의한 열수생산에 지대한 영향을 미칠 것이다.

5. 유체순환시험

5.1 시료 및 시험모델

시료로는 아크릴(acryl)과 전북 진안산 대리석을 사용하였으며 시험체는 150 mm×150 mm×150 mm의 입방체로 제작하고, 시험체 중앙 및 중앙으로부터 50 mm 떨어진 위치에 직경 10mm의 공을 뚫어서 각각 주입공과 토출공으로 사용하였다. 이들 공은 수압파쇄에 의하여 형성된 균열면과 연결됨으로 유체순환회로를 형성하게 된다. 특히 아크릴 시료를 사용한 이유는 수압파쇄시험 및 유체순환시험을 육안으로 관찰하기 위해서였다.

5.2 시험장치 및 방법

수압파쇄 실험장치는 시험체에 측압을 작용시켜주는 플랫잭(flat jack), 시험체와 플랫잭을 구속시켜주는 외형틀(steal frame), 플랫잭의 압력을 조절하는 압력조절부, 보아홀(borehole)에 압력을 가해주는 팩커(packer), 팩커압력을 측정, 기록하는 압력변환기 및 다중채널기록계(multicorder)로 구성되어 있다³⁾.

Fig. 13은 외형틀 및 플랫잭의 제원과 시험을 위하여 시험체를 장치한 모습을 나타낸 것이다. 외형틀은 340 mm×340 mm×50 mm의 스테인레스판 3매를 볼트로 고정시켜 일체화하고 중앙부에 156 mm×156 mm의 사각구멍을 뚫어서 제작한 것이다. 플랫잭은 두께 0.6 mm의 스테인레스 판 153 mm×150 mm의 2매를 겹쳐 사각주위를 용접하고 상부에는 2개의 銅管을 연결하여 펌프로 연결시키고 다른 한 쪽은 가압시에 플랫잭 내의 공기를 뽑아낼 수 있도록 한 것이다. 플랫잭은

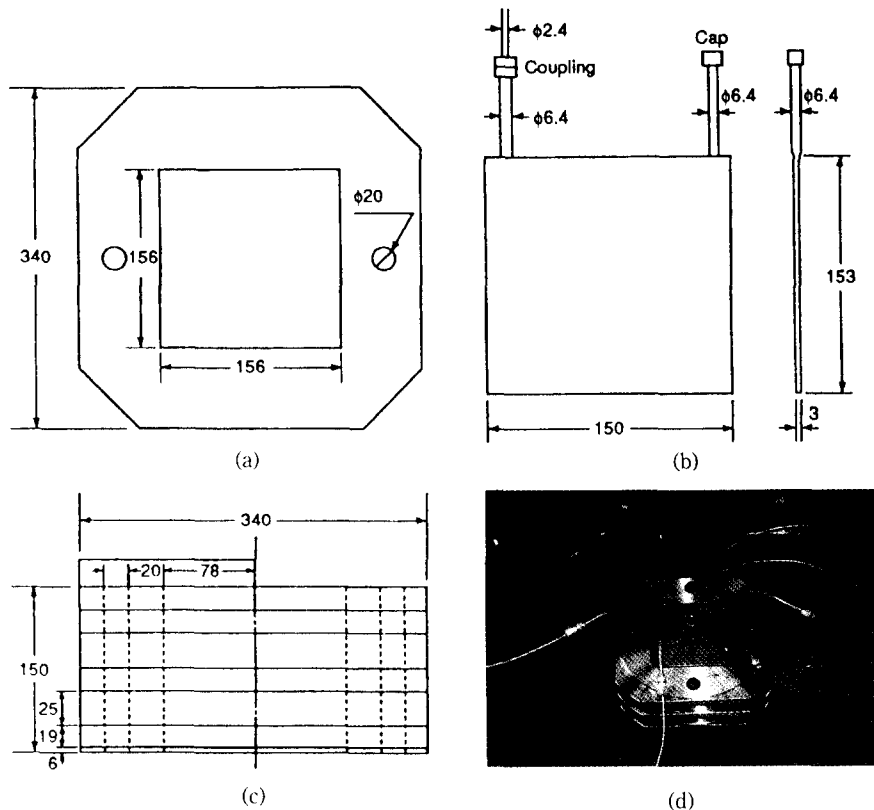


Fig. 13. (a), (b) Dimensions of a steel frame; (c) Dimensions of a flat jack; (d) an equipped acryl model set.

