

단일 균열의 유체유동과 물질이동을 모사하는 역산 채널 모델

장민철, 강주명, 최종근

1. 서론

최근의 균열 내 물질이동에 관한 실험 및 이론적 연구결과로부터 균열 면에서 유체는 유동 채널을 따라 선택적으로 흐르는 사실이 밝혀졌다. 이런 현상을 채널링 현상이라 정의하며, 일반적으로 채널의 간극 평균은 균열의 다른 부분보다 크게 나타나고, 표준 편차는 작게 나타난다. 이러한 2차원 균열 매질에서의 유체 유동과 물질이동을 해석하기 위해 여러 1차원 채널 모델들이 제시되었다. 그러나, 기존의 모델들은 균열의 용질도달곡선을 정확히 모사하지 못할 뿐만 아니라, 간극의 분포(간극 평균, 표준편차) 또한 균열 내 유동 채널의 분포 특성을 반영하지 못하였다. 이 논문에서는 역산 알고리즘을 이용한 새로운 채널 모델을 제시하였다. 채널 모델의 비교 및 적용 대상이 되는 2차원 균열 모델(2D fracture model)을 컴퓨터 모델로 생성하였으며, 용질 이동 실험 결과와 비교함으로써 검증하였다.

2. 이론적 고찰

균열의 용질이동 실험 결과, 용질도달곡선(tracer breakthrough curve)이 주어지면 M개의 채널구간으로 나눈다. 각 M개의 채널구간 중 i 번째 채널 구간의 잔류시간(t_i^{obs})은 그 래프의 시간 축으로부터 읽고, 유량(Q_i^{obs})은 식(1)의 농도와 유량의 관계식으로부터 얻는다.

$$\frac{C(t)}{C_0} = \sum_{i=1}^M Q_i^{obs} H(t-t_i) \left(\sum_{i=1}^M Q_i \right)^{-1} \quad H(t-t_i) : \text{step function} \quad (1)$$

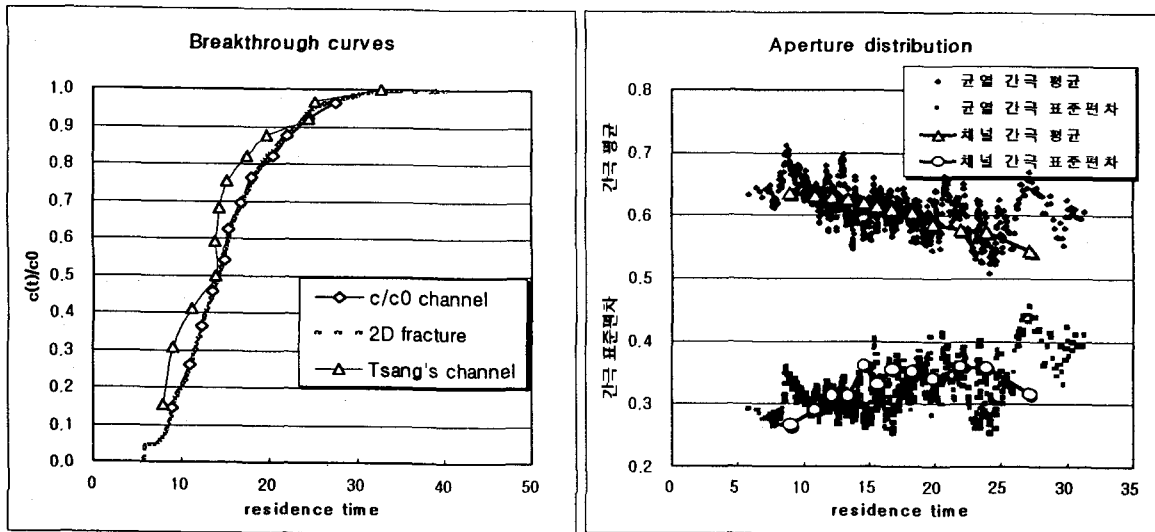
주어진 t_i^{obs} , Q_i^{obs} 로부터 i 번째 채널의 평균 간극 \bar{b}_i 를 계산하고 임의의 σ_b (채널 내 간극의 표준편차)를 가정하면, \bar{b}_i , σ_b 를 만족하는 간극 분포를 생성할 수 있다. 생성된 간극분포로 유량($Q^{cal}(\sigma_b)$)을 계산하면, σ_b 와 $Q^{cal}(\sigma_b)$ 의 함수관계를 얻게 된다. $Q^{cal}(\sigma_b) = Q_i^{obs}$ 를 만족하는 σ_b 를 찾으면, 계산된 \bar{b}_i 와 σ_b 는 i 번째 채널의 평균과 표준편차가 되며, 이때의 간극분포는 i 번째 채널의 간극분포가 된다. M개의 채널에 대해 반복 적용하면 M개의 채널 각각의 간극 분포를 얻게 된다.

