

저류층 암석코어 물성 실험자료 해석을 위한 사용자 친화적 S/W 개발

이종용* · 임중세**

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 해양개발공학부 교수

Development of a User-Friendly Software for the Analysis of Experimental Data on Reservoir Rock Core's Petrophysical Properties

J. Y. Lee* · J. S. Lim**

*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Div. of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 저류층의 매장량과 유동특성을 좌우하는 저류층의 물성을 현장에서 직접 측정하는 것은 매우 어려운 일이므로 시추공으로부터 회수된 암석코어의 물성을 측정하고 이를 저류층의 물성으로 대표하는 코어 분석법이 널리 활용되고 있다. 이 연구에서는 객체지향 시각화 개발 도구를 이용하여 저류층 암석코어의 물성 실험자료 해석을 위한 사용자 친화적 소프트웨어를 개발하였다. 이 소프트웨어는 유체 주입을 통한 저류층 암석코어의 공극률 및 유체투과율 측정실험과 그 해석에 활용할 수 있으며, 회귀분석에 의해 실험 결과를 해석하고 차트를 이용하여 이를 시각화한다. 또한 이 소프트웨어는 사용자 친화적으로 제작되었고 실험 매뉴얼을 도움말 형태로 삽입하였으므로 초보자도 손쉽게 사용할 수 있다.

핵심용어 : 저류층, 암석코어, 공극률, 유체투과율

ABSTRACT : Since in-situ measurement of petrophysical properties of reservoir, which have great influence on reserves and flow characteristics of the reservoir, is very difficult, core analysis, which measures petrophysical properties of rock core samples recovered from the reservoir, has been used broadly. In this study, we developed a user-friendly software for the analysis of experimental data on reservoir rock core's petrophysical properties utilizing an object-oriented tool. This software can be utilized for interpretation of fluid-injection experiment on porosity and permeability of reservoir rock core. The software estimates its results through regression analysis and visualizes it with chart. Since the software is designed to be user-friendly and includes an instruction manual as a help-file, it can also be used by a beginner.

KEY WORDS : reservoir, rock core, porosity, permeability

1. 서 론

저류층의 물성은 저류층의 매장량과 유체 유동 능력을 좌우하므로 석유 및 천연가스 저류층 특성화에 있어서 중요한 변수로 작용한다. 주요 저류층 물성으로는 공극률(porosity), 유체투과

율(permeability), 유체포화도(fluid saturation)등이 있으며 직·간접적인 여러 가지 방법에 의해 측정이 가능하나 현장에서 신뢰성 있는 값을 측정하는 것은 다소 어려운 면이 있다. 코어분석법(core analysis)은 시추공으로부터 회수된 암석코어의 물성을 측정하고 이를 저류층의 물성으로 대표하는 방법으로 상당

* jylee@bada.hhu.ac.kr 051)410-4917

** jslim@mail.hhu.ac.kr 051)410-4682

한 비용이 들고 제한적으로 선택된 시추공의 특정부분에서만 행하여진다는 단점이 있다. 이러한 이유 때문에 제한된 코어시료를 분석하고 코어시료가 채취되지 않은 구간의 물성추정은 여러 물리검층(well logging) 자료와 코어분석 자료를 결합하여 추정하는 방법이 일반적으로 행해지고 있다. 이 연구에서는 윈도우 기반의 객체지향 시각화 개발 도구인 *Microsoft Visual Basic*을 이용하여[1] 저류층 암석코어 물성 실험자료 해석을 위한 사용자 친화적 소프트웨어, *CorePro 1.0*을 개발하였다. 이 소프트웨어는 유체주입을 통한 저류층 암석코어의 공극률 및 유체투과율 측정실험과 그 해석에 활용할 수 있으며, 회귀분석에 의해 실험결과를 해석하고 차트를 이용하여 이를 시각화한다. 또한 실험 매뉴얼을 도움말 형태로 삽입하였고 사용자 친화적으로 제작되었으므로 초보자도 손쉽게 사용할 수 있다.

