지구통계 기법을 이용한 오일샌드 저류층 해석 및 스팀주입중력법을 이용한 비투멘 회수 적지 선정 사전 연구

정진아 · 박은규*

경북대학교 지질학과

A Characterization of Oil Sand Reservoir and Selections of Optimal SAGD Locations Based on Stochastic Geostatistical Predictions

Jina Jeong and Eunyu Park*

Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

In the study, three-dimensional geostatistical simulations on McMurray Formation which is the largest oil sand reservoir in Athabasca area, Canada were performed, and the optimal site for steam assisted gravity drainage (SAGD) was selected based on the predictions. In the selection, the factors related to the vertical extendibility of steam chamber were considered as the criteria for an optimal site. For the predictions, 110 borehole data acquired from the study area were analyzed in the Markovian transition probability (TP) framework and three-dimensional distributions of the composing media were predicted stochastically through an existing TP based geostatistical model. The potential of a specific medium at a position within the prediction domain was estimated from the ensemble probability based on the multiple realizations. From the ensemble map, the cumulative thickness of the permeable media (i.e. Breccia and Sand) was analyzed and the locations with the highest potential for SAGD applications were delineated. As a supportive criterion for an optimal SAGD site, mean vertical extension of a unit permeable media was also delineated through transition rate based computations. The mean vertical extension of a permeable media show rough agreement with the cumulative thickness in their general distribution. However, the distributions show distinctive disagreement at a few locations where the cumulative thickness was higher due to highly alternating juxtaposition of the permeable and the less permeable media. This observation implies that the cumulative thickness alone may not be a sufficient criterion for an optimal SAGD site and the mean vertical extension of the permeable media needs to be jointly considered for the sound selections.

Key words : oil sand, geostatistical simulation, SAGD, cumulative thickness, vertical mean length

본 연구에서는 캐나다 아사바스카 지역의 맥머레이층에 대한 3차원 지구통계 모사를 실시하였으며 모사 결과를 바탕으로 심부지열회수방법을 통한 경제적 산출 가능 지역을 가늠하고자 하였다. 비투멘의 효율적인 생산을 위하여 SAGD 공법의 최적 입지를 선정하는데 있어 스팀챔버의 충분한 수직적 연장성을 확보하는 것은 중요한 사항이다. 연구지역에서 획득한 110개의 시추공 자료에 대하여 마르코프 전이 확률 기반의 분석을 실시하였으며 이를 바탕으로 맥머레이층 구성 암상에 대한 추계론적 예측을 실시하였다. 추계론적 모사를 통하여 획득한 다중재현을 기반으로 암상 불확률 분포도를 제작하였으며 이는 각 암상이 분포 할 수 있는 포텐셜을 보여준다. 암상 불확률 분포도를 이용하여 투수성 퇴적층(역질 퇴적층 및 사질 퇴적층)에 대한 누적 층후도를 구성하였으며 이를 바탕으로 SAGD 공법이 적용될 수 있는 최적 입지를 선정하였다. SAGD 최적 입지 선정을 위한 추가적인 분석을 실시하기 위하여 전이율을 바탕으로 한 단일 퇴적층의 평균적인 수직 및 수평적 연장성을 산정하였다. 투수성 퇴적층의 평균적인 수직적 연장성은 대체로 투수성 퇴적층에 대한 누적층후도 분포도와 유사한 분포 양상을 보이거나 일부 누적 층후가 큰 위치에서 유사하지 않은 양상을 보인다. 이는 누적 층후도와 평균적인 수직적 연장성 분포 양상이 유사하지 않은 지역은 투수성 퇴적층과 다른 암상과의 교호성은 매우 크나 투수성 퇴적층의 수직적인 연장성은 좋지 않음을 의미한다. 따라서 누적

*Corresponding author: egpark@knu.ac.kr

충후도 뿐 만 아니라 투수성 퇴적층의 수직적 연장성 또한 충분히 고려하였을 때 건전한 SAGD 최적 입지를 선정하는데 충분히 신뢰성 있는 결론을 도출 할 것으로 판단된다.

주요어 : 오일샌드, 지구통계학적 모사, 스팀주입중력배수법, 누적 충후, 수직적 평균 연장성

1. 서 론

최근 들어 신규 유전 개발 빈도의 감소와 기존 유전 생산량 감소 및 생산 원가 상승 등으로 인한 고유가 현상이 지속되고 있다. 이로 인해 원유의 안정적이고 지속적인 공급을 위한 대책으로 비전통형 자원 개발에 대한 관심이 증가하였다. 이에 따라 전 세계적으로 가스하이드레이트, 오일샌드, 오일세일 및 세일가스, GTL(Gas to Liquids), CBM(Coal Bed Methane) 등의 경제성 있는 비전통 에너지 자원개발이 활성화 되고 있는 추세이다. 비전통 석유자원 중의 하나인 오일 샌드는 75~85%가 모래 및 점토와 같은 무기물질로 구성되어 있으며 3 내지 5%가 수분, 그리고 약 10% 내외가 중질원유인 비투멘(Bitumen)으로 구성되어 있으며 비투멘 함유량이 12% 이상일 경우 경제성 있는 개발이 이루어 질 수 있다(Masliyah *et al.*, 2008).

캐나다 앨버타(Alberta) 주의 경우 현재 세계 최대의 오일샌드 생산 지역으로 1.7에서 2.5조 배럴의 오일샌드가 부존되어 있으며 가채 매장량은 약 1.7억 배럴로 보고된다(Hinkle and Batzle, 2006). 이는 전 세계 석유 매장량의 13%에 해당하는 양으로 캐나다 앨버타의 오일샌드 개발에 따른 경제적 파급 효과는 막대할 것으로 예상된다. 특히, 앨버타의 아사바스카(Athabasca) 지역은 앨버타 지역 오일샌드의 80% 이상이 부존되어 있는 곳으로 주요 저류층은 맥머레이층(McMurray Fm) 및 클리어워터 층(Clearwater Fm)이다(Kwon, 2008).

