



치밀가스 저류층의 저투과도 측정에 관한 실험적 연구

장호창 · 신창훈* · †이정환

전남대학교 에너지자원공학과, *한국가스공사 연구개발원
(2014년 5월 2일 접수, 2014년 6월 5일 수정, 2014년 6월 11일 채택)

Experimental Study on the Measurement of the Low Permeability in Tight Gas Reservoir

Ho-Chang Jang · Chang-Hoon Shin* · †Jeong-Hwan Lee

Dept. of Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwang-Ju
500-757, Korea

*R&D Division, Korea Gas Corporation, Ansan 426-790, Korea
(Received May 2, 2014; Revised June 5, 2014; Accepted June 11, 2014)

요약

비전통가스 자원을 개발하기 위해서는 저류층 암체의 치밀성을 도출하는 물성 분석이 요구된다. 특히, 치밀가스와 같은 비전통자원의 경우, 전통적인 천연가스전과 비교하여 투과도가 특징적으로 낮아서 통상적인 물성 측정 기술을 적용하기에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 비정상상태에서 저투과성 암체의 물성을 측정하는 압력펄스감소법을 기반으로 실험 장치를 개발하였다. 개발된 기기는 우리나라 경상분지 치밀사암의 물성 분석에 이용되었으며, 각 시료의 투과도와 공극률을 도출하였다. 또한, 실험을 통해 얻은 자료와 이론해 모델 간의 회귀분석 결과 모두 0.96 이상의 상관계수를 나타냈으며, 개발된 장치에 대한 높은 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Abstract - To develop a unconventional gas reservoir, an analysis of tight rock property are required. Especially, conventional measurements are difficult to be applied to unconventional resources such as tight gas reservoir because the permeability are extremely low compared to a conventional gas reservoir. In this study, an apparatus was developed for measuring low permeability and porosity based on a pressure pulse decay method under unsteady state conditions. The apparatus was applied for measuring the porosity and permeability of tight sand core samples from Gyeongsang basin in Korea. As a validation of the measurement, regression analysis was carried out using the dimensionless pseudo-pressure between the measured data and analytical solution. The results show the correlation coefficients above 0.96. Therefore, it is believed that the apparatus has a high accuracy.

Key words : unconventional gas, tight gas, low permeability, unsteady state, pressure pulse decay method

†Corresponding author:jhwan@jnu.ac.kr

I. 서론

기존 유·가스전의 매장량 감소와 수평정 시추나 수압파쇄 공법과 같은 자원개발 기술 향상에 힘입어 비전통가스 자원(unconventional gas)에 대한 관심이 증가하고 있다. 비전통가스 자원이란 근원암에서 발생한 가스가 근원암층에 갇혀서 한곳으로 집적되지 못하거나 1차 이동을 하였으나 다른 치밀한 암체에 갇혀 2차 이동을 하지 못한 채 근원암에 근접하여 광범위하게 분포하는 가스를 말한다[1].

선행 연구에 따르면, 가스하이드레이트를 제외한 비전통가스 자원의 전 세계 추정 부존량이 약 32,000 Tcf(trillion cubic feet)에 달하며, 이는 기존 천연가스 매장량의 80%에 해당한다[2]. 따라서 성공적인 개발이 이루어진다면 많은 양의 에너지자원 확보가 가능할 것으로 기대된다. 하지만 비전통가스 자원은 전통적인 천연가스전과 비교하여 투과도 및 공극률이 특징적으로 낮아서 통상적인 물성 측정 기술적용에는 한계가 있다.

저투과성 암체 물성을 도출하기 위한 물성 측정 방법은 실험 조건에 따라 크게 정상상태(steady state) 측정법과 비정상상태(unsteady state) 측정법으로 분류될 수 있다[3]. 정상상태 측정법은 전통적인 석유·가스 저류층의 암체 물성을 측정하기 위해 통상적으로 사용되며, 일반적으로 원통형 시료를 이용하여 물성을 도출하는 방법이다. 하지만 암체의 저투과성으로 인하여 정상상태가 되기까지의 시간 소요가 크며, 일정한 유동량을 유지하기 어렵다. 이에 Brace[4]는 비정상상태에서 암체 물성을 측정할 수 있는 압력펄스감소법(pressure pulse decay)을 제안하였다. 압력펄스감소법은 Fig. 1과 같이 장치 중심에 위치한 시료의 양단에 상·하류부분에 해당하는 용기를 부착하여 상류 용기에서 압력펄스를 발생시켜 유체가 시료를 투과해 하류부분으로 유동할 때 발생하는 압력거동과 평형압력을 분석하여 투과도와 공극률을 산출하는 방법이다.

Yamada와 Jones[5]는 물성 측정과정에서 압력변화에 영향을 주는 매개변수인 장치내 부피가 고려되

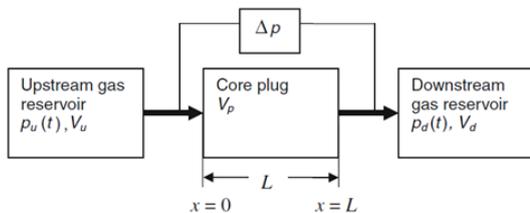


Fig. 1. Flowchart for developing the system.

지 않아 실제 물성과 비교했을 때 큰 차이가 발생함을 확인하였으며, 상류부분에 부착된 용기의 부피에 대한 시료공극의 부피비가 0.1보다 작게 설정되어야 함을 확인하였다. Hsieh 등[6], Bourbie와 Walls[7], Chen과 Stagg[8]는 압력펄스감소법에서 도출된 압력거동이 아닌 시료의 주입부와 배출부에서 측정된 유량을 이용하여 투과도를 측정하였다. 또한, Haskett 등[9], Kwan 등[10], Holder[11]는 생산장에서 얻은 데이터와 실험에서 측정된 데이터를 비교하여 두 값의 차이를 보정하는 식을 유도하였다. Kamath 등[12]은 저류층의 이방성 및 불균질성을 고려하여 실제 투과도에 보다 근사한 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 압력펄스감소법을 기반으로 다양한 부피 변화가 가능하고 시간적 효율을 향상시킨 저투과도 측정 장치(LPMA; low permeability measurement apparatus)를 개발하였다. 개발된 장치를 이용하여 우리나라 경상분지에서 채취한 치밀사암 시료에 대한 투과도 및 공극률을 측정하였으며, 도출된 물성에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 Hsieh 등[6]이 제안한 이론해 모델과의 비교 분석을 수행하였다.

