(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0010897
(43) 공개일자 2020년01월31일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
E21B 41/00 (2006.01) *E21B 47/00* (2006.01)
G01V 1/30 (2006.01) *G06F 17/10* (2006.01)
G06F 30/00 (2020.01)
(52) CPC특허분류
E21B 41/0092 (2013.01)
E21B 47/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0085522
(22) 출원일자 2018년07월23일
심사청구일자 2018년07월23일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
신현돈
인천광역시 서구 청라라임로 85, 103동 1302호(연희동, 청라린스트라우스)
김민
대전광역시 중구 계룡로 873-11 (용두동) 22-4번지 강남어린이집
(74) 대리인
이은철, 이수찬

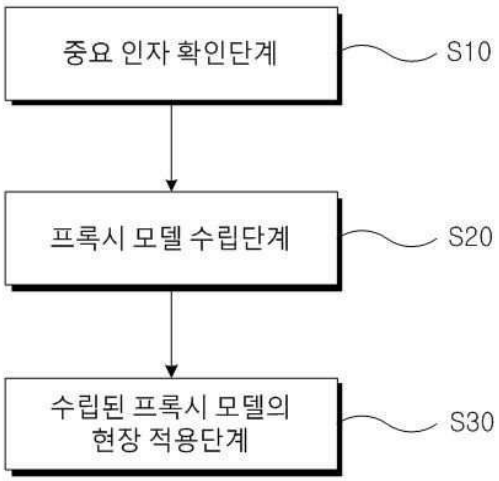
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **세일 장애층 크기 추정방법 및 이를 수행하는 프로그램을 기록한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체**

(57) 요 약

본 발명은 세일 장애층 크기 추정방법에 관한 것으로서, 오일샌드 지층에 협재된 세일 장애층의 크기 추정에 사용될 인자를 확인하는 중요 인자 확인단계; 선형 회귀모델을 이용하고, 입력변수와 출력변수 사이의 통계적 연관을 적용하여 세일 장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 프록시 모델 수립단계; 그리고, 상기 프록시 모델 수립단계에서 개발된 상기 프록시 모델을 실제 오일샌드 지층의 저류층 특성에 적용하여 상기 프록시 모델을 검증하는, 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계를 포함한다. 이로 인해, 프록시 모델을 이용하여 오일샌드 지층 내부에 형성된 세일층의 위치 및 크기를 예측할 수 있고, 이에 따라 오일샌드 개발시 위치 및 크기가 파악된 세일층을 피하여 오일샌드 지층에 주입정 및 생산정을 시추할 수 있어, 오일샌드로부터 생산되는 오일 생산량을 증대시킬 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도4



(52) CPC특허분류
G01V 1/30 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
G06F 30/20 (2020.01)
G01V 2200/16 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

오일샌드 지층에 협재된 셰일 장애층의 크기 추정에 사용될 인자를 확인하는 중요 인자 확인단계;

선형 회귀모델을 이용하고, 입력변수와 출력변수 사이의 통계적 연관을 적용하여 셰일 장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 프록시 모델 수립단계; 그리고,

상기 프록시 모델 수립단계에서 개발된 상기 프록시 모델을 실제 오일샌드 지층의 저류층 특성에 적용하여 상기 프록시 모델을 검증하는, 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계

를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 중요 인자 확인단계는,

입력변수 및 출력변수 결정단계;

입력인자 범위 지정단계;

2-level의 부분 요인 설계 분석으로 시뮬레이션을 계획하는 단계;

CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션하는 단계;

시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점을 추출하는 단계; 그리고,

분석 결과로부터 중요 인자 추출 단계

를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 입력변수 및 출력변수 결정단계에서, 상기 입력변수는 오일샌드 지층의 저류층 두께, 수평 투과도, 수직-수평 투과율, 공극률, 오일 포화도, 셰일 장애층의 셰일 수평 투과도, 셰일 수직-수평 투과율, 셰일 공극률, 셰일 물 포화도, 셰일 너비, 셰일 길이, 셰일의 수직 위치 및 셰일의 두께이고,

상기 출력변수는 FPP에서의 오일 생산량, FPP에서의 누적 오일 생산량, FPP에서의 스팀-오일 비, FPP에서의 누적 스팀-오일 비, FPT에서의 오일 생산량, FPT에서의 누적 오일 생산량, FPT에서의 스팀-오일 비, FPT에서의 누적 스팀-오일 비, 그리고 스팀-오일 비 최대값이며,

상기 FPP, FPT는 상기 시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점을 추출하는 단계에서 추출된 각 변곡점인 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 분석 결과로부터 중요 인자 추출 단계는 상기 입력변수와 상기 출력변수 사이의 P-value 값을 도출하여, 도출된 P-value 값이 0.05보다 작은 입력변수를 중요 인자로서 추출하며, 저류층 두께 수평 투과도, 수직-수평 투과율, 오일 포화도, 셰일 너비, 셰일 길이, 그리고 셰일의 수직 위치가 상기 중요 인자로 추출되는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 프록시 모델 수립 단계는,

2-level 선형 회귀모델로부터 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 선택하는 단계;

주요 변수를 위한 확률분포를 가정하는 단계;

라틴 하이퍼큐브 샘플링을 이용하여 시뮬레이션을 계획하는 단계;

시뮬레이션 수행 및 SAGD 생산데이터에서 변곡점 조사를 위해 시뮬레이션 결과를 출력하는 단계; 그리고,

입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계

를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계는, 선형 프록시 모델과 비선형 프록시 모델을 각각 생성하는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계에서, 상기 선형 프록시 모델로서 선형(L, linear) 회귀모델 및 선형-로그(L-LO, linear-log) 회귀모델, 그리고 로그-로그(LO-LO, log-log) 회귀모델을 각각 생성하고, 상기 비선형 프록시 모델로서 2요소 상호작용 회귀모델(2FI; 2-factor interaction)과 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델(2FILT; 2-factor interaction with log transform)을 각각 생성하는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 프록시 모델 수립단계에서 생성되는 셰일 장애층 크기 예측 수식은 다음의 수식인 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