맥머레이층은 수평적으로 40,000 km²에 달하는 세계에서 가장 큰 오일샌드 퇴적층이며 약 1조 배럴의 비투멘을 포함하고 있는 경제성 높은 오일샌드층이다(McLennan and Deutsch, 2004). 현재 개발되고 있는 오일샌드 중 30%는 심부열회수(in-situ thermal recovery) 방식의 일종인 스팀주입중력배수법(steam assisted gravity drainage, 이하 SAGD)에 의해서 회수 될 수 있다(Ren *et al.*, 2006). 개발 대상 지층에 스팀주입을 실시 할 경우 상온에서 점성도가 높은 특징을 갖는 비투멘의 유동성을 증가시켜 회수율 증가 효과를 기대할 수 있다. 이는 약 150 m 심도를 가지는 주요 연구대상 저류지층인 맥머레이층의 개발에 적합한 방식으로 저류층 내 스팀 주입정과 비투멘 회수정을 각각 상·

하로 수평 배치한 후 높은 온도의 스팀을 주입시켜 스팀챔버(steam chamber)를 형성한 후 영향범위 내 중력배출 되는 비투멘을 회수한다(Butler *et al.*, 1981).

비투멘의 높은 유동성 확보를 통한 효율적이고 경제적인 개발을 위해서는 주입되는 스팀의 전파효율이 중요한 요인으로 작용한다. 이러한 스팀전파효율은 저류층의 불균질성과 오일 함유층의 분포양상, 공극률, 투수성, 저류층 두께 및 지질경계 등과 같이 기본적인 저류층 특성에 의해 결정되며 따라서 이와 같은 저류층 상황에 대한 포괄적 특성화가 요구된다(Dimitrakopoulos *et al.*, 1993; Chen, 2009). 또한 중력배수 효율은 스팀챔버 크기 및 비투멘의 상대투수성 등에 의하여 결정되므로 이질 퇴적층과 비투멘 사암층의 수직·수평적 분포 양상이 개발 지역 선정에 중요한 고려 대상이 되어야 한다. 따라서 서로 다른 투수성을 갖는 다양한 퇴적상들의 상대적 분포에 대한 정확한 예측은 SAGD 시스템의 설계 및 개발 가능한 비투멘의 회수량 등을 산정하는데 있어 필수적이다.

캐나다지역의 오일샌드 개발을 위한 저류층 특성화 연구는 1990년 대 초반부터 활발하게 이루어져 왔다(Dimitrakopoulos *et al.*, 1993; McLenna and Deutsch, 2004; Ren *et al.*, 2006; Chen, 2009; Lee *et al.*, 2011). 이러한 연구들은 대부분 세미-베리오그램(semi-variogram)에 기반한 기존 지구통계 모사기법을 이용하여 저류층 특성화를 실시하고 그 결과에 기초하여 다양한 저류층 시뮬레이션을 실시하고 있다. 그러나 세미-베리오그램은 퇴적층에서 일반적으로 관찰되는 방향에 따른 구조의 비정규성(directional non-stationarity) (예. 점이층리 등)을 예측하는 데에는 한계성이 있다는 사실이 기존 연구에서 다수 지적된 바 있다(Carle and Fogg, 1996; Weissmann *et al.*, 1999). 맥머레이층은 북미판과 태평양판의 충돌로 인한 복잡한 조구조운동에 의해 형성된 지층으로 해침에 의한 퇴적상의 상향 세립화 경향이 우세한 불균질성 저류층이다. 따라서 이와 같은 저류층을 보다 효과적으로 예측하기 위해서는 퇴적층의 지질층서 분석에 적합한 전이확률(transition probability) 분석을 실시하는 것이 바람직하다(Krumbein, 1967; Krumbein and Dacey, 1969). Krumbein과 Dacey (1969)는 퇴적암의 층서나 퇴적 과정 등이 갖

는 순차적 구조가 마르코비언(Markovian) 과정을 따르며 이를 전이확률 또는 임베디드(embedded) 전이확률을 통하여 표현할 수 있다고 설명한 바 있다. 전이확률은 기존 지구통계 모델들이 근간으로 하고 있는 세미베리오그램에 비하여 다양한 장점을 지니고 있어 근래의 지구통계 모델에 다수 이용되고 있는 추세이다 (Carle and Fogg, 1996; Elfeki and Dekking, 2001; Park *et al.*, 2007; Park, 2010).

따라서 본 연구에서는 캐나다 앨버타 주 아사바스카 지역의 맥머레이층에 대하여 지향적 비정규성 해석이 가능한 지구통계 모델에 기초하여 3차원 예측을 실시하고자 한다. 또한 이러한 예측을 통해, SAGD 공법을 이용한 오일샌드 개발에 있어 중요한 요인으로 작용하는 이질 퇴적층의 분포와 사질 퇴적층의 상대적 분포 양상을 예측하고, 최종적으로 연구대상지역 내의 경제성 있는 오일샌드 개발지를 선정하고자 한다.

2. 연구 지역 및 이용자료

본 연구에서는 캐나다 앨버타 주의 township 76 range 07에 걸친 맥머레이층 자료를 활용하였다. 연구대상지층은 약 5.02 km²의 넓이에 걸쳐 분포하고 있다. 맥머레이층 상부 경계는 해수면 기준으로 최대 271.5 m 및 최소 242.2 m에 위치하며 하부 경계는 최대 232.45 m, 최소 167.9 m에 위치한다. 본 층의 최대 및 최소 두께는 각각 74 m 및 18.95 m이다.

맥머레이층의 지질예측을 위하여 총 110개의 시추공

Fig. 1. Local coordinates of 110 borehole in research area.

자료가 이용되었으며 그 위치를 도시화한 것은 Fig. 1과 같으며 위치는 township 07 range 76에 해당한다. Fig. 2의 시추공은 실제 자료를 등 간격으로 차분하여 얻어진 자료이며 전체 시추공 자료 중 일부를 표현한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 이 지역을 구성하는 암상은 한국석유공사에서 분류한 충서군(KNOC Facies Group)에 따라 총 8개로 구분 지었으며 이에 는 석회암층, 셰일, 이질 플러그, 이질우세 경사이질층, 이질이 협재한 사질 퇴적층, 사질우세 경사이질층,

Fig. 2. A few examples of borehole used in this study. Each color in the color bar (bottom) sequentially indicates Limestone, Shale, Mud-plug, Muddy IHS, Shaley sand, Sandy IHS, Breccia and Sand from left to right.

Table 1. The composing media in the study area and their index.

Geology	Index
Limestone	1
Shale	2
Mud plug	3
Muddy IHS	4
Shaley sand	5
Sandy IHS	6
Breccia	7
Sand	8

역질 퇴적층, 및 사질 퇴적층이 있으며(Table 1) 이들에 대하여 각각 순서대로 1에서 8까지 순차적인 인덱스를 부여하여 예측을 실시하였다. 역질 및 사질 퇴적

층, 이질이 협재한 사질 퇴적층의 경우 연구지역내에서 비투멘의 주저류층 역할을 하며 나머지 암상의 경우 비저류층 역할을 한다. 최상부의 암상은 대체로 세일인 것으로 분석되었으며 기저부의 암상은 석회암으로 이루어져 있는 것으로 분석되었다. 시추공으로부터 얻어진 지질매질의 비율은 석회암층이 5.1%, 세일이 22.8%, 이질 플러그가 12.6%, 이질우세 경사이질층리가 10.3%, 이질이 협재한 사질 퇴적층이 2.7%, 사질우세 경사이질층리가 9%, 역질 퇴적층이 3.3%, 및 사질 퇴적층이 34.2%이다.

