

압력펄스감소법을 이용한 인공균열코아의 투과도 및 공극율 측정효과

김현태, 김인기, 허대기, 김세준¹⁾, 성원모²⁾

1. 서론

일반적으로 암석코아의 공극율은 보일의 법칙이 적용되어 계산되고, 유효투과도는 Darcy의 법칙에 의해 계산된다. 보일의 법칙은 부피와 압력의 관계식이며, Darcy의 법칙은 코아에 유체가 정상상태로 유동하는 동안 압력의 양단에 걸리는 압력차에 의해 계산된다. 정상상태 방법은 투과도가 매우 낮은 경우에는 유체유동이 정상상태에 이르는 기간이 오래걸리고, 투과도가 너무 큰 경우에는 코아양단에 걸리는 압력 차가 너무 작아 유효투과도 산정이 어렵다. 문헌고찰에 의하면 압력펄스감소법은 이와 같이 극단적으로 비정상적인 코아물성추정에 유용하다고 한다. 그러나 이러한 연구는 대부분 치밀암석의 경우에 주로 한정하고 있고, 균열코아의 경우는 거의 없다. 다만 미국의 텍사스 A&M 대학의 Ning. 외 (1993)는 치밀코아 중간에 생긴 균열을 이용하여 치밀암반과 균열의 물성을 동시에 측정할 수 있다는 방법을 제안했으나, 치밀암반과 균열 물성의 극단적인 상이성으로 인해 단일 시스템에서 두 종류의 물성을 동시에 측정한다는 것은 현실적으로 거의 불가능하거나 측정했다 하더라도 측정값의 정확성이 의심스럽게 된다. 따라서 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 압력펄스감소법의 민감도 분석을 통해 좀더 정확히 균열코아의 투과도를 측정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

실험장비는 코아의 종류에 따라 시스템 상하류부분의 가스용기 부피를 변경할 수 있게 Fig. 1과 같이 설계, 제작하였다. 실험은 먼저 직경이 약 1.5"이고, 길이가 2"인 코아를 코아홀더에 장착하고 수압펌프와 질소가스 주입 레귤레이터를 이용하여 봉압과 시스템 내부압력을 생성한다. 이때 봉압은 약 1500psig이고 시스템 내부압력은 1,000psig이다. 여기서 시스템 내부공간은 밸브 1에서 상하류부분의 가스용기를 비롯한 연결 튜빙은 물론 코아공극 및 레퍼런스 어큐물레이터가 포함된다. 다음엔 시스템의 압력이 안정되면 상류부분의 밸브 4와 전기식 공기작동 밸브 및 하류부분의 밸브 6을 잠그고 압력펄스 생성기를 이용하여 상류부분의 가스용기에 약 30psig 정도의 압력펄스를 생성시킨 후 밸브 3을 잠근다. 시스템이 안정되기를 기다려 상류부분에 설치된 전기식 공기작동 밸브를 신속히 개방하면 상류부분에 발생된 압력펄스가 코아공극를 통하여 하류부분의 용기로 확장되면서 부피변화에 따른 가스의 팽창으로 인해 상류부분 압력은 감소하게 되고, 하류부분 압력은 상승하여 임의의 시간이 지난 뒤 평형에 이르게 된다. 이때 시간에 따른 상하류부분의 압력 변화 추이가 자료취득 시스템에 의해 컴퓨터에 자동으로 저장된다. 여기서 측정된 초기의 압력펄스와 평형상태에서의 압력 차는 공극율 결정에 이용되며, 평형에 이르는 시간은 코아의 유효투과도 결정에 이용된다. 여기서 평형상태의 압력은 정상상태하의 압력과 같다.

3. 결과분석

3-1. 수치해 적용

다공질 매질을 통과하는 가스의 유동방정식은 1차원 공간을 유동하는 가스의 질량평형방정식

으로부터 식 (1)과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\mu_g \phi C_i}{7.324 \times 10^{-8} K} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 Ψ 는 의사압력으로서 가스의 점성도, 압축인자, 압력의 함수로 나타나는 매개변수로 다음과 같다.

$$\Psi = \int_P^p \frac{2P}{\mu_g Z} dP \quad (2)$$

이때 초기조건과 경계조건은 실험시스템에서 설정한 것과 동일하게 나타내면 다음과 같다. 먼저 시스템의 하류부분, 코아격자, 시스템의 상류부분의 초기조건은 다음과 같다.

