

균열 교차에서 유량 및 유량비 변화에 따른 용질 혼합 특성에 대한 실험적 연구

최진호, 강주명
서울대학교

An Experimental Investigation of the Solute Mixing Characteristics by Changes of Flow Rate and Flow Ratio at a Fracture Intersection

Jinho Choi, JooMyoung Kang
Seoul National University

1. 서론

저류층에서 유체와 용질 등의 거동은 가장 저항이 적은 쪽으로 이루어지기 때문에 균열은 이런 유체와 용질의 가장 주요한 유동 경로가 된다. 두 개의 균열이 겹치는 경우 유동은 균열 교차를 통과하면서 에너지를 잃게 되며, 유입된 균열에서 다른 균열로 이동하는 용질의 유동 확률은 지역적 형상과 유동 상태에 따라 계산될 수 있다. 하지만, 균열망 규모에서는 균열의 크기 분포와 형태가 매우 불확실하며, 균열망이 완벽하게 특성화되었다고 해도 정확한 계산을 위해서는 시스템과 시간 등의 한계가 존재한다.

균열망은 단일 균열면들의 집합이며, 균열면들이 서로 교차하는 균열 교차가 유체와 용질의 주요한 유동로라는 점에서 교차점에서 나타나는 용질 거동 현상에 대한 연구를 수행할 필요가 있다. 특히, 균열 교차에서 용질 혼합 정도 예측에 따라 임의 시간의 어떤 지점에 농도 예측이 큰 차이를 보일 수 있으므로 균열 교차의 용질 거동과 혼합특성 분석은 용질 거동 시스템을 완성하는데 필수적이다.

이 실험에서는 용질용액의 유량비가 큰 경우와 작은 경우 각각에 두 가지의 유량비에 대하여 실험을 수행하였으며, 동일 페클레수 범위에서 유량비 변화에 따른 혼합도 변화 양상을 관찰하여 유량비가 혼합특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고, 연속 균열 교차를 가정하여, 인접한 유입/유출부의 유량을 같도록 제어하여 교차로 유입되는 유량 차에 의한 이송 혼합의 영향을 확산 혼합과 함께 종합적으로 고려하였다. 평균유량의 변화에 따른 페클레수의 변화를 통해 확산의 영향 구간을 구분하고, 확산의 영향이 적은 구간에서 유량비, 페클레수와 교차에서 용질의 혼합도의 관계를 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1 은 전체 실험 장치의 모식도이다. Fig. 1 에서 ①, ④번과 ②, ③번의 유량을 동일하게 설정하여 불완전혼합일 경우 ①번으로 주입된 용질이 유선을 따라 ④번으로 배출되게 함으로써 갑색소-적색 용액의 흡광도와 실험을 통해 얻은 최종흡광도의 값이 동일해지도록 하였다. 각 MFC 와 균열 교차 모델 사이의 파이프라인에는 필터를 설치하여 실험 중 발생하는 미생물에 의한 MFC, 스펙트라포토미터의 기기 오작동을 차단하였다. 스펙트라포토미터는 RS-232C 통신을 이용하여 개인용 컴퓨터에서 제어 및 데이터 수집을 가능하게 설계하였다. 또한, 스펙트라포토미터와 균열 교차 모델을 연결하는데 소요되는 파이프라인의 길이를 최소한으로 하고, 1/16 인치 파이프라인을 사용하여 유동 단면적을 줄임으로써 ④번 출구를 출발한 용질이 스펙트라포토미터에 도달하는 시간을 최소로 만들어 실험의 오차를 줄였다.

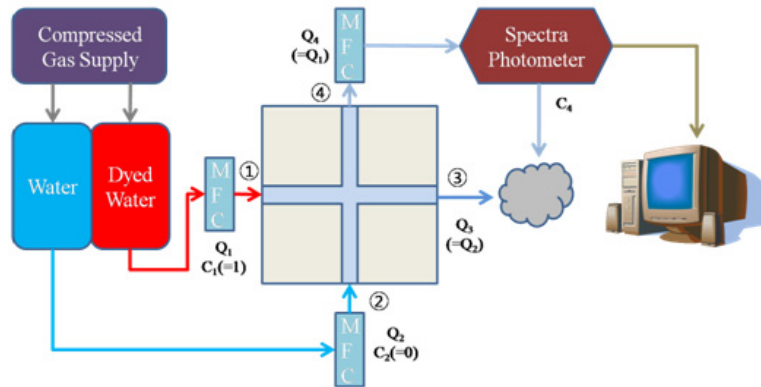


Fig. 1. 전체 실험 장치 구성 모식도

2-2. 실험방법

2차원으로 가정되는 얇은 깊이의 평탄 벽면 균열 교차 모델 실험을 통해 기존 전산모사 연구 결과를 비교검증하고, 벽면에 암색의 거칠기를 표현할 수 있는 사포를 부착한 거친 벽면 균열 교차 모델 실험을 수행하여 평탄 벽면 균열 교차 모델 실험결과와 비교 분석한다.