본 연구에서는 시추공 로깅 자료에 근거하여 전체 심도를 0.5 m 간격으로 세분하여 지하지질 분석을 시도하였으며 각 0.5 m 간격 내에 50% 이상을 차지하고 있는 암상을 그 간격을 대표하는 지질로 보았다.

Fig. 3. The changes of auto-transition probability of (a) Limestone, (b) Shale, (c) Mud-plug, (d) Muddy IHS, (e) Shaley sand, (f) Sandy IHS, (g) Breccia, and (h) Sand calculated at increasing lag separations. The left sides are downward(top to bottom) direction, whereas the right sides are the opposite(bottom to top) direction.

이에 따라 비교적 얇은 층으로 나타나는 이질 플러그의 경우 다소간의 저평가가 이루어질 수 있다. 그러나 이질 플러그와 같이 비교적 얇은 상으로 나타나나 투수성 측면에서 오일샌드의 개발에 중요한 의미를 가지는 지질의 경우 각 간격의 투수성을 재평가하여 투수성의 등급 별로 재평가하는 방법이 고려되어야 하며 이를 위하여 추후 매질의 투수성에 기초한 다양한 규모 확장(up-scaling) 기법이 고려될 수 있다.

3. 시추공 자료를 이용한 오일샌드 저류층의 지구통계학적 분석

시추공에 나타난 연구대상 지역 지질의 수직적 상관

성 변화를 분석하기 위하여 각 8개 암상에 대한 거리-전이확률 변화도를 제작하였으며 그 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 또한 Fig. 5는 본 연구 모사의 기본 입력자료로 활용된 전이확률 행렬을 도식한 것으로 하부에서 상부방향으로의 전이확률 및 상부에서 하부방향으로의 평균적 전이확률의 강도를 표현한 것이다. 그림에서 자기상관성에 해당하는 주대각 방향의 전이확률 성분들인 자기-전이확률(auto-transition probability)은 대체로 높은 확률을 보이며 암상 간의 교차상관성에 해당하는 주대각 이외의 성분인 상호-전이확률(cross-transition probability)은 일부를 제외하고는 매우 낮은 값을 보인다.

Table 2는 맥머레이층 암상들의 수직 및 수평적 평

Fig. 4. The changes of cross-transition probability between the permeable and less permeable media. Each of the transition indicates (a) Limestone→Sand, (b) Sand→Limestone, (c) Shale→Sand, (d) Sand→Shale, (e) Mud-plug→Sand, (f) Sand→Mud-plug, (g) Muddy IHS→Sand, (h) Sand→Muddy IHS, (i) Shaley sand→Sand, (j) Sand→Shaley sand, (k) Sandy IHS→Sand, (l) Sand→Sandy IHS, (m) Breccia→Sand, (n) Sand→Breccia.

Fig. 5. The mean one-step transition probability acquired from vertical transitions in 110 borehole data.

균 상관거리를 종합하여 얻어진 결과이며 표에서 +X는 도메인의 서쪽에서 동쪽으로의 방향을 의미하고 +Y 및 -Y는 각각 도메인의 남쪽에서 북쪽 및 북쪽에서 남쪽에서의 방향, +Z와 -Z는 도메인의 상부에서 하부, 하부에서 상부로의 방향을 의미한다.

Fig. 3(a)는 석회암층의 수직적 거리에 따른 자기상관성 변화를 나타낸 것이다. 석회암층은 대부분 맥머레이층 기저부에서 나타나므로 상부에서 하부로 진행하면서 상관성은 감소하지 않는다. 반대로 하부에서 상부로 진행할 경우 추세의 감소는 느리게 발생하는 경향성을 보여 상관거리가 큼을 지시한다. 이와 같이 방향에 따라 서로 다른 변화추세를 보이는 것은 석회암 분포에 있어 방향에 따른 비정규성을 의미한다. 이러한 추세를 통하여 얻은 수직 방향으로 석회암층의 평균 상관거리는 61 m로 분석되었다. Fig. 3(b)에서 셰일의 경우 시추공 분석에서도 보는 바와 같이 맥머

레이층 상부 대부분을 차지하나 상부뿐만 아니라 층 내부에서도 관찰된다. 따라서 하부에서 상부로 진행할 경우 셰일의 상관성의 감소는 매우 더디게 나타난다. 반면에 상부에서 하부로 진행할 경우 상관성의 감소가 앞서 석회암층의 경우처럼 지속적으로 일어나는 형태를 보인다. 분석을 통하여 얻은 셰일의 평균 상관거리는 상부에서 하부 방향의 경우 14 m 그리고 하부에서 상부 방향의 경우 17 m이다. 이렇게 서로 다른 상관거리 및 상관성 감소 추세는 석회암층과 마찬가지로 셰일의 경우에도 방향에 따른 지구통계적 비정규성이 나타남을 의미하며 이는 석회암층의 경우 맥머레이층 하부 그리고 셰일의 경우 맥머레이층 상부를 구성하는 주요 암상임을 의미한다.

이질 플러그는 맥머레이층 내부에서 다른 지질들과 상호 교호하며 나타나는 형태를 띤다. 따라서 방향에 따른 통계적 비정규성은 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 또한 전이확률의 변화를 통해 살펴볼 때 빠른 상관성 감소를 보이는 구조와 느린 상관성 감소를 보이는 두 가지 구조가 공존하는 것을 Fig. 3(c)을 통하여 확인할 수 있다. 이질 플러그의 평균적 상관거리는 12 m로 분석되었다. Fig. 3(d)는 이질우세 경사이질층리의 상관성 변화를 나타낸 것으로 이질우세 경사이질층리 역시 이질 플러그와 마찬가지로 층 내부에서 다른 지질들과 교호하는 형태로 존재하여 방향에 따른 통계적 비정규성은 나타나지 않는다. 그러나 이질 플러그와 달리 이질우세 경사이질층리는 한 가지 지구통계적 구조만을 보이며 상관거리는 상대적으로 짧은 4 m로 분석되었다. 이질이 협제한 사질 퇴적층(Fig. 3(e))와 사질우세 경사이질층리(Fig. 3(f))는 이질우세 경사이질층리와 매우 유사한 상관성 감소추세를 보이며 상관성 추이를 통하여 얻어진 평균적 상관거리는 각각 7 m 및 6 m로 이질우세 경사이질층리와 유사하게 분

Table 2. Correlation length of the each composing media where each of symbol indicates +X: west→east; -X: east→west; +Y: south→north; -Y: north→south; +Z: top→bottom; and -Z: bottom→top directions.

