

공극률과 건조율을 이용한 다공질 사암의 투과도 추정방법 제안

고은지¹ · 김진후^{2*}

¹동남권 건설교통기술 지역거점센터
²동아대학교 에너지·자원공학과

A Suggested Method for Predicting Permeability of Porous Sandstone Using Porosity and Drying Rate

Eunji Ko¹ and Jinhoo Kim^{2*}

¹Dongnam Regional Infrastructure Technology Management Center

²Dong-A University, Department of Energy and Mineral Resources Engineering

요약: 투과도는 다공질 암석 내에서 유체의 유동 특성을 나타내는 중요한 매개변수로서 일반적으로 코어 시료의 유체 유동실험을 통해 산출된다. 하지만, 유체 유동실험을 위해서는 별도의 실험장치가 필요하며, 투과도가 낮을 경우 많은 시간이 소요될 수 있다. 본 연구에서는 일련의 투과도 측정 실험 없이 시료의 건조과정만으로 투과도를 도출하기 위해 유체투과도, 공극률, 건조율간의 상관관계를 분석하였다. 공극률은 표면건조 포화시료를 건조시키면서 무게 변화를 연속적으로 측정하는 건조 모니터링 방법을 이용하여 산출하였으며, 건조율은 물 포화율에 따른 시료의 무게 변화율로부터 구했다. 70 ~ 670 mD의 투과도를 보이는 6개의 베레아 사암을 이용해 회귀분석한 결과 공극률 및 건조율로부터 다공성 사암의 투과도를 예측할 수 있는 새로운 경험식을 도출하였다.

주요어: 유체 투과도, 공극률, 건조율, 건조 모니터링

Abstract: As the permeability is an important parameter to characterize the ease with which a porous medium transmits fluids, it is usually obtained by fluid flow experiment using core samples. In order to measure the permeability, however, an experimental apparatus is required and it might take long measurement time, especially for tight samples. In this study, the relationship between permeability and porosity as well as drying rate has been investigated to predict the permeability without a series of measuring experiments. Porosity is measured by drying monitoring method, which measures weight variation continuously while drying surface-dried saturated sample, and drying rate is obtained from weight variation ratio with respect to the water saturation. The total of 6 Berea sandstone samples, which have a permeability range of 70 to 670 mD, were used in this work, and a new and empirical equation which could predict permeability of porous sandstone by using porosity and drying rate were obtained through regression analysis.

Keywords: permeability, porosity, drying rate, drying monitoring

서 론

투과도는 다공질 매질 내에서 유체의 유동 특성을 나타내는 중요한 매개변수이며, 투과도를 정확하게 측정하거나 예측하는 기술은 탄화수소 또는 지하수의 생산성과 직결되므로 지금

까지 많은 연구가 이루어졌다(Adler *et al.*, 1991; Carrier, 2003; Keehm and Mukerji, 2004; Lee and Keehm, 2009).

일반적으로 암석의 투과도를 측정하기 위해서는 별도의 기계장치가 필요하며, 투과도가 낮은 시료의 경우 시간도 많이 걸리는 편이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 측정이 비교적 간단한 1개 이상의 매개변수를 이용해 투과도를 산출할 수 있는 여러 경험식들이 발표되었다. Hazen (1911)은 포화된 모래의 수리전도도를 모래 구성입자의 크기를 이용하여 구할 수 있는 경험식을 발표하였으며, Kozeny (1927)와 Carmen (1956)은 구성입자의 크기 분포와 간극비(void ratio; e)를 이용하여 다공성 매질의 투과도를 예측할 수 있는 반이론적이며, 반경험적인 관계식을 발표하였다. Jacquin (1964)는 분급이 매우 양호하고 평균 입자의 크기가 250 μm 이며, 청결 사암인

2014년 4월 7일 접수; 2014년 4월 30일 수정; 2014년 8월 11일 채택

*Corresponding author

E-mail: jkim@dau.ac.kr

Address: Energy and Mineral Resources Engineering Dept.,
Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan, Korea

©2014, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fontainebleau 사암을 이용하여 투과도를 공극률의 함수로 간단히 나타내었다. Rezaee *et al.* (2006)은 탄산염암의 경우 공극 반경의 중앙값(median)과 공극률의 조합이 투과도와 매우 높은 상관관계가 있음을 밝힌 바 있으며, Gao and Hu (2013)는 공극 반경의 중앙값으로부터 투과도를 예측할 수 있는 새로운 경험식을 제안하였다.

국내의 경우, Kim *et al.* (2002)은 쓰레기 매립층과 분탄화된 무연탄의 투과도와 하중압 사이의 상관식을 발표한 바 있으며, Jun *et al.* (2007)은 코어 및 물리검층 자료를 이용하여 각 수리학적 단위 그룹별 유체 투과율을 예측할 수 있는 퍼지 모델을 개발하였다. Hu and Keehm (2008)은 동해-1 가스전 시료를 이용하여 P과 속도로부터 투과도를 정량적으로 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다. Yang *et al.* (2013)은 X-ray CT를 이용한 다공질 사암의 국부적 공극특성 변화와 수리 이방성 연구를 통하여 면공극률 편차와 투과도 사이에 매우 높은 역의 상관관계가 있음을 밝혔다.

