

# 공극구조 전산모사를 이용한 사암과 탄산염암의 오일포화도에 따른 물성변화 분석

이민희, 김영석

공주대학교 지질환경과학과, minhimi@kongju.ac.kr

## Physical Properties Changes with Oil Saturation in Sandstone and Carbonate Using Pore-scale Simulations

Minhui Lee and Youngseuk Keehm

Dept. of Geoenvironmental Sci., Kongju National University

### 1. 서론

복잡한 퇴적상과 불균질한 속성작용, 그리고 균열 등의 영향을 받는 탄산염암 유전의 개발과 평가를 위해서는 오일포화도에 따른 물성의 상관관계를 정확히 이해하는 것이 요구된다. 이에 본 연구에서는 물성에 1차적인 영향을 미치는 공극구조 전산모사를 이용해 사암과 탄산염암의 오일포화도에 따른 물성변화를 분석하였다. 공극구조는 서로 비슷한 공극률(약 16%)를 가지는 사암과 탄산염암 샘플을 대상으로 X선 토모그래피(X-ray microtomography)를 통해 획득하였다. 그리고 획득된 공극구조 내의 오일포화도 변화는 염수로 100% 포화된 상태에서 오일을 주입하는 2상유체 주입시뮬레이션(two-phase flow simulation)방법을 이용하여 모사하였다. 그 이후 각각의 오일포화도를 가지는 공극구조에 대하여 공극스케일 전산모사를 이용해 전기전도도와 속도의 변화를 분석하였다.

### 2. 공극구조의 획득

공극스케일 전산모사에서 사용할 공극구조는 고분해능 자료를 얻을 수 있는 X선 토모그래피를 이용하였다. 이 방법은 X선이 시료를 통과하여 얻어지는 감쇠(attenuation)영상을 이용해 토모그램을 획득하는 방법으로 암석의 3차원 공극구조 해석에 많이 사용되고 있다(Cnudde et al., 2006). 연구에 사용된 시료는 공극구조에 따른 차이를 비교하기 위해 공극률이 약 16%로 유사한 사암과 탄산염암이다. 이 샘플을 이용하여 약 1 $\mu$ m의 해상도를 갖는 16bit gray-scale의 토모그램을 얻어 3차원 구조로 형성하였으며 분류화(classification) 과정을 통해 공극스케일 전산모사에 적용할 수 있는 공극과 입자로 이루어진 이진화(binanzed) 구조를 생성하였다(Fig. 1).

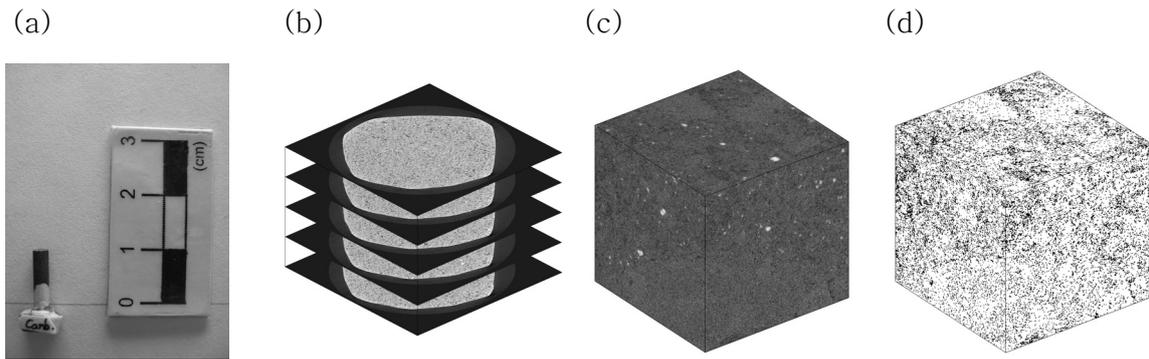
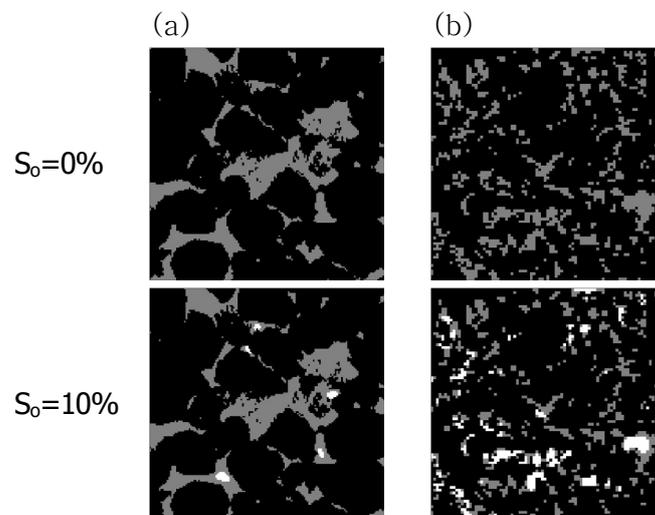


Fig. 1. Schematic diagram for 3D structure acquisition. (a) Sample preparation. (b) Sliced images from X-ray scan. (c) 3D tomogram. (d) Pore microstructure after classification processes.