II. 이론배경

Dicker와 Smits[13]는 비정상상태에서의 압력거동 자료를 이용하여 투과도를 도출하기 위해 확산방정식을 기반으로 투과도 도출을 위한 수식을 제안하였다. 발생된 압력 펄스가 코어 시료를 투과하여 유동될 때 코어 시료내의 압력분포를 나타내는 지배방정식의 $P(x, t)$ 는 위치와 시간에 따라 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[14].

$$\frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2} = \frac{c\mu\phi}{k} \frac{\delta P(x, t)}{\delta t} \quad (1)$$

for $0 < x < L$, and $t > 0$

식 (2), (3), (4)는 시간과 가스 유동 위치에 따라 코어 시료 양단과 상·하류부분간의 압력관계를 나타낸 초기조건 식이다.

$$P(x, 0) = P_d(0) \text{ for } 0 < x < L \quad (2)$$

$$P(0, t) = P_u(t) \text{ for } t \geq 0 \quad (3)$$

$$P(L, t) = P_d(t) \text{ for } t \geq 0 \quad (4)$$

여기서, L은 코어 시료의 길이(ft), P는 압력(psi), P_d 는 하류부분의 압력(psi), P_u 는 상류부분의 압력

(psi)을 의미한다.

식 (5), (6)은 각각 상류부분과 하류부분에서 시간에 따른 압력 변화를 투과도, 상·하류 부분의 부피, 압력 변화, 압축률, 점성도, 공극률, 코어 길이 등을 통해 나타낸 경계조건이다.

$$\frac{dP_u}{dt} = \frac{k}{c\mu\phi L} \frac{V_p}{V_u} \frac{\delta P}{\delta x} \Big|_{x=0} \text{ for } t > 0 \quad (5)$$

$$\frac{dP_d}{dt} = -\frac{k}{c\mu\phi L} \frac{V_p}{V_d} \frac{\delta P}{\delta x} \Big|_{x=L} \text{ for } t > 0 \quad (6)$$

여기서, c는 압축률(psi⁻¹), k는 투과도(md), V_d는 하류부분의 부피(ft³), V_u는 상류부분의 부피(ft³), V_p는 코어 시료의 공극 부피, μ는 유체의 점성도(cp)를 의미한다.

식 (1)에 초기조건인 식 (2)~(4)와 경계조건인 식 (5), (6)을 적용하고 압력변화에 대한 무차원 형태로 나타내면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_D = \frac{2}{m+1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a(b^2 + \theta_m^2) - (-1)^m b \sqrt{(a^2 + \theta_m^2)(b^2 + \theta_m^2)}}{\theta_m^2 (\theta_m^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} e^{-\theta_m^2 t_D} \quad (7)$$

식 (7)에서 θ_m은 식 (8)의 근이며, a와 b가 같을 때 θ_m의 첫 번째 근(θ₁)은 Table 1과 같이 나타낼 수 있으며, 상·하류부분의 부피 관계를 통해 유량 교정 인자(mass flow correction factor, f₁)를 취할

Table 1. First root pulse-decay values when a=b

a or b	θ ₁ ²	f ₁ = θ ₁ ² / (a + b)
0.0	0.000000	1.000000
0.1	0.196711	0.983553
0.2	0.387016	0.967539
0.3	0.571166	0.951944
0.4	0.749404	0.936755
0.5	0.921963	0.921963
0.6	1.089064	0.907553
0.7	1.250923	0.893516
0.8	1.407744	0.879840
0.9	1.559725	0.866514
1.0	1.707053	0.853527

수 있다. 이 때, a와 b는 상·하류부피와 샘플 시료 간의 부피비를 표현하며 각각 식 (9)와 (10)과 같다. t_D는 무차원 시간을 나타내며, 식 (11)로 표현할 수 있다. 이때 실험에 사용되는 용기의 벽이 견고하고, 압력전송기(pressure transducer)의 부피변형이 V_u, V_d에 비해 매우 작다면, 상류부분과 하류부분의 등온압축률인 c_{vu}와 c_{vd}는 가스 등온압축률(c_g)에 비해 매우 작기 때문에 무시할 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{(a+b)\theta}{\theta^2 - ab} \quad (8)$$

$$a = \frac{V_p(c_g + c_{pv})}{V_u(c_g + c_{vu})} \quad (9)$$

$$b = \frac{V_p(c_g + c_{pv})}{V_d(c_g + c_{vd})} \quad (10)$$

$$t_D = \frac{(6.8046E-5)k_y t}{\mu\phi(c_g + c_{pv})L^2} \quad (11)$$

식 (7)의 좌변인 무차원 압력차는 가스를 사용할 경우 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_D = \frac{P_u[t]^2 - P_d[t]^2}{P_u[0]^2 - P_d[0]^2} = \frac{\Delta P[t][P_d(t) + \frac{1}{2}\Delta P(t)]}{\Delta P[0][P_d(0) + \frac{1}{2}\Delta P(0)]} \quad (12)$$

식 (7)의 ΔP_D는 상수 a, b, 가스의 점성도와 압축률 그리고 t_D와 식 (8)에서 제공되는 모든 근으로 이루어진 함수이다. Jones[15]는 상류부분과 하류부분 용기의 부피를 같게 하면 코어 상단과 하단의 질량 보존이 성립되어 식 (7)에서 식 (8)의 모든 짝수 근을 제거하였으며, 식 (7)을 간소화시키기 위해 실험장비의 공극부피에 대한 용기 부피의 비율을 훨씬 작게 설정해야함을 제안하였다. 즉, a와 b가 작은 경우, 초기 시간대를 제외하면 θ_m에서 첫 번째 근을 제외한 두 번째 근부터는 무시할 수 있다. 압력펄스를 통해 가스가 이동되는 시스템이 위의 조건을 만족할 경우, 식 (7)은 θ₁으로만 이루어진 단일 지수함수가 되며, 이 식의 양변에 대수를 취하여 정리하면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln[\Delta P_D] = \ln(f_0) + s_1 t \quad (13)$$