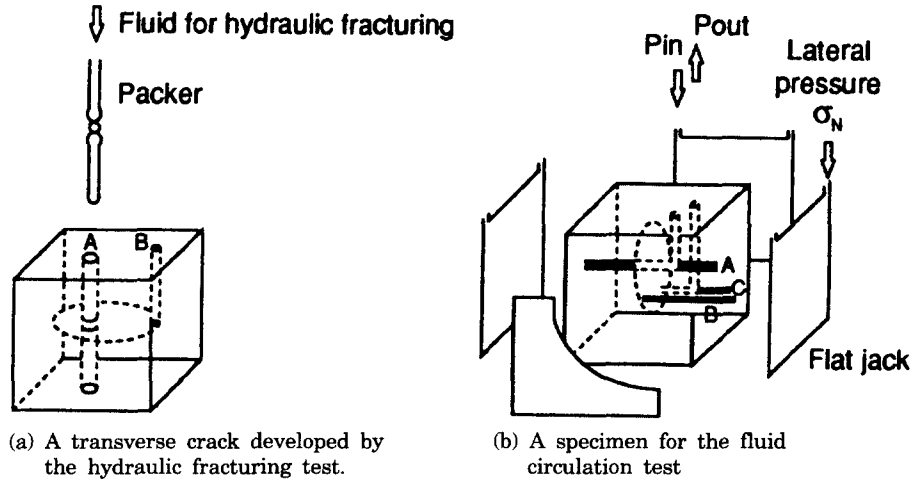


Fig. 14. Schematic diagram of the hydraulic fracturing test and an acrylic model for the fluid circulation test.

시험체와 외형틀 사이에 설치하고 핸드펌프에 의해서 유체압을 시험체에 작용시킨다. 이 때 유체압은 2개의 스톱밸브(stop valve)에 의해 조절되며, 이 측압은 압력 게이지에 의해서 측정된다.

Fig. 14(a)에서 횡균열이 시험체의 외부측면까지 발전하는 것을 방지하기 위하여 측면 가까이 보아홀 B를 천공한다. 그림에서 보는 바와 같이 수압과쇄에 의하여 A공에서 발생한 횡균열은 B공에 도달하면 더 이상 발전하지 못하고 정지하게 된다. Fig. 14(b)는 유체의 순환실험을 하기 위한 시험체이다. Fig. 14(a)에서의 A공은 유체의 주입공으로 사용되고, 토출공용으로는 C공을 천공한다. 수압과쇄시의 A공의 밀부분과 입구, C공의 입구 그리고 B공 전체를 수지접착제로 메우며 이들은 Fig. 14(b)에서 흑색으로 표시된 부분들이다.

체순환실험에 있어서 펌프에 의하여 가해지는 주입공내의 압력은 압력변환기를 통하여 다중채널기록계로 기록이 되며, 균열을 통과하여 토출공으로 유출되는 토출유량은 용량이 1 ml, 2 ml, 5 ml인 피펫(pipette)을 사용하여 측정하였다.

유체순환실험에서는 균열면에 수직인 외부압, σ_n 과 주입유량, Q_{in} 의 변화에 따른 토출률, 정상유동압력, 유동저항, 유체회수율 등을 조사하였다. σ_n 은 0, 20, 40, 60 kg/cm², Q_{in} 은 0.27, 0.54, 1.08, 2.70 ml/min로 하여 두 조건의 조합으로 이루어진 총 16가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다.

각 실험조건에 대한 유체순환실험시, 토출공에 피펫

을 연결해서 균열을 통과하여 유출되는 유량을 매 20초 간격으로 측정하고 이로부터 유출률을 구하였으며, 또한 기록된 압력곡선으로부터 정상유동압력을 측정하였다.