선행 연구에 따라 암석의 투과도는 공극률과 공극의 연결성에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 특히 공극의 연결성은 입자의 크기, 모양, 입자 크기의 분포, 모관 압력, 파쇄대 발달 상태 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이 밖에 공극의 크기와 모관 내 유체의 유동 등 공극의 구조 및 연결성이 암석의 증발건조 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 연구되었다(Goertz and Knight, 1988; Siegesmund and Snelthage, 2011).

본 연구에서는 공극률과 공극의 연결성이 암석의 증발건조 특성에 영향을 미치며, 이는 결국 암석의 유체 투과도에도 영향을 미칠 것이라는 점에 착안하여 암석의 공극률과 증발건조 특성을 반영한 유체 투과-증발 건조 모델을 제안하고자 한다. 여기서 암석의 공극률을 산출하고 증발건조 특성을 파악하기 위해 Lee and Lee (2010)가 제안한 건조 모니터링 기법을 사용하였다. 건조 모니터링 기법은 공극률 계산에 필요한 시료의 건조무게를 정확하게 산출하기 위해 제안된 방법으로, 암석시료를 물로 포화시킨 후 건조 진행에 따른 시료의 무게변화를 연속적으로 자동 기록하고 분석하는 방법이다. 건조가 진행됨에 따라 포화 시료의 무게는 점차 감소하여 궁극적으로 건조 시료의 무게에 접근하는데, 포화시료와 건조시료 무게 차이가 곧 공극 내에 포함된 물의 증발건조에 기인한다는 원리를 이용하여 공극률을 계산한다. 건조 모니터링을 통해 얻어지는 건조 시간에 따른 무게 감소곡선, 즉 건조곡선(drying curve)의 형태는 암석의 증발건조 특성에 따라 달리 나타나기 때문에 (Franzen and Mirwald, 2004; Ko *et al.*, 2012), 이를 매개변수화하면 유체 투과 모델에 적용이 가능하며, 나아가 유체 투과도를 공극률과 증발건조 특성으로부터 산출할 수 있는 경험식 도출이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 건조 모니터링을 통해 얻어지는 공극률 및 건조곡선의 형태가 암석의 증발건조 특성에 따라 달라지고, 이

는 곧 투과도와 밀접한 연관이 있을 것으로 판단하여, 70 ~ 670 mD의 다양한 투과도를 보이는 6개의 원주형 베레아 사암(Berea Sandstone) 시료를 이용하여 공극률 및 증발건조 특성으로부터 유체 투과도를 예측할 수 있는 상관 관계식을 도출하였다.

유체 투과 및 증발 건조 모델

유체 투과 모델

단일 유체가 다공성 매질 내를 흐르는 경우 매우 복잡한 유동 경로를 갖는 매질을 여러 개의 동일한 대표 요소부피(representative elemental volume; REV)를 이용하여 유체의 흐름을 나타낼 수 있다. 이 때 REV는 Fig. 1과 같이 한 개의 구불구불한 경로를 갖는 튜브를 포함한다(Ruth *et al.*, 2013). 이 때, L 은 튜브의 전체 길이를, D 는 튜브의 직경을, L_b 는 요소의 길이를, 그리고 A_b 는 요소의 단면적을 각각 나타낸다. 요소 양단에 $P_a - P_b$ 의 압력차가 발생하면 유체의 흐름이 발생하며, 공극률 ϕ 인 매질의 투과도 k 는

$$k = \frac{\phi^m (\sigma \cos \theta)^2}{2a} \int \frac{dS_w}{(P_c)^2} \quad (1)$$

와 같이 표현된다(Ruth *et al.*, 2013). 여기서 σ 는 표면장력을, θ 는 접촉각을 나타내며, m 과 a 는 Archie의 고결지수(cementation exponent)와 상수를 각각 나타낸다. 식 (1)은 유체 포화율(S_w)에 따른 모관 압력(P_c)의 변화가 유체 투과도에 영향을 미치는 현상을 적분을 통해 반영하고 있다.

튜브 내에서의 모관 압력 P_c 와 모관 직경과는

$$P_c = \frac{4\sigma \cos \theta}{D} \quad (2)$$

의 관계가 있으므로, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$k = \frac{\phi^m (\sigma \cos \theta)^2}{32a} \int \frac{D^2}{(\sigma \cos \theta)^2} dS_w \quad (3)$$

를 얻을 수 있다.

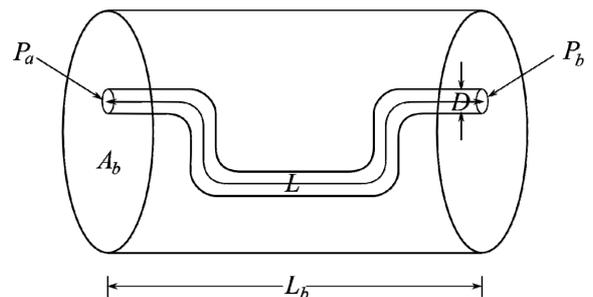


Fig. 1. A representative elemental volume model. (after Ruth *et al.*, 2013).