이 때, f₀와 s₁ 그리고 가스압축률은 다음과 같다.

$$f_0 = \frac{2[a(b^2 + \theta_1^2) + b\sqrt{(a^2 + \theta_1^2)(b^2 + \theta_1^2)}]}{\theta_1^2(\theta_1^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} \quad (14)$$

$$s_1 = -\frac{kf_1A(1/V_u + 1/V_d)}{\mu_g c_g L} \quad (15)$$

$$c_g = \frac{1}{P} \left[1 - \frac{d \ln[z]}{d \ln[P]} \right] = \frac{f_z}{P} \quad (16)$$

압력 P는 평균 공급압력 P_m 을 사용하게 되는데, a와 b의 크기가 같고 암석이 균질하다면 P_m 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m[t] = P_2[t] + \frac{1}{2} \Delta P[t] \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)을 식 (15)에 적용함으로써 식 (15)의 기울기 s 를 구할 수 있고 최종적으로 식 (18)을 이용하여 투과도를 도출할 수 있다.

$$k = \frac{-14696s_1\mu_g L}{f_1A(1/V_u + 1/V_d)} \quad (18)$$

공극률의 경우, 보일의 법칙과 실제기체상태방정식을 통해 정리된 식 (19)와 (20)을 이용하여 도출할 수 있다.

$$\frac{P_1 V_1}{Z_2 n_2 R T_2} = \frac{P_2 (V_1 + V_2 - V_b + V_p)}{Z_1 n_1 R T_1} \quad (19)$$

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \quad (20)$$

여기서, n은 몰수, R은 기체상수(psi-ft³), T는 온도(°F), Z는 기체압축인자를 의미한다.

압력펄스감소법을 이용하여 투과도와 공극률을 측정할 경우, 지배방정식인 식 (1)에 식 (21)의 유사압력(pseudo-pressure)과 식 (22)의 조정된 유사시간(adjusted pseudo-time)을 적용하여 식 (23)과 같이 선형화시킬 수 있다.

$$\Psi = 2 \int_{P_0}^P \frac{P}{\mu Z} dP \quad (21)$$

$$t_a = \mu c_t \int_{t_0}^t \frac{dt}{\mu c_t} \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\mu \phi c_t}{k} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial t_a} \right] \quad (23)$$

for $0 < x < L$, and $t_a > 0$

여기서, t_a 는 조정된 유사시간(s), c_t 총 압축률(ψi⁻¹), Ψ 는 유사압력(ψsia²/cp)을 의미한다.

또한, 선형화된 식 (23)을 상·하류부분으로 나누어 식(24), (25)와 같은 무차원 유사압력 형태(dimensionless pseudo-pressure)로 단순화시킬 수 있다.

$$\Psi_{Du} = \frac{\Psi_u - \Psi_{di}}{\Psi_{ui} - \Psi_{di}} \quad (24)$$

$$\Psi_{Dd} = \frac{\Psi_d - \Psi_{di}}{\Psi_{ui} - \Psi_{di}} \quad (25)$$

여기서, Ψ_{Du} 는 상류부분의 무차원 유사압력, Ψ_{Dd} 는 하류부분의 무차원 유사압력, Ψ_u 는 상류부분의 유사압력(ψsia²/cp), Ψ_d 는 하류부분의 유사압력(ψsia²/cp), Ψ_{ui} 는 상류부분의 초기 유사압력(ψsia²/cp), Ψ_{di} 는 하류부분의 초기 유사압력(ψsia²/cp)을 의미한다.

III. 저투과도 측정 장치

3.1. 장치 구성 및 특징

본 연구에서는 저투과도 암체의 물성 측정에 압력펄스감소법을 적용하기 위해 Fig. 2와 같은 모식도를 갖는 저투과도 측정 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 온도 변화를 방지하기 위해 코어 홀더 및 상·하류부분을 비롯한 장치의 주요 설비는 인큐베이터 안에 위치시켰으며, 상류부분과 하류부분에는 탈부착이 가능한 용기를 설치하여 밸브, 튜빙 등에 의해 발생할 수 있는 사망부피(dead volume)를 줄임으로써, 내부 요인에 의한 오차를 최소화시켰다.

또한, 코어의 양단 연결부에 우회라인(by-pass line)을 설치하여 주입유체의 유동 방향에 따른 물성 변화를 고려하였으며, 이를 통해 양방향 투과도를 산출할 수 있다. 상·하류부분과 코어 홀더의 연결부에 솔레노이드 밸브를 설치하였으며, 밸브의 개폐를 인큐베이터 외부에서 조절하여 실험장치 내의 외부영향을 줄이고, 시간의 효율성을 극대화했다. 실험이 수행되는 동안 시스템 내부에서 발생하는 압력 거동은 데이터 취득시스템을 거쳐 사용자가 설정한 시간 간격별로 저장되며, 최종적으로 실험 시간, 온도, 상·하류부분의 압력, 코어 홀더 양단의 압력 차이를 취득할 수 있다.

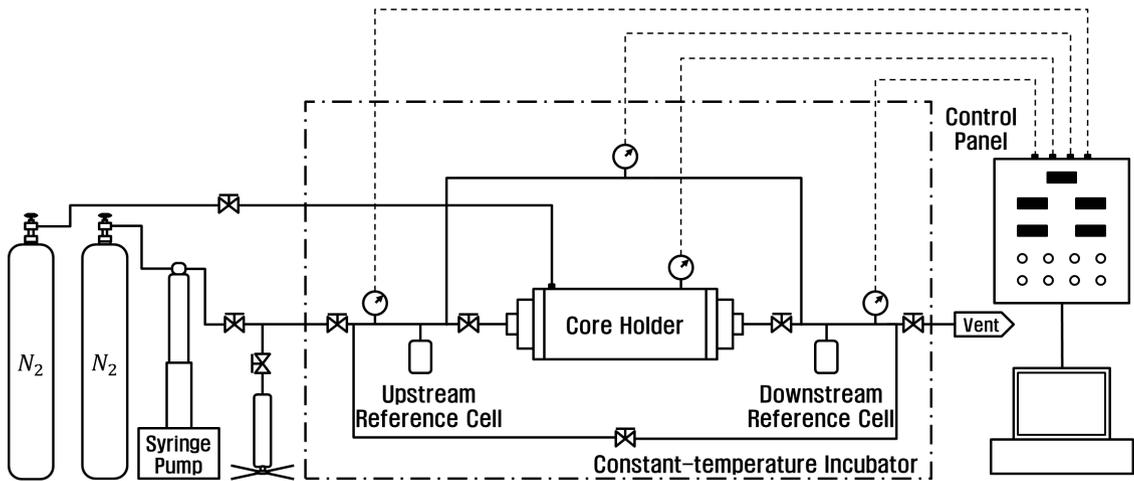


Fig. 2. Schematic diagram of LPMA(low permeability measurement apparatus).