5.3 실험결과 및 고찰

아크릴을 이용한 횡균열모델에 대한 유체순환실험결과와 정상유동압력은 일반적으로 주입률의 제곱근에 선형적 관계를 가지면서 증가하며 그 증가정도는 균열면에 수직인 외부압의 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 주입률의 증가에 대한 정상유동압력의 증가는 어떠한 접근한계치를 가지는 것으로 보여진다.

유체가 균열내부를 흐를 때, 유체의 흐름에 대한 저항은 (7)식과 같이 주어지는 유동저항(I: flow impedance)의 개념으로 본다.

$$I = P_{st} / (A \cdot Q_{out}) \tag{7}$$

여기서 P_{st} 는 정상유동압력, A는 균열면적, 그리고 Q_{out} 는 토출률이다.

아크릴모델에 대하여 토출유량이 증가할수록 I는 감소하고 균열면에 수직인 외부압이 증가할수록 I는 크게 나타났다. 토출률은 주입률에 대해 거의 일정한 비율을 보이므로 주입률이 증가할수록 I는 감소한다고 볼 수 있는데, 이는 주입률이 증가하면 정상유동압력은 증가하지만 그에 따라 균열의 개구가 커지고 토출률도 증가하므로 유동저항은 상대적으로 감소하는 것으로 생각된다. 또한 균열면에 수직인 외부압이 커지면 이 압력

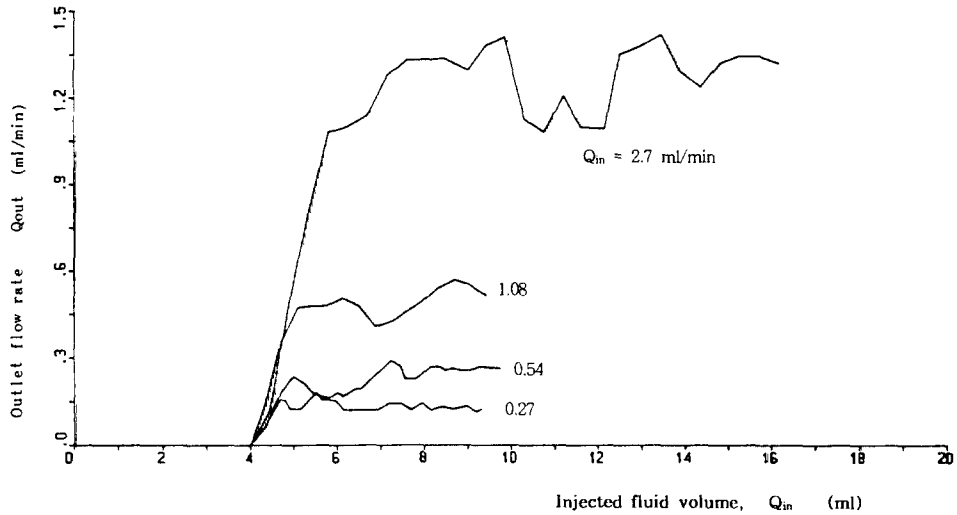


Fig. 15. Relationship between injected fluid volume and outlet flow rate with the change of inlet flow rate at $\sigma_n = 60 \text{ kg/cm}^2$ on a transverse fracture model.

Table 4. Results of the fluid circulation test on the transverse fracture model.

σ kg/cm ²	Q_{in} ml/min	$Q_{out(ave)}$ ml/min	Recovery rate %
0	2.7	1.26	47
	1.08	0.53	49
	0.54	0.26	48
	0.27	0.17	63
20	2.7	1.31	49
	1.08	0.58	54
	0.54	0.28	52
40	2.7	1.30	48
	1.08	0.52	48
	0.54	0.27	50
	0.27	0.16	59
60	2.7	1.29	48
	1.08	0.49	45
	0.54	0.24	44
	0.27	0.13	48

을 상쇄시키고 균열의 개구를 유지하기 위해 P_{in} 가 커지므로 유동저항은 크게 나타난다.