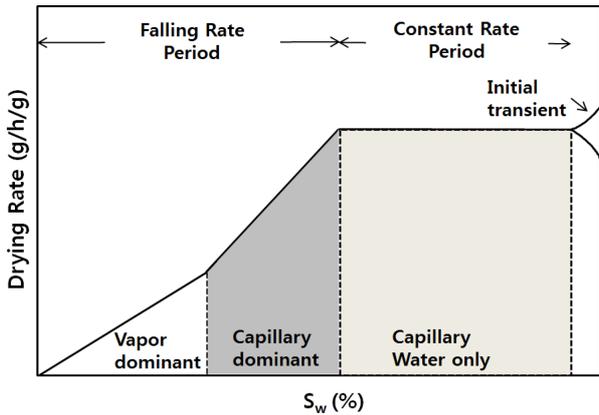


Fig. 2. A Drying rate curve model showing initial transient, constant rate period, and falling rate period. The falling rate period is subdivided into capillary dominant and vapor dominant region. (after Goertz and Knight, 1998).

증발 건조 모델

공극을 포함하는 암석 내의 물 및 수증기의 이동과 분포는 건조과정에서 다양한 단계를 거치는데, Ko (2014)는 Mujumdar and Devahastin (2012)가 제시한 건조율 곡선(drying rate curve)의 가로 축을 함수비 대신 물 포화율(S_w)로 바꾸어 Fig. 2와 같은 건조율 곡선으로 건조과정의 단계를 설명하였다. 여기서 건조율(Drying rate, D_r)은 단위 시간 당 단위 시료무게에 대한 수분 변화량의 비로 정의하였다. 처음 건조가 일어날 때 암석은 열 평형상태가 되기 위해 초기 과도과정을 거친다 (initial transient). 건조가 진행됨에 따라 물이 모관 유동에 의해 암석 표면으로 이동해 건조되는데 이 기간을 항률기간 (constant rate period)라 한다. 건조가 계속 진행됨에 이 평형 상태는 깨지게 되어 감률기간(falling rate period)으로 접어든다. 한편, 감률기간은 모관 유동 우세(capillary dominant)기간과 수증기 우세(vapor dominant)기간으로 구분 할 수 있다(Ko, 2014).

유체 투과-증발 건조 모델

공극을 포함하는 암석 내 유체의 유동 특성은 공극률뿐만 아니라 유체의 증발 건조 특성까지도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되어 새로운 유체 투과-증발 건조 모델을 수립하였다.

공극의 직경이 클수록 공극의 표면적이 넓어지고, 표면적에 비례하여 건조가 빨리 진행되므로, 결국 암석의 건조율, D_r 은 공극 직경의 제곱에 비례하게 된다. 또한 물 포화율에 따른 표면장력과 접촉각의 변화가 없다고 가정하면, 식 (3)은 건조율을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$k = C \cdot \phi^m \int_{S_{w_1}}^{S_{w_2}} D_r dS_w \quad (4)$$

여기서 C 는 Archie 상수(a) 및 표면적과 건조율 사이의 비례

계수를 포함하는 비례상수이다.

식 (4)는 유체 투과-증발 건조 모델에 의해 투과도를 공극률과 건조율의 함수로 표현하고 있다. 이 식의 우변에 물 포화율에 대한 건조율의 적분값이 사용되는 데 이를 다음과 같이 IDR (integration of Drying Rate)로 정의하였다.

$$IDR \equiv \int_{S_{w_1}}^{S_{w_2}} D_r dS_w \quad (5)$$

여기서, 적분 구간 S_{w_1} 과 S_{w_2} 은 건조율 곡선에서 감률기간 중 모관 유동 우세기간이 끝나는 점과 항률기간의 시작점(Fig. 2의 건조율 곡선에서 음영으로 칠해진 구간)으로 각각 설정한다.

식 (5)를 식(4)에 대입하면

$$k = C \cdot \phi^m \cdot IDR \quad (6)$$

의 관계식이 얻어진다. 즉, 투과도는 ϕ^m 과 IDR의 곱에 비례하는 상관관계를 갖는다. Humble의 지층계수 관계식에 의하면, 공극률이 크고, 입자상 암석에 대한 지층계수는 $F = 0.81/\phi^2$ 로 표현되며, 고결지수로 $m = 2$ 를 사용한다(Tiab and Donaldson, 2012). 본 연구에 사용된 베레아 사암도 공극률이 크고, 입자상 암석에 해당되므로 $m = 2$ 를 사용하였으며, Humble 관계식의 분자에 표시된 상수 0.81은 식 (6)의 상수 C 에 포함된 것으로 본다.

실험장치 및 방법

암석의 공극률은 시료의 표면건조 수포화무게와 건조무게, 그리고 부피를 측정함으로써 구할 수 있으며, 암석의 건조율 곡선은 수포화 시료를 건조시키면서 무게 변화를 연속적으로 측정함으로써 구할 수 있다.