[수식]

$$LO_LO_WD = 1343.455 \times (Kh)^{0.2787} \times (So)^{-1.810} \times (VL)^{0.1356} \times (CumOR_FPP)^{0.0942} \times (CSOR_FPP)^{-0.266} \times (OR_FPT)^{-0.5641} \times (CumOR_FPT)^{0.6725} \times (SOR_FPT)^{0.518}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_WD = {} & 17 + 127.6 \times [ln(VL)] - 648 \times [ln(SOR_FPT)] + 644 \times [ln(MXS)] \\ & + 4.901 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] - 56.46 \times [ln(So) \times ln(VL)] - 21.45 \times [ln(VL) \times ln(OR_FPT)] \\ & + 20.469 \times [ln(VL) \times ln(CumOR_FPT)] + 219.2 \times [ln(VL) \times ln(SOR_FPT)] \\ & - 209.4 \times [ln(VL) \times ln(MXS)] + 1.902 \times [ln(CumOR_FPP) \times ln(MXS)] \\ & + 121.1 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(SOR_FPT)] - 125.4 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(MXS)] \end{aligned}$$

$$L_LO_LN = ln\left[\begin{array}{l} (RT)^{114.0} \times (Kh)^{210.8} \times (Kv/Kh)^{45.9} \times (So)^{849} \times (VL)^{315.9} \times (OR_FPP)^{-96.1} \\ \times (CSOR_FPP)^{-33.3} \times (OR_FPT)^{-191.8} \times (CumOR_FPT)^{-76.9} \\ \times (SOR_FPT)^{-68.1} \times (CSOR_FPT)^{253.2} \end{array}\right] + 462$$

$$\begin{aligned} 2FILT_LN = {} & -6640 + 1502 \times [ln(RT)] + 1017 \times [ln(Kh)] + 1649 \times [ln(VL)] - 779 \times [ln(CumOR_FPT)] \\ & + 993 \times [ln(CSOR_FPT)] - 2147 \times [ln(RT) \times ln(So)] - 392.6 \times [ln(RT) \times ln(VL)] \\ & + 262.0 \times [ln(RT) \times ln(CumOR_FPT)] - 385.2 \times [ln(RT) \times ln(CSOR_FPT)] - 1316 \times [ln(Kh) \times ln(So)] \\ & - 115.9 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] + 130.5 \times [ln(Kh) \times ln(CumOR_FPT)] \\ & - 265.4 \times [ln(Kh) \times ln(CSOR_FPT)] + 1923 \times [ln(So) \times ln(OR_FPT)] \\ & - 395.6 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPT)] + 274.2 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPT)] \\ & - 112.1 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CumOR_FPT)] + 228.2 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CSOR_FPT)] \end{aligned}$$

$$LO_LO_VL = 31.890 \times (So)^{-2.887} \times (CumOR_FPP)^{0.2796} \times (CSOR_FPP)^{-0.8166}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_VL = {} & 19.87 - 39.30 \times [ln(So)] - 15.56 \times [ln(CSOR_FPP)] \\ & - 9.180 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPP)] - 20.44 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPP)] \end{aligned}$$

(위의 수식에서, LO_LO_WD는 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, 2FILT_WD는 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, L_LO_LN은 선형 프록시 모델인 선형-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, 2FILT_LN은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, LO_LO_VL은 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치, 2FILT_VL은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치이며, 각 수식들에서 곱해지는 상수 및 지수들은 실제 결과와 시뮬레이션 결과를 대비하여 상관관계(R^2)이 1에 가까워지도록 회귀법으로 설정된 값임.)

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계는,

저류층 인자 및 실제 SAGD 프로젝트의 변곡점을 조사하는 단계;

프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측하는 단계;

CMG STARS 저류층 시뮬레이터를 이용하여, 예측된 셰일 장애층을 재설계하고 시뮬레이션을 수행하는 단계;

실제 SAGD 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하는 단계; 그리고,

프록시 모델의 현장 적용 가능성을 확인하기 위해 검증을 수행하는 단계

를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 셰일 장애층 크기 추정방법.

청구항 10

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 셰일 장애층 크기 추정방법 및 이를 수행하는 프로그램을 기록한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 셰일 장애층 크기 추정방법 및 이를 수행하는 프로그램을 기록한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 관한 것으로, 좀더 자세하게는, 셰일 장애층이 협재된 오일샌드 개발 효율을 향상하기 위해, 프록시 모델을 이용하여 오일샌드 지층에 협재된 셰일 장애층의 크기를 추정하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 오일샌드(oil sand)란 원유를 포함한 다공질 사암으로, 캐나다 중서부의 알버타 주에 매장량을 가지고 있으며, 모래에 석유가 끈적끈적하게 묻어있는 상태의 자원이다.

[0003] 이러한 오일샌드는 수십 미터 아래에 매장되어 있어 채굴이 용이한 편이며, 스팀(steam)을 방출하는 주입정(injection well)과, 주입정에서 방출된 스팀이 오일샌드를 통과하며 유동성이 확보된 오일이 생산정(production well)을 통해 추출되게 된다.

[0004] 그러나, 도 1의 (a)에 도시한 것처럼, 저류층의 두께(B)는 20m 정도인 오일샌드(1) 지층에 진흙 등으로 형성된 퇴적암 층이 두께(A) 2m 이내의 셰일층(2)으로 형성되는 경우, 도 1의 (b)에 도시한 것처럼 주입정(100)과 생산정(200)을 위치시키더라도, 도 1의 (b) 및 도 2에 도시한 것처럼 주입정(100)의 배출공(110)에서 방출된 스팀이 셰일층(2)에 막혀 오일샌드를 통과하는 양이 적어지게 되고, 이에 따라 생산정(200)에 유입되는 액체 상태의 오일 생산량은 셰일층(2)이 존재하지 않을 때 생산정에 유입되는 오일 생산량보다 줄어든다.

[0005] 따라서, 오일샌드에 협재된 셰일층(2)으로부터 떨어진 위치에 주입정 및 생산정을 디자인하여 오일 생산량을 증대시키기 위해서, 셰일층(2)의 크기를 추정하는 방법이 필요한 실정이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 제2011-0096389호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 오일샌드가 매장된 지층에 형성되어 오일샌드로부터 오일 생산 효율을 떨어뜨리는 셰일층의 크기를 프록시 모델을 이용하여 효율적으로 추정하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법은 오일샌드 지층에 협재된 셰일 장애층의 크기 추정에 사용될 인자를 확인하는 중요 인자 확인단계; 선형 회귀모델을 이용하고, 입력변수와 출력변수 사이의 통계적 연관을 적용하여 셰일 장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 프록시 모델 수립단계; 그리고, 상기 프록시 모델 수립단계에서 개발된 상기 프록시 모델을 실제 오일샌드 지층의 저류층 특성에 적용하여 상기 프록시 모델을 검증하는, 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0009] 상기 중요 인자 확인단계는, 입력변수 및 출력변수 결정단계; 입력인자 범위 지정단계; 2-level의 부분 요인 설계 분석으로 시뮬레이션을 계획하는 단계; CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션하는 단계; 시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점을 추출하는 단계; 그리고, 분석 결과로부터 중요 인자 추출 단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0010] 상기 입력변수 및 출력변수 결정단계에서, 상기 입력변수는 오일샌드 지층의 저류층 두께, 수평 투과도, 수직-

수평 투과율, 공극률, 오일 포화도, 셰일 장애층의 셰일 수평 투과도, 셰일 수직-수평 투과율, 셰일 공극률, 셰일 물 포화도, 셰일 너비, 셰일 길이, 셰일의 수직 위치 및 셰일의 두께이고, 상기 출력변수는 FPP에서의 오일 생산량, FPP에서의 누적 오일 생산량, FPP에서의 스팀-오일 비, FPP에서의 누적 스팀-오일 비, FPT에서의 오일 생산량, FPT에서의 누적 오일 생산량, FPT에서의 스팀-오일 비, FPT에서의 누적 스팀-오일 비, 그리고 스팀-오일 비 최대값이며, 상기 FPP, FPT는 상기 시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점을 추출하는 단계에서 추출된 각 변곡점인 것을 특징으로 한다.