기존 연구와의 비교분석을 위해 분석 기준을 페클레수와 상대농도로 정한다. 상대농도는 균열 교차지점에서 용질의 섞임 정도를 나타내는 기준으로 0-50% 사이의 값을 가진다. 불완전혼합 상태를 상대농도 0%, 완전혼합인 상태를 상대농도 50%로 표현하며 수식은 다음과 같다.

$$\text{상대농도} = \left(\frac{A_x - A_c}{2(A_c - A_i)} + \frac{1}{2} \right) \times 100(\%) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$A_i = \frac{Q_3 \cdot A_r}{(Q_1 + Q_2)}$$

A_x 는 상대농도를 알고 싶은 상태의 흡광도를 나타내는 것으로 본 연구에서는 최종흡광도, A_r 는 갑색소-적색 용액의 흡광도, A_c 는 완전혼합이 일어날 경우의 흡광도, A_i 는 불완전혼합이 일어날 경우의 최종흡광도로 본 연구에서는 A_r 과 같다. 각각은 A_i 를 1로 A_c 를 0.5로 둔 농도값으로 대치될 수 있다. Q_1, Q_2, Q_3 는 각각 Fig. 3.5의 ①, ②, ④에서의 유량을 의미하며 이 연구에서 $Q_1=Q_4, Q_2=Q_3$ 이다. 상대농도를 위 식과 같이 최종흡광도의 선형식으로 나타낼 수 있으려면 용질의 농도와 흡광도의 관계식이 원점을 지나는 직선방정식이어야 한다.

Fig. 2. 는 3.3g/L 갑색소-적색 용액의 농도를 10%씩 감소하면서 흡광도를 측정된 결과로 용질 농도와 흡광도의 관계가 위 조건을 만족함을 알 수 있으므로 상대농도에 대한 수식 (Eq. 1)을 사용할 수 있다.

Fig. 3. 은 단위 모델에 대한 실험 순서도이다. 우선 각 실험장치를 가동할 수 있도록 구성하고 모든 파이프라인을 Fig. 1. 과 같이 연결한다. 3.3g/L 갑색소-적색 용액과 이차증류수를 만들어 각 실린더에 저장한 다음 가압장치를 이용하여 실린더 내부의 압력을 20psi로 유지한다. 5cc/min의 유량으로 이차증류수를 실험장치에 충분한 시간동안 흘려 잔류용질이 남아있지 않도록 하고, MFC와 스펙트라포토미터의 영점조절을 실시한다. 5cc/min의 유량으로 적색 용액을 스펙트라포토미터의 샘플저장장치로 흘려 용액의 흡광도를 측정하여 기록하고 샘플저장장치에 잔류용질이 남지 않도록 이차증류수로 재세척한다. 실험 계획에 맞추어 각 MFC의 유량을 세팅하고 유동실험을 시작한다. 이 때, 스펙트라포토미터에 연결된 개인용 컴퓨터의 로깅용 프로그램을 작동시켜 샘플저장장치에 유입되는 용액의 흡광도 변화를 살핀다. 흡광도의 변화가 일정 시간에 걸쳐 나타나지 않을 때의 흡광도를 최종흡광도로 기록하고 MFC와 로깅용 프로그램을 중지한다. 한 모델에 대해 계획한 실험이 모두 종료될

때까지 작업을 반복한다.

Table 1. 은 실험 계획했던 유동비와 유량의 변경에 관한 자료이다.

