

Simulated annealing을 이용한 정적 및 동적자료에 대한 균열 역산모델

장일식¹⁾ · 강주명 · 최종근²⁾

1. 서론

균열에서의 유체유동을 해석하기 위하여 다양한 접근법이 시도되어 왔으나 균열망에서의 유체유동 현상을 제대로 모사하지 못하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수리학적 자료를 직접 사용하여 균열망을 형성하는 simulated annealing(SA) 역산법을 도입하였다(Datta-Gupta 등, 1995; Nakao 등, 2000). 그러나 기존 연구는 균열망의 역산에서 정적자료 즉, 균열의 통계적 특성을 제한조건으로 사용하지 못하였으며 균열의 세부 기하구조를 분석할 수 있는 입자이동 자료를 역산에 통합하지 못했다는 것이다.

이 연구에서는 압력거동만 고려한 기존 모델의 한계를 극복하고 균열의 통계적 특성, 유체 유동에 따른 압력거동, 그리고 입자이동에 의한 농도곡선 등을 동시에 고려할 수 있는 균열 역산시스템을 개발하였다. 다양한 형태의 자료를 에너지함수에 통합하고 지역적 극소점이 많은 에너지함수로부터 광역적 최소값을 찾기 위하여 비구배기반 역산기법인 SA(simulated annealing)를 사용하였다. 또한, 이중연결리스트를 도입하여 균열망 변경 시 균열의 교차점을 효율적으로 추가 또는 삭제하는 알고리즘을 개발하였다. 입자추적법에 비해 시뮬레이션 수행 시간이 월등히 빠른 준해석법을 사용하여 용질이동 자료를 역산 과정에 통합하였다.

2. 균열 역산시스템 개발

2.1 균열망 구성 기법

현장에서 파악한 균열특성을 바탕으로 균열망을 구성하였다. Fig. 1의 점선과 같이 가상의 조밀한 선으로 균열 시스템을 나눈 후 이 선들이 교차하는 점에 균열 중심이 놓일 수 있다는 가정을 하였다. 균열 중심이 선택되면 균열의 길이분포, 방향분포, 간극분포에서 확률적으로 값을 선택하여 균열을 생성하였다. 역산하는 과정에는 개별 균열의 생성 및 삭제 과정이 무수히 반복되며 균열망의 교차정보를 효율적으로 처리하기 위하여 이중연결리스트를 사용하여 나타내었다.

2.2 유체유동 및 입자이동

단일 균열에서의 유체유동은 삼승법칙을 따른다는 가정하에 균열의 교차점에서 물질평형식을 이용하여 지배방정식을 유도하였다. 입자이동 전산모델은 Novakowski와 Bogan(1999)이 제시한 준해석법을 사용하여 구현하였다. 준해석법은 입자이동에 대한 지배방정식을 라플라스 변환한 후 단일 균열에서의 이론해를 사용하여 입자의 농도 분포를 찾아내는 방법이다.

1) 서울대학교 공학연구소(jis@geofluid.snu.ac.kr)

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

2.3 SA 역산 기법

SA는 비구배기반 역산기법으로 국소적 극소값을 벗어나 광역적 최소값을 찾아내는데 적합한 방법이다. 에너지함수는 균열의 통계적 특성, 균열밀도, 압력거동, 입자농도곡선을 사용하여 구성하였다.

$$E = w_f E_f + w_d E_d + w_p E_p + w_t E_t$$

여기서, w 는 각 에너지함수의 가중치를 나타낸다. 지수함수적 스케줄을 사용하여 온도변화를 표현하였으며 변화된 구성의 수용여부는 Metropolis 알고리즘을 채택하였다.

3. 균열 역산시스템의 적용성

참조균열망을 Fig. 2와 같이 구성하고 유정 B에서 일정 유량으로 유체를 생산할 때의 각 유정의 압력거동과 유정 B에서 일정 농도로 입자를 주입하고 나머지 유정에서 일정 유량으로 생산하면서 관측한 입자의 농도곡선을 현장자료로 가정하였다. 균열의 특성자료, 압력거동 및 입자이동 자료를 사용하여 참조균열망에 대한 역산을 수행하였다. Fig. 3은 역산에 의해 생성된 균열망 중 하나를 나타낸 것이다.