Fig. 15는 아크릴에서의 횡균열의 경우 외부압력(σ_n)이 60 kg/cm^2 일 때의 주입유량 변화에 대한 토출유량의 관계이며 외부압력이 다른 경우에도 유사한 경향을 보였는데, 이들 결과치는 Table 4와 같다. 주입유량이 증대할수록 토출유량이 큰 변동을 보이는 것은, 균열내의 유량과 압력이 커짐에 따라 균열내부의 유체의 흐름에 혼란이 일어나고 균열의 부분적 개폐가능성이 커서

정상유동상태의 유지가 비교적 어려운 때문인 것으로 보여진다. 그리고 주입유량과 토출유량의 비 즉, 회수율은 44~63%로 주입유량과 외부압력에 별로 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

또한 대리석에서의 종균열의 경우, 위와 같은 외부압력과 주입유량변화에 대한 토출유량의 관계를 보면 비슷한 경향을 나타내었는데 회수율은 19~30%로 아크릴의 횡균열의 경우보다 낮게 나타난 것은 아크릴보다 투수성이 큰 대리석의 내부로 유체가 침투하며 또 한편으로는 유체가 가압구간을 밀폐해주는 O링(O-ring)을 우회하여 팩커주위로 유출되기 때문인 것으로 생각된다.

6. 유체순환시험에 대한 수치해석 및 고찰

앞에서 실시한 유체순환시험으로부터 구한 정상유동 압력과 균열크기를 이용하여 유한요소법에 의한 2차원 유동해석 및 경계요소법에 의한 준 3차원 응력해석을 실시하고 균열의 개구변위(開口變位), 균열내부의 유체 압분포, 그리고 유체의 유동방향 등을 조사하였다. 해석에서의 모델은 등방성 탄성체이고 불투수성이며 균열내의 유체흐름은 정상류로 가정하였다.

6.1 유동해석

유체유동에 대한 지배방정식은 일종의 준조화 방정

식(quasi harmonic equation)으로 표현될 수 있는데, 본 연구에서는 유체의 흐름을 2차원 정상류라고 보기 때문에 얇은 균열내를 흐르는 유체유동의 해석에는 다음과 같은 식을 적용할 수 있다⁸⁾.

$$K e \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\Delta} = 0$$

$$K = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{e^3}{12} \quad (8)$$

여기서, e 는 개구변위(開口變位, aperture), Q 는 총유출량, μ 는 유체의 점성계수, Δ 는 요소의 단면적, P 는 각요소내의 유체압, 그리고 K 는 개구단면의 단위면적당 통과하는 유량이다.

유동해석을 위해서는 초기의 균열크기와 개구변위를 알아야 하는데, 균열의 크기는 수압파쇄실험을 통하여 알 수 있지만 개구변위의 측정은 어려우므로 초기치를 가정해서 해석을 실시하여 균열내 유체압분포를 구하였다. 그리고 이를 이용한 응력해석결과 얻어진 개구변위분포를 이용하여 유동해석을 반복 수행하는 연계해석(coupled analysis)을 실시하였다.

6.2 응력해석

직사각형 경계요소에서 발생하는 변위 불연속량(displacement discontinuity)을

$$D_1 = U_1(x, y, 0_-) - U_1(x, y, 0_+) \quad (9)$$

로 정의하면, 응력과 변위 불연속량과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$U = A \cdot D \quad (10)$$

$$\sigma = B \cdot D$$

여기서, 행렬 A, B 는 임의점에서의 변위와 응력을 결정하는 영향계수의 도함수들로 구성된다. 따라서 요소의 기하학적 배열에 따라 행렬 A, B 를 구하고 경계조건으로 $\sigma = \bar{\sigma}$ 가 주어지면 (10)식으로부터 미지량 D 와 변위 U 를 계산할 수 있다.

본 해석모델은 얇은 판상의 균열이고 이에 수직인 외부압 및 균열내 유체압이 작용하는 경우이므로 준3차원 변위 불연속응력 해석기법을 적용할 수 있다. 여기서 변위 불연속량은 균열내 개구변위에 해당되며 응력 조건은 외부압(P)과 균열내 유체압(P_*)의 차 $P - P_*$ 로 표시할 수 있다.