3.2. 저투과도 측정 실험

개발된 장치를 이용하여 우리나라 경상분지 치밀 사암의 투과도와 공극률 도출실험을 수행하였다. 경상분지는 Fig. 3과 같이 경상남도와 경상북도의 대부분 지역을 차지하는 약 20,000 km²의 넓이를 갖는 대규모 퇴적분지이다. 퇴적층은 상부 중생대중인 백악기 육성 퇴적물이며, 상부로 갈수록 빈번해지는 화산암과 화산기원 퇴적암층이 협재되는 특징을 가지고 있다[17].

본 연구에서는 경상분지 하양층군에 분포한 세립 질이나 조립질 모래로 구성된 치밀사암을 채취하여 직경 1.5 인치로 코어링 하였으며, Table 2와 같이 TS-1, TS-2, TS-3 시료로 명명된 시료를 코어 홀더에 장입될 수 있게 길이 1.65 인치 이상으로 절단하였다.

준비된 코어 시료는 코어홀더에 장입전에 176°F의 온도에서 24시간 동안 진공과정을 거쳤으며, 코어 홀더에 장입 후에는 잡가스 제거를 위해 진공 펌프를 사용하여 1시간 동안 진공시키는 전처리 과정을 수행하였다.

시스템 내부 압력 주입에 앞서, 저류층에서 지층 압력을 받는 현상을 모사하기 위해 코어 외부에 위치한 코어 홀더 내에 1,300 psi 이상의 하중압을 발생시켰다. 물성 도출시 요구되는 유사압력을 사용하기 위해서는 고압의 초기 조건이 요구되기 때문에 실험 초기 조건을 1,000 psi 이상의 압력으로 평형을 이루었으며, 상류부분에 압력펄스를 만들기 위하여 평형압력의 3%에 해당하는 압력을 추가적으로 발생시켰다. 물성 측정 실험은 압력펄스 발생 후 상류

Table 2. Core plug size of tight sand

Sample	Diameter	Length
TS-1	1.5 inch	1.75 inch
TS-2	1.5 inch	1.79 inch
TS-3	1.5 inch	1.88 inch

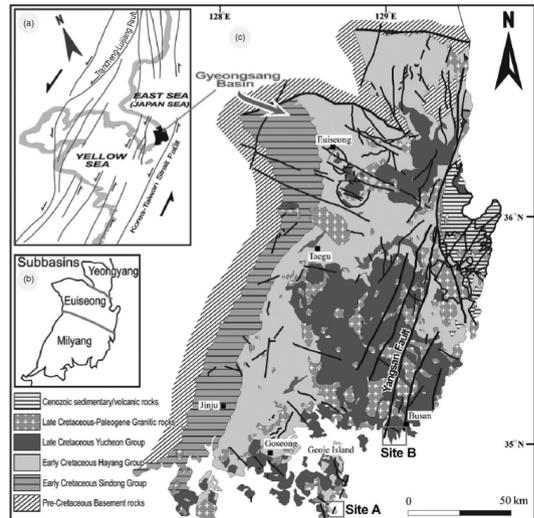


Fig. 3. Location and geological map of Gyeongsang basin[16].

부분에 위치한 솔레노이드 밸브를 열었을 때 시작되며, 상류부분과 하류부분의 압력이 평형상태에 도달한 후에 실험을 종료하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

개발된 실험 장치를 통해 TS-1, TS-2, TS-3의 압력 거동을 취득하였으며, 취득된 자료를 통해 각각의 투과도와 공극률을 산출하였다. 도출된 값에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 Hsieh 등[6]에 의해 제안된 이론해 모델의 압력거동과 비교 분석을 수행하였다. 각 시료에 대한 전처리 과정과 실험과정은 모두 동일하게 적용되었으며, 각 시료의 물성측정 결과를 도출하였다.

4.1. 실험자료 분석 및 측정 결과

TS-1의 초기 평형압력은 1,003 psi이며, 상류구간에 발생시킨 30 psi의 압력펄스를 이용해 압력거동을 취득하였다. Fig. 4은 개발된 장치에 TS-1 코어 시료를 장입하여 취득된 압력 거동 자료를 무차원 유사압력으로 변환한 결과를 보여준다. 상류부분은 1~0.3804로 시간이 지남에 따라 하강하는 형태를 보였으며, 하류부분은 0에서 0.3804로 점점 증가하는 형태를 보였다. TS-1 시료의 경우, 물성 측정에 소요되는 시간이 길어 자료 취득 간격을 200초로 설정하였다. 실험 시작 후 약 13시간 만에 압력이 평형상태에 도달하였다. 천이유동 구간에서 취득된 물성 변화 자료와 사용된 시료의 길이, 직경 등을 이용하여 투과도를 산출했고, 공극률의 경우 초기 압력 평형상태와 실험 종료 시점의 평형압력, 시료의 부피 등을 이용하여 도출했다. TS-1 시료의 투과도는 0.0002 md, 공극률은 4.3%로 나타났으며, 일반적으로 사암이 가지는 물성 범위에 비해 매우 낮은 값이 도출되었다.

TS-2의 초기 평형압력은 1,001 psi이며, 상류구간에 발생시킨 29 psi의 압력펄스를 이용해 압력거동을 취득하였다. Fig. 5는 TS-2 코어 시료를 통해 취득된 압력 거동 자료를 무차원 유사압력으로 변환한 결과를 보여준다. 상류부분은 1~0.4742로 시간이 지남에 따라 하강하는 형태를 보였으며, 하류부분은 0에서 0.4742로 점점 증가하는 형태를 보였다. TS-2 시료의 경우, 실험 시작 후 약 6시간 30분 만에 압력이 평형상태에 도달하였다. 무차원 유사압력과 시료의 물성, 초기 평형압력, 최종 평형압력을 통해서 TS-2 시료의 투과도와 공극률을 산출했으며, 각각 0.0004 md와 4.9%로 나타났다.