	Correlation length					
	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
Limestone	319.04	320.67	309.65	330.24	431.87	61.22
Shale	113.18	118.57	110.44	111.11	14.07	17.35
Mud plug	90.24	80.80	83.63	85.20	11.85	11.89
Muddy IHS	75.62	79.95	75.67	76.30	7.14	7.16
Shaley Sand	77.11	88.54	85.99	75.30	6.40	6.44
Sandy IHS	73.25	73.25	72.73	71.09	5.68	5.69
Breccia	82.88	68.70	74.88	72.16	4.94	4.94
Sand	88.36	88.32	85.90	84.69	9.87	9.97

석되었다. 맥머레이층의 주요 투수성 구조 역할을 하는 역질 퇴적층 및 사질 퇴적층의 상관성 변화 추이는 각각 Fig. 3(g) 및 Fig. 3(h)과 같다. 두 층의 상관성 변화 추이는 유사한 특성을 보이는 것으로 판단되며 짧은 거리에서 급격히 상관성이 감소하나 그 이상의 거리에서는 다소 더딘 상관성의 감소 경향을 갖는다.

역질 퇴적층의 평균적 상관거리는 비교적 짧은 5m를 가지며 사질 퇴적층의 상관거리는 상대적으로 큰 10m로 나타났다. 이를 통하여 두 매질의 투수성이 유사할 경우 역질 퇴적층에 비하여 사질 퇴적층 층이 보다 큰 투수성 구조 역할을 할 수 있을 것으로 판단되며 사질 퇴적층이 SAGD 공법을 적용한 오일샌드 개발에 더 유리한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 자기-전이확률과 달리 상호-전이확률은 상대적으로 매우 작은 값을 보인다. 그러나 상호-전이확률 중 일부는 타 전이확률에 비하여 상대적으로 높은 값을 보이며 대체로 타 암상에서 사질 퇴적층으로 전이되는 확률이 큰 것으로 관찰되었다. 따라서 연구대상 지층인 맥머레이층 전반에 걸쳐 사질 퇴적층의 분포가 우세하며 세일 및 석회암층을 제외한 대부분의 암상이 사질 퇴적층과 교호하는 양상을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 또한 타 암상에서 세일로 전이되는 확률 역시 상대적으로 크게 나타나며 이는 전체 도메인에서 사질 퇴적층과 함께 세일이 우세한 분포양상을 지시한다. 실제 시추공 자료를 통한 분석 결과 역시 세일이 22.8% 및 사질 퇴적층이 34.2%로 전체 암상의 절반 이상을 차지한다.

Fig. 4는 주요 비투멘 저류암상인 사질 퇴적층과 비투멘 저류 및 개발의 장애요인으로 분류할 수 있는 타 암상을 2분화 하여 상호간의 전이확률을 분석한 결과이며, 사질 퇴적층을 제외한 타 암상에서 사질 퇴적층으로의 거리에 따른 전이확률 변화(Fig. 4(a,c,e,g,i,k,m)) 및 사질 퇴적층에서 타 암상으로의 전이확률 변화(Fig. 4(b,d,f,h,j,l,n))를 각각 나누어 도시하였다. 그림에서와 같이 사질 퇴적층에서 타 암상으로의 전이와 타 암상에서 사질 퇴적층으로의 전이는 일부 경우를 제외하고는 대부분 서서히 발생하는 것을 확인할 수 있다. 기저부를 이루는 석회암층에서 사질 퇴적층으로의 상관성 변화를 살펴보았을 때 lag가 증가함에도 상당 거리에 이르기까지 전이확률이 0으로 지속됨을 알 수 있으며 이는 사질 퇴적층과 석회암층 간의 상관성이 비교적 크지 않음을 의미한다. 이는 연구대상지층 내에서 석회암층이 두터운 기반암의 양상으로 분포하여 사질 퇴적층 층의 형성과는 상관성이 없는 퇴적과정을

통하여 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 맥머레이층 투수성의 지하 요인이 되는 이질 플러그와 이질우세 경사이질층리의 경우 사질 퇴적층과의 상관성변화 관계에서 매우 느린 전이확률 변화도를 보인다. 이는 이들의 형성과정과 사질 퇴적층의 형성과정이 상호 유사하지 않음을 의미한다. 다량의 사질을 포함하는 이질이 협재한 사질 퇴적층과 사질우세 경사이질층리의 경우 사질 퇴적층으로의 전이가 매우 급격히 발생하여 일정 전이확률로 수렴하는 경향을 보인다. 이는 형성과정 상 이질이 협재한 사질 퇴적층 및 사질우세 경사이질층리가 사질 퇴적층과 매우 유사하게 분포하며 상호 인접하여 존재함을 의미하며 이 세 암상 간의 상호적 관계가 매우 큼을 알 수 있다. 또한 주요 투수성 구조 중 하나인 역질 퇴적층은 매우 빠른 속도로 사질 퇴적층으로의 전이가 발생되며 이는 역질로 이루어진 구조가 사질 퇴적층 내에 비교적 얇은 층의 형태로 존재함을 지시한다. 따라서 사질 퇴적층, 역질 퇴적층, 이질이 협재한 사질 퇴적층, 및 사질우세 경사이질층리는 유사한 퇴적과정에 의해 형성되었을 것으로 판단된다.

4. 지구통계 모사 모델 및 자료의 구성

본 연구에서는 대상지역인 맥머레이층 지질의 3차원적 분포양상을 예측하기 위하여 지시인자 기반 지구통계 예측모사를 실시하였다. 이를 위하여 범주형 자료로 구성한 총 110개 시추공 자료와 이를 이용한 수직 및 수평적 전이확률 행렬을 입력자료로 활용하였다. 수직적 전이확률 행렬을 얻기 위해서는 총 110개의 시추공 자료에 대하여 상부→하부 및 하부→상부 방향으로 one-step 전이확률 분석을 실시하였다. 또한 수평적 전이확률을 얻기 위해서는 110개 시추공 자료를 모사 도메인에 할당하고 이에 근거한 최근접이웃(nearest neighborhood) 기법을 적용하여 3차원 내삽을 실시한 후 그 결과를 training map으로 활용하였으며, 제작된 training map에서 동→서, 서→동, 남→북, 및 북→남 방향에 대한 one-step 전이확률 행렬을 얻어 이를 모사 입력 자료로 활용하였다. 이와 같은 방법론은 Park et al. (2007) 및 Park (2010)을 참조한 것이며 본 연구에서와 같이 충분한 자료가 비교적 고르게 도메인 상에 분포하고 있을 경우 전이확률을 유추할 수 있는 유효한 방법이다.