[0011] 상기 분석 결과로부터 중요 인자 추출 단계는 상기 입력변수와 상기 출력변수 사이의 P-value 값을 도출하여, 도출된 P-value 값이 0.05보다 작은 입력변수를 중요 인자로서 추출하며, 저류층 두께 수평 투과도, 수직-수평 투과율, 오일 포화도, 셰일 너비, 셰일 길이, 그리고 셰일의 수직 위치가 상기 중요 인자로 추출되는 것을 특징으로 한다.

[0012] 상기 프록시 모델 수립 단계는, 2-level 선형 회귀모델로부터 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 선택하는 단계; 주요 변수를 위한 확률분포를 가정하는 단계; 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 이용하여 시뮬레이션을 계획하는 단계; 시뮬레이션 수행 및 SAGD 생산데이터에서 변곡점 조사를 위해 시뮬레이션 결과를 출력하는 단계; 그리고, 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0013] 상기 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계는, 선형 프록시 모델과 비선형 프록시 모델을 각각 생성하는 것을 특징으로 한다.

[0014] 상기 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발하는 단계에서, 상기 선형 프록시 모델로서 선형(L, linear) 회귀모델 및 선형-로그(L-LO, linear-log) 회귀모델, 그리고 로그-로그(LO-LO, log-log) 회귀모델을 각각 생성하고, 상기 비선형 프록시 모델로서 2요소 상호작용 회귀모델(2FI; 2-factor interaction)과 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델(2FILT; 2-factor interaction with log transform)을 각각 생성하는 것을 특징으로 한다.

[0015] 상기 프록시 모델 수립단계에서 생성되는 셰일 장애층 크기 예측 수식은 다음의 수식인 것을 특징으로 한다.

[0016] [수식]

$$LO_LO_WD = 1343.455 \times (Kh)^{0.2787} \times (So)^{-1.810} \times (VL)^{0.1356} \times (CumOR_FPP)^{0.0942} \times (CSOR_FPP)^{-0.266} \times (OR_FPT)^{-0.5641} \times (CumOR_FPT)^{0.6725} \times (SOR_FPT)^{0.518}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_WD = {} & 17 + 127.6 \times [ln(VL)] - 648 \times [ln(SOR_FPT)] + 644 \times [ln(MXS)] \\ & + 4.901 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] - 56.46 \times [ln(So) \times ln(VL)] - 21.45 \times [ln(VL) \times ln(OR_FPT)] \\ & + 20.469 \times [ln(VL) \times ln(CumOR_FPT)] + 219.2 \times [ln(VL) \times ln(SOR_FPT)] \\ & - 209.4 \times [ln(VL) \times ln(MXS)] + 1.902 \times [ln(CumOR_FPP) \times ln(MXS)] \\ & + 121.1 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(SOR_FPT)] - 125.4 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(MXS)] \end{aligned}$$

$$L_LO_LN = ln\left[\begin{array}{l} (RT)^{114.0} \times (Kh)^{210.8} \times (Kv/Kh)^{45.9} \times (So)^{849} \times (VL)^{315.9} \times (OR_FPP)^{-96.1} \\ \times (CSOR_FPP)^{-33.3} \times (OR_FPT)^{-191.8} \times (CumOR_FPT)^{-76.9} \\ \times (SOR_FPT)^{-68.1} \times (CSOR_FPT)^{253.2} \end{array}\right] + 462$$

$$\begin{aligned} 2FILT_LN = {} & -6640 + 1502 \times [ln(RT)] + 1017 \times [ln(Kh)] + 1649 \times [ln(VL)] - 779 \times [ln(CumOR_FPT)] \\ & + 993 \times [ln(CSOR_FPT)] - 2147 \times [ln(RT) \times ln(So)] - 392.6 \times [ln(RT) \times ln(VL)] \\ & + 262.0 \times [ln(RT) \times ln(CumOR_FPT)] - 385.2 \times [ln(RT) \times ln(CSOR_FPT)] - 1316 \times [ln(Kh) \times ln(So)] \\ & - 115.9 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] + 130.5 \times [ln(Kh) \times ln(CumOR_FPT)] \\ & - 265.4 \times [ln(Kh) \times ln(CSOR_FPT)] + 1923 \times [ln(So) \times ln(OR_FPT)] \\ & - 395.6 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPT)] + 274.2 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPT)] \\ & - 112.1 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CumOR_FPT)] + 228.2 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CSOR_FPT)] \end{aligned}$$

$$LO_LO_VL = 31.890 \times (So)^{-2.887} \times (CumOR_FPP)^{0.2796} \times (CSOR_FPP)^{-0.8166}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_VL = {} & 19.87 - 39.30 \times [ln(So)] - 15.56 \times [ln(CSOR_FPP)] \\ & - 9.180 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPP)] - 20.44 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPP)] \end{aligned}$$

[0017]

[0018] (위의 수식에서, LO_LO_WD는 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, 2FILT_WD는 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, L_LO_LN은 선형 프록시 모델인 선형-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, 2FILT_LN은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, LO_LO_VL은 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치, 2FILT_VL은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치이며, 각 수식들에서 곱해지는 상수 및 지수들은 실제 결과와 시뮬레이션 결과를 대비하여 상관관계(R^2)이 1에 가까워지도록 회귀법으로 설정된 값임.)

[0019] 상기 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계는, 저류층 인자 및 실제 SAGD 프로젝트의 변곡점을 조사하는 단계; 프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측하는 단계; CMG STARS 저류층 시뮬레이터를 이용하여, 예측된 셰일 장애층을 재설계하고 시뮬레이션을 수행하는 단계; 실제 SAGD 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하는 단계; 그리고, 프록시 모델의 현장 적용 가능성을 확인하기 위해 검증을 수행하는 단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.