TS-3의 초기 평형압력은 1,000 psi이며, 상류구간에 발생시킨 30.5 psi의 압력펄스를 이용해 압력거

동을 취득하였다. Fig. 6은 TS-3 코어 시료를 통해 취득된 압력 거동 자료를 무차원 유사압력으로 변환한 결과를 보여준다. TS-3의 경우, 앞선 두 개의 코어 시료와는 달리 실험 시간이 다소 적게 소요되었으며, 이는 TS-3 시료가 TS-1과 TS-2에 비해 비교적 높은 투과도를 가진 것으로 판단된다. 상류부분은 1~0.4463로 시간이 지남에 따라 하강하였고 하류부분은 0~0.4463로 점점 증가하는 형태를 보였다. 무차원 유사압력과 시료의 물성, 초기 평형압력, 최종 평형

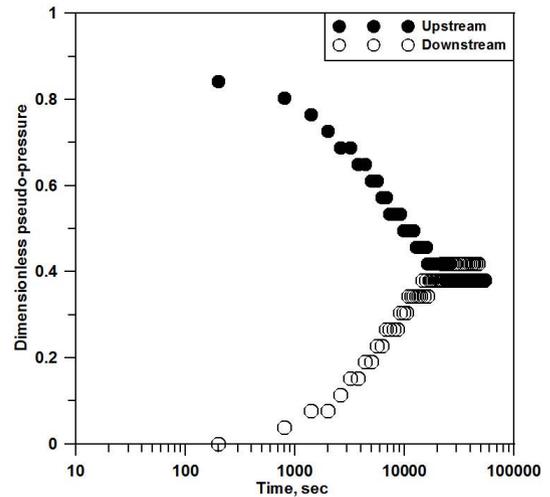


Fig. 4. Pressure transient curve of TS-1.

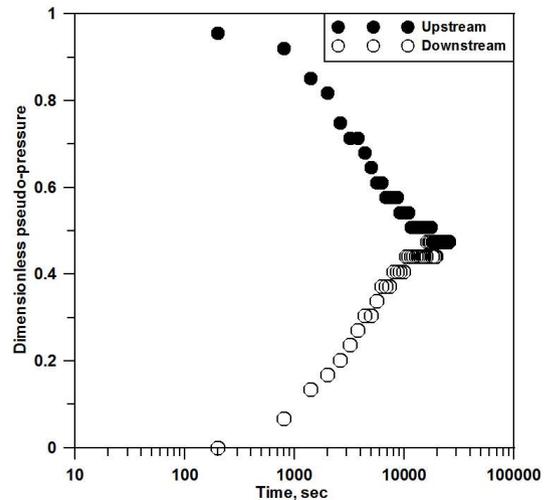


Fig. 5. Pressure transient curve of TS-2.

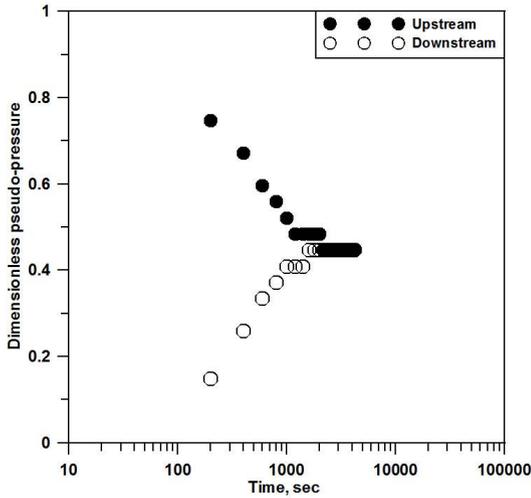


Fig. 6. Pressure transient curve of TS-3.

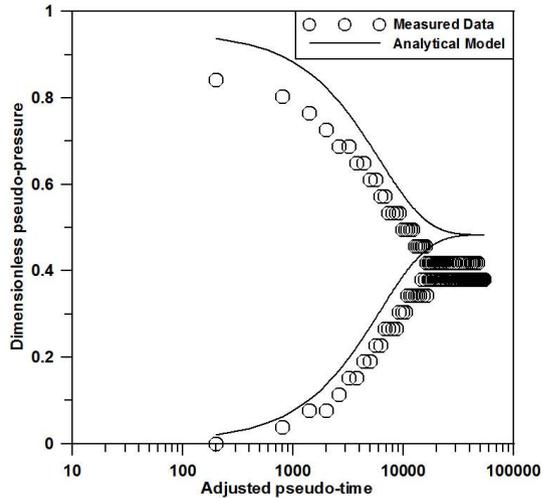


Fig. 7. Experimental data of TS-1 compared to analytical model.

Table 3. Results of experimental test

Sample	Permeability	Porosity
TS-1	0.0002 md	4.2%
TS-2	0.0004 md	4.9%
TS-3	0.0035 md	4.3%

압력을 통해서 TS-3 시료의 투과도와 공극률을 산출했으며, 각각 0.0035 md와 4.3%로 나타났다.

개발된 장치를 통해 도출된 TS-1, TS-2, TS-3의 투과도와 공극률을 Table 3과 같이 정리하였다. 도출된 물성 중 공극률의 경우, 값에 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 분포를 보였으나, 투과도의 경우, TS-1 기준으로 했을 때, 시료별로 작게는 2배에서 최대 10배 이상의 차이를 보였다.

