

수공법 회수율에 미치는 균열 간극분포의 영향에 관한 실험적 연구

이 재형, 강 주명, 최 종근¹⁾

한국자원공학회 춘계학술대회 발표논문, 조선대학교, 광주, 2000년 4월 14-15일

1. 서론

일반적으로 균열이 존재하는 파쇄 저류층에서의 유체 유동은 균열을 통하여 이루어진다. 수공법 (water flooding)을 파쇄 저류층에 적용할 경우 주입되는 물은 균열을 통하여 이동하며 모세관압력 차이에 의한 흡수과정 (imbibition)을 통해 주변 다공매질의 석유를 치환·생산한다. 흡수과정은 대상 저류층의 물성, 암석 블록의 형태, 주입 유속, 온도, 균열의 간극분포 특성 등 여러 가지 인자에 영향을 받는다.¹⁻²⁾ 그러므로 균열을 통한 흡수과정에 관한 정확한 이해 없이는 효율적인 석유생산을 기대할 수 없다. 이 연구에서는 전술한 흡수과정의 여러 영향인자 중에서 균열간극분포의 특성이 수공법 석유회수율에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 균열간극분포

균열 간극 분포의 특성을 정량화 하기 위하여 변동계수, 왜도계수, 이등방비를 선택하였다. 각 변수들의 물리적 개념을 살펴보면 다음과 같다. 평균간극 크기에 대한 표준편차의 비로 정의되는 변동계수는 실제 균열의 형태와 평판 모형간의 편차를 나타낸다. 변동계수가 클수록 주입되는 물이 편류현상 (channeling)을 일으킬 가능성이 증가한다. 왜도계수는 간극 분포의 대칭성을 나타내는 것으로 동일 변동계수를 갖더라도 왜도계수의 절대값이 클수록 편류현상은 심화된다. 비등방비는 흐름방향 상관거리와 횡방향 상관거리의 비로 정의된다. 간극의 연결성은 이 값이 1보다 작으면 횡방향으로, 1보다 크면 흐름방향으로 더 우수함을 나타낸다.

3. 연구방법 및 결과

3.1 연구방법

시료는 100 md와 650 md의 유체전도도를 가진 베레아 사암 (Berea sandstone) 블록에서 직경 2 inch 길이 1 ft 의 코어를 각 4개씩 채취하여 암석매질의 Dykstra-Parsons 계수 (CDP), 공극율, 유체투과율 등을 측정한다. 각 시료에 하중기를 사용하여 시료의 축방향으로 단일균열을 생성한다. 균열 시료에 인장응력을 가하여 간극 분포를 생성하고 알루미늄 판 및 에폭시 첨가 등의 과정을 거쳐 최종의 균열시료를 완성한다. 완성된 균열시료를 코어홀더에 장착하고 일정한 응력과 온도조건을 유지한다. 진공방법을 사용하여 균열시료를 등유로 100% 포화한 후 일정 유속으로 물을 주입하여 생산되는 석유의 부피를 측정한다. 다음의 물주입 실험을 위해 Soxhlet extraction을 수행하여 잔류오일을 제거하고 등유로 포화시킨다. 주입실험이 끝난 균열시료의 간극 분포를 측정하기 위하여 주조법 (casting method)

주요어 : 균열, 간극분포, 흡수과정, 석유회수율

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부

을 사용하였다. 실리콘을 사용하여 물주입 실험과 동일한 응력조건에서 간극의 재생판(replica)을 만들고 우레탄으로 보강한다. 이것을 1 mm 간격으로 잘라 영상분석기로 1 mm 간격으로 간극을 측정한다.

4.2 간극분포 및 회수율 특성

측정된 간극분포와 암석매질의 물성이 Table 1 에 나타나 있다. 각 블록에 해당하는 시료들의 공극율, 유체투과율, 그리고 C_{DP} 값이 일정한 것으로부터 간극분포의 특성외에 흡수 과정에 미치는 다른 요인들은 미미한 것으로 생각할 수 있다. 각 시료별로 측정된 간극 분포가 Fig. 1에 나타나 있다. 균열간극 분포 측정의 결과로부터 시료들의 균열형태를 다음과 같이 설명할 수 있다. F2와 F3, 그리고 F4의 경우 비교적 평탄한 간극 분포를 보이며 편류 발생 가능성이 작고 F1, F5, F6, 그리고 F7 의 경우 편류가 발생할 가능성이 높다. F8의 경우, 편류발생 가능성은 적으나 간극분포가 매우 불균질하고 상관 거리가 매우 짧아 이상유동 시 많은 잔류오일이 균열에 존재할 것으로 예측된다.

Fig. 2 는 650 md 균열시료들에서 주입수의 유량이 2 cc/min인 경우 주입 공극부피에 따른 누적 석유 회수량을 비교한 것이다. 흡수과정에 의한 석유 회수효율은 변동계수와 왜도계수가 증가할수록 감소하며 이등방비에도 큰 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 100 md 시료들의 경우에도 같은 영향이 나타났다. F3의 경우, 측정된 변동계수와 왜도계수가 비교적 큰 이유는 Fig. 1에서 보듯이 주입구 부근에 간극이 평균간극크기의 4배 이상이 될 정도로 매우 큰 영역이 존재하기 때문이다. 이 영역은 비교적 주입구면에 가깝고 횡방향으로 넓게 분포되어 있어 편류발생 가능성이 적다. 그러므로 F3에서 이 영역을 제외하고 생각한다면 변동계수와 왜도계수는 크게 감소할 것이다. 회수효율이 가장 낮은 F7의 경우는 큰 변동계수와 왜도계수, 그리고 작은 비등방비의 영향에 기인한다. 비등방비가 작을수록 유동석유의 끊어짐 현상(snapping off)이 발생하여 회수효율이 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

100 md 시료들에서 단위 공극부피 만큼 물이 주입되었을 때의 주입유속에 따른 석유회수량 곡선이 Fig. 3 에 나타나 있다. 일반적으로 주입유속이 빨라지면 석유회수효율은 감소하는데, 주입유속에 대한 회수량의 민감도는 변동계수와 왜도계수가 증가할수록, 그리고 비등방비가 감소할수록 더욱 증가하였다.