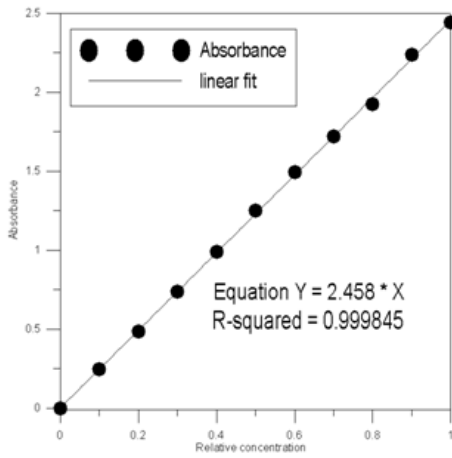


Fig. 2. 용질의 상대농도와 흡광도 관계

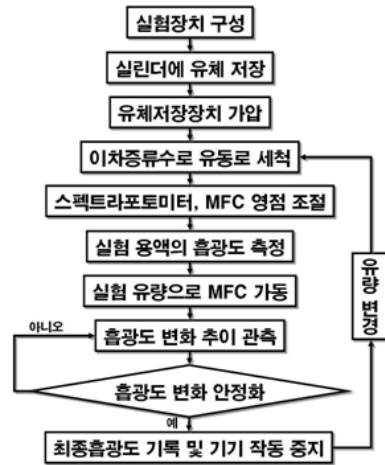


Fig. 3. 균열 교차 모델 실험 순서도

Table 1. 실험 유량비 및 유량 변경 계획

Flow Rate Ratio (Water:Red)	평탄 벽면 (cc/min)		거친 벽면 (cc/min)	
	Water	Red	Water	Red
1:1	0.1	0.1	0.1	0.1
	0.3	0.3	0.3	0.3
	0.5	0.5	0.5	0.5
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
1:2	0.1	0.2	0.1	0.2
	0.3	0.6	0.3	0.6
	0.5	1	0.5	1
	1	2	1	2
	2	4	2	4
	2.5	5	2.5	5
1:4	0.1	0.4	0.1	0.4
	0.3	1.2	0.3	1.2
	0.5	2	0.5	2
	1	4	1	4
	1.25	5	1.25	5
4:1	0.4	0.1	0.4	0.1
	1.2	0.3	1.2	0.3
	2	0.5	2	0.5
	4	1	4	1
	5	1.25	5	1.25
2:1	0.2	0.1	0.2	0.1
	0.6	0.3	0.6	0.3
	1	0.5	1	0.5
	2	1	2	1
	4	2	4	2

3. 실험결과 및 분석

아래 페클레수 식인 (Eq. 2)에서 분산계수 D 를 구성하는 두 항이 물리적 혼합항인 av 와 확산에 관련된 항인 D^* 이다. 분자분산계수인 D^* 와 혼합도 a 는 고정된 값이기 때문에 평균유속인 v 가 증가할수록 페클레수는 일정한 값으로 수렴하게 된다. 페클레수가 일정해지기 전의 구간은 분자분산계수, 즉 확산의 영향이 크게 작용하는 구간으로 생각할 수 있다. 이 구간을 구분하기 위해 아래 Fig. 4. 와 같이 평균유속과 페클레수의 관계를 살펴보았다.

$$P_e = \sqrt{2} \frac{\bar{v}b}{D}, D = \alpha_L \bar{v} + D^* \tag{Eq. 2}$$

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}, v_{1(2)} = \frac{Q_{1(2)}}{Area} = \frac{Q_{1(2)}}{bd}$$

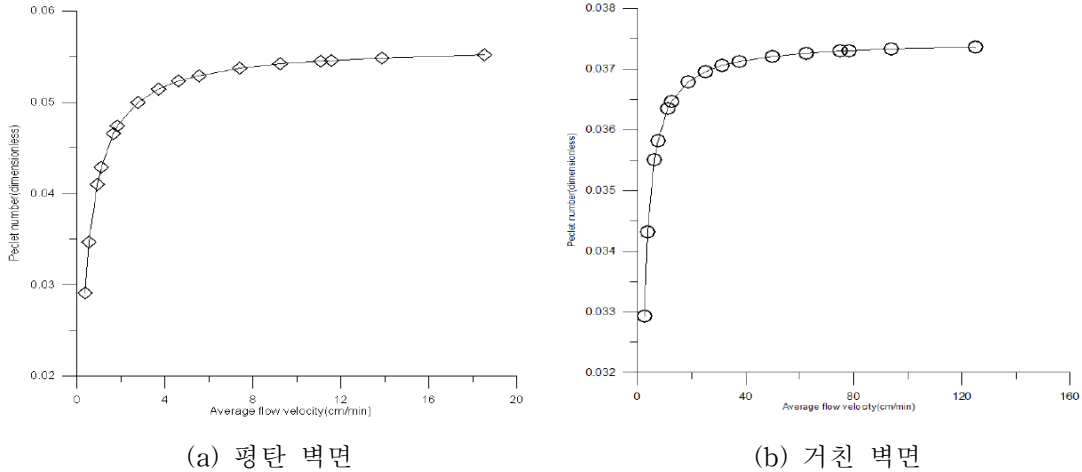


Fig. 4. 평균유속 변화(x축)에 따른 페클레수 변화(y축)