3차원 지구통계 모사에는 Park(2010)에 의해 개발된 GCMC(generalized coupled Markov chain) 모델이 이용되었다. GCMC 모델은 지시자 기반 추계론적 예

측 모델로 일반적 지질 공간자료가 지니는 마르코비안 특성 및 불확실성을 내포하는 공간예측의 확률변수(random variable) 가정에 기초하여 예측을 수행한다. 따라서 매질 간의 전이확률을 기초로 다차원 공간에서 예측지점의 우도함수(likelihood function) 구성을 통하여 조건부 확률분포를 얻어내고 난수 발생을 통하여 추계론적 예측을 실시하며 2차원 및 3차원 공간에 대한 예측을 수행할 수 있다. GCMC 모델은 기존의 세미-배리오그램 및 크리깅 기반 모델들에서 다룰 수 없었던 지향적 비정규성을 예측에 포함하기 위하여 예측지점(unsampled location)과 관측지점(sampled location) 간 양 방향의 전이확률을 연산에 이용하며, 1차원에서의 우도함수는

$$\pi(S_j) = \frac{\sqrt{p_{ji}^{(dl)} \cdot p_{ij}^{(dl)} \cdot m_i \cdot m_j}}{m'_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad \text{Eq. (1)}$$

와 같이 주어지고, 여기서 $\pi(S_j)$ 는 인근 관측지점에서의 매질이 S_j 일 경우 예측지점에서의 매질이 S_i 로 주어질 우도이며, p_{ji} 및 p_{ij} 는 각각 관측지점에서 예측지점에서의 $j \rightarrow i$ 전이확률 및 예측지점에서 관측지점에서의 $i \rightarrow j$ 전이확률, 그리고 n 은 총 범주 혹은 암상의 가짓수를 의미한다. 전이확률행렬(transition probability matrix),

$$P^{(r)} = \begin{bmatrix} p_{1,1}^{(r)} & p_{1,2}^{(r)} & \cdots & p_{1,n-1}^{(r)} & p_{1,n}^{(r)} \\ p_{2,1}^{(r)} & p_{2,2}^{(r)} & \cdots & p_{2,n-1}^{(r)} & p_{2,n}^{(r)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_{n-1,1}^{(r)} & p_{n-1,2}^{(r)} & \cdots & p_{n-1,n-1}^{(r)} & p_{n-1,n}^{(r)} \\ p_{n,1}^{(r)} & p_{n,2}^{(r)} & \cdots & p_{n,n-1}^{(r)} & p_{n,n}^{(r)} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (2)}$$

에서 (j, i) 및 (i, j) 성분을 통해 얻을 수 있다. 또한 m_i 및 m_j 는 각각 S_i 및 S_j 의 주변확률(marginal probability)을 의미하며, m'_i 는 관측지점에서 S_j 가 발견되기 이전의 S_i 주변확률을 의미한다. 1차원에서 두 방향으로의 매질 간 전이가 조건부 독립일 경우 두 체인은 동일한 가중치인 1/2를 갖게 되므로 식은 위와 같이 제공근으로 표현된다.

5. 모델 적용 및 결과

지구통계 모사에서 이용된 도메인의 크기는 4,740×6,140×105 m이며 이를 237×307×105 개의 격자로 차

분하여 총 7,639,695개의 그리드로 도메인을 구성하였다. 이는 일반적으로 퇴적상의 수평적 상관거리는 수직적 상관거리에 비하여 큰 것을 고려한 것이다. 본 연구에서 얻어진 모사 결과는 직접적으로 SAGD 등 수치연산 모사를 위하여 적용되기에는 상당히 높은 해상도를 지니고 있어 일반적인 워크스테이션으로는 무리가 따르며 최종적으로 모사 결과를 수치연산에 적용하기 위해서는 규모확장(scale-up) 과정이 요구된다. 모사를 위해서 총 1,600회 재현(single realization)이 구성되었으며 이를 위하여 2×quadcore CPU (RAM 16 Gb)의 워크스테이션이 활용되었고 총 모사시간은 178 시간이 소요되었다. 지구통계 모사는 우선 각 section 들에 대하여 각각 100회의 재현을 실시한 후 이러한 결과를 토대로 전체 연구지역에 대한 100회의 재현 구성을 수행하였다. 각 section 및 전체 연구대상 지역에 대하여 얻어진 각 100회의 단일재현은 각 암상에 대한 앙상블 확률(ensemble probability)로 구성하였으며 최종적으로 가장 높은 앙상블 확률에 근거하여 결정론적(deterministic) 암상 분포 예측도를 제작하였다.

5.1. 충후도 분석 결과

Fig. 6의 (a) 및 (b)는 정규크리깅(ordinary kriging)을 통하여 분석된 맥머레이층의 상부 및 하부 경계를 보여주고 있다. 상부 경계는 시추공 로깅자료의 초기 심도를 이용하여 설정하였으며 하부 경계는 시추공의 하부를 구성하는 석회암층이 처음으로 나타나는 심도를 이용하여 설정하였다. 정규크리깅을 이용하여 맥머레이층의 경계를 작성하기 앞서 배리오그램 분석을 통하여 입력 변수를 산정하였다. 상부심도와 하부심도는 연구지역의 북쪽을 기준으로 45° 시계방향으로 신장되어 있는 형태를 보이며 이의 상관거리는 대략 1750 m로 분석되었으며 이를 이용하여 정규크리깅면을 작성하였다. 맥머레이층 상부경계는 대체로 북동에서 남서 방향으로 경사진 형태를 보이나 연구지역의 남서방향에서 시작하여 section 14 인근 지역까지는 경사도가 증가하다가 section 14 인근에서 북동방향으로 경사도가 감소하는 종 형태의 경계면을 보여준다. 반면 하부 경계는 상부경계와 상이하게 도메인 전반에서 북동-남서 방향의 기울기를 보인다. 이에 따라 section 13 및 section 14에서 가장 큰 충후를 보이며 section 15, section 22 및 section 24에서 가장 작은 충후를 보이는 것으로 분석되었다. 맥머레이층의 전반적인 충후는 55.43 m이며 전반적으로 수평에 가까운 기울기를 가진다.