4.2. 실험 결과 검증

개발된 장치는 이미 검증과정까지 마친 또 다른 기기에서 도출된 물성과 비교하거나, 투과도가 정확히 계산될 수 있는 인공 코어 시료를 이용하여 물성을 측정함으로써 신뢰성이 확인될 수 있다. 하지만 국내에서 저투과도 측정 장비가 없고, 인공 코어 시료 제작에는 기술적·비용적인 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 Hsieh 등[6]이 제안한 압력펄스감소법의 이론해 모델을 이용하여 도출된 물성에 대한 신뢰성 검증을 수행하였다. 이를 위해 물성을 도출한 시료별로 조정된 시간에 따른 실험 자료와 이론

해 모델에 의해 도출된 무차원 유사압력의 거동을 비교하였으며, 상·하류 압력 거동에 대한 각각의 회귀곡선 분석을 수행하였다. TS-1의 경우, 실험과 이론해 모델을 통해 도출된 무차원 유사압력 거동이 Fig.7과 같이 나타났다. 하류구간에 비해 상류구간에서 무차원 유사압력 거동이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 평형상태에서의 무차원 유사압력이 실험의 경우 0.3804, 이론해 모델의 경우 0.4826를 나타냈다.

Fig. 8과 Fig. 9는 상류부분과 하류부분에서 실험과 이론해 모델을 통해 도출된 무차원 유사압력을 회귀분석한 결과를 나타내며, 각각 0.9753과 0.9692의 상관계수를 갖는 것으로 나타났다. 상류부분에서 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력이 다소 차이를 보였으나, 물성 도출에 사용되는 압력 거동의 기울기에는 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 무차원 유사압력의 거동 차이는 균질한 코어 상태를 가정하고 있는 이론해 모델에 의해 발생할 수 있는 영향으로 판단된다.

TS-2의 경우, 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력 거동은 Fig. 10과 같이 나타난다. 평형상태에서의 무차원 유사압력이 실험의 경우 0.4742, 이론해 모델의 경우 0.4777을 나타냈다. 이는 실험에서 도출되는 압력단위가 소수점 첫 번째 자리까지 측정되는 압력전송기에 의한 단순오차로 보이며, 실험과 이론해 모델에서 도출한 결과가 거의 유사하다고 판단할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 상류부분과 하류부분에 대한 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력을 회귀

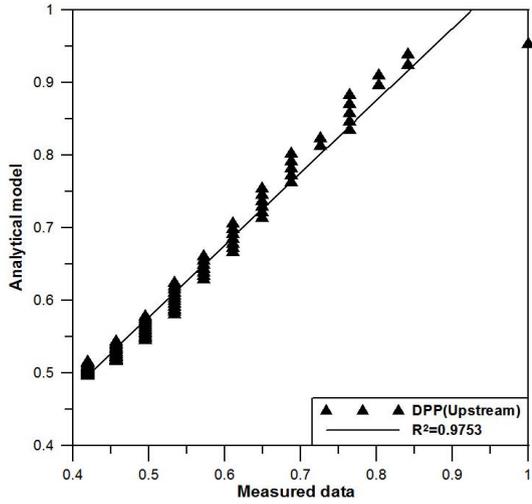


Fig. 8. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-1(upstream).

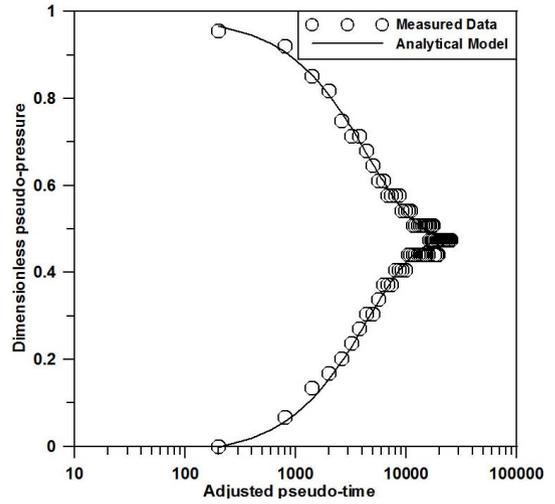


Fig. 10. Experimental data of TS-2 compared to analytical model.

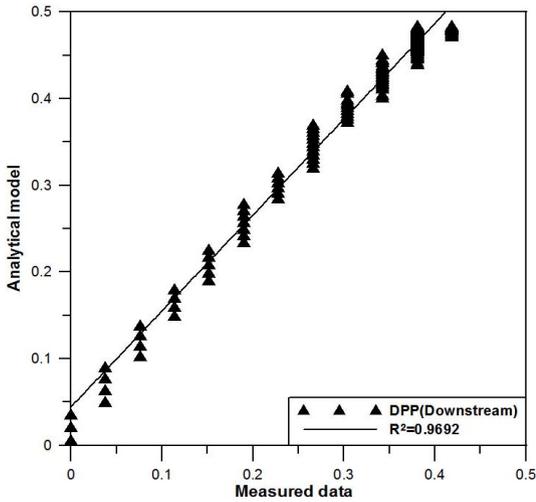


Fig. 9. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-1(downstream).

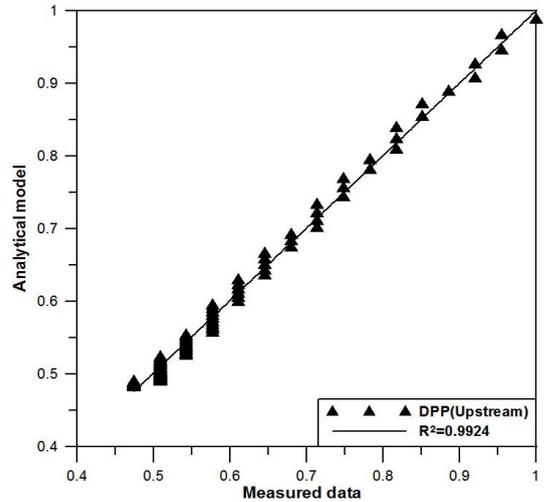


Fig. 11. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-2(upstream).