### 3. 2상유체 주입전산모사

오일포화도의 변화를 모사하기 위해 격자볼츠만방법(lattice-Boltzmann method)을 이용하여 오일과 염수를 포함하는 2상유체 주입전산모사를 수행하였다(Keehm et al., 2001). 공극구조의 초기 상태를 염수로 100% 포화시키고 오일을 주입하는 전산모사를 수행하여 각 포화도 별로 염수와 오일의 공간적인 분포형태가 포함된 공극구조를 획득할 수 있었다. Fig. 2는 오일포화도에 따른 오일의 거동 특성을 보여주고 있다. 염수는 오일에 비해 상대적으로 wettability가 높아 입자를 감싸는 형태로 분포하게 되고 오일포화도가 증가하면 모세압력(capillary pressure)이 작아 유체가 이동하기 쉬운 공간부터 주입되기 시작한다. 사암의 경우 탄산염암에 비해 공극의 연결성이 좋고 pore throat의 크기가 크므로 오일이 주입되면 모세압이 작은 일부 공극에서만 유동이 일어난다(Fig. 2(a)). 탄산염암의 경우는 공극의 연결성이 사암에 비해 매우 불량하고 pore throat의 크기가 작은 공극이 전체적으로 넓게 분포하며 오일포화도가 증가할수록 사암보다 많은 부분에서 오일이 주입된다(Fig. 2(b)).



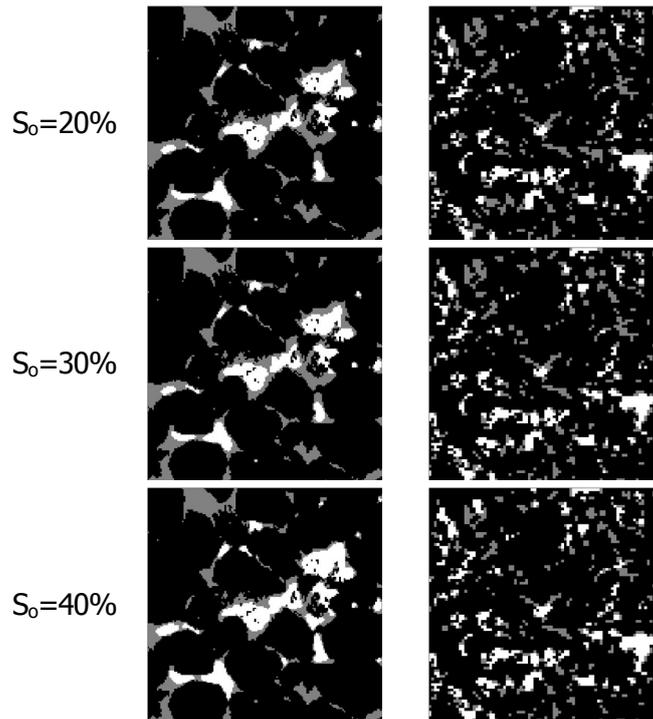


Fig. 2. Oil distributions during oil injection in (a) sandstone and (b) carbonate samples. Grains are shown in black, water in gray, and oil in white.