[0020] 상기 셰일 장애층 크기 추정방법 및 이를 수행하는 프로그램을 기록한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체를 특징으로 한다.

발명의 효과

[0021] 이러한 특징에 따르면, 프록시 모델을 이용하여 오일샌드 지층 내부에 형성된 셰일층의 위치 및 크기를 예측할 수 있고, 이에 따라 오일샌드 개발시 위치 및 크기가 파악된 셰일층을 피하여 오일샌드 지층에 주입정 및 생산정을 시추할 수 있어, 오일샌드로부터 생산되는 오일 생산량을 증대시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 설명하기 위해, 셰일층이 협재된 오일샌드 저류층을 나타낸 도면이다.

도 2는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 설명하기 위해, 종래의 SAGD 공법을 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 3은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법에서 사용하는 오일샌드 지층의 셰일층 협재에 따른 일일 오일 생산량 그래프 및 스팀-오일 비(SOR; steam-oil ratio)를 나타낸 그래프와 오일샌드 지층의 3D 단면도이다.

도 4는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 나타낸 흐름도이다.

도 5는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 중요 인자 확인단계를 나타낸 흐름도이다.

도 6은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 프록시 모델 수립단계를 나타낸 흐름도이다.

도 7은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계를 나타낸 흐름도이다.

도 8은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계의 일예를 나타낸 그래프이다.

도 9는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법에서 실제 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다.

도 10은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법으로부터 예측된 셰일 장애층의 크기를 실제 셰일 장애층의 크기와 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 아래에서는 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[0024] 도 3은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법에서 사용하는 오일샌드 지층의 셰일층 협재에 따른 일일 오일 생산량 그래프 및 스팀-오일 비 그래프와 오일샌드 지층의 3D 단면도이고, 도 4는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 나타낸 흐름도이고, 도 5는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 중요 인자 확인단계를 나타낸 흐름도이고, 도 6은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 프록시 모델 수립단계를 나타낸 흐름도이고, 도 7은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계를 나타낸 흐름도이고, 도 8은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법의 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계의 일예를 나타낸 그래프이고, 도 9는 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법에서 실제 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이고, 도 10은 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법으로부터 예측된 셰일 장애층의 크기를 실제 셰일 장애층의 크기와 비교한 그래프이다.

[0025] 도 1 내지 도 10을 참조하여 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 설명하면, 먼저, 셰일 장애층 크기 추정방법은 도 4에 도시한 것처럼 중요 인자 확인단계(S10), 프록시 모델 수립단계(S20), 그리고 수립된 프록시 모델의 현장 적용단계(S30)를 포함하여 수행된다.

[0026] 셰일 장애층 크기 추정방법은 프로세서 등의 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에서 수행되는 일예를 가정하여 설명하도록 한다.

[0027] 중요 인자 확인단계(S10)는 오일샌드 지층(1) 및 셰일 장애층(2)의 특성들 중 셰일 장애층의 위치 및 크기를 예측하는 데 변수로서 이용될 특성을 중요 인자로 추출한다.

[0028] 중요 인자 확인단계(S10)는 도 3에 도시한 오일샌드 지층의 일일 오일 생산량 그래프의 변곡점으로부터 FPP(first production peak), FPT(first production trough), SPP(second production peak)를 추출하고, 도 3의 스팀-오일 비(SOR; Steam Oil Ratio) 그래프의 변곡점으로부터 MXS(maximum SOR), MNS(minimum SOR)를 셰일

장애층의 크기 및 위치 예측에 사용될 인자들로서 추출하고, 이들 인자들을 중요 인자로서 이용할지의 여부를 확인한다.

[0029] 변곡점은 그래프에서 기울기가 갑자기 변하는 지점으로 추출된다.

[0030] 중요 인자 확인단계(S10)는 도 5에 도시한 것처럼, 입력변수 및 출력변수 결정(S11) 단계, 입력인자 범위 지정(S12) 단계, 2-level의 부분 요인 설계로 시뮬레이션 계획(S13) 단계, CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션(S14) 단계, 시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점 추출(S15) 단계, 그리고 분석 결과로부터 중요 인자 추출(S16) 단계를 포함하여 이루어진다.

[0031] 입력변수 및 출력변수 결정(S11) 단계에서, 오일샌드 지층(1)의 특성 및 셰일 장애층(2)의 특성, 셰일 장애층(2)의 크기 및 위치와 관련된 변수들을 입력변수로 설정하고, SAGD 생산 데이터의 변곡점과 관련된 변수들을 출력변수로 설정한다.

[0032] 위 단계(S11)에서, 오일샌드 지층(1)의 특성 중 저류층 두께(reservoir thickness), 수평 투과도(Horizontal permeability), 수직-수평 투과율(Vertical-horizontal permeability ratio), 공극률(porosity), 오일 포화도(oil saturation)가 입력변수로 설정되고, 입력변수들 각각의 심볼이 설정될 수 있다. 한 예에서, 입력변수의 심볼은 각각 RT, Kh, Kv/Kh, Po, So로 설정될 수 있다.

[0033] 그리고, 위 단계(S11)에서, 셰일 장애층(2)의 특성 중 셰일 수평 투과도(Shale horizontal permeability), 셰일 수직-수평 투과율(Shale vertical-horizontal permeability ratio), 셰일 공극률(Shale porosity), 셰일 물 포화도(Shale water saturation)가 입력변수로 설정되고, 입력변수의 심볼은 각각 Sh_Kh, Sh_Kv/KH, Sh_Po, Sh_Sw으로 설정될 수 있다.

[0034] 또한, 위 단계(S11)에서, 셰일 장애층(2)의 크기 및 위치는 셰일 너비(Shale width), 셰일 길이(Shale length), 셰일의 수직 위치(Vertical location of Shale) 및 셰일의 두께(Tickness of shale)가 입력변수로 설정되고, 입력변수의 심볼은 각각 WD, LN, VL, TS로 설정될 수 있다.

[0035] 위 단계(S11)에서, FPP에서의 오일 생산량, FPP에서의 누적 오일 생산량, FPP에서의 스팀-오일 비, FPP에서의 누적 스팀-오일 비, FPT에서의 오일 생산량, FPT에서의 누적 오일 생산량, FPT에서의 스팀-오일 비, FPT에서의 누적 스팀-오일 비, 그리고 스팀-오일 비최대값이 출력변수로 설정되고, 출력변수의 심볼은 각각 OR_FPP, CumOR_FPP, SOR_FPP, CSOR_FPP, OR_FPT, CumOR_FPT, SOR_FPT, CSOR_FPT, MXS로 설정될 수 있다.