Fig. 6. The interpolated distributions of (a) the upper McMurray formation boundary and (b) the lower boundary both estimated from ordinary kriging based on 110 borehole data, and (c) the thickness of McMurray formation obtained from the subtraction of the lower boundary from the lower boundary elevations.

5.2. 각 지질에 대한 양상을 확률 분포도 분석 결과

Fig. 7은 각각 연구대상지역에 존재하는 8개의 암상들에 대한 양상별 확률 분포도이며 Fig. 8은 심도별 암상분포 확률을 보여주는 평면도이다. 이는 앞서 분석된 지구통계학적 특성자료와 총 110개의 시추공 자료를 이용하여 실시한 총 100회의 지구통계 재현을 통하여 제작되었다. 그림에서 붉은색 계열은 해당 암상의 분포 확률이 높은 것을 의미하며 푸른색 계열은 분포 확률이 낮은 것을 의미한다. Fig. 8(a)에서 석회암층의 경우 도메인의 최상부에는 분포하지 않으며 하부지역에 국한되어 나타난다. Fig. 8(b)는 셰일의 분포 확률을 보여주며 셰일은 맥머레이층의 상부로 갈수록 분포비가 증가하는 양상을 보여준다. 이질 플러그는 상관거리가 짧은 렌즈상을 이루며 맥머레이층 상부에서의 분포비가 하부보다 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 등방의 렌즈상인 이질 플러그들은 북동-남서 방향으로 배열 되어있는 형태를 보인다(Fig. 8(c)). Fig. 8(d)의 이질우세 경사이질층리는 이질 플러그와 유사한 수직 및 수평적 분포양상을 보여주며 이는 두 지질매질의 형성이 유사한 과정을 통하여 형성되었음을 의미하는 것으로 판단된다. 이질이 협재한 사질 퇴적층과 사질우세 경사이질층리의 경우 이질 플러그보다 상대적으로 더 짧은 상관거리의 렌즈상 형태를 가지며 각각 맥머레이층 상부 및 중상부에서 분포한다. 또한 이질 플러그와 이질우세 경사이질층리와 유사한 분포양상을 가져 이들이 유사한 과정을 통하여 형성되었음을 지시한다.

주요 투수성 구조인 역질 퇴적층의 경우 주로 맥머레이층의 중간 심도에서 남동쪽에 치우쳐 나타나며

(Fig. 8(g)) 이는 맥머레이층의 형성 당시 하천의 상류 방향이 도메인의 남동쪽임을 의미하는 것으로 판단된다. 또 다른 투수성 구조인 사질 퇴적층은 도메인 전체에 걸쳐 넓게 분포하고 있으며 일반적으로 맥머레이층 중간심도에서 가장 큰 분포를 보이고 층의 상부와 하부에서 상대적으로 적은 분포를 보인다(Fig. 8(h~i)). 특히 사질 퇴적층의 경우 각 심도에 따라 배열 및 신장 방향이 서로 다르게 나타나는 양상을 보이며 하부에서는 북동-남서방향이 우세하고 상부로 갈수록 북서-남동방향이 우세한 특징을 보여준다. 사질 퇴적층의 경우 타 암상의 분포와는 달리 특정방향으로 신장된 형태를 뚜렷하게 보여주며 이는 하도의 발달과 사질 퇴적층의 간의 높은 상관성을 지시하는 것으로 판단된다. 또한 전반적으로 하도형태의 사질 퇴적층 주변으로 셰립질의 이질 플러그 및 이질우세 경사이질층리가 발달하는 양상을 보인다.

5.3. 누적 층후도 분석 결과

Fig. 9는 각 암상에 대한 양상별 확률 분포도로부터 획득한 누적층후도 분석 결과이다. 누적 층후도는 각 암상에 대한 양상별 확률 분포도에서 각 격자의 양상별 확률이 50% 이상일 경우 해당 격자의 높이를 누적하여 작성하였다. 분석 결과 석회암층은 맥머레이층 하부에 전반적으로 고르게 분포하고 있으나 특히 도메인의 남측에서 북동 방향으로 신장된 능선의 형태를 보이므로 상대적으로 두꺼운 층후를 보인다. 사질우세 경사이질층리와 역질 퇴적층의 경우 맥머레이층에서의 분포 범위가 비교적 좁으며 사질우세 경사이질층리의 경우 층의 북동쪽 일부 구간에 국한되어 우세하게 분포

Fig. 7. The three-dimensional ensemble distribution of each composing medium: (a) Limestone; (b) Shale; (c) Mud-plug; (d) Muddy IHS; (e) Shaley sand; (f) Sandy IHS; (g) Breccia; (h) Sand.

Fig. 8. The ensemble probability distribution in the depth dependent planar slices of each composing medium: (a) Limestone; (b) Shale; (c) Mud-plug; (d) Muddy IHS; (e) Shaley sand; (f) Sandy IHS; (g) Breccia; (h-i) Sand.

Fig. 9. The vertical cumulative thicknesses of (a) Limestone, (b) Shale, (c) Mud-plug, (d) Muddy IHS, (e) Shalely sand, (f) Sandy IHS, (g) Breccia and (h) Sand.

하고 역질 퇴적층의 경우 남동쪽 구간에서 우세하게 분포하고 있다. 또한 사질우세 경사이질층리는 사질 퇴적층과 유사한 분포 형태를 보이므로 두 암상간의 형성과정이 유사할 것으로 판단된다. 이와 유사하게 이질우세 경사이질층리는 이질 플러그와 유사한 분포 양상을 보이므로 이 두 암상 역시 유사한 환경에서 퇴적되었을 것이라 판단된다. Fig. 9(c) 및 Fig. 9(h)에서 보여 지는 바와 같이 이질 플러그와 사질 퇴적층은 남서-북동방향으로 신장된 형태를 보이고 있다. 또한 사질 퇴적층의 분포확률이 높은 지역은 일반적으로 이질 플러그의 확률이 낮은 것으로 분석되어 사질 퇴적층과 이질 플러그는 상호 배타적 관계가 있는 것으로 판단된다.