본 연구에서는 70 ~ 670 mD의 서로 다른 투과도를 보이는 6개의 베레아 사암 시료를 이용하여 투과도, 공극률 및 건조율을 구했으며, 각각의 인자를 측정하기 위한 실험장치 및 방법은 다음과 같다.

시료 준비 및 투과도 측정

총 6개의 시료 중 5개 시료(BS0501, BS1501, BS2501, BS2502, BS5001)는 Berea Sandstone Petroleum Cores (2014)에서 판매하는 직경 약 25 mm의 원주형 베레아 사암을 구입한 후 약 38 mm의 길이로 절단하여 사용하였고, 1개의 시료(BS1301)는 기 보유중인 시료(직경 25.95 mm, 길이 32.75 mm)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 베레아 사암은 다공성 사암으로 Tiab and Donaldson (2012)에 의하면 양호(good) 내지 매우 양호(very good)한 투과도를 갖는 것으로 분류된다. 또한 베레아 사암은 석유업계에서 유체 투과용 표준시료로 자주 사용되고 있으며, 주로 실리카와 알루미늄으로 구성되어 있고 기타 산화물을 미량 포함하고 있다(SiO_2 : 93.13%, Al_2O_3 :

Table 1. Dimension and permeability of the specimens used in the experiment.

Sample	D (mm)	L (mm)	Perm. (mD)	Perm. Classification*
BS0501	25.17	35.96	70	Good
BS1301	25.95	32.75	130	Good
BS1501	25.21	38.50	145	Good
BS2501	25.07	37.71	338	Very Good
BS2502	25.14	38.09	326	Very Good
BS5001	25.15	37.96	670	Very Good

*Permeability, k in mD, may be judged as: poor if $k < 1$, fair if $1 < k < 10$, moderate if $10 < k < 50$, good if $50 < k < 250$, and very good if $k > 250$ (after Tiab and Donaldson, 2012).

3.86%) (Berea Sandstone Petroleum Cores, 2014).

건조율이 시료의 무게뿐만 아니라 표면적과도 밀접한 관계가 있을 것으로 예상되어 시료의 절단 길이를 기 보유 시료인 BS1301의 표면적과 유사하고, 투과도 측정용 홀더에 삽입이 가능하도록 결정하였다. 절단된 시료는 초음파 세척기(SH-2140, Sae han ultrasonic Co.)로 세척하고, 대류형 건조기에 넣어 48시간 이상 완전히 건조하였다. 건조된 시료를 투과도 측정기(PERG-200, Core Laboratories)에 넣고 투과도를 측정하였다. 이 때 작동 유체로 질소를 사용하였으며, BS0501 시료의 경우 미끄러짐 효과를 보정하기 위해 Klinkenberg 보정을 실시하였다. 실험에 사용된 6개 시료의 크기 및 투과도를 Table 1에 정리하였다.

수포화장치 및 방법

암석을 수포화시키기 위하여 Fig. 3과 같은 건식진공 후 습식진공 포화장치를 이용하였다. 건식진공을 위해서 진공 데시케이터 (1)에 증류수를 담고 진공 데시케이터 (2)에 시료를 넣은 후 분당 255 리터를 배출하는 진공펌프(ROAIRVAC 9.0, Rothenberger)를 가동하여 2 torr 이하의 진공상태를 유지하였다. 진공 초기에 진공 데시케이터 (1)에 담긴 증류수에는 기포가 발생하는데, 기포가 빨리 제거되도록 데시케이터 안에 플라스틱 조각을 넣고 주기적으로 교란시켰다. 증류수 내의 기포가

충분히 제거된 상태에서도 계속 펌프를 가동하여 건식진공 소요시간을 2시간으로 일정하게 유지하였다. 건식진공이 완료되면 진공 데시케이터 (1)의 밸브를 열어 진공 데시케이터 (2) 안에 놓인 시료가 증류수에 잠기도록 하였다. 시료가 완전히 물에 잠기면 진공 데시케이터 (1)의 밸브를 잠그고 습식진공을 2시간 동안 수행하였다. 건식진공과 습식진공 과정에 생기는 수증기를 포집하기 위하여 진공 데시케이터 (2)와 진공펌프 사이에 콜드 트랩(cold trap; WCT-40, 대한과학)을 설치하였으며, 콜드 트랩의 온도는 -25°C 를 유지하였다. 습식진공이 끝나면 진공을 해소하여 시료를 물로 포화시켰으며, 이 시료를 물에 담근 채 48시간 동안 상온에서 보관하였다.

표면건조 수포화무게 및 부피측정

수포화 상태로 상온에서 보관한 시료를 물에서 꺼내어 젖은 수건으로 시료의 겉면에 있는 물기를 제거하였다. 매 실험마다 최대한 동일한 표면건조 상태를 유지하기 위해 젖은 수건의 무게가 일정하도록 물을 가감하였다. 본 실험에서는 젖은 수건의 무게가 항상 24 g이 되도록 하였으며, 물기 제거는 매 측정마다 항상 2분 동안만 수행하였다.