2. 저류층 기초물성

2.1 저류층 공극률

공극률은 암석전체의 부피에 대한 암석 내 공극부피의 비로 정의되며 공극이란 유체를 저장하거나 함유할 수 있는 암석 내 공간을 말한다. 공극률은 일반적으로 %로 나타내며 식 (1)에 의해 표현된다.

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \times 100 \quad (1)$$

공극률은 공극의 연결성에 따라 암석의 전체 부피에 대한 전체 공극부피의 비인 절대공극률(absolute porosity)과 연결된 공극만의 부피의 비인 유효공극률(effective porosity)로 분류되며, 석유를 포함한 다상유체의 생산은 암석내의 연결된 공극과 관계되므로 저류층 공학에서는 절대공극률보다는 유효공극률이 주된 관심사가 된다[2]. Table 1에 몇 가지 암 종의 절대공극률과 유효공극률 값이 제시되어 있다[3].

Table 1 Comparison between absolute porosity and effective porosity of some rocks.

물 질	총 공극률 (%)	유효 공극률(%)
경석고(anhydrite)	0.5~5	0.05~0.5
초크(chalk)	5~20	0.05~0.5
석회암, 백운암	5~15	0.1~5
사암	5~15	0.5~10
세일	1~10	0.5~5
암염	0.5	0.1
화강암	0.1	0.0005
균열 결정질암	-	0.00005~0.01

2.2 저류층 유체투과율

유체투과율은 암석의 공극을 통해 유체가 이동할 수 있는 용이도로 정의된다. 공극률이 매장량과 관련된 물성이라면 유체투과율은 생산성과 관련된 물성이다. 즉, 저류층 암석의 유체투과율이 크면 다공질 매체 내 유체이동이 용이하므로 많은 양의 탄화수소를 생산할 수 있기 때문에 저류층의 가치가 커지는 반면, 공극률이 크고 매장량이 많은 저류층이라 하더라도 유체투과율이 작다면 유체이동이 어려워 저류층의 경제성이 떨어지게 된다.

이러한 다공질 매체 내 유동성은 공극의 형태 및 배열상태, 공극 내에 있는 유체의 종류와 함량에 따라 달라지므로 유체투과율은 다음과 같이 세 가지로 정의된다.

(1) 절대유체투과율(absolute permeability)

절대유체투과율은 단상유체가 다공질매체의 유효공극을 100% 포화시켰을 때 유체가 흐를 수 있는 능력을 말한다.

(2) 유효유체투과율(effective permeability)

유효유체투과율은 다상유체 거동 시 각각의 유체가 저류층 내에서 동시에 흐를 수 있는 능력을 말한다. 각 유체의 투과율은 유체의 포화도와 밀접한 관계가 있으며, 포화도가 클수록 유체투과율은 커진다.

(3) 상대유체투과율(relative permeability)

상대유체투과율은 유효유체투과율과 절대유체투과율간의 비로 정의된다. 이는 다상유체 유동 시 다공질매체에 대한 각 유체의 상대적인 유동 용이도를 나타낸 것으로 암석 내 유체포화도나 암석의 유착특성과 깊은 관련이 있다[2].

실제 저류층은 단상보다는 다상의 유체가 동시에 존재하므로 일반적으로 저류층 공학에서는 절대유체투과율보다는 유효유체투과율, 또는 상대유체투과율에 보다 관심을 갖는다.