주요어: 채널 모델, 채널링, 역산법

서울대학교 자원공학과

3. 본론

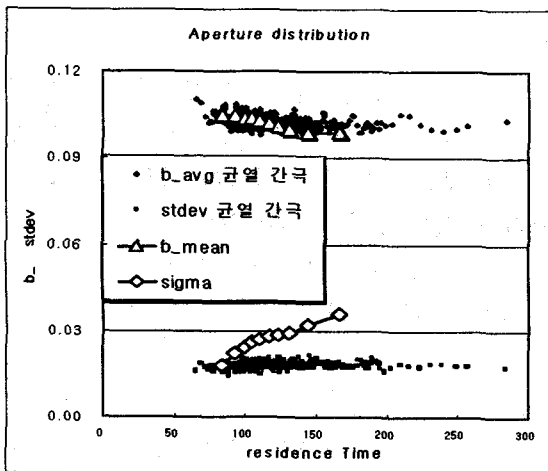
간극 평균 0.5874cm, 표준 편차 0.3839cm, 유량 = 50.716 cc/sec인 균열에 대해 2D 균열 모델로 용질 이동 곡선을 생성하였다. <그림 1>은 이 균열에 대한 기존의 채널모델, 역산채널 모델의 결과를 비교 도시한 그래프이다. 역산 채널 모델의 그래프가 기존의 채널 모델 보다 훨씬 정확하게 균열의 유체 유동을 모사하고 있는 것을 알 수 있다. <그림 2>는 2차원 균열 내에서 입자가 흘러가는 유동 경로의 간극 평균, 표준편차와 역산으로 구한 채널 모델의 간극 분포를 비교한 것이다. 역산 채널 모델이 2차원 균열의 간극 분포를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.



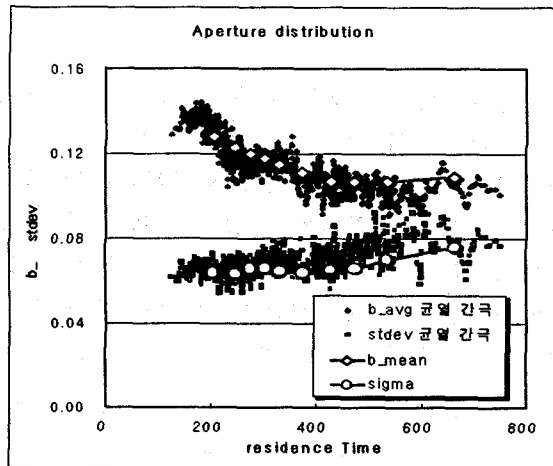
<그림 1> 역산채널모델, Tsang의 채널 모델의 용질 도달 곡선 비교

<그림 2> 균열 내 유동경로의 간극 분포와 역산 채널의 간극 분포 비교

이런 과정으로, correlation length/length of fracture(λ/L)=0.125, 간극 평균이 대략 0.1cm이고 표준편차를 달리하는 10개의 균열에 대해 역산 채널 모델을 적용하였다. 그 결과, 변동계수가 대략 0.3 이상인 경우는 균열 내 유동경로의 간극 분포와 이에 대응하는 채널의 간극 분포가 비슷한 값을 보이나, 변동 계수가 그 보다 작은 영역에서는 일치하지 않는 경향을 보였다. 이는 채널링 현상의 발생과 관련이 깊다. $\sigma_b/\bar{b} < 0.3$ 인 경우, 균열 내 유동경로의 간극 분포는 잔류시간에 상관없이 거의 일정하게 나타난다 <그림 3>. 변동계수가 0.3이상의 영역에서는 채널링 현상이 본격적으로 나타나고, 역산 채널 모델의 간극 분포와 균열 내 유동경로의 간극 분포는 일치하는 경향을 보인다 <그림 4>.



<그림 3> $\sigma_b/\bar{b}=0.185$



<그림 4> $\sigma_b/\bar{b}=0.753$

4. 결론

역산 채널 모델은 기존 모델과는 달리, 역산 알고리즘을 이용하여 용질 도달 곡선을 정확히 모사할 수 있으며, 균열 내 유동경로의 간극 분포를 반영한다. 인자 분석과 역산 채널 모델의 적용을 통하여, 변동계수 0.3 이상의 영역에서 채널링이 지배적으로 발생하며, 역산 채널 모델을 효율적으로 적용할 수 있음을 확인하였다. 역산 채널 모델은 균열의 2차원적 유동을 1차원의 채널들로 기술하므로, 계산속도와 컴퓨터의 기억 용량 면에서 상당한 효율을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1988, "Flow and Tracer Transport in Fractured Media: A variable Aperture Channel Model and Its Properties," *Water Resources Research* Vol. 24, No. 12, pp. 2049-2060
2. Tsang, Y. W. and Tsang, Y. W., 1989, "Flow Channeling in a Single Fracture as a Two-Dimensional Strongly Heterogeneous Permeable Medium," *Water Resources Research* Vol. 23, No. 3, pp. 467-479
3. Moreno, L. and Neretnieks, I., 1988, "Flow and Tracer Transport in a Single Fracture : A Stochastic Model and Its Relation to some Field Observations," *Water Resources Research* Vol. 24, No. 12, pp. 2033-2048