표면건조 시료의 수포화무게(M_{sat})는 0.001g의 정밀도를 갖는 전자저울(EX623, Ohaus)을 이용하여 측정하였으며, 시료의 부피는 전자비중계(MD-300S, Alfa Mirage)를 이용하여 측정하였다. 전자비중계는 부력 이용방법에 의해 부피를 측정하며, 이를 위해 시료의 수포화무게 및 수중무게(M_{sub})를 0.01 g 단위로 측정하였다. 전자비중계에 사용되는 물의 밀도를 ρ_w 라 하면 시료의 부피는

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (7)$$

로 구할 수 있다(KSRM, 2006).

공극률 및 건조율 산출

다공성 사암의 공극률과 건조율을 측정하기 위해 Lee and Lee (2010)가 제시한 건조 모니터링 장치를 이용하였다(Fig.

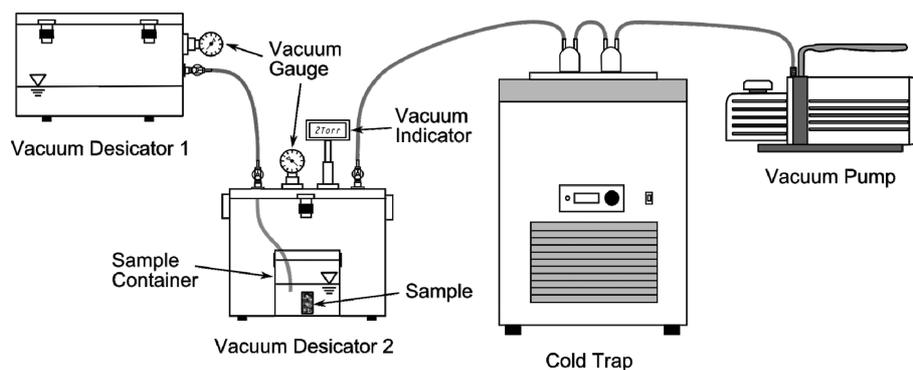


Fig. 3. A schematic diagram for wet-type after dry-type vacuum saturation system using two vacuum desiccator and a cold trap.

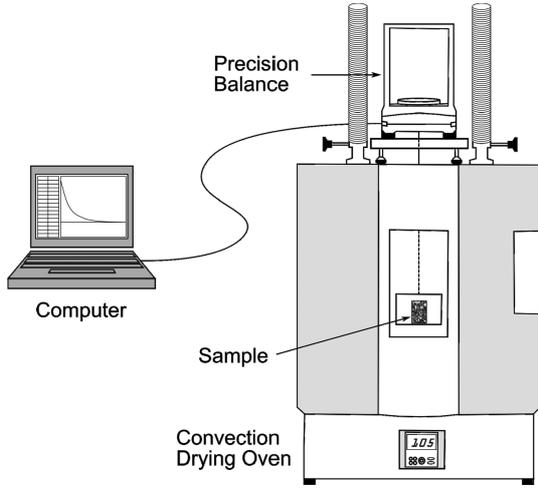


Fig. 4. A schematic diagram for drying monitoring system.

4). 표면건조 수포화 시료를 105°C로 설정한 자연대류형 건조기(DO-91, 대흥과학)에 넣고 전자저울(EX623, Ohaus)로 매 30초 간격으로 무게 변화를 측정하여 자료를 컴퓨터에 저장하였다.

Fig. 5는 6개의 시료 중 BS2502 시료에 대하여 24시간 건조에 따른 무게 변화 곡선을 보인 것으로 표면건조 수포화무게(M_{sat})로 정규화하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 건조 개시 후 약 70분까지는 시료의 무게가 수분이 증발함에 따라 급격히 감소하다가 그 이후부터는 무게 변화가 거의 나타나지 않는다. 따라서 시간에 따른 무게 관측값을 이용하여 곡선접합에 의해 회귀식을 구하면 아주 오랜 시간이 경과한 후의 시료 무게, 즉 시료의 건조무게(M_s)를 구할 수 있다. 시간(t)이 지남에 따라 정규 무게(M_n)가

$$M_n = (1 - c)\exp(-at^b) + c \quad (8)$$

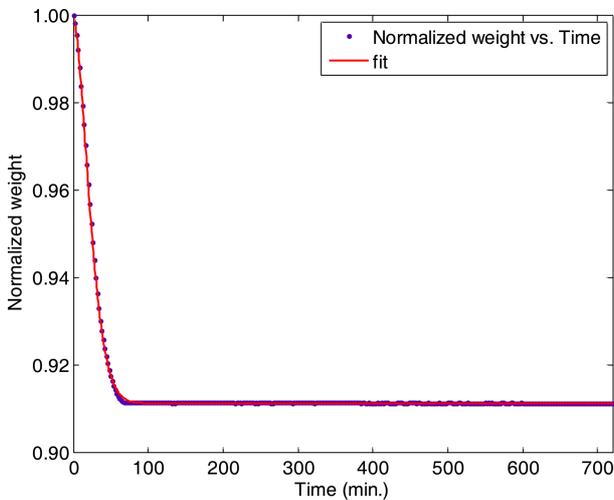


Fig. 5. Variation of normalized weight during drying. A curve fit obtained by using the eq. (6) is overlapped on the data.