유체투과율의 단위는 1935년 API(American Petroleum Institute)에 의해 정의된 *darcy*를 사용하며 이는 1856년 순수한 물을 이용하여 모래 관을 통과하는 물의 유동을 조사한 프랑스 과학자, Henry Darcy의 이름으로, 1 *darcy*의 유체투과율은 압력구배가 1 *atm/cm*일 때 1 *cp*의 유체가 1 *cm*²의 단면적을 통해 1 *cc/sec*로 흐를 수 있는 정도이다. SI단위계에서 1 *darcy*는 9.869×10⁻⁹ *cm*²이다. 다공질 매체의 유체유동을 나타내는 Darcy 방정식은 식 (2)와 같다.

$$Q = - \frac{kA}{\mu} \frac{dP}{dL} \quad (2)$$

3. 저류층 기초물성 측정실험

3.1 실험장비

이 연구에서는 지하의 자연 다공질 매질을 모사하여 저류층의 공극률 및 유체투과율을 측정할 수 있는 실험시스템을 제작하였다. 시스템의 단순화를 위하여 사용유체로 기체를 이용한 실험시스템과 액체를 이용한 실험시스템으로 분리하여 제작하였으며 시료장착 및 봉압(overburden pressure) 조절, 탈기 등의 반복과정 없이 동일 시료의 공극률 및 유체투과율을 연속적으로 측정할 수 있도록 제작하였다. 이 연구에서 제작된 저류층 암석코어 물성측정 실험시스템에 사용되는 장비는 크게 암석코어를 포함하는 코어홀더, 유체주입을 위한 정량주입장치, 공극률측정장치, 유량측정장치 등으로 구성된다. 코어홀더는 암석코어를 장착하고, 내부에 주입되는 유체의 누출방지 및 지하응력상태 모사를 위한 봉압조절이 가능한 장비이다. 정량주입장치는 시스템에 주입될 유체를 정량, 또는 정압으로 공급해주는 장치이며 기체실험의 경우에는 기체정량주입기, 액체실험의 경우 액체정량주입펌프를 사용하였다. 공극률측정장치는 기체실험의 경우 헬륨공극률측정기, 액체실험의 경우 뷰렛을 사용하였으며 유량측정장치는 전자식유량계를 사용하였다. 이 연구에서는 주입유체로 투과력이 뛰어난 순도 99.999%의 헬륨가스와 해수의 평균염도에 가까운 3 wt %의 염화나트륨(NaCl) 수용액을 사용하였으나, 이는 실험의 목적에 따라 변경될 수 있다. 실험에 필요한 기타 장비로는 압력측정기 및 진공펌프 등이 있다. Fig. 1 과 Fig. 2에 기체를 이용한 실험시스템과 액체를 이용한 실험시스템의 모식도를 각각 나타내었다[4].

3.2 실험방법

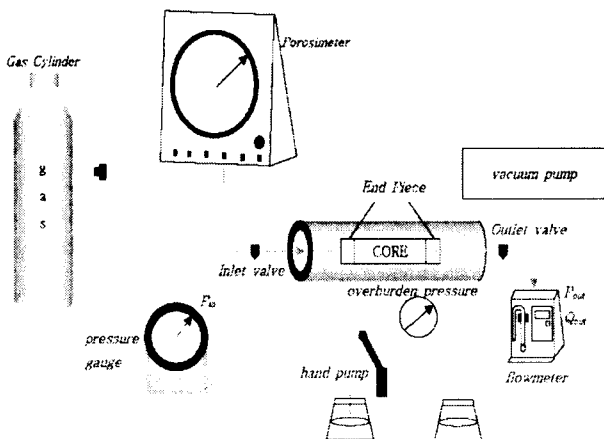


Fig. 1 Reservoir rock core's petrophysical property measurement system using gas.

3.2.1 기체를 이용한 저류층 공극률 측정실험

기체를 이용하여 저류층 암석코어의 공극률을 측정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 시료를 코어홀더 안에 장착하고 적정봉압을 가하여 지하의 응력상태를 모사한 후, 진공펌프를 이용한 탈기과정을 거쳐 시스템내의 용존가스를 제거한다. 탈기가 완료되면 시스템에 헬륨가스를 공급하고 시료를 100% 포화시킨 후, 공극률측정기를 이용하여 주입된 헬륨가스의 부피를 측정한다. 주입된 헬륨가스의 부피를 식 (1)과 같이 시료의 전체부피로 나누면 암석코어의 유효공극률을 계산할 수 있다.