#### 4. 오일포화도에 따른 물성 전산모사

2상유체 주입전산모사를 통해 얻은 공극구조를 이용하여 전기전도도와 속도를 계산하는 물성 전산모사를 수행하였다. 전기전도도와 속도의 계산은 유한요소법을 이용한 변형률 에너지 최소화 방법을 사용하여 Roberts and Garboczi(2002)에 의해 제안된 방법을 수정하여 사용하였다(Keehm, 2003). 그 결과 전기전도도는 사암에 비해 매우 낮은 값을 보였으며, 탄산염암의 경우 낮은 오일포화도에서 사암의 비해 값의 변화가 크게 나타나다가 일정 포화도 이상에서는 값의 변화가 적게 나타난다(Fig 3(a)). 오일은 모세압이 작은 부분으로 주로 흐르게 되는데, 사암의 경우 모세압이 작은 일부 공극에서만 오일의 유동이 발생해 전체적인 공극의 연결성에 미치는 영향이 적으나 탄산염암의 경우는 사암과 달리 오일이 공극구조 전체에 넓게 분포해 낮은 오일포화도에서도 공극 내부의 염수의 연결성이 급격히 나빠지기 때문으로 생각된다. 다음으로 탄산염암의 속도는 사암에 비해 높은 값을 보이나 포화도에 따른 속도의 변화가 크지 않았다. 상대적으로 프레임의 탄성계수가 커서 속도 값이 사암보다 훨씬 높은 탄산염암의 경우 포함유체가 염수에서 물로 바뀐다고 하더라도 속도에 미치는 영향이 크지 않음을 보여준다(Fig 3(b)). 그리고 공극의 크기와 형태가 사암에 비해 훨씬 작고 복잡하기 때문에 정밀한 속도변화를 기술하기 위해서는 보다 높은 해상도의 공극구조가 필요할 것으로 사료된다.

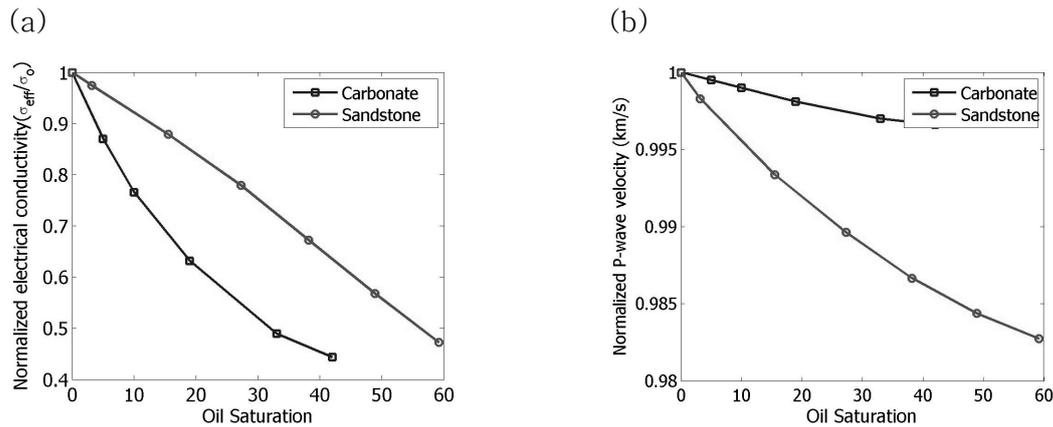


Fig. 3. (a) Normalized electrical conductivity, and (b) Normalized P-wave velocity at different oil saturations.

## 5. 결론

본 연구에서는 사암과 탄산염암의 공극구조를 이용하여 포화도에 따른 물성변화를 전산 모사를 통해 비교하였다. 동일한 포화도에서 오일의 유동은 사암에서는 모세압이 적은 일부 부분에서 발생하나 탄산염암의 경우 오일의 분포범위가 넓어 염수(water-phase)의 연결성이 급격히 나빠지게 되어 전기비저항이 사암에 비해 급격히 감소하는 현상을 나타냈다. 속도의 경우 사암은 오일포화도가 증가함에 따라 속도 변화가 큰 반면, 탄산염암의 경우 변화가 크게 나타나지 않았다. 이는 탄산염암의 속도는 사암에 비해 공극 내의 유체의 종류에 따라 민감하게 반응하지 않음을 시사한다. 그리고 탄산염암 내에서 발생하는 porosity에 대한 이해와 공극구조 획득과정에서 이를 정확히 분류할 수 있는 방법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다. 앞으로 다양한 종류의 탄산염암 공극구조를 이용한 전산모사를 통해 오일포화도에 따른 물성변화를 정량적으로 제시하고 탄성과 자료, AVO 분석 등을 통한 연구와 병행한다면 복잡한 구조를 갖는 탄산염 유전의 정량적인 평가와 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 참고문헌

- Cnudde V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Hoorebeke, L. V., and Jacobs, P., 2006, Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool, *Applied Geochemistry*, 21, 826–832.
- Keehm, Y., Mukerji, T., Nur A., 2001, Two-phase flow in complex porous media using Lattice-Boltzmann method, *SEG Expanded Abstract* 20, 1724–1727.
- Keehm, Y., 2003, *Computational Rock Physics : Transport Properties in Porous Media and Applications*, Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- Roberts, A. P. and Garboczi, E. J., 2002, Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids, *J. Mech. Phys. Solids*, 50(1), 33–55.

**사사:** 본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 2009T100200058).