[0036] 입력인자 범위 지정(S12) 단계에서는, 위 단계(S11)에서 설정된 입력변수 및 출력변수들에 대해 각각 최소범위 및 최대범위를 지정한다.

[0037] 한 예에서, 입력변수들에 대한 최소범위 및 최대범위는 다음의 표 1 및 표 2와 같이 지정되고, 출력변수들에 대한 최소범위 및 최대범위는 다음의 표 2와 같이 각각 지정된다.

[0038] [표 1]

Explanatory parameters		Symbol	Minimum	Maximum
Reservoir properties	Reservoir thickness, m	RT	24	34
	Horizontal permeability, D	Kh	3	8
	Vertical-horizontal permeability ratio	Kv/Kh	0.4	0.8
	Porosity	Po	0.33	0.36
	Oil saturation	So	0.65	0.85
Shale properties	Shale horizontal permeability, md	Sh_Kh	25	135
	Shale vertical-horizontal permeability ratio	Sh_Kv/Kh	0.01	0.0001
	Shale porosity	Sh_Po	0.27	0.33
	Shale water saturation	Sh_Sw	0.50	0.75
Shale size and location	Shale width, m	WD	50	90
	Shale length, m	LN	500	700
	Vertical location of shale, m	VL	10	14
	Thickness of shale, m	TS	4	8

[0039]

[0040] [표 2]

Response parameters	Symbol	Unit
Oil rate at the time of the first production peak	OR_FPP	m^3/d
Cumulative oil at the time of the first production peak	CumOR_FPP	E^6m^3
SOR at the time of the first production peak	SOR_FPP	-
CSOR at the time of the first production peak	CSOR_FPP	-
Oil rate at the time of the first production trough	OR_FPT	m^3/d
Cumulative oil at the time of the first production trough	CumOR_FPT	E^6m^3
SOR at the time of the first production trough	SOR_FPT	-
CSOR at the time of the first production trough	CSOR_FPT	-
Maximum SOR	MXS	-

[0041]

[0042] 다음으로, 2-level의 부분 요인 설계로 시뮬레이션 계획(S13) 단계에서, 2-level로 부분 요인 설계(fractional factorial design)를 통해 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 시뮬레이션을 준비 및 계획한다.

[0043] 위 단계(S13)에서, 시뮬레이션을 수행할 횟수와, 시뮬레이션 수행 결과에 따라 각 입력변수들에 2-level 방법을 적용함에 있어서 -1 또는 +1을 부여하도록 시뮬레이션 방법을 설정할 수 있다.

[0044] CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션(S14) 단계에서는, CMG's STARS 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 단계(S14)에서, 입력변수에 대해 2-level 방법을 통해 설정된 횟수만큼 시뮬레이션을 수행하여 표 3과 같이 시뮬레이션 결과를 생성한다.

표 3

[0045]

Run	RT	Kh	Kv/Kh	Po	So	Sh_Kh	Sh_Kv/Kh	Sh_Po	Sh_Sw	WD	LN	VL	TS
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
30	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
31	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
32	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

[0046] 그리고, 이 단계(S14)에서, 출력변수에 대해 설정된 횟수만큼 시뮬레이션을 수행하여 표 4와 같이 시뮬레이션 결과를 생성한다.

표 4

[0047]

Run	OR_FPP (m^3/d)	CumOR_FPP (E^6m^3)	SOR_FPP	CSOR_FPP	OR_FPT (m^3/d)	CumOR_FPT (E^6m^3)	SOR_FPT	CSOR_FPT	MXS
1	108	0.0515	7.57	6.22	93	0.0900	9.67	7.40	9.67
2	339	0.0557	9.32	6.36	268	0.1190	14.49	9.38	14.49
3	189	0.0490	2.50	2.40	93	0.3510	4.73	3.65	4.97
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

30	230	0.0556	7.75	5.78	191	0.0790	11.88	7.31	11.88
31	128	0.0647	3.02	2.63	92	0.2510	4.88	3.70	5.00
32	319	0.0566	2.11	1.77	217	0.3063	4.04	3.15	4.54

[0048] 다음으로, 시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점 추출(S15) 단계에서, 위 단계(14)에서 수행된 표 3 및 표 4의 시뮬레이션 결과를 외부의 데이터베이스 또는 출력장치로 출력하거나, SAGD 생산 데이터로부터 변곡점을 추출하는데, 이때, 변곡점 추출에 이용하는 SAGD 생산 데이터는 도 3에 도시된 일일 오일 생산량 그래프 및 스팀-오일 비 그래프일 수 있고, SAGD 생산 데이터로부터 추출되는 변곡점은 FPP, FPT, SPP, MXS, MNS일 수 있다.

[0049] 그리고, 분석 결과로부터 중요 인자 추출(S16) 단계는 위 단계(S15)에서 출력된 표 3 및 표 4의 시뮬레이션 결과로부터 분석 결과를 생성하고, 생성된 분석 결과로부터 중요 인자를 추출한다.

[0050] 분석 결과는 입력변수들과 출력변수들 사이의 P-value 값을 표 5와 같이 도출되고, 분석 결과에서 P-value 값이 0.05보다 작은 입력변수를 중요 인자로서 추출한다.

[0051] [표 5]

P-value < 0.05		Response Parameters								
		OR _FPP	CumOR _FPP	SOR _FPP	CSOR _FPP	OR _FPT	CumOR _FPT	SOR _FPT	CSOR _FPT	MXS
Explanatory Parameters	RT	0.063	0.004	0.619	0.201	0.001	0.112	0.358	0.278	0.206
	Kh	0.000	0.917	0.409	0.910	0.000	0.788	0.637	0.628	0.606
	Kv/Kh	0.001	0.288	0.068	0.180	0.020	0.741	0.338	0.010	0.025
	Po	0.533	0.466	0.674	0.505	0.768	0.334	0.735	0.392	0.813
	So	0.002	0.044	0.000	0.000	0.712	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sh_Kh	0.748	0.140	0.068	0.018	0.770	0.331	0.843	0.495	0.620
	Sh_Kv/Kh	0.594	0.650	0.471	0.554	0.654	0.849	0.849	0.733	0.701
	Sh_Po	0.899	0.647	0.664	0.845	0.956	0.561	0.822	0.816	0.903
	Sh_Sw	0.873	0.616	0.846	0.880	0.762	0.757	0.404	0.456	0.579
	WD	0.508	0.340	0.120	0.119	0.535	0.000	0.646	0.028	0.714
	LN	0.000	0.007	0.066	0.320	0.000	0.001	0.024	0.002	0.003
	VL	0.002	0.369	0.002	0.001	0.000	0.912	0.079	0.000	0.006
	TS	0.421	0.203	0.907	0.830	0.547	0.805	0.552	0.494	0.518

[0052]

[0053] 위 단계(S16)에서, 위의 표 5에서 P-value값이 0.05 미만으로 나타나는 입력변수인 저류층 두께(RT), 수평 투과도(Kh), 수직-수평 투과율(Kv/Kh), 오일 포화도(So), 셰일 너비(WD), 셰일 길이(LN), 셰일의 수직 위치(VL)가 중요 인자로서 추출된다.