3.2.2 기체를 이용한 저류층 유체투과율 측정실험

기체를 이용하여 저류층의 유체투과율을 측정하는 실험은 3.2.1의 실험과 동일한 순서로 시료장착, 가압, 탈기과정을 거친 후 기체정량주입기를 이용하여 시스템에 헬륨가스를 공급하고 충분한 시간을 주어 시스템 내 유동을 안정화시킨다. 유동이 안정상태(steady-state)가 되면 주입부와 배출부의 압력자료와 주입기체의 유량자료를 식 (2)에 대입하여 암석코어의 절대유체투과율을 측정할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기체를 이용한 공극률 측정실험과 유체투과율 측정실험은 시료장착, 가압, 탈기 등의 기본적인 실험과정이 동일하다. 이 연구에서 제작된 기체실험시스템은 이러한 반복과정을 줄이고자 가스통 외부에 T자형 밸브를 장착하였다. 즉 동일 시료의 공극률 및 유체투과율을 연속적으로 측정하고자 할 경우, 시료장착 및 가압, 탈기과정의 중복 없이 가스통 외부에 장착된 T자형 밸브의 방향에 따라 저류층 암석코어의 공극률 및 유체투과율을 선택적, 혹은 연속적으로 측정할 수 있다.

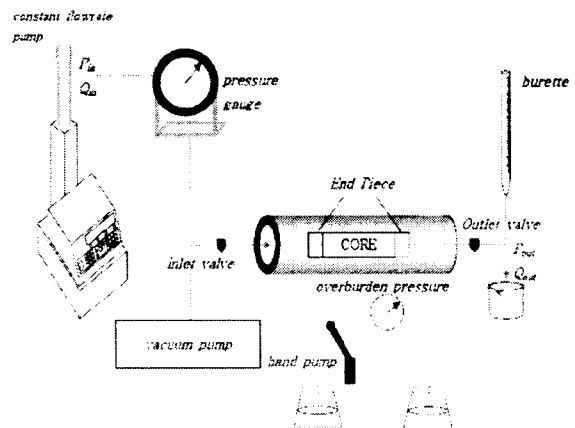


Fig. 2 Reservoir rock core's petrophysical property measurement system using liquid.

3.2.3 액체를 이용한 저류층 공극률 측정실험

액체를 이용한 저류층 암석코어의 공극률을 측정하는 방법은 다음과 같다. 3.2.1의 실험과 동일한 방법으로 시료장착 및 가압, 탈기과정을 거친 후 시스템에 염수를 흡입(imbibe)시킨다. 염수흡입방법은 뷰렛을 시스템보다 높게 설치, 뷰렛과 시스템의 수위차를 이용하며 뷰렛의 눈금변화가 없을 때의 눈금변화를 읽고 이를 식 (1)에 대입하여 공극률을 계산한다.

3.2.4 액체를 이용한 저류층 유체투과율 측정실험

유체투과율은 이상의 실험과 동일한 과정을 거쳐 시스템 내 용존가스를 제거한 후 정량펌프를 이용, 염수를 주입하여 시료를 100% 포화시키고 충분한 시간을 주어 유동이 안정화되면 주입부와 배출부의 압력자료와 유량자료를 측정, 이를 식 (2)에 대입하여 계산할 수 있다.

공극률 및 유체투과율 측정을 위한 주입유체로는 실험목적에 따라 다양한 유체를 사용할 수 있으나, 일반적으로 물로 인한 점토(clay) 입자의 스웰링(swelling)현상과 해수의 평균염도를 고려하여 3 wt % 염화나트륨 수용액이 많이 사용된다.