분석한 결과를 나타내며, 상관계수가 각각 0.9924와 0.9894를 나타냈다. TS-2의 경우 상류부분과 하류부분 모두 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력이 잘 일치하였으며, 도출된 물성에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

TS-3의 경우, 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력 거동은 Fig. 13과 같이 나타났다. 최종 평형상태에서의 무차원 유사압력이 실험의 경우 0.4463, 이

론해 모델의 경우 0.4822를 나타냈다. Fig. 14와 Fig. 15는 상류부분과 하류부분에 대한 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력을 회귀분석한 결과로써, 상관계수가 각각 0.9860과 0.9950으로 산출되었다. 따라서 상류부분과 하류부분의 무차원 유사압력이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

TS-1, TS-2, TS-3의 실험과 이론해 모델의 무차원 유사압력 거동을 회귀분석한 결과, Table 4와 같이

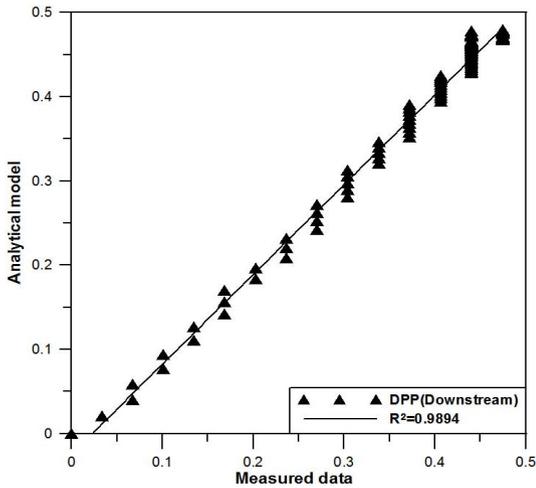


Fig. 12. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-2(downstream).

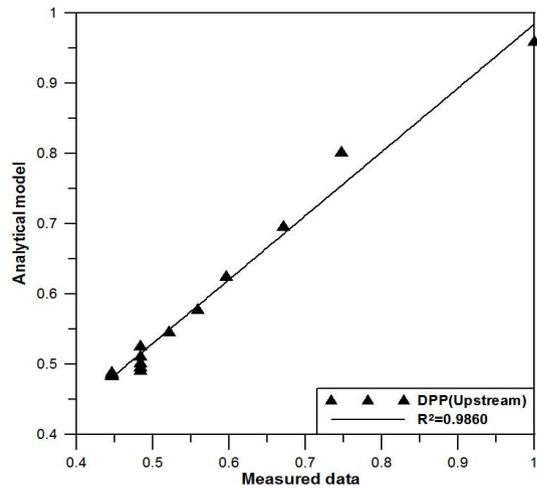


Fig. 14. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-3(upstream).

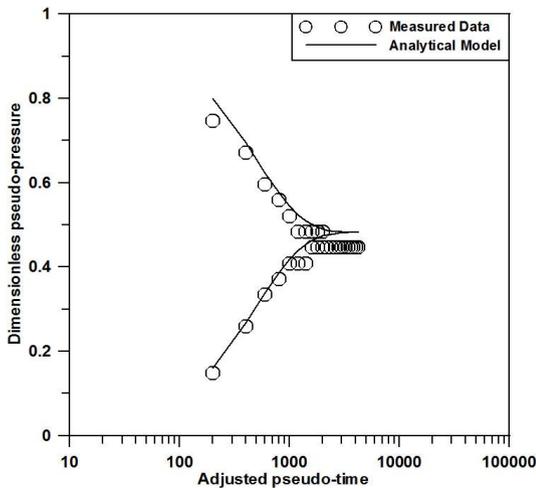


Fig. 13. Experimental data of TS-3 compared to analytical model.

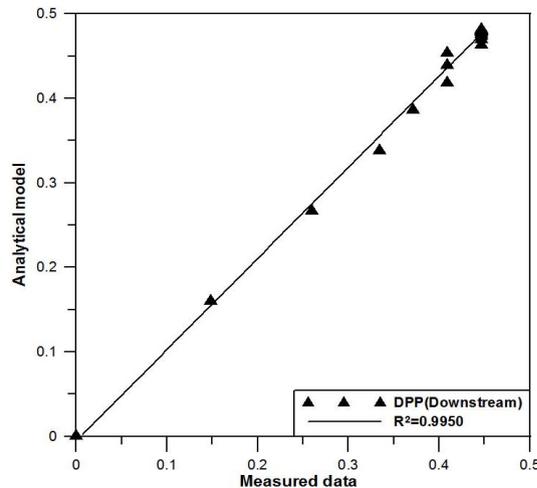


Fig. 15. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure of TS-3(downstream).

상관계수가 모두 0.96 이상으로 높은 수치를 나타냈으며, 개발된 장치를 통해 도출된 물성에 대한 높은 신뢰성을 확인할 수 있었다. TS-1의 경우, 높은 상관계수를 나타내기는 했지만, 상류부분에서 다소 큰 차이가 발생하였다. 이는 치밀사암 시료의 지질학적 변형이나 시료가 가지고 있는 불균질성에 의한 영향으로 추정되며, 향후 Microfocus CT X-ray, SEM 등을 통해 보다 복합적인 연구를 통한 정확한 물성 규명이 요구됨을 확인할 수 있었다.

Table 4. Regression analysis of dimensionless pseudo-pressure

Sample	Regression analysis(R^2)	
	Upstream	Downstream
TS-1	0.9753	0.9692
TS-2	0.9924	0.9894
TS-3	0.9860	0.9950

V. 결론

본 연구에서는 저투과성 암체의 물성을 도출하기 위해 저투과도 측정 장치를 설계 및 개발하였다. 개발된 장치를 이용하여 우리나라 경상분지의 치밀사암에 대한 물성을 취득하였으며, 이를 통해 다음의 결과를 도출하였다.

(1) 치밀사암 저류층과 같은 저투과성 암체의 물성 분석을 위해 압력펄스감소법을 기반으로 한 저투과도 측정 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 물성 측정에 주요 매개변수로 작용하는 상·하류의 부피비를 고려하기 위해 상·하류에 설치된 용기를 탈부착 가능하도록 제작하였으며, 장치 내부를 소형화하여 사장부피를 줄임으로써, 물성 취득시 발생할 수 있는 오차를 최소화시켰다.

(2) 개발된 장치는 우리나라 경상분지의 치밀사암 시료인 TS-1, 2, 3의 물성 측정 실험에 사용되었다. 물성 측정에 소요된 총 시간은 시료별로 최소 50분에서 최대 13시간이었으며, 각각 투과도는 0.0002, 0.0004, 0.0035 md, 공극률은 4.2, 4.9, 4.3%로 도출되었다.