[0054] 도 5 및 표 3 내지 표 5를 참고로 하여 설명한 것처럼, 중요 인자 확인단계(S10)에서는 오일샌드 지층(1)에 협재된 셰일 장애층(2)으로 인해 오일 생산량에 영향을 미치는 변수들을 결정하고 시뮬레이션을 수행하여, 시뮬레이션 결과로부터 중요 인자를 추출하게 되어, 시뮬레이션 결과로부터 셰일 장애층(2)의 위치 및 크기를 추정하는 데 영향을 미치는 인자들을 효율적으로 획득할 수 있게 된다.

[0055] 계속해서, 도 6을 참고로 하여 프록시 모델 수립단계(S20)를 설명하면, 프록시 모델 수립단계(S20)는 2-level 선형 회귀모델로부터 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 선택(S21)하는 단계, 주요 변수를 위한 확률분포를 가정(S22)하는 단계, 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 이용하여 시뮬레이션 계획(S23)하는 단계, 시뮬레이션 수행 및 SAGD 생산데이터에서 변곡점 조사를 위해 시뮬레이션 결과 출력(S24) 단계, 그리고 입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발(S25)하는 단계를 포함하여 이루어진다.

[0056] 2-level 선형 회귀모델로부터 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 선택(S21)하는 단계에서, 2-level 선형 회귀모델을 생성하고, 생성된 2-level 선형 회귀모델을 참조하여 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 추출한다.

[0057] 이 단계(S21)에서, 변곡점에 영향을 주는 주요 변수로서, 분석 결과로부터 중요 인자 추출(S16) 단계에서 추출

된 저류층 두께(RT), 수평 투과도(Kh), 수직-수평 투과율(Kv/Kh), 오일 포화도(So), 세일 너비(WD), 세일 길이(LN), 세일의 수직 위치(VL)가 선택된다.

[0058] 한 예에서, 주요 변수로서, 저류층 두께(RT), 수평 투과도(Kh), 수직-수평투과율(Kv/Kh), 오일 포화도(So), 세일 너비(WD), 세일 길이(LN), 세일의 수직 위치(VL), FPP에서의 오일 생산량(OR_FPP), FPP에서의 누적 오일 생산량(CumOR_FPP), FPP에서의 스팀-오일 비(SOR_FPP), FPP에서의 누적 스팀-오일 비(CSOR_FPP), FPT에서의 오일 생산량(OR_FPT), FPT에서의 누적 오일 생산량(CumOR_FPT), FPT에서의 스팀-오일 비스팀-오일 비(SOR_FPT), FPT에서의 누적 스팀-오일 비(CSOR_FPT), 그리고 스팀-오일 비 최대값(MXS; maximum sor)이 선택될 수 있다.

[0059] 주요 변수를 위한 확률분포를 가정(S22)하는 단계에서는 위 단계(S21)에서 선택된 주요 변수를 위한 확률분포를 가정한다. 한 예에서, 주요 변수를 위한 확률분포는 균일분포(Uniform Distribution) 또는 삼각분포(Triangular Distribution)로 가정될 수 있는데, 주요 변수를 위해 균일분포로 가정하는 경우, 각 변수들에 대해 최대값과 최소값을 가정한다. 한 예에서, 저류층 두께는 24~34m로, 세일 너비는 50~90m로, 세일 길이는 500~740m로, 그리고 세일 수직 위치는 8~14m로 각각 분포값이 가정된다.

[0060] 한편, 주요 변수를 위해 삼각분포로 가정하는 경우, 각 변수들에 대해 최소값, 최대값, 그리고 이들 사이의 최빈값을 가정할 수 있으며, 한 예에서, 각 변수들의 최소값~최대값과 최빈값은 수평 투과도가 3~8D, 5D(달시, darcy), 수직-수평 투과율은 0.4~0.8, 0.5, 오일 포화도는 0.65~0.86, 0.8로 각각 분포값이 가정된다.

[0061] 그리고, 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS, latin hypercube sampling)을 이용하여 시뮬레이션 계획(S23) 단계에서, 전체 샘플링 공간에서 각 샘플 공간을 겹치지 않도록 변수의 범위를 나누어 샘플을 생성하는 통계적 방법인 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법을 이용하여 변수들을 무작위 샘플링한다.

[0062] 이 단계(S23)에서, 시뮬레이션 계획에 있어서, 시뮬레이션 수행 횟수를 설정할 수 있다.

[0063] 시뮬레이션 수행 및 SAGD 생산데이터에서 변곡점 조사를 위해 시뮬레이션 결과 출력(S24) 단계에서는, 위 단계(S24)에서 라틴 하이퍼큐브 샘플링으로 계획된 시뮬레이션을 수행 및 그 결과를 출력하고, 시뮬레이션 결과인 SAGD 생산데이터는 SAGD 생산데이터로부터 변곡점을 조사하기 위해 출력된다. 이 단계(S24)에서, 시뮬레이션은 표 6과 같이 99회 수행되어 시뮬레이션 결과로 출력될 수 있다.

[0064] [표 6]

Run	RT	Kh	Kv/Kh	So	WD	LN	VL	OR_FPP (m^3/d)	CumOR_FPP (E^3m^3)	SOR_FPP	CSOR_FPP	OR_FPT (m^3/d)	CumOR_FPT (E^3m^3)	SOR_FPT	CSOR_FPT	MXS
1	32	4.5	0.60	0.83	78	580	10	203	0.0723	3.42	3.14	145	0.2369	5.51	4.25	6.38
2	26	4.5	0.40	0.77	90	660	8	110	0.0304	4.25	3.52	86	0.1978	9.13	7.51	10.14
3	26	4.5	0.52	0.75	54	680	12	143	0.0532	4.92	3.65	141	0.1186	6.54	4.90	7.13
4	26	5.5	0.6	0.71	66	700	12	137	0.0857	8.56	5.74	135	0.1108	9.02	6.44	9.03
5	24	6.0	0.68	0.73	70	580	14	196	0.1073	4.76	3.54	182	0.1467	6.05	4.13	6.05
6	26	7.0	0.48	0.65	78	620	8	171	0.0167	7.44	6.13	124	0.1323	12.59	11.58	14.26
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
94	34	6.0	0.72	0.83	54	680	14	298	0.0316	2.14	1.87	179	0.1484	3.89	3.20	4.03
95	30	6.0	0.6	0.73	58	580	14	255	0.0555	3.37	3.09	209	0.1372	6.62	4.39	6.62
96	26	4.0	0.8	0.65	66	720	14	203	0.0125	4.10	3.12	120	0.1010	10.52	8.68	12.07
97	34	3.5	0.64	0.75	74	540	10	148	0.0421	3.89	3.66	145	0.1820	7.48	5.39	7.58
98	32	6.5	0.48	0.71	58	640	10	188	0.0130	4.20	2.66	159	0.0987	9.84	6.77	9.84
99	24	5.0	0.50	0.75	90	700	10	170	0.0212	3.51	2.95	103	0.1678	9.58	7.05	10.22