4. 실험자료 해석을 위한 사용자 친화적 S/W 개발

4.1 S/W의 구조

이 연구에서는 앞에서 설명한, 지하의 저류층을 모사하고 공극률 및 유체투과율을 측정할 실험의 효율적인 결과해석을 목적으로 객체지향 시각화 개발 도구인 *Microsoft Visual Basic*을 이용하여 윈도우즈 기반의 사용자 친화적인 소프트웨어를 개발하고자 하였다. Fig. 3은 이 연구에서 개발된 소프트웨어, *CorePro 1.0*의 로고를 나타낸 것이다.

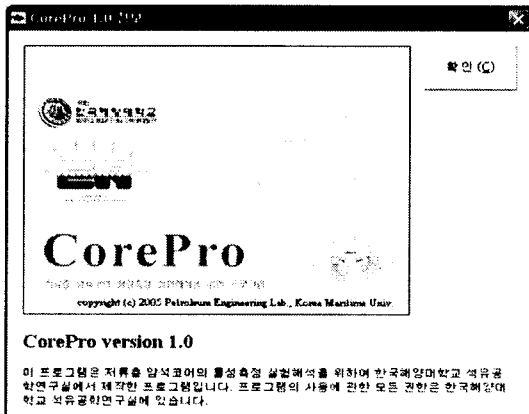


Fig. 3 Logo of *CorePro 1.0*.

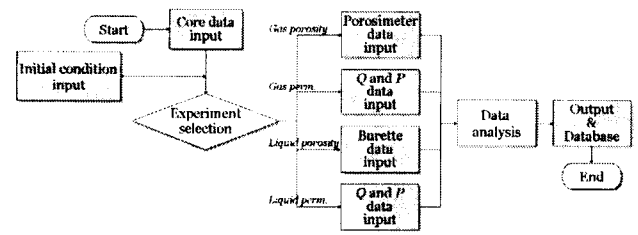


Fig. 4 Flowchart of *CorePro 1.0*.

소프트웨어의 전체적인 구조를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 *CorePro 1.0*은 코어자료를 입력하고 실험을 선택하면 선택된 실험에 따라 기체를 이용한 공극률 측정실험과 유체투과율 측정실험, 액체를 이용한 공극률 측정실험과 유체투과율 측정실험 등 네 개의 실험모듈이 하위문서 형태로 나누어져 진행되며 각각의 실험 모듈별로 실험자료를 입력받아 저류층 물성을 계산한다. 이 소프트웨어는 MDI(Multiple Documents Interface)형식으로 구현되므로 다중문서 작업을 통한 복수 실험의 진행이 가능하다. Fig. 5는 실험선택 및 코어자료 입력 모듈을 포함하는 *CorePro 1.0*의 초기화면을 나타낸 것이다.

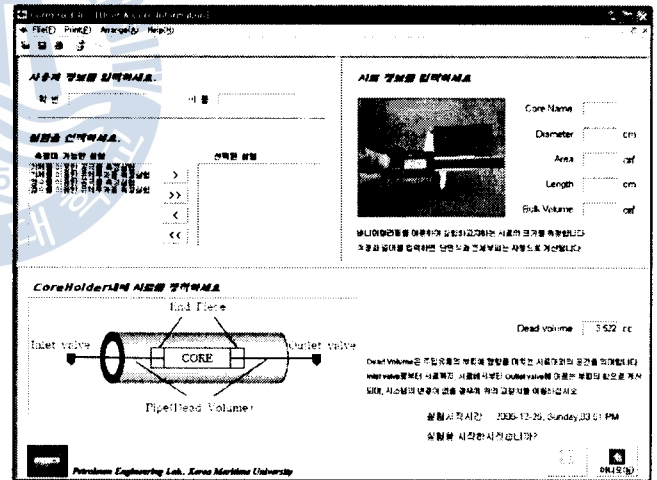


Fig. 5 Initial screen of *CorePro 1.0*.