페클레수의 변화가 10e-3단위 이하인 경우 페클레수가 일정해 진 것으로 판단할 수 있고, 페클레수가 일정해지는 구간은 확산의 영향이 적은 것으로 가정할 수 있다. 실험에서 이런 구간이 평균유속 30cm/min 이상에서 나타났다. 실험 중 일정한 페클레수 범위에서 유량비 변화에 따른 혼합도의 변화는 각각의 페클레수 경우에 Fig. 5. 로 나타났다. x축은 증류수유량/용질용액유량의 유량비를 의미하고, y축은 교차에서의 혼합도를 나타낸다. 그래프들에서 유량비가 증가할수록 대체로 혼합도가 증가하는 양상을 보이지만, 유량비가 낮은 경우 혼합도가 역으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두 용액의 유량 차에 의해 이송 혼합의 영향이거나 유속의 영향으로 생각되지만, 정확한 분석을 위해서는 유량비와 유량을 좀 더 세분화 한 추가적 실험이 필요하다. 그리고, 페클레수가 낮은 경우 그 관계가 명확하지 않았기 때문에 선형화하기 힘들 것으로 판단되었다.

동일한 유량비의 경우에 페클레수가 증가할 때 혼합도가 감소하는 양상을 확인할 수 있었으며, 이는 페클레수 변화에 따른 혼합도 변화를 나타낸 Fig. 6. 에서 좀 더 명확히 확인할 수 있다. 이러한 페클레수와 혼합도의 관계는 이전의 전산모사나 해석적 연구의 결과와 유사하였다. 페클레수의 범위가 이전 연구의 결과들에 비해 매우 좁게 나타났는데, 이는 혼합을 시각적으로 확인하기 위해 이전 연구에 비해 10의 4승까지 높은 값의 분산계수를 지니는 용질을 이용하여 페클레수의 계산에서 분산계수의 영향이 크게 작용하였기 때문이다.

유량비와 혼합도의 관계를 판단하기 힘든 낮은 페클레수 실험은 앞선 확산 영향 해석의 결과에 비추어 볼 때, 확산의 영향이 큰 구간에 존재하였다. Fig. 5. 에서 실선으로 연결된 실험들은 확산의 영향이 작은 것으로 가정할 수 있는 실험들이며, 점선으로 연결된 실험들은 확산의 영향이 큰 것으로 가정할 수 있다.

증류수유량/용질용액유량의 유량비와 혼합도의 관계가 명확한 실험들에서는 유량비와 혼합도가 비례한다고 할 수 있었다. 페클레수와 유량비를 종합적으로 생각하면, 유량비/페클레수가 혼합도와 비례한다고 할 수 있으므로 그 관계를 Fig. 7. 로 확인하였다. 페클레수가 확산 등의 비선형 요소의 영향을 무시할 수 있을 정도로 큰 경우 혼합도는 페클레수에 반비례하고, 유량비에 비례함을 확인하였다.

거친벽면실험의 경우는 전체적인 혼합도가 평탄벽면에 비해 높게 형성되어 유량비 변화에 따른 혼합도의 변화를 명확히 보기는 힘들었지만, 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