5.4. SAGD 적용을 위한 적지 선정 분석

오일샌드의 경제적인 개발을 위해서는 스팀전파효율을 극대화시키기 위하여 사질 퇴적층의 밀집정도 및 단위 퇴적층의 층후 확보가 중요하다. 층후에 국한되어 분석할 경우 사질 퇴적층의 수직적 누적 층후가 가장 두껍게 나타나는 township 76 range 07 section 14에 해당하는 지역이 오일샌드 개발에 가장 적합할 것으로 예상된다. 그러나 Fig. 9(h)는 사질 퇴적층에 해당하는 격자를 단순 누적하여 얻어진 자료로 수직적으로 사질 퇴적층의 층후가 얼마만큼의 연장성을 갖는지에 대한 정보는 확인할 수 없다. 따라서 본 연구에

서는 사질 퇴적층의 수직적 연장성을 확인하기 위한 방법으로 평균 상관거리($\bar{\lambda}$)를 산정하고 이를 사질 퇴적층의 평균적 수직 연장성으로 판단하였다. 평균 상관거리의 산정을 위해서는 수직 전이율(vertical transition rate, R_ϕ)의 산정이 우선되어야 하며 이를 위하여 아래의 식을 이용하였다(Carle and Fogg, 1996).

$$T(\Delta h_\phi) = \exp(R_\phi \Delta h_\phi)$$

$$R_\phi = \frac{\ln[T(\Delta h_\phi)]}{\Delta h_\phi}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{R_\phi} \quad \text{Eq. (3)}$$

여기서 T_ϕ 는 수직적 전이확률행렬을 의미하며 Δh_ϕ 는 수직방향으로의 래그를 의미한다. Fig. 10은 3차원 양상불 확률 분포로부터 사질 퇴적층과 역질 퇴적층을 지시자 1로 그 외의 암상들은 지시자 2로 2분화 하고 이로부터 제작된 결정론적 결과에 기초하여 산정된 평균 상관거리 분포이다. 평균 상관거리는 도메인을 X방향, Y방향 및 Z방향에 대하여 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 105\text{ m}$ 격자로 차분한 후 각 격자내의 수직적 전이확률 및 전이율을 획득하여 산정되었다. 또한 암상분포의 지향적 비정규성을 고려하여 상부→하부 및 하부→상부방향의 평균적 상관거리를 모두 얻어 그 평균을 대표값으로 이용하였다.

Fig. 10(a)는 주요 투수층인 역질 및 사질 퇴적층을

Fig. 10. The distributions of averaged vertical mean lengths of (a) less permeable media and (b) permeable media.

제외한 나머지 퇴적층의 평균 수직 상관거리를 표현한 것이다. 도메인 내에서 저투수층으로 분류되는 퇴적층 중 가장 큰 비율을 차지하는 세일의 누적 층후(Fig. 9(b))와 비교해 보았을 때 저투수층들의 수직 상관거리 분포는 매우 유사한 양상을 갖는다. 자료의 부족으로 인하여 예측의 신뢰성이 제한적인 도메인의 동측 및 서측을 제외하면 저투수층은 도메인의 남부에서 2 km가량 북측방향으로 연장성을 가지는 구간에서 비교적 큰 평균 수직 상관거리를 가지는 것으로 예측되었다. Fig. 10(b)는 주요 투수층인 역질 및 사질 퇴적층의 평균 수직 상관거리를 표현한 것이다. 투수층으로 분류할 수 있는 암상 중 사질 퇴적층의 분포 비율이 다수이므로 사질 퇴적층의 누적 층후(Fig. 9(h))와 비교적 유사한 양상을 가진다. 그러나 앞서 분석된 누적 층후의 경우 단일 퇴적층의 연장성을 고려하지 않았으므로 다소간의 차이를 보인다. 특히 Fig. 10(b)에서 표시된 구간 내부의 경우 Fig. 9(h)의 누적 층후도에 상응하지 않는 양상을 뚜렷하게 보여주며 Fig. 9(h)에서 가장 큰 사질 퇴적층의 층후를 갖는 위치와 Fig. 10(b)에서 가장 큰 평균 수직 상관거리의 위치가 서로 다르게 나타난다. 이는 해당 위치에서 사질 퇴적층의 수직적 연장성이 좋지 않으며 다른 암상들과 교호하는 양상에 기인한 것으로 판단된다. 이는 단순히 투수성 퇴적층의 누적 층후만을 고려하여 최적의 SAGD 입지를 선택하는 것 보다는 투수성 퇴적층의 수직적 연장성을 함께 고려하여 최적입지를 선정하는 방안이 보다 합리적일 수 있

Table 3. The averaged horizontal mean lengths at each vertical interval.

Mean of Horizontal Mean Length		
depth	Sand (m)	Others (m)
0 m ~ 10 m	9.34	180.75
11 m ~ 20 m	13.21	39.73
21 m ~ 30 m	17.27	45.52
31 m ~ 40 m	16.49	40.06
41 m ~ 50 m	15.23	32.64
51 m ~ 60 m	18.92	29.09
61 m ~ 70 m	17.57	23.61
71 m ~ 80 m	14.31	52.02
81 m ~ 90 m	10.64	111.09
91 m ~ 105 m	11.15	248.03

음을 시사한다.

SAGD 최적입지 선정을 위하여서는 수직적인 투수층의 연장성이 최우선시 하여 고려되어야 하나 수평적인 연장성 또한 고려되는 것이 바람직하다. 따라서 역질 및 사질 퇴적층의 수평적인 평균 상관거리에 대한 분석을 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. 수평적 평균 상관거리 분석을 위하여 도메인을 수직적으로 10 m 간격으로 차분하여 전이확률 행렬을 얻었으며 이에 이용된 식은 Eq. (1)과 같다. Table 3은 투수층과 저투수층의 구간별 수평적 평균 상관거리를 보여준다. 표에서 맥머레이층 상부로부터 심도 51 m ~ 70 m에 해당하는 구간은 투수층의 상관거리가 가장 크고 저투

수층의 상관거리가 비교적 작은 구간으로 예측 되었으며 이에 따라 해당 심도가 SAGD 공법을 적용하였을 경우 최적의 심도구간이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 캐나다 아사바스카 지역의 최대 오일 샌드 퇴적층인 맥머레이층에 대한 3차원 지구통계 모사를 실시하였으며 이를 통해 심부지열회수방법을 통한 경제적 산출 가능 지역을 가늠하고자 하였다. SAGD 공법을 이용하여 오일샌드로부터 비투멘 회수 시, 비투멘의 충분한 유동성을 확보하기 위한 스팀전파효율 최대 지역이 개발지로 선정되어야 한다. 이 때 비투멘 샌드층의 수직·수평적 연장성, 저투수층의 수직·수평적 연장성 및 저류층과 저투수층의 분포상관관계 등 다양한 요인이 저류층 내 스팀의 전파효율과 스팀챔버 형성에 큰 영향을 끼친다. 따라서 비투멘 저류층에 대한 보다 사실적인 특성화 결과는 비투멘 개발의 입지선정에 있어 필수적인 요인이다.