4.2 S/W의 특징 및 기능

4.2.1 실험결과와 용이한 산출

*CorePro 1.0*은 간단한 자료입력과 마우스조작만으로 쉽게 실험결과를 산출한다. 이 소프트웨어는 사칙연산 및 단위변환 과정 등의 단순연산 외에도 유체투과율 측정에 있어 중요한 변수가 되는 온도에 따른 점성도의 변화를 예측하며 최소제곱회귀분석을 이용하여 최적화된 실험결과를 도출한다. Fig. 6은 이런 과정으로부터 산출된, 임의의 시료의 공극률 측정실험결과를 나타낸 것이다.

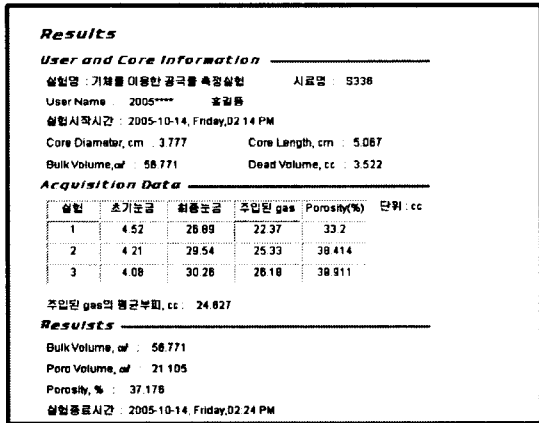


Fig. 6 View of experimental results.

4.2.2 실험결과의 저장 및 출력

CorePro 1.0은 산출된 실험결과의 저장을 통한 실험자료의 데이터베이스구축을 가능하게 하며 인쇄기능이 내재되어 문서 형태의 출력도 가능하다. Fig. 7은 자료저장 창을 나타낸 것이며 Fig. 8은 'txt파일' 형식으로 저장된 실험결과를 나타낸 것이다.

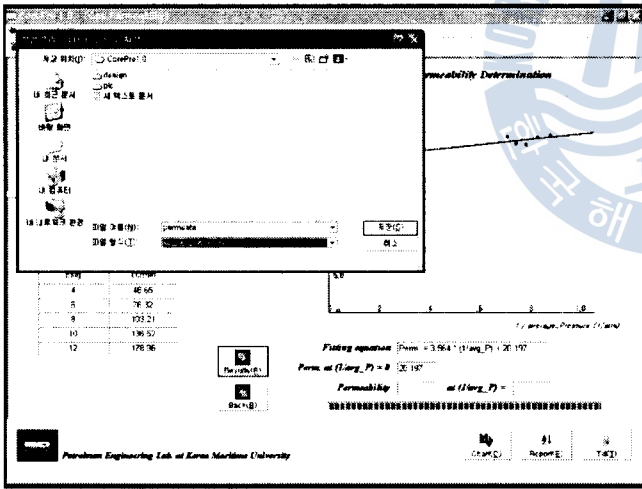


Fig. 7 Data save for D/B.

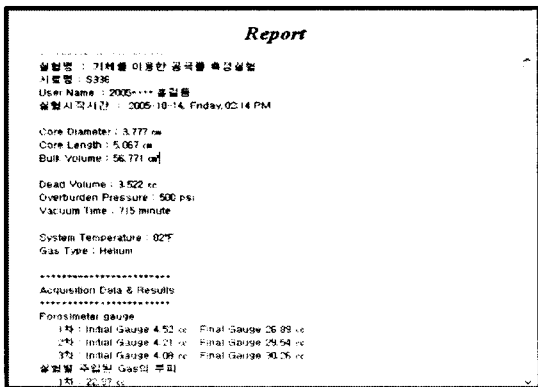


Fig. 8 Saved data as a txt file.