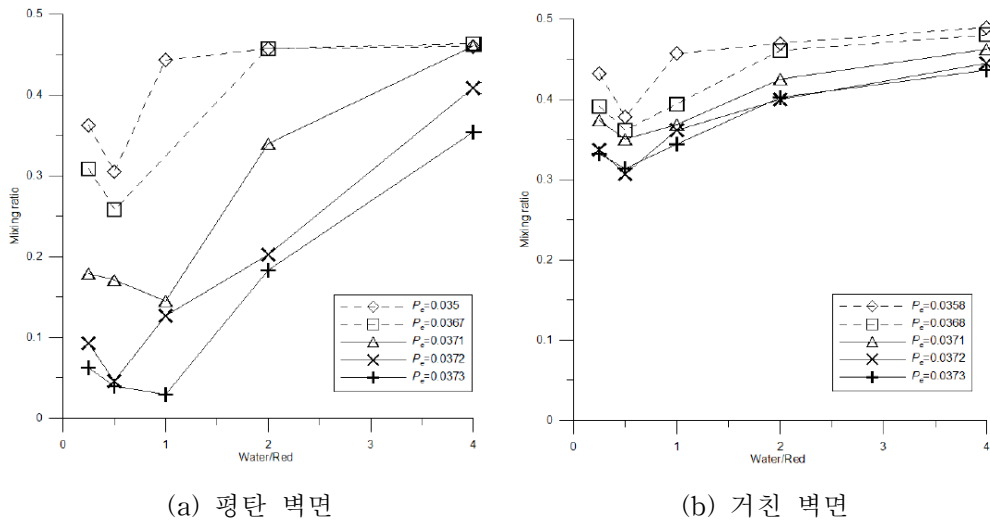


Fig. 5. 유량비 변화에 따른 혼합도 변화

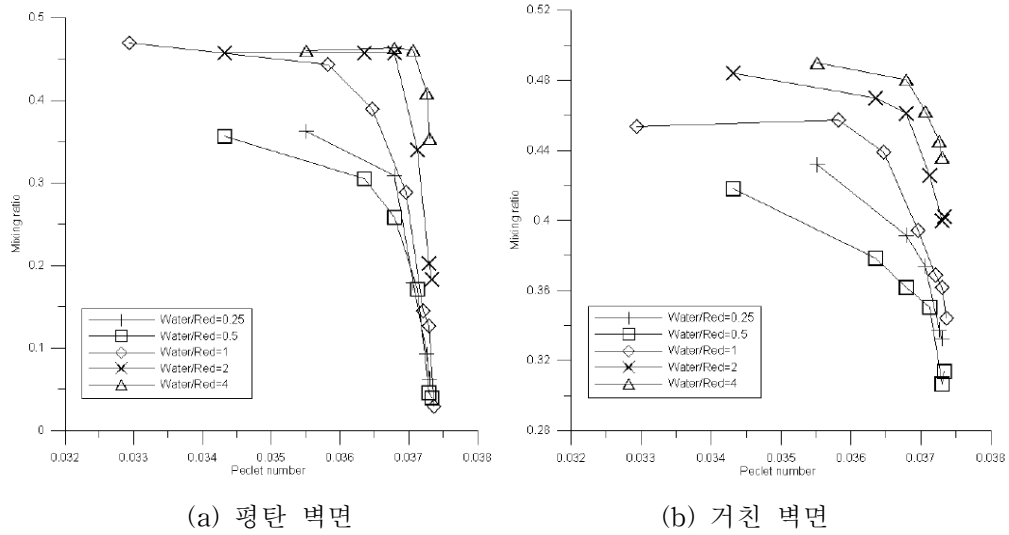


Fig. 6. 각 유량비에서 페클레수와 혼합도 관계

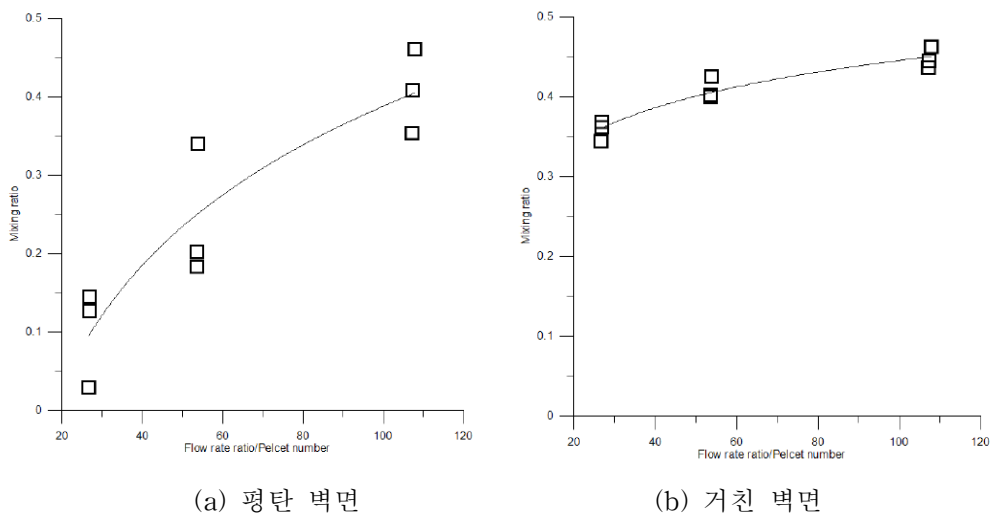


Fig. 7. 확산 영향이 약한 경우 유량비/페클레수와 혼합도 관계

4. 결론

이전의 연구들과 같은 2차원 거동을 모사하기 위해 2차원으로 가정할 수 있는 깊이가 얇은 균열 교차에서 평탄벽면과 거친벽면의 실험을 수행하였다. 다양한 유량과 유량비에 대한 실험으로 전산모사 연구나 해석적 연구로만 이루어졌던 균열 교차에서의 혼합특성에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이 연구에서 페클레수 변화가 $10e^{-3}$ 단위 이하인 경우 확산으로 인한 혼합효과를 무시할 수 있었다. 확산 영향을 무시할 수 있다고 가정할 수 있는 경우 혼합도 변화양상을 선형화할 수 있었고, 확산 영향이 크다고 가정되는 경우 혼합도와 페클레수 또는 유량비의 관계를 선형화할 수 없었다.

(2) 증류수유량/용질용액유량의 유량비가 증가할수록 혼합도는 증가하는 양상을 보였다. 확산 영향을 무시할 수 있는 경우, 혼합도는 페클레수에 반비례하고 유량비에 비례하였다.

용질의 유동은 균열을 통해 주로 이루어진다. 불확실한 가정과 계산을 위한 노력이 많이 드는 네트워크 규모의 해석 전에 단일 균열 교차에서의 용질 거동 및 혼합의 특성화는 임의의 시간과 위치에서 균열망 내의 용질의 농도 등을 계산하는데 필수적이라 하겠다. 이 연구에서는 이전 연구에서 보여준 페클레수와 혼합도의 관계를 실험적으로 확인하였으며, 유량비와 혼합도의 관계를 제시하였다.

혼합도를 페클레수로 예측하는 것은 확산 영향이 적은 제한된 경우에 가능하였으며, 유량비는 확산의 영향과 관계없이 혼합도와 비례하였다. 실제 혼합현상을 해석하기 위해서는 추가적으로 더 다양한 분산계수의 용질에 대한 유량 또는 유량비 변화에 따른 혼합도 변화에 대한 실험이 필요하다.

5. 참고문헌

1. Berkowitz, B.; Naumann, C.; Smith, L.. Mass transfer at fracture intersections : An evaluation of mixing models, WATER RESOURCES RESEARCH, 1994, 30(6), 1765-1773
2. Berkowitz, B.; Scher, H.. Anomalous Transport in Random Fracture Networks, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1997, 79(20), 4038-4041