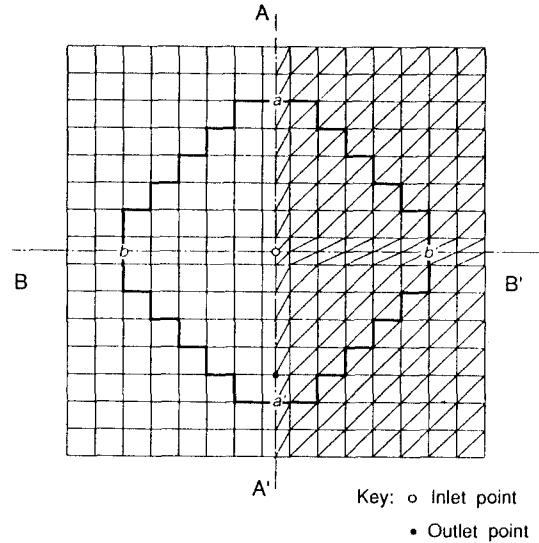


Fig. 16. Finite element and boundary element meshes for the coupled stress and flow analysis on a transverse fracture model.

6.3 요소망 및 경계조건

Fig. 16은 횡균열에 대한 요소망이다. 좌우대칭성을 고려하여 좌측에는 응력해석을 위한 요소망, 우측에는 유동해석을 위한 요소망을 분할하였다.

유동해석시에 유입유압(inlet fluid pressure, P_i)은 정상유동압력 P_{*0} 로 하였고, 토출유압(outlet fluid pressure, P_o)은 실험결과를 참작하여 P_{*0} 와 외부압 σ_n 의 차의 1/10에 σ_n 을 더한 값으로 가정하였다.

6.4 해석결과 및 고찰

횡균열에 대한 해석은 σ_n 이 40 kg/cm²일 때 주입률이 0.27, 2.7 ml/min인 두 경우에 대하여 실시하였는데, Fig. 17은 해석결과 얻어진 두 경우의 개구변위와 균열내 유체압분포를 나타내고 Fig. 18은 2.7 ml/min인 경우의 유체유동을 나타낸 것이다. Fig. 17에서 주입률에 따른 균열 개구변위를 비교해볼 때 주입률이 많을수록 P_{*0} 가 커져서 개구변위가 크게 나타났는데 이는 실험결과와 부합하는 현상이다. 또한 균열내의 유체압분포는 주입공과 토출공을 잇는 선을 따라 토출공으로 갈수록 압력의 감소구배가 크게 나타났다. 그리고 Fig. 18에서 보는 바와 같이 유체의 유동량은 주입공과 토출공을 잇는 직선부근에서 일반적으로 크게 나타나고 특히 토출공 부근에서 가장 크게 나타났음을 알

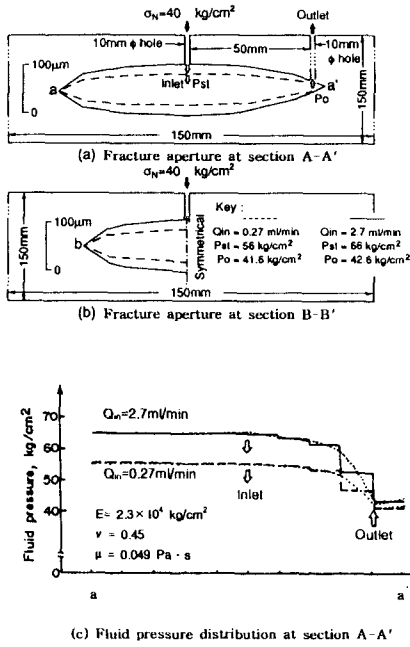


Fig. 17. The results of the coupled stress and flow analysis on a transverse fracture model.