(3) 도출된 결과에 대한 검증은 위해 이론해 모델과 실험 결과를 비교 분석하였다. 그 결과, 각 시료의 상·하류구간에서 발생한 무차원 유사압력 거동의 상관계수가 모두 0.96 이상으로 나타남으로써 도출된 물성에 대한 충분한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(4) 본 연구를 통해 개발된 장치는 향후 저투과성 암체로 구성된 저류층의 생산 평가를 위한 저류층 시뮬레이션의 주요 입력 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(2011T100200111).

사용기호

a : volume ratio between upstream and pore
 b : volume ratio between downstream and pore
 c : isothermal compressibility [psi^{-1}]
 c_g : gas isothermal compressibility [psi^{-1}]
 c_{pv} : gas isothermal compressibility of pore [psi^{-1}]

c_{vd} : gas isothermal compressibility of downstream [psi^{-1}]
 c_{vu} : gas isothermal compressibility of upstream [psi^{-1}]
 f_0 : first factor of eqn. 7
 f_1 : mass flow correction factor
 f_z : gas compressibility correction factor
 k : absolute permeability [md]
 k_g : gas permeability [md]
 L : length of core [inch]
 n : number of moles
 P : pressure [psi]
 P_d : downstream pressure [psi]
 P_u : upstream pressure [psi]
 R : universal gas constant [$10.732 \text{ psi}\cdot\text{ft}^3$]
 s_1 : constant
 T : temperature [Fahrenheit]
 t : time [sec]
 t_a : adjusted pseudo-time [sec]
 t_D : dimensionless time
 x : distance from downstream end of core [inch]
 V_d : downstream volume [ft^3]
 V_p : pore volume [ft^3]
 V_u : upstream volume [ft^3]
 Z : gas compressibility factor
 z : gas deviation factor

그리스 문자

ϕ : porosity
 μ : viscosity [cp]
 μ_g : gas viscosity [cp]
 θ : root of transcendental eqn. 8
 Ψ : pseudo-pressure [psia^2/cp]
 Ψ_d : pseudo-pressure at downstream pressure
 Ψ_u : pseudo-pressure at upstream pressure [psia^2/cp]
 Ψ_{di} : pseudo-pressure at initial downstream pressure [psia^2/cp]
 Ψ_{ui} : pseudo-pressure at initial upstream pressure [psia^2/cp]
 Ψ_{Dd} : dimensionless pseudo-pressure at downstream pressure
 Ψ_{Du} : dimensionless pseudo-pressure at upstream

pressure

REFERENCES

- [1] Baek, M.S., "Unconventional Gas Resources & KOGAS' Projects", *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **48**(4), 524-538, (2011)
- [2] Holditch, S.A., "Tight Gas Sands", *Journal of Petroleum Technology*, **58**(6), 88, (2006)
- [3] Suarez-Rivera, R., Chertov, M., Willberg, D.M., Green, S.J. and Keller, J., "Understanding Permeability Measurements in Tight Shales Promotes Enhanced Determination of Reservoir Quality", *SPE Canadian Unconventional Resources Conference*, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, Canada, (2012)
- [4] Brace, W.F., Walsh, J.B. and Frangos, W.T., "Permeability of Granite Under High Pressure", *Journal of Geophysical Research*, **73**(6), 2225-2236, (1968)
- [5] Yamada, S.E. and Jones, A.H., "A Review of a Pulse Technique for Permeability Measurements", *Society of Petroleum Engineers Journal*, **20**(5), 357-358, (1980)
- [6] Hsieh, P.A., Tracy, J.V., Neuzil, C.E., Bredehoeft, J.D. and Silliman, S.E., "A Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks-I. Theory", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **18**(3), 248-252, (1981)
- [7] Bourbie, T. and Walls, J., "Pulse Decay Permeability: Analytical Solution and Experimental Test", *Society of Petroleum Engineers Journal*, **22**(5), 719-721, (1982)
- [8] Chen, T. and Stagg, P.W., "Semilog Analysis of the Pulse-Decay Technique of Permeability Measurement", *Society of Petroleum Engineers Journal*, **24**(6), 639-642, (1984)
- [9] Haskett, S.E., Narahara, G.M. and Holditch, S.A., "A Method for the Simultaneous Determination of Permeability and Porosity in Low-Permeability Cores", *Journal of SPE Formation Evaluation*, **3**(3), 651-658, (1988)
- [10] Kwan, M.Y., Okazawa, T. and Fortier, R.A., "Application of the Pulse-Decay Technique to the Measurement of Heavy Oil Core Fluid Mobilities and Porosity", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **27**(5), 92-98, (1998)
- [11] Holder, J., Koelsch, T., Fruth, L. and Donath, F., "Laboratory Measurement of Permeability in Rock", *The 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, American Rock Mechanics Association, Minneapolis, Minnesota, USA, (1988)
- [12] Kamath, J., Boyer, R.E. and Nakagawa, F.M., "Characterization of Core-Scale Heterogeneities Using Laboratory Pressure Transients", *Society of Petroleum Engineers Journal*, **7**(3), 219-227, (1992)
- [13] Dicker, A.I. and Smits, R.M., "A Practical Approach for Determining Permeability from Laboratory Pressure Pulse Decay Measurements", *International Meeting on Petroleum Engineering*, Society of Petroleum Engineers, Tianjin, China, (1988)
- [14] Kim, H.T., Huh D.G., Kim, S.J., Sung, W.M. and Jang, T.H., "Measurements of Tight Rock Permeability by Pressure Pulse Decay Method", *Journal of Mineral and Energy Resources*, **35**, 475-480, (1998)
- [15] Jones, S.C., "A Technique for Faster Pulse-Decay Permeability Measurements in Tight Rocks", *Journal of SPE Formation Evaluation*, **12**(1), 19-26, (1994)
- [16] Jeon, Y.M. and Sohn, Y.K., "Characteristics, emplacement processes, and stratigraphic implications of the basalts intercalated in the Hanyang Group, Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea", *Journal of the Geological Society of Korea*, **44**(6), 707-727, (2008)
- [17] Kang, H.C., Paik, I.S., Lee, H.L., Lee, J.E. and Chun J.H., "Soft-sediment deformation structures in Cretaceous non-marine deposits of southeastern Gyeongsang Basin, Korea: Occurrences and origin", *Island Arc*, **19**, 628-646, (2010)