[0065]

[0066] 그리고, 입력변수 및 출력변수 사이에 통계적 연관을 이용하여 세일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발(S25)하는 단계에서 생성하는 프록시 모델은 여러 변수들로부터 영향을 받는 문제를 분석 및 모델링에 효과적인 수학적 및 통계적 방법으로서, 선형 프록시 모델과 비선형 프록시 모델을 각각 생성한다.

[0067] 이 단계(S25)에서, 선형 프록시 모델로, 선형(L, linear) 회귀 모델 및 선형-로그(L-LO, linear-log) 회귀 모델, 그리고 로그-로그(LO-LO, log-log) 회귀 모델을 각각 생성하고, 비선형 프록시 모델로, 2요소 상호작용 회귀 모델(2FI; 2-factor interaction)과 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀 모델(2FILT; 2-factor interaction with log transform)을 각각 생성한다.

[0068] 이때, 선형 프록시 모델인 선형 회귀 모델 및 선형-로그 회귀 모델은 각각 다음의 식 1 및 식 2와 같이 표현된다.

[0069] [식 1]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots\cdots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

[0070]

[0071] [식 2]

$$y = \beta_0 + \beta_1 ln(x_1) + \beta_2 ln(x_2) + \cdots\cdots + \beta_k ln(x_k) + \varepsilon$$

$$y = ln\left(e^{\beta_0} \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdots\cdots x_k^{\beta_k}\right) + \varepsilon$$

[0072]

[0073] 위의 식 1에서, y는 출력변수, i가 1부터 k까지인 xi는 입력변수, i가 1부터 k까지인 β_i는 감퇴계수, k는 변수번호, 그리고 ε는 에러 항이다.

[0074] 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델은 위의 식 2에서 변형되어 다음의 식 3과 같이 표현된다.

[0075] [식 3]

$$ln(y) = \beta_0 + \beta_1 ln(x_1) + \beta_2 ln(x_2) + \cdots\cdots + \beta_k ln(x_k) + ln(\varepsilon)$$

$$y = e^{\beta_0} \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdots\cdots x_k^{\beta_k} \cdot \varepsilon$$

[0076]

[0077] 그리고, 비선형 프록시 모델인 2요소 상호작용 회귀모델 및 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델은 식 2에 상호작용 항을 추가하여 각각 다음의 식 4 및 식 5로 표현된다.

[0078] [식 4]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots\cdots + \beta_k x_k + \sum_{i<j=2}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

[0079]

[0080] [식 5]

$$ln(y) = \beta_0 + \beta_1 ln(x_1) + \beta_2 ln(x_2) + \cdots\cdots + \beta_k ln(x_k) + \sum_{i<j=2}^{k} \beta_{ij} ln(x_i) ln(x_j) + ln(\varepsilon)$$

[0081]

[0082] 프록시 모델 수립단계(S20)에서 생성되는 세일 장애층 크기 예측 수식은 다음의 식 6으로 표현된다.

[0083] [식 6]

$$LO_LO_WD = 1343.455 \times (Kh)^{0.2787} \times (So)^{-1.810} \times (VL)^{0.1356} \times (CumOR_FPP)^{0.0942} \times (CSOR_FPP)^{-0.266} \times (OR_FPT)^{-0.5641} \times (CumOR_FPT)^{0.6725} \times (SOR_FPT)^{0.518}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_WD = {} & 17 + 127.6 \times [ln(VL)] - 648 \times [ln(SOR_FPT)] + 644 \times [ln(MXS)] \\ & + 4.901 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] - 56.46 \times [ln(So) \times ln(VL)] - 21.45 \times [ln(VL) \times ln(OR_FPT)] \\ & + 20.469 \times [ln(VL) \times ln(CumOR_FPT)] + 219.2 \times [ln(VL) \times ln(SOR_FPT)] \\ & - 209.4 \times [ln(VL) \times ln(MXS)] + 1.902 \times [ln(CumOR_FPP) \times ln(MXS)] \\ & + 121.1 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(SOR_FPT)] - 125.4 \times [ln(CSOR_FPP) \times ln(MXS)] \end{aligned}$$

$$L_LO_LN = ln\left[\begin{array}{l} (RT)^{114.0} \times (Kh)^{210.8} \times (Kv/Kh)^{45.9} \times (So)^{849} \times (VL)^{315.9} \times (OR_FPP)^{-96.1} \\ \times (CSOR_FPP)^{-33.3} \times (OR_FPT)^{-191.8} \times (CumOR_FPT)^{-76.9} \\ \times (SOR_FPT)^{-68.1} \times (CSOR_FPT)^{253.2} \end{array}\right] + 462$$

$$\begin{aligned} 2FILT_LN = {} & -6640 + 1502 \times [ln(RT)] + 1017 \times [ln(Kh)] + 1649 \times [ln(VL)] - 779 \times [ln(CumOR_FPT)] \\ & + 993 \times [ln(CSOR_FPT)] - 2147 \times [ln(RT) \times ln(So)] - 392.6 \times [ln(RT) \times ln(VL)] \\ & + 262.0 \times [ln(RT) \times ln(CumOR_FPT)] - 385.2 \times [ln(RT) \times ln(CSOR_FPT)] - 1316 \times [ln(Kh) \times ln(So)] \\ & - 115.9 \times [ln(Kh) \times ln(OR_FPT)] + 130.5 \times [ln(Kh) \times ln(CumOR_FPT)] \\ & - 265.4 \times [ln(Kh) \times ln(CSOR_FPT)] + 1923 \times [ln(So) \times ln(OR_FPT)] \\ & - 395.6 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPT)] + 274.2 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPT)] \\ & - 112.1 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CumOR_FPT)] + 228.2 \times [ln(OR_FPT) \times ln(CSOR_FPT)] \end{aligned}$$

$$LO_LO_VL = 31.890 \times (So)^{-2.887} \times (CumOR_FPP)^{0.2796} \times (CSOR_FPP)^{-0.8166}$$

$$\begin{aligned} 2FILT_VL = {} & 19.87 - 39.30 \times [ln(So)] - 15.56 \times [ln(CSOR_FPP)] \\ & - 9.180 \times [ln(So) \times ln(CumOR_FPP)] - 20.44 \times [ln(So) \times ln(CSOR_FPP)] \end{aligned}$$

