

암반 단열에서 wettability가 지하수 속도에 미치는 영향

이항복, 여인옥*, 이강근**, 고용권, 최종원
 한국원자력연구원, 대전광역시 대덕대로 1045 (덕진동 150-1)

*전남대학교, 광주광역시 북구 용봉로 (500-757)

**서울대학교, 서울특별시 관악구 관악로 599 (신림동)

hblee@kaeri.re.kr

1. 서론

심지 층에 처분된 고준위 방사성 폐기물로부터 핵종들이 유출될 경우 처분장 주변의 지하 암반 층을 통해 생태계로 이동할 수 있다. 특히 유출된 핵종들은 암반 균열을 통해 지하수의 다양한 이동 경로를 따라 이동하게 되며, 이러한 이유로 암반 균열에서 지하수 흐름 양상에 관한 이해는 방사성폐기물 처분의 장기 안전성 측면에서 매우 중요한 요소라 하겠다. 특히 지하수 중에 콜로이드에 흡착하여 이동하는 방사성핵종들은 주로 반송(이류)에 의해 단열을 따라 빠르게 이동하게 되기 때문에 지하수 흐름 속도를 규명하는 것은 핵종의 이동 시간과 범위를 파악하는데 있어 기본적으로 반드시 필요하다. 단일 단열에서의 지하수 흐름 속도를 정량화하기 위해서 Reynolds equation으로부터 유도된 cubic law가 주로 사용되고 있고, 이를 결정하는 요인으로써 간극의 변화로 대표되는 단열의 기하학적 구조가 가장 중요하게 고려되어 왔지만, 암반의 표면성질 특히 wettability의 영향에 관해서는 연구된 바가 거의 없다.

본 연구에서는 마이크로미터 스케일의 단일 단열에서 wettability가 지하수 흐름 속도에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 친수성과 소수성을 띠는 각기 다른 4가지 표면에서 수리 실험을 통해 직접적인 지하수 유량 비교를 하였다. 또한 간극의 크기에 따라 wettability의 영향 정도가 어떻게 달라지는가에 관해서도 확인하였다.

2. 실험 및 결과

다음과 같은 실험 장치에서 수리 실험이 시행되었다 (Fig 1). 가운데에 평행 단열을 형상화한 유리판이 위치하였고 양끝에 수조를 연결하여 overflow를 통해 수두를 조절할 수 있도록 하

다. 그리고 단열의 수두는 압력계를 통해 직접적으로 측정되었다. 실험에 사용된 평행한 fracture는 일정한 두께의 두 개의 유리판 사이의 각 모서리에 500 마이크로미터 지름의 동선조각을 넣어 만들어졌고 허용오차는 10 마이크로미터였다. 그리고 단열 표면을 소수성으로 만들기 위해 비수용성 액체에 노출시킬 때, 가솔린과 경유와 크레오소트를 사용하였다. 크레오소트는 대표적인 고밀도 비수용성 액체의 일종으로 냄새가 많이 나고 발암물질이며, 기존 연구에 의해 표면의 wettability를 강하게 바꾸는 물질로 알려져 있다.

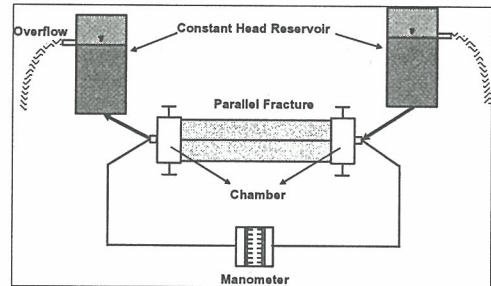


Fig. 1. Experimental setup

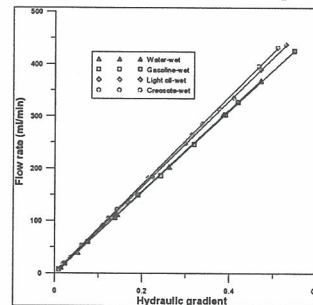


Fig. 2. Measured flow rates vs. hydraulic gradient

수두 구배 변화에 따라 측정된 유출량 분석결과 개의 직선은 각각의 다른 wettability를 가지는 표면을 나타내고 있는데 모두 수두 구배가 증가함에 따라 지하수 유출량이 일정하게 증가하는