와 같은 함수관계가 있다고 가정할 때, $t=0$ 인 경우 $M_n=1$ 로 수포화 상태의 정규무게를 나타내며, 시간이 무한대로 경과했을 경우 $M_n \approx c$ 로 건조상태의 정규무게에 수렴하게 된다. 따라서 시료의 건조무게는

$$M_s = c \cdot M_{sat} \quad (9)$$

가 된다. Fig. 5에 건조에 따른 시료의 정규 무게와 식 (8)로 구한 회귀곡선을 함께 나타내었다. 이 때 곡선접합에 따른 결정계수는 $R^2=0.9114$ 이었으며, 나머지 5개 시료도 결정계수 0.9 이상의 높은 값으로 건조무게를 산출할 수 있었다.

시료의 공극률 ϕ 는 KSRM (2006)의 방법에 따라 다음의 식 (10)과 (11)로부터 구했다.

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (10)$$

$$\phi = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (11)$$

여기서, V_v 는 공극의 부피를, V 는 식 (5)로 결정된 시료의 부피를 각각 나타낸다. 6개 시료에 대한 공극률을 Table 2에 정리하였다.

암석의 건조율은 암석 단위무게 당 단위시간에 증발하는 수분의 양으로 다음과 같이 정의하였다.

$$D_r = \frac{\Delta M_w}{\Delta t \cdot M_s} \quad (12)$$

여기서 ΔM_w 는 Δt 시간 동안 발생한 공극수의 무게 변화량이

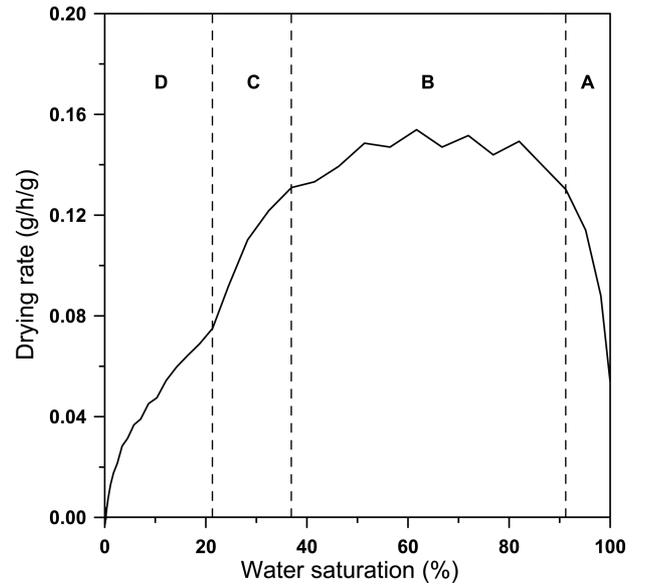


Fig. 6. A plot of drying rate vs. water saturation for BS-2502. The constant rate period (B) starts at $S_w=91.2\%$ and the capillary dominant region of the falling rate period (C) ends at $S_w=21.3\%$. Region A represents initial transient period and D represents vapor dominant region of the falling rate period.

며, D_r 의 단위는 [g/hr/g]이다. 건조시간 t 가 경과한 후의 물 포화율(S_w)은 건조시간 t 가 경과한 후 측정된 시료의 무게(M)로부터 다음 식을 이용해 구했다.

$$S_w = \frac{M - M_s}{M_w} \times 100\% \quad (13)$$

Fig. 6은 6개의 시료 중 대표적으로 BS2502의 건조율을 물 포화율에 대해 나타낸 건조율 곡선이다. 이를 Fig. 2의 건조율 곡선 모델과 비교해보면, 항률기간은 물 포화율 약 91.2 ~ 36.9%에 해당하며, 감률기간 중 모관 유동 우세기간은 물 포화율 36.9 ~ 21.3%에 해당함을 알 수 있다.

투과도 예측

투과도와 공극률 및 건조율과의 상관성 분석을 위하여 식 (4) ~ (6)을 이용하였다. IDR을 계산하기 위한 식 (5)의 적분은 사다리꼴 적분법을 이용하여 수치 적분하였다. Table 2에 식 (5)로 계산된 각 시료에 대한 IDR 값을 표로 나타내었다. 표에서 보듯이 투과도가 증가함에 따라 IDR 값이 증가하는 경향을 보인다.

6개의 시료에 대한 투과도와 $\phi^2 \cdot IDR$ 값을 Table 2에 정리하였으며, 투과도를 세로축으로, $\phi^2 \cdot IDR$ 값을 가로축으로 산포도를 그리면 Fig. 7과 같다. 이 때 투과도를 나타내는 세로축을 log 스케일로 그리면 투과도와 $\phi^2 \cdot IDR$ 사이에 선형의 관계를 보여, 투과도 k (mD)와 $\phi^2 \cdot IDR$ 사이에

$$k = 17.217e^{729.01 \cdot (\phi^2 \cdot IDR)} \quad (14)$$

의 관계식을 얻을 수 있었다. 이 때, 결정계수 $R^2 = 0.9954$ 로 투과도와 $\phi^2 \cdot IDR$ 사이에 매우 높은 상관관계가 있음을 보인다.