$$\Psi(x=0, t=0) = \Psi_d, \quad \Psi(x, t=0) = \Psi_d, \quad \Psi(x=L, t=0) = \Psi_u \quad (3)$$

다음으로 시스템의 하류부분과 상류부분의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\mu_g C_g V_d}{7.324 \times 10^{-8} KA} \frac{\partial \Psi_d}{\partial t}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\mu_g C_g V_u}{7.324 \times 10^{-8} KA} \frac{\partial \Psi_u}{\partial t} \quad (4)$$

이상의 초기조건과 경계조건을 적용한 식 (1)을 유한차분화하여 해를 구할 수 있다. 이때 식 (1)의 해와 이번 실험자료를 매칭 (matching)시켜 코아의 공극율과 투과도를 얻을 수 있다. Table 1의 사례 A는 수치해와 해석해를 비교하기 위해 사용한 균질코아의 실험자료이다. Fig. 2는 실험 자료에 해석해와 수치해를 매칭한 결과로서 두 결과는 모두 잘 매칭되는 것을 알 수 있다. 여기서 수치해에 사용된 코아의 격자수는 15개이다. 그림에서 공극율에 종속하는 인자는 정상상태에 도달한 시점의 무차원 의사압력이고, 투과도에 기여하는 종속인자는 정상상태에 도달한 최초 시간이다. 이 실험에 의해 결정된 평형 의사압력 Ψ_d^* 가 0.286이고, 최초 정상상태 도달 시간 t^* 가 25.2초 일 때 균질코아의 공극율과 투과도는 각각 4.6%와 0.055md이다. 헬륨공극율 측정기와 정상상태방법에 의해 측정된 동일한 균질 코아의 물성이 각각 4.5%와 0.054md인 점을 고려할 때 이 연구에서 측정된 물성 값은 모두 정확한 값으로 산출된 것을 알 수 있다. 이때 공극율의 실험오차는 2.2%이고, 투과도의 실험오차는 1.8%이다.

3-2. 투과도와 공극율

일반적으로 균열코아는 균열이 없는 균질코아에 비해 투과도가 매우 높아 정상상태에 도달하는 시간이 짧아 이 기간동안 수치해에 매칭시킬 수 있는 실험자료의 취득이 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 실험 시스템의 상하류부분 가스용기 중 적어도 하나의 부피를 크게 증가시켜 정상상태에 도달하는 시간을 연장시켜 주어야 한다. 그러나 이런 경우 압력천이 자료는 많이 취득할 수 있으나 상하류부분 가스용기부피에 비해 공극부피가 매우 작기 때문에 압력필스의 확장으로 인한 압력변화 차가 나타나지 않기 때문에 상대적으로 공극의 민감도가 적게 된다. Fig. 3과 4는 이러한 현상을 잘 설명해 주고 있다. Fig. 3에서 실선은 공극율과 투과도가 낮은 경우의 압력변화 추이, 점선은 공극율과 투과도가 높은 경우의 압력변화추이를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 낮은 공극율과 투과도를 갖는 코아의 경우 물성추정에 문제가 없지만 높은 공극율과 투과도를 갖는 코아의 경우 정상상태에 이르는 시간이 겨우 2초 이내이다. 이러한 경우 앞서 설명

한 바와 같이 시스템의 상하류부분 중 적어도 하나의 가스용기 부피를 크게 하여 정상상태에 도달하는 시간을 증대시켜야만 정확히 투과도를 산출할 수 있는 많은 압력천이자료를 얻을 수 있다. Fig. 4는 Table 1의 사례 B 자료를 기본으로 하여 상하류부분의 가스용기의 크기와 공극율의 측정한계에 대한 민감도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 민감도 변수인 종축은 공극율에 대한 정상상태에 도달하는 압력구배로서 공극율이 작고 상하류부분의 가스용기의 크기가 작을수록 민감도가 증가하여 공극율 측정이 용이하다. 실제 시험에서도 상하류 가스용기의 크기가 10cc 이하이고 공극율이 10% 이하인 코아자료의 경우 매칭이 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 상하류부분 가스용기의 크기가 각각 25cc인 시스템에 대하여 코아의 투과도가 2md이고 공극율이 각각 0.1%, 0.5%, 1%인 경우의 공극율 변화에 대한 민감도를 분석하였다. 그 결과 서로 다른 공극율에 대한 압력변화의 차이는 거의 나타나지 않았다. 즉, 이와 같은 결과는 과거의 시스템으로는 균열공극율을 측정할 수 없다는 것을 시사하고 있다. Fig. 6은 원형의 코아의 중심에 균열을 인공적으로 낸 균열코아에 대한 실험자료를 매칭하여 투과도를 산출한 것이다. 이때 균열투과도는 상하류간의 무차원 의사압력 차에 의해 계산되는데, 균열투과도는 2.74md이다. 한편 동일한 균열코아를 정상상태방법에 의해 산출한 균열투과도는 2.73 md이다. 두 자료의 실험 오차는 0.25%로 매우 작은 것을 알 수 있었다. 이 결과는 이 연구에서 제안한 방법에 의해 투과도가 매우 큰 균열투과도를 매우 정확하게 측정할 수 있다는 근거가 된다.