4.2.3 실험결과의 시각화

CorePro 1.0은 차트를 이용하여, 산출된 실험결과의 시각화를 제공한다. Fig. 9는 기체를 이용한 공극률 측정실험의 반복 실험결과를 막대그래프를 이용하여 시각화한 것이며 Fig. 10은 유체투과율 측정실험 결과의 산점도와 회귀직선을 시각화한 것이다.

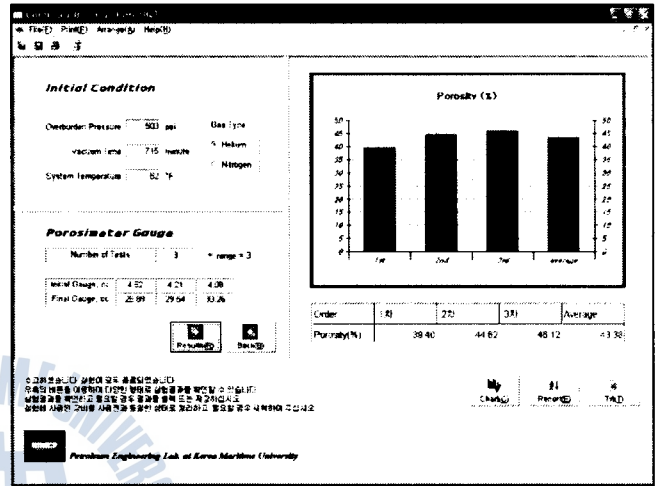


Fig. 9 Visualization of experimental results on gas porosity

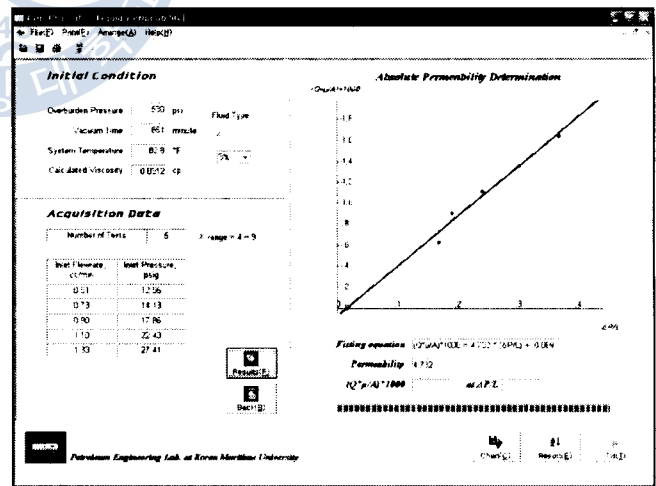


Fig. 10 Visualization of experimental results on liquid permeability.

4.2.4 사용자 친화적인 구성

CorePro 1.0은 초보자도 쉽게 사용이 가능하도록 선택된 물성 측정실험에 따라 자료입력이 순차적으로 진행되며 실험자료를 입력하는 모든 글상자에 간단한 팁이 제시되어있다. Fig. 11에 이를 나타내었다.

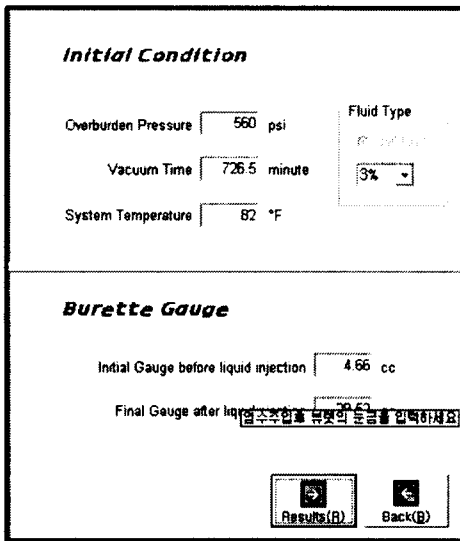


Fig. 11 Tip text included at each control.