Okabe and Blunt (2004)는 유체 투과도 예측 모델을 수립하면서 공극률 23%, 유체 투과도 1,100 mD인 베레아 사암을 기준으로 삼았다. 공극률과 IDR의 회귀분석을 통하여 이 시료의 IDR을 추정하면 $IDR = 0.1115$ 가 된다. 이를 식 (14)에 대입하면 투과도가 약 1,270 mD로 계산되어 실제 시료의 투과도보다 약 15% 정도 큰 값을 보인다. 한편, 이들은 마이크로 CT

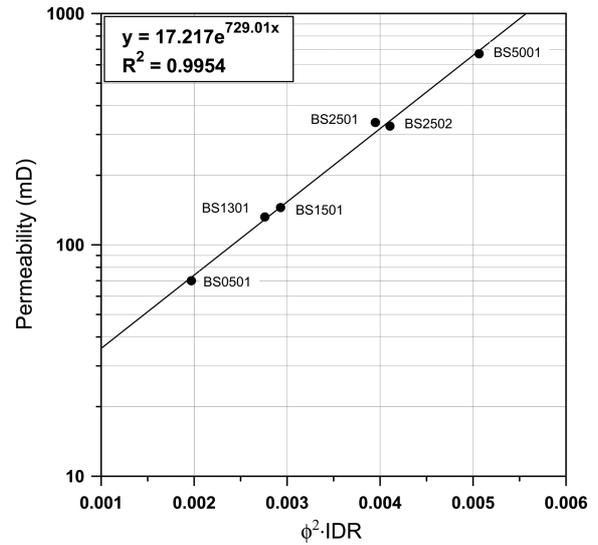


Fig. 7. Correlation between permeability and porosity squared times IDR.

이미지를 이용해 이 시료에 대한 유체 투과도를 1,346 mD로 예측하였으며, 재구성된 미세구조(reconstructed microstructure) 모델을 이용하여 1,274 mD를 얻었다. 이밖에, Øren and Bakke (2003)는 같은 시료에 대해 공극 스케일 모델링을 통해 791 ~ 942 mD의 투과도를 얻었다. 이상의 투과도 추정값을 비교해 보면, 본 경험식으로 구한 베레아 사암의 투과도는 Øren and Bakke (2003)의 모델 추정치보다 Okabe and Blunt (2004)의 모델 추정치와 더 가까우며, 실제 투과도와도 매우 근사하게 일치한다.

한편, Zinszner and Pellerin (2007)은 공극률 4 ~ 25% 범위를 갖는 Milly la Forêt 사암에 대해 투과도(mD)와 공극률(%)의 상관관계를 3차 다항식을 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\log k = a(\log \phi)^3 + b(\log \phi)^2 + c(\log \phi) + d \quad (15)$$

여기서, 계수 $a = 11.17$, $b = -40.29$, $c = 51.6$, $d = -20.22$ 이다. 본 실험에서 구한 공극률을 식 (15)에 대입하면 투과도가 약 1,000 ~ 2,700 mD로 계산되는데, 이는 실제 투과도인 70 ~ 670 mD에 비해 약 4 ~ 14배 정도로 상당히 크게 산출된다. 이는 공극률이 큰 사암이라도 특정 지역의 암석을 이용하여 도출한 관계식을 다른 지역의 암석에 그대로 적용하기에는 문제가 있음을 보여주며, 공극률과 같이 하나의 매개변수만으로는 투과도를 예측하는 데 한계가 있음을 보여준다.

결론

유체 투과도는 다공질 매질 내에서 유체의 유동 특성을 나타내는 중요한 매개변수로서 유체 투과도를 정확하게 측정하거나 예측하는 기술에 대한 많은 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 건조 모니터링을 통해 시료의 유체 투과도를 도출하기

Table 2. Porosities and IDRs of the specimens determined by drying monitoring.

Sample	Perm. (mD)	Porosity (%)	IDR	$\phi^2 \cdot IDR$
BS0501	70	16.07	0.0763	0.00197
BS1301	130	17.99	0.0853	0.00276
BS1501	145	17.87	0.0917	0.00293
BS2501	338	20.37	0.0952	0.00395
BS2502	326	20.56	0.0971	0.00411
BS5001	670	21.63	0.1083	0.00507

위해 유체 투과도, 공극률, 건조율 간의 상관관계를 분석하였으며, 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 유체 투과 모델과 건조 모델을 사용하여 새로운 통합모델인 유체 투과-증발 건조 모델을 제안하였으며, 유체투과도와 $\phi^2 \cdot IDR$ 회귀분석 결과 높은 상관관계가 성립함을 확인하였다.

2. 70 ~ 670 mD의 투과도를 갖는 사암 시료를 이용하여 공극률과 건조율을 도출하였으며, 이를 제안된 유체 투과-증발 건조 모델에 적용하여 최종적으로 투과도를 도출할 수 있는 경험식을 도출하였다.