선형 흐름을 보여주고 있다 (Fig 2). 삼각형으로 연결된 것이 water-wet에서의 결과 값인데, 이 실험값을 토대로 수리학적 간극을 계산해보면 508 마이크로미터가 나온다. 이는 허용오차를 감안하여 맨 처음 간극을 형성하기 위해 사용한 500 (10)의 동선과 거의 일치하는 값을 보이고 있다. 이를 통해, water-wet의 경우에는 수리학적 간극을 구하기 위해 사용된 cubic law가 실험값과 일치하며 이는 다시 말해, slip이 발생하지 않는 no-slip 경계조건이 타당하게 적용된다는 것을 의미합니다. 정사각형으로 연결된 직선은 gasoline-wet의 경우인데 이 경우에는 water-wet의 경우와 거의 차이가 없었다. 이에 반해 light oil과 creosote의 경우에는 water-wet의 경우와 비교하여 같은 수두 구배에서 더 높은 유출량 값을 보였습니다. Creosote의 경우 water와 가장 큰 차이를 보이는데, water에 비해 약 10%의 지하수 유출량이 증가하였습니다. Analytical solution과 수리 실험 결과를 이용하여 각 표면에서의 slip length를 구하였다 (Fig 3).

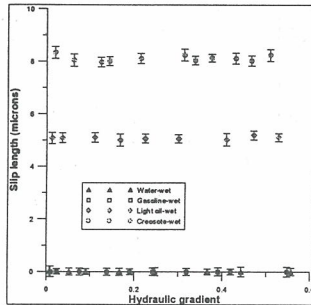


Fig. 3. Slip length vs. hydraulic gradient

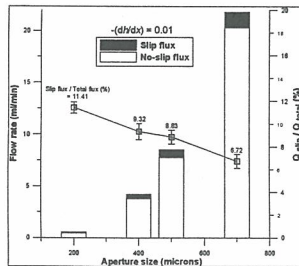


Fig. 4. The ratio of flow rate caused by slip to the total flow rate as functions of the aperture

그래프를 보면 slip length가 수두 구배의 변화에 따라 일정하게 유지되고 있는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 slip 발생이 수두 구배에 상관없이 일정하게 일어난다는 것을 알 수 있고, 이는 다시 말해 매우 낮은 지하수 속도에서조차 slip이 발생할 수 있음을 암시하고 있다. Fig 4는 간극 크기에 따른 slip의 크기 정도를 알아본 결과이다. 간극의 크기가 증가함에 따라 전체 유량에서 차지하는 slip에 의한 유량의 비율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 간극의 크기가 증가함에 따라 slip의 효과는 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구를 통해 단일 표면의 wettability가 변하게 되면 그 단면을 따라 이동하는 지하수의 흐름 속도에도 변화가 생기게 되는 것을 알 수 있었다. 상대적으로 소수성 정도가 약한 표면에서는 유체의 미끄러짐에 의한 유량의 증가가 나타나지 않았고, 강한 소수성 표면에서는 친수성 표면에 비해 지하수의 유량 증가를 확인하였다. 즉 slip의 크기 정도는 표면의 소수성 정도에 따라 영향을 받았고 이러한 현상은 지하수 속도에 상관없이 일정하게 발생하는 것으로 판단되었다. 또한 이러한 효과는 마이크로 미터 단위의 단열에서 두드러지고 간극의 크기가 그 이상으로 커지게 되면 slip의 효과가 크게 나타나지 않을 것으로 예상할 수 있다. 결과적으로 지하 암반 표면은 암석의 종류, 지하수의 pH, 온도 등에 의해 다양한 wettability를 가질 수 있기 때문에 이를 고려하는 것은 실제 암반 단열 내에서 보다 정확한 지하수 속도를 예측하는데 유용할 것이며, 다시 말해 wettability는 단열을 통한 방사성핵종의 이동에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 중요 요인이라 판단할 수 있다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.