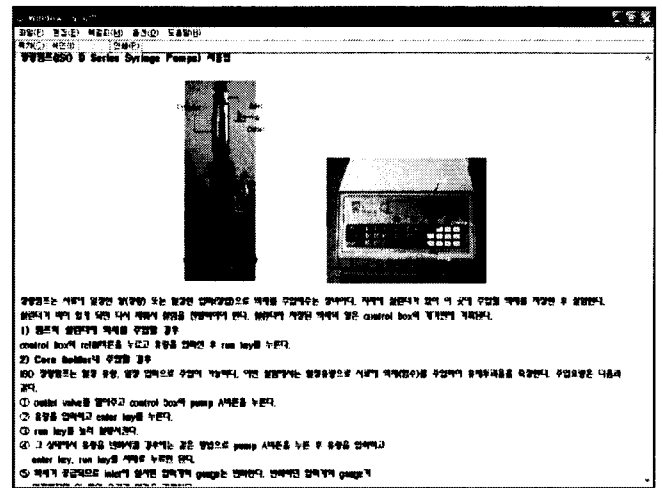


Fig. 13 Help-file of CorePro 1.0.

또한 CorePro 1.0은 실험에 미숙한 초보자도 쉽게 실험을 실시할 수 있도록 각 실험모듈마다 간단한 실험방법 안내를 실험모듈 우측상단에 포함하고 있으며(Fig. 12) 실험매뉴얼이 도움말 파일형태로 삽입된 「tutorial」 형식으로 제작되었다(Fig. 13).

이 연구에서는 저류층 암석코어 물성 실험의 자료해석을 위한 윈도우즈 기반의 사용자 친화적 소프트웨어, CorePro 1.0을 개발하였다. CorePro 1.0은 간단한 자료입력과 마우스 조작으로 저류층 암석코어의 공극률 및 유체투과율 실험결과를 산출하며 실험결과를 시각화하고 실험자료를 데이터베이스화한다. 또한 실험과정에 따라 순차적으로 진행되고 실험매뉴얼을 삽입한 「tutorial」 형식으로 제작되었으므로 초보자의 실험교육목적으로도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

참고문헌

- [1] 김병세, 이이표(2001): Microsoft Visual Basic Bible 6.0, 제1판, 삼양출판사, 서울.
- [2] 강주명(1994): 석유공학개론, 제2판, 서울대학교출판부, 서울, pp. 27-28, 45-46, 99-101.
- [3] 이근상(2002): 지하수 수리와 환경, 제1판, 구미서관, 서울, p. 43.
- [4] 이재형, 김현태, 허대기, 류병재(2004): 다공성 매질에서 주입유속에 따른 메탄 하이드레이트 생성조건, 한국지구시스템공학회지, 제 41권, 2호, pp. 118-124.

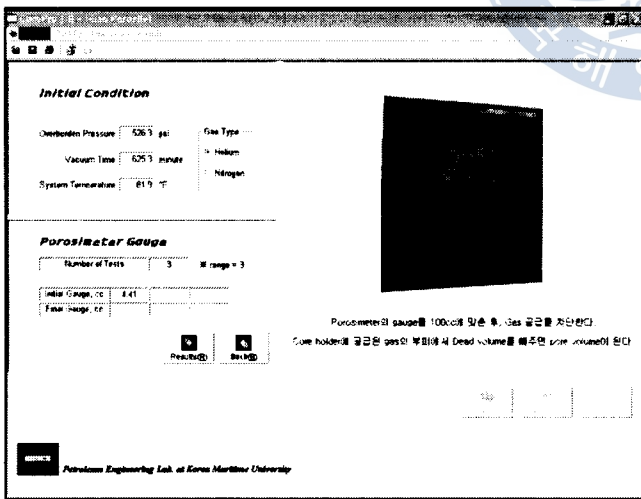


Fig. 12 Gas porosity calculation module including instruction manual.

원고접수일 : 2005년 12월 29일

원고채택일 : 2006년 1월 7일