4. 결론

- 1) 석유회수 효율은 이등방비에 비례하고 변동계수와 왜도계수에 반비례한다.
- 2) 석유 회수율에 미치는 균열 간극분포의 영향은 주입유속이 증가할수록 심화된다.
- 3) 초기 물도달시간은 변동계수와 왜도계수가 증가할수록, 그리고 이등방비가 감소할수록 빨라진다.

참고문헌

1. Cil, M., Reis, J. C., Miller, M. A., and Misra, D., 1998, "An Examination of Countercurrent Capillary Imbibition Recovery from Single Matrix Blocks and Recovery Predictions by Analytical Matrix/Fracture Transfer Functions," *Proceedings*, Paper SPE 49005, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, pp.237-251.
2. Babadagli, T., 1997, "Scaling of Capillary Imbibition under Static Thermal and Dynamic Fracture Flow Conditions," *Proceedings*, Paper SPE 39027, 5th Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 30-Sept. 3.

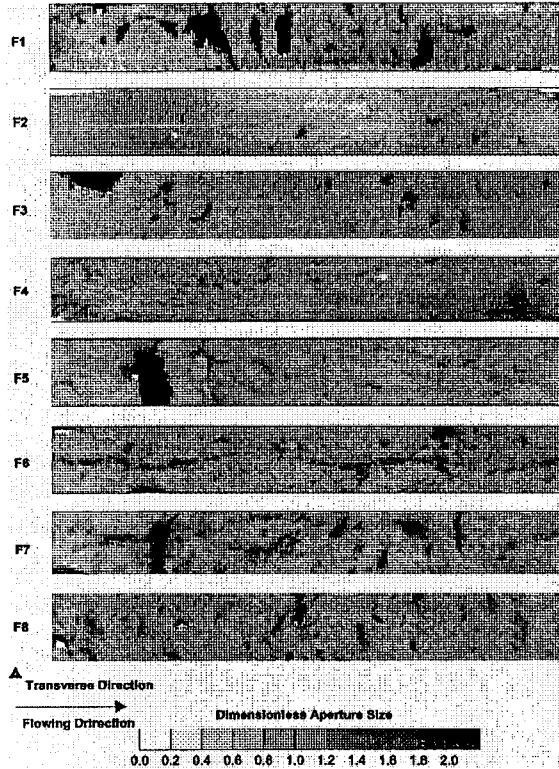


Figure 1. 균열 암석시료들의 간극분포.

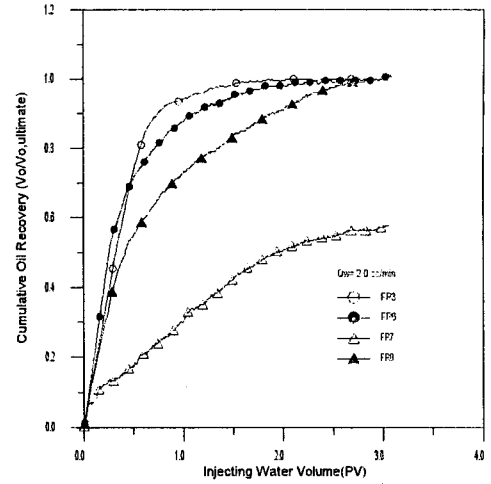


Figure 2. 주입유속 2 cc/min에서 650 md 시료들의 누적 석유회수량 곡선.

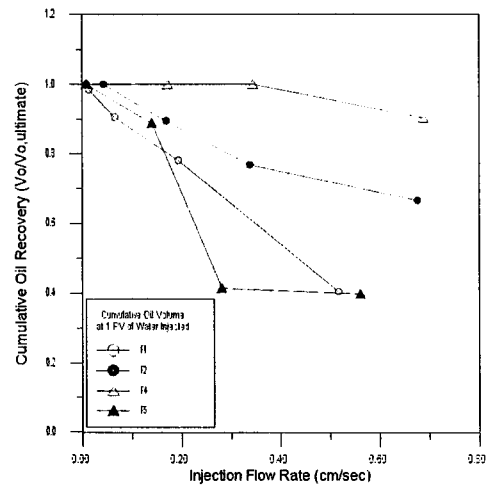


Figure 3. 100 md 시료에서 물 1 공극 부피가 주입되었을 때 주입유속에 따른 회수량 곡선.

Table 1. 측정된 암석매질의 물성과 균열간극 분포의 통계적 특성

시료	암석매질 물성			균열 간극분포 특성			
	공극율	유체투과율(md)	C_{DP}	평균간극(μm)	변동계수	왜도계수	이등방비
F1	0.21	97	0.23	320	0.82	3.0	0.67
F2	0.21	98	0.23	400	0.35	2.4	3.26
F3	0.21	658	0.11	590	0.52	3.9	1.74
F4	0.21	109	0.25	480	0.34	1.9	2.80
F5	0.20	102	0.24	590	0.70	5.0	0.85
F6	0.21	643	0.10	500	0.42	2.4	1.91
F7	0.22	655	0.11	600	0.54	3.5	1.00
F8	0.22	660	0.10	540	0.37	2.4	0.90