3. Berkowitz, B.; Scher, H.. Theory of anomalous chemical transport in random fracture networks, PHYSICAL REVIEW E, 1998, 57(5), 5858-5869
4. HULL, L. C.; KOSLOW, K. N.. Streamline Routing Through Fracture Junctions, WATER RESOURCES RESEARCH, 1986, 22(12), 1731-1734
5. Johnson, J.; Brown, S.; Stockman, H.. Fluid flow and mixing in rough-walled fracture intersections, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2006, 111, B12206
6. Li, G.. Tracer mixing at fracture intersections, Environmental Geology, 2002, 42, 137-144.
7. Park, Y.-J.. Fracture intersection characteristics and the effects on network scale solute transport, Thesis for a Ph.D. Degree, Seoul National University, 2002
8. Park, Y.-J.; Lee, K.-K.. Analytical solutions for solute transfer characteristics at continuous fracture junctions, WATER RESOURCES RESEARCH, 1999, 35(5), 1531-1537
9. S.E.Silliman; E.S.Simpson.. Laboratory Evidence of the Scale Effect in Dispersion of Solutes in Porous Media, WATER RESOURCES RESEARCH, 1987, 23(8), 1667-1673
10. V.V.Mourzenko; F.Yousefian; B.Kolbah; J.-F.Thovert; P.M.Adler.. Solute Transport at Fracture Intersections, WATER RESOURCE SRESEARCH, 2002, 38(1), 1-14
11. Wilson, C. R.; Witherspoon, P. A.. Flow Interface Effects at Fracture Intersections, WATER RESOURCES RESEARCH, 1976, 12, 102-104