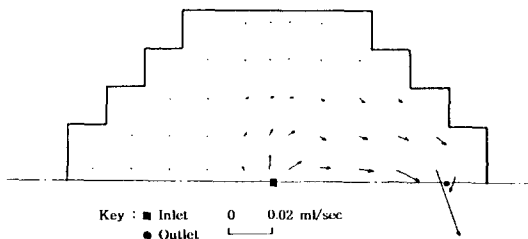


Fig. 18. Fluid flow within a transverse fracture model for $Q_{in} = 2.7 \text{ ml/min}$.

수 있다.

7. 결 론

화강암, 편마암, 반려암, 대리석 그리고 아크릴 시험체에 대하여 인공슬롯에 의한 균열발전의 모델시험, 온도변화에 의한 암석의 수리역학적 거동의 모델시험, 유체순환시험 및 수치해석을 실시한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 인공슬롯시험에서 슬롯의 길이가 7 cm, 13 cm인 경우, 최대주응력과 최소주응력의 비가 1.7 이상이면 일반적으로 최소주응력에 수직인 방향으로 균열이 유

도되는 경향을 보였다.

(2) 최소주응력 방향에 대한 슬롯의 각도가 클수록 초기파쇄압력과 균열개구압력은 작게 나타났다.

(3) 투수율 측정에 있어서 축하중이 증가함에 따라 투수율은 증가하고 한편 봉압이 증가함에 따라 투수율은 현격하게 감소하였다.

(4) 온도를 상온에서 100°C로 증가시켰을 때 10, 20, 30 MPa의 봉압하에서 투수율은 각각 약 2.3배, 1.6배, 1.5배로 나타났다. 즉 온도의 증가에 따라 투수율은 증가했으나, 동일 온도하에서는 봉압의 증가에 따라 투수율은 감소하였다.

(5) 유체순환시험에서 유체의 주입률이 증대할수록 토출률은 증대했으며 주입률과 토출률의 비, 즉 회수율은 주입률과 외부압력에 크게 영향 받지 않는 것으로 나타났다.

(6) 정상유동압력은 대체로 주입률의 제공근에 선형적으로 증가하며 그 증가율은 균열면에 수직인 외부압의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

(7) 수치해석결과에 의하면 유체의 유동량은 주입공과 토출공을 잇는 직선부근에서 일반적으로 크게 나타나고 특히 토출공 부근에서 가장 크게 나타났다.

사 사

본 논문은 한국과학재단의 '93 핵심전문연구과제(2년단위 연구과제 : 과제번호; 931-0800-009-2)의 연구비 지원으로 이루어졌기에 이에 관계관에게 심심한 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이회근, 양형식, 1988, 경계요소법에 의한 암반거동의 실험 및 수치해석적 연구(II)-수압파쇄 및 균열내 유체순환시험과 수치해석-, 한국자원공학회지, Vol. 25, No. 2, pp.98-108
2. 박한규, 신중호, 이회근, 1989, 수압파쇄기구에 관한 연구(제1보)-수압파쇄법의 기본원리 및 그에 의한 취성재료의 인장강도 측정법에 대한 실험적 고찰-, 한국자원공학회지, Vol. 26, No. 3, pp.191-199
3. 장주필, 신중호, 이회근, 1989, 수압파쇄기구에 관한 연구(제2보)-수압파쇄균열내 유체순환시의 유체유동 및 균열거동에 관하여-, 한국자원공학회지, Vol. 26, No. 4, pp.264-272

4. 최성웅, 신중호, 이회근, 1989, 수압파쇄기구에 관한 연구(제3보)-미소균열을 측정에 의한 수압파쇄의 균열발전상태검토-, 한국자원공학회지, Vol. 26, No. 5, pp.387-396
5. Hayashi, K., T. Ito and H. Abe, 1989, In situ stress determination by hydraulic fracturing-A method employing an artificial notch, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 3/4, pp.197-202
6. Doe, T.W. and G. Boyce, 1989, Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, No. 6, pp. 605-611
7. Morrow, C. 1981, Permeability of granite in a temperature gradient, J. Geophys. Res., Vol. 86, pp.3002-3008
8. Mizuta, Y. and C. Fairhurst, 1983, Rock mass behaviour coupled with pressurized water flowing through the fracture, Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy, Martinus Hijhoff publishers, The Hague/Boston, pp.233-249