3. 적정 범위내의 투과도를 갖는 시료에 대해 도출된 경험식을 적용할 경우, 시료의 건조과정만으로 암석 내 유체의 유동 특성을 나타내는 유체투과도를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서는 베레아 사암만을 이용하여 경험식을 도출하였기 때문에 다른 지역에서 산출되는 다공성 사암에 본 모델을 적용하기 위해서는 그 지역의 시료를 이용한 별도의 계수 도출이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술 지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(과제번호: 13 RDRP-B066470)에 의해 수행되었습니다. 또한 본 논문의 완성도를 높이기 위해 귀중한 시간을 할애하여 심사하여 주신 익명의 심사자분들께 고마움을 표합니다.

References

- Adler, P. M., Jacquín, C. G., and Rahon, D., 1991, Three-dimensional reconstructed porous media- Application to the study of transport mechanisms in sandstones, *Abstracts for the Second European Core Analysis Symposium (EUROCAS II), Society of Core Analysts- A Chapter-at-Large of SPWLA*, 393-405.
- Berea Sandstone Petroleum Cores, 2014, <http://www.bereasandstonecores.com/cores.php> (March 31, 2014 Accessed).
- Carman, P. C. 1956, Flow of gases through porous media, Butterworths Scientific Publications, London.
- Carrier III, W. D., 2003, Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carmen, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, 1054-1056.
- Franzen, C. and Mirwald, P. W., 2004, Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity, *Environmental Geology*, **46**, 391-401.
- Gao, Z. and Hu, Q., 2013, Estimating permeability using median pore-throat radius obtained from mercury intrusion porosimetry, *Journal of Geophysics and Engineering*, **10**, 025014 (7pp).
- Goertz, D. and Knight, R., 1998, Elastic wave velocities during evaporative drying, *Geophysics*, **63**, 171-183.
- Hazen, A. 1911, Discussion: dams on sand foundations, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **73**, 199.
- Hu, D. K. and Keehm, Y. S., 2008, Concept of rock physics modeling and application to Donghae-1 gas field, *2008 Korean Geophysics and Geophysical Exploration Conference, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, 173-178.
- Jacquín, C. G., 1964, Corrélatons entre la perméabilité et les caractéristiques géométriques du grès de Fontainebleau, *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **19**, 921-937.
- Jun, J. Y., Kam, F. J., Jeong, C. K., Kang, J. M., Jang, I. S., and Kim, J. Y., 2007, *Proceedings of Fall Conference, The Korean Society of Energy Engineering*, 314-319.
- Keehm, Y. S. and Mukerji, J., 2004, Permeability and relative permeability from digital rocks: Issues on grid resolution and representative elementary volume, *SEG Int'l Exposition and 74th Ann. Mtg. Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, 1654-1657.
- Kim, H. T., Huh, D. K., and Kim, S. J., 2002, Permeability measuring experiment for non-conventional reservoir, *2002 Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea, The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 385-388.
- Ko, E. J., 2014, *A study on the Correlation between Drying Exponent and Permeability of Rock and Cement Base Specimens*, M.S. Dissertation, Dong-A University, 71p.
- Ko, E. J., Kim, J. H., and Kim, S. B., 2012, Calculation of drying exponent by using drying curve of rock specimen, *Proceeding of the 99th Fall Conference, Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 200-202.
- Kozeny, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden, *Wien, Akad. Wiss.*, **136**(2a), 271.
- KSRM (Korea Society for Rock Mechanics), 2006, Standard test method for porosity and density of rock, *Tunnel & underground Space*, **16**, 95-98.
- Lee, M. H. and Keehm, Y. S., 2009, Smoothing effect in X-ray microtomogram and its influence on the physical property estimating of rocks, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **12**, 347-354.
- Lee, S. K. and Lee, T. J., 2010, A new suggested method for determining solid weight of rock samples by weight monitoring during drying process, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **47**, 183-190.
- Mujumdar A. and Devahastin, S., Fundamental Principles of Drying, <http://staff.sut.ac.ir/haghighi/download/documents/Drying.pdf>, (Sept. 20, 2012 Accessed).
- Okabe, H. and Blunt, M. J., 2004, Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics, *Physical Review E*, **70**, 066135-1-10.
- Øren, P.-E. and Bakke, S., 2003, Reconstruction of Brea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **39**, 179-199.
- Rezaee, M. R., Jafari, A., and Kazemzadeh, E., 2006, Relationships between permeability, porosity and pore throat size in carbonate rocks using regression analysis and neural networks, *J. Geophys. Eng.*, **3**, 370-376.

- Ruth, D., Lindsay, C., and Allen, M., 2013, Combining electrical measurement and mercury porosimetry to predict permeability, *Petrophysics*, **54**, 531-537.
- Siegesmund, S. and Snelthage, R., 2011, *Stone in Architecture: properties, durability*, 4th Ed., Springer, Berlin.
- Tiab, D. and Donaldson, E. C., 2012, *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, 3rd Ed., Elsevier, Amsterdam.
- Yang, H. Y., Kim, H. N., Kim, K. M., Kim, K. Y., and Min, K. B., 2013, A study of locally changing pore characteristics and hydraulic anisotropy due to bedding of porous sandstone, *Tunnel & Underground Space*, **23**, 228-240.
- Zinszner, B. and Pellerin, F.M., 2007, *A Geoscientist's Guide to Petrophysics*, IFP Publications.