연구대상 지층인 맥머레이층은 복잡한 조구조운동으로 인하여 불균질성이 매우 큰 퇴적층이다. 이러한 퇴적층을 기존의 지구통계 모델을 이용하여 모사 할 경우 공간에 따라 비정규적으로 분포하는 다양한 암상을 효과적으로 모사하는데 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 비정규적 지하매질분포를 예측하기 위하여 마르코브 연쇄 과정을 기반으로 하는 GCMC 모델(Park, 2010)을 주요 지구통계 예측도구로 이용하였으며 모사 결과의 다양한 분석을 통하여 경제적인 비투멘 개발을 위한 최적 입지를 선정하고자 하였다.

본 연구에서는 오일샌드의 효과적 생산을 위하여 맥머레이층 층후 분석, 앙상블 확률 분포도 분석, 누적 층후도 분석 및 수직·수평적 평균 상관거리 분석을 실시하였다. 맥머레이층은 약 5.02 km²의 넓이를 가지며 거의 수평에 가까운 경사도로 분포하고 있고 해수면 기준으로 약 240 m을 시작심도로 하여 평균 55.43 m의 층후를 보인다. 또한 석회암, 셰일, 이질 플러그, 이질우세 경사이질층리, 이질이 협재한 사질 퇴적층, 사질우세 경사이질층리, 역질 퇴적층 및 사질 퇴적층의 총 8개의 암상으로 구성되어 있다. 이들에 대하여 자기 상관성 변화 분석, 교차 상관성 변화 분석 및 앙상블 확률 분포도 분석을 실시한 결과, 특히 셰일 및 석회암이 공간에 대한 비정규적 특성을 가지며 전체 도메인 내 사질 퇴적층과 셰일의 분포 비율이 클 것으로 예측 되었다. 또한 주요 투수층 역할을 하는

사질 퇴적층은 역질 퇴적층 및 사질우세 경사이질층리와 교차 상관성이 큰 것으로 분석되었으며 저 투수층의 셰일은 이질 플러그 및 이질우세 경사이질층리와 큰 교차 상관도를 보이는 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 맥머레이층 내 암상들을 투수층과 저투수층으로 2분화 하여 분석을 실시하였다. 그 결과 투수층의 수직 및 수평적 연장성 그리고 저투수층의 수직 및 수평적 연장성에 대한 공간적 분포예측자료를 얻었다. 이와 같은 결과는 비투멘 저류층의 누적 층후를 바탕으로 개발 적지를 선정하는 기존 방법론에 더하여 보다 실제적인 SAGD 공법의 최적지를 판단하는데 있어 반드시 고려되어야 할 사항으로 판단된다.

암상 분류만을 이용하여 최적의 오일샌드 생산입지를 선정하는 것은 충분한 신뢰성을 갖지 못한다. 따라서 SAGD 적용의 주요 고려사항인 투수성에 대한 암상의 재분류를 통하여 추가적인 지구통계 모사가 실시되어야 하며 사질 퇴적층 내 주 비투멘 배태층을 구분한 추가적인 모사 또한 필요할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 이질 퇴적층의 분포양상(다른 암상과의 교호성, 두께, 수평연장성)의 경우 효율적인 비투멘 생산에 부정적인 영향을 미치므로 지구물리학적 탐사 자료를 보조입력자료로 이용하여 불확실성의 최소화를 도모하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011201030006C).

참고문헌

- Kwon, Y. (2008) Geology of Athabasca oil sands in Canada. The Korean Journal of Petroleum Geology, v.14, p.1-11.
- Lee, D., Seo, K. and Lim, J. (2011) 3D Geostatistical modeling using well data of oil sand reservoir in the Leismer field, Canada. Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering, v.48(6), p.687-700.
- Masliyah, J., Zhou, Z., Xu, Z., Czarnecki, J. and Hamza, H. (2004) Understanding water-based bitumen extraction from Athabasca oil sands. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.82, p.628-654.
- Hinkle, A. and Batzle, M. (2006) Heavy oils: a worldwide overview. The Leading Edge, v.25, p.742-749.
- McLennan, J.A. and Deutsch, C.V. (2004) SAGD Reservoir characterization using geostatistics: Application to the Athabasca oil sands, Alberta, Canada.

- Journal Article, v.6, p.1-21.
- Ren, W., Leuangthong, O. and Deutsch, C.V. (2006) Reservoir characterization of McMurray Formation by 2D geostatistical modeling. *Natural Resources Research*, v.15, p.111-117.
- Butler, R.M., McNab, G.S. and Lo, H.Y. (1981) Theoretical studies on the gravity drainage of heavy oil during steam heating. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.59, p.455-460.
- Dimitrakopoulos, R. and Griffin, W.H. (1993) Geology-based conditional simulation in the Athabasca oil sands deposit, Alberta, Canada. *Nonrenewable Resources*, v.2, p.49-61.
- Chen, Q. (2011) Assessing and improving steam-assisted gravity drainage: Reservoir heterogeneities, hydraulic fractures, and mobility control foams. ProQuest, UMI Dissertation Publishing, 210p.
- Weissmann, G.S., Carle, S.F. and Fogg, G.E. (1999) Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics. *Water Resources Research*, v.35, p.1761-1770.
- Carle, S.F. and Fogg, G.E. (1996) Transition probability-based indicator geostatistics, *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, v.28, p.453-477.
- Krumbein, W.C. and Dacey, M.F. (1969) Markov chains and embedded Markov chains in geology. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, v.1, p.79-96.
- Krumbein, W.C. (1967) Fortran IV Computer Programs for Markov Chain Experiments in Geology. *Kansas Geol. Survey Computer Contr.*, v.13, p.38.
- Elfeki, A. and Dekking, M. (2001) A Markov chain model for subsurface characterizations: Theory and applications. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, v.33, p.569-589.
- Park, E. (2010) A multidimensional generalized coupled Markov chain model for surface and subsurface characterization. *Water Resour. Res.*, v.46, W11509, doi:10.1029/2009WR008355.
- Park, E. (2007) Generalized coupled markov chain model for characterizing categorical variables in soil mapping. *Soil Science Society of America Journal*, v.71, p.909-917.

2013년 1월 21일 원고접수, 2013년 6월 28일 1차수정,
2013년 7월 16일 게재승인