결론적으로 이상과 같은 결과는 기존의 압력펄스감소 실험장비에서 상하류부분의 가스용기 크기를 확대해줌으로써 비록 균열코아의 공극율 측정은 불가능하지만 유효투과도만은 정확하게 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

압력펄스감소법은 균질한 치밀코아에 대해서는 투과도와 공극율을 동시에 측정할 수 있으나 투과도가 큰 균열코아의 경우에는 공극율은 타 방법에 의해 산출하여야 하나 균열투과도만은 실험 시스템 상하류부분의 가스용기 크기를 조정함으로써 매우 정확하게 측정할 수 있다. 특히, 실제 균열코아의 경우 균열을 형성하는 균열표면 거칠기의 차이에 의해 형성된 간극변화에 의해 유체유동시 채널현상이 나타나기 때문에 균열투과도 측정이 쉽지 않다. 그러나 이 방법을 적용함으로써 자연균열이 발달한 코아의 투과도 측정이 현실화 될 수 있게 되었다.

주요어 : 압력펄스, 무차원 의사압력, 인공균열코아

- 1) 한국자원연구소 석유해저부 (htkim@kigam.re.kr)
- 2) 한양대학교 응용시스템공학부

참고문헌

1. 김현태, 허대기, 김세준, 성원모, 장태현, 1998, "압력펄스 감소방법을 이용한 치밀암석의 저투과도 측정," 한국자원공학회지, Vol.35, No.5, pp.475-80.
2. Haskett, S.E., Narahara, G.M., and Holditch, : "A Method for the Simultaneous Determination of Permeability and Porosity in Low-Permeability Cores," paper SPE 15379, 1986
3. Xixu, N.M Fan, J., Holditch, S.A., and Lee, W.J, : "The Measurement of Matrix and Fracture Properties in Naturally Fractured Cores," paper SPE 25898, 1993.

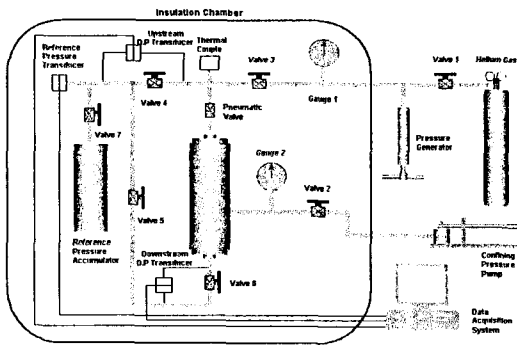


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory.

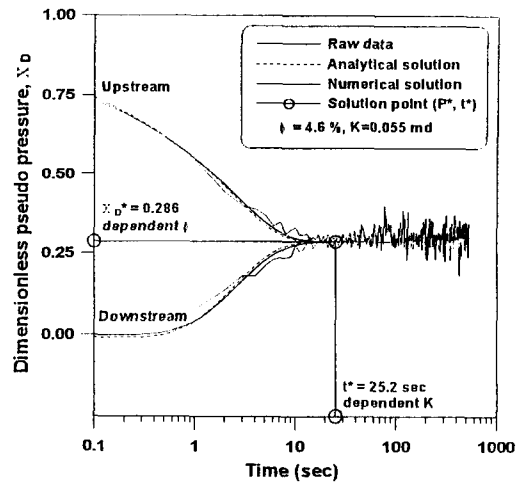


Fig. 2. Comparison between numerical and analytical solution, and matching between experiment data and the solutions.