역산된 균열망의 신뢰도를 알아보기 위하여 역산에 사용되지 않은 자료를 비교하였다. 즉, 동일한 참조균열망에 대한 역산을 여러 번 수행하여 형성된 균열망의 유정 F에서 일정유량으로 생산할 때 나머지 유정에서 관측되는 압력을 참조균열망과 비교한 결과 관측정에 대한 예측오차는 0.49로 약 10%의 평균 예측오차를 보였다.

역산과정에 유체유동 및 입자이동 정보를 모두 사용할 경우와 유체유동 정보만 사용한 경우 역산에 사용되지 않은 자료에 대한 예측을 수행하였다. Table 1은 균열특성과 압력거동 자료만 사용하여 역산한 경우 입자이동에 대한 입자 돌파시간에 대한 예측과 그 오차를 나타낸 것이고 Table 2는 입자이동 자료까지 역산에 포함한 경우에 입자 돌파시간 예측과 오차를 나타낸 것이다. 입자 돌파시간에 대한 예측 오차는 입자이동 자료까지 역산에 사용한 경우에 급격히 감소한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 압력거동만 고려한 기존 모델의 한계를 극복하고 균열의 길이, 방향, 간극 등의 통계적 분포 및 균열밀도, 유체유동에 따른 압력거동, 그리고 입자이동에 의한 농도곡선 등의 정보를 역산과정에 통합할 수 있는 균열 역산시스템을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이 연구에서 개발된 균열 역산시스템은 실제 균열의 통계적 분포를 따르면서 유체유동을 보장하는 균열망을 생성하기 때문에 생산정과 관측정 사이의 유체유동에 영향을 미치는 균열은 실제와 유사하거나 등가인 구조로 형성되었다.
2. 역산된 균열망에서 관측정의 압력거동에 대한 예측은 유정 사이의 균열 구조가 역산과정에 충분히 반영되었기 때문에 평균적으로 10% 내외의 작은 오차를 보였다.
3. 역산된 균열망에서의 신뢰성 있는 예측을 하기 위해서는 역산과정에 반드시 입자이동의 정보를 사용해야 한다.

5. 참고문헌

1. Datta-Gupta, A., D.W. Vasco, J.C.S. Long, P.S. Donfro, and W.D. Rizer. 1995. Detailed characterization of a fractured limestone formation by use of stochastic inverse approaches. *SPE Form. Eval.* 3:133-140
2. Nakao, S., J. Najita, and K. Karasaki. 2000. Hydraulic well testing inversion for modeling fluid flow in fractured rocks using simulated annealing: A case study at Raymond field site, California. *J. Appl. Geophys.* 45:203-223
3. Novakowski, K.S. and J.D. Bogan. 1999. A semi-analytical model for the simulation of solute transport in a network of fractures having random orientations. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 23:317-333

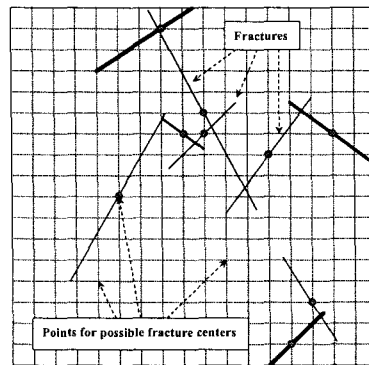


Fig. 1 Schematic diagram for the points where the centers of fractures can be located



Fig. 2 The reference fracture network



Fig. 3 An inversed fracture network

Table 1 Prediction of breakthrough time in the case not including transport data

Well	Breakthrough time [sec]		Error	
	Reference	Median	Absolute[sec]	Relative [%]
A	9013	17677	8664	96.1
B	8548	11596	3048	35.7
C	N/A	N/A	N/A	N/A
D	14651	26997	12346	84.3
E	50129	81250	31121	62.1

Table 2 Prediction of breakthrough time in the case including transport data

Well	Breakthrough time [sec]		Error	
	Reference	Median	Absolute[sec]	Relative [%]
A	9013	13756	4743	52.6
B	8548	5920	2628	30.7
C	N/A	N/A	N/A	N/A
D	14651	16851	2200	15.0
E	50218	72337	22209	44.2