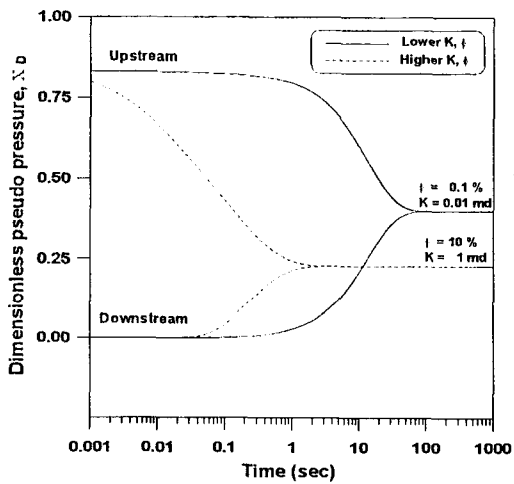


Fig. 3. Shifting of pressure transient due to higher porosity and permeability, and lower ones.

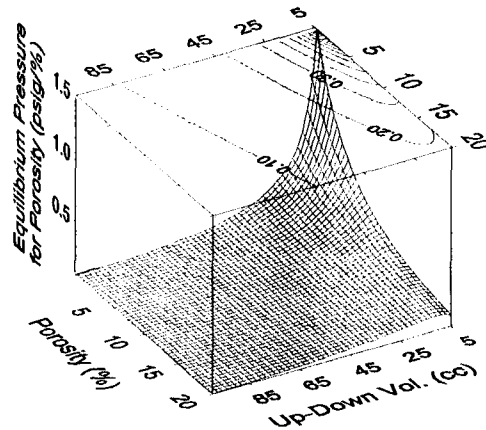


Fig. 4. Sensitivity of equilibrium pressure for porosity due to porosity and up-down volume.

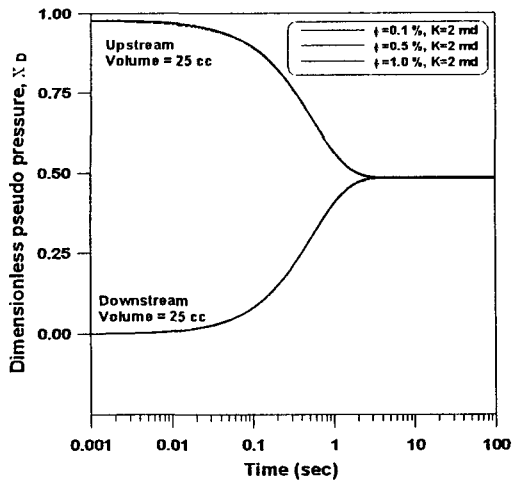


Fig. 5. Effect of porosity on pressure transient at constant permeability.

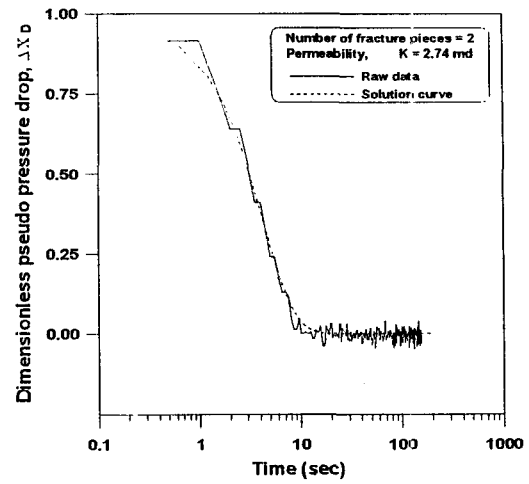


Fig. 6. Matching between experimental raw data and numerical solution for synthetic fractured core.

Table 1. Parameters used in experiment

Parameters	Case A	Case B
Core length, cm, L	4.944	4.941
Core diameter, cm, D	3.772	3.780
Upstream volume, cc, V_u	3.01	153.01
Downstream volume, cc, V_d	3.17	78.93
Initial upstream pressure, psig, P_u	1029.6	1030.7
Initial downstream pressure, psig, P_d	999.3	999.7
Overburden pressure, psig	1500.0	1500.0
System temperature, °C	23.6	26.9
Measurement time step size, second	1.0	0.5
Fluid used in experiment	Nitrogen gas	Nitrogen gas