[0084]

[0085] 위의 식 6에서, LO_LO_WD는 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, 2FILT_WD는 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 너비, L_LO_LN은 선형 프록시 모델인 선형-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, 2FILT_LN은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 길이, LO_LO_VL은 선형 프록시 모델인 로그-로그 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치, 2FILT_VL은 비선형 프록시 모델인 로그 변환적용된 2요소 상호작용 회귀모델에서의 셰일 장애층의 수직위치이며, 각 수식들에서 곱해지는 상수 및 지수들은 실제 결과와 시뮬레이션 결과를 대비하여 상관관계(R^2)이 1에 가까워지도록 회귀법으로 설정된 값이다.

[0086] 계속해서, 프록시 모델의 현장 적용단계(S30)를 설명하면, 프록시 모델의 현장 적용단계(S30)는 프록시 모델 수립단계(S20)에서 수립된 프록시 모델을 실제 오일샌드 지층에 적용하는 단계로서, 도 7에 도시한 것처럼, 저류층 인자 및 실제 SAGD 프로젝트의 변곡점을 조사(S31)하는 단계, 프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측(S32)하는 단계, CMG STARS 저류층 시뮬레이터를 이용하여 예측된 셰일 장애층을 재설계하고 시뮬레이션 수행(S33) 단계, 실제 SAGD 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교(S34)하는 단계, 그리고 프록시 모델의 현장 적용 가능성을 확인하기 위해 검증 수행(S35)하는 단계를 포함하여 이루어진다.

[0087] 저류층 인자 및 실제 SAGD 프로젝트의 변곡점을 조사(S31)하는 단계는 저류층의 특성들로부터 저류층 인자를 추출하고, 실제 저류층의 SAGD 생산데이터로부터 변곡점을 조사하는 단계로서, 실제 저류층으로서 캐나다의 알버르타에 위치하는 Suncor's Firebag SAGD 프로젝트의 데이터를 이용하는 일예를 참조하여 설명한다.

[0088] 한 예에서, 위 단계(S31)는 도 8의 (a) 내지 (c)에 도시한 것처럼, 실제 저류층에 주입된 웰(well)A, 웰B, 웰C에서의 SAGD 생산데이터로부터 변곡점 FPP, FPT, MXS를 각각 조사하도록 이루어진다.

[0089] 이때, Suncor's Firebag의 웰들로부터 얻은 SAGD 생산데이터로부터 저류층 특성과 변곡점을 다음의 표 7로부터 조사할 수 있다.

표 7

[0090]

		Well A	Well B	Well C
Reservoir Properties	RT, m	40.5		32.8
	Po	0.31		0.32
	So	0.86		0.85
Inflection Points	OR_FPP, m^3/d	204.94	198.22	315.28
	CumOR_FPP, $E^6 m^3$	0.040	0.039	0.053
	SOR_FPP	1.54	2.08	1.69
	CSOR_FPP	2.44	2.59	2.22
	OR_FPT, m^3/d	106.44	83.54	141.87
	CumOR_FPT, $E^6 m^3$	0.112	0.103	0.285
	SOR_FPT	6.62	6.21	2.65
	CSOR_FPT	3.32	3.59	2.65
	MXS	6.62	6.26	4.45

[0091] 그리고, 프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측(S32)하는 단계는 프록시 모델 수립단계(S20)에서 생성된 프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측한다. 이 단계(S32)에서, 셰일 장애층의 크기는 셰일 너비(WD), 셰일 길이(LN) 및 셰일의 수직위치(VL)를 각각 예측한다.

[0092] 이때, 프록시 모델을 이용하여 예측된 SAGD 프로젝트의 셰일 장애층의 크기는 다음의 표 8로 계산될 수 있다.

표 8

[0093]

Wells	WD	LN (Horizontal well length: 800 m)	LN (Horizontal well length: 1000 m)	VL
Well A	49.3 m	694.2 m	867.8 m	10.2 m
Well B	54.3 m	686.0 m	857.4 m	9.5 m
Well C	90.7 m	559.8 m	699.7 m	12.1 m

[0094] 그리고, CMG STARS 저류층 시뮬레이터를 이용하여, 예측된 셰일 장애층을 재설계하고 시뮬레이션 수행(S33) 단계에서는 중요 인자 확인단계(S10) 중 CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션(S14)에서 이용한 CMG 시뮬레이터를 이용하여, 위 단계(S32)에서 예측된 셰일 장애층의 구조를 재설계하고, 재설계된 셰일 장애층 특성을 이용하여 SAGD 생산데이터에 대한 시뮬레이션을 수행한다.

[0095] 다음으로, 실제 SAGD 생산 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교(S34)하는 단계에서는, 위 단계(S33)에서 수행된 시뮬레이션 결과와 실제 저류층의 생산데이터를 도 9의 그래프와 같이 비교하며, Suncor's Firebag의 일예인 도 9의 비교결과를 참조하면 실제 SAGD 생산 데이터와 시뮬레이션 결과가 유사한 것을 확인할 수 있고, 도 10의 그래프에 도시된 것처럼 식 6으로부터 도출된 셰일 장애층의 크기가 실제 크기와 상관관계(R^2)가 높게 형성되는 것을 알 수 있다. 이는, 수립한 프록시 모델로부터 얻은 수식으로부터 도출한 셰일 장애층의 크기를 적용하여 시뮬레이션 결과가 실제 생산 데이터와 상관관계가 높은 것으로서, 해당 프록시 모델을 이용하여 저류층의 생산데이터를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

[0096] 마지막으로, 프록시 모델의 현장 적용 가능성을 확인하기 위해 검증 수행(S35) 단계에서는 프록시 모델을 Suncor's Firebag 외의 다른 현장에 적용하여 실제 생산 데이터와 비교하여 다른 현장에도 적용 가능한지를 추가적으로 더 확인한다.

[0097] 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법은 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 프로그램 형태로 기록될 수 있고, 예로서, 휘발성 또는 비휘발성 기억장치 또는 프로세서에 구현될 수 있으며, 이를 한정하지는 않아야 할 것이다.

[0098] 그리고, 본 발명의 한 실시예에 따른 셰일 장애층 크기 추정방법을 수행하는 프로그램을 기록한 컴퓨터 판독 가능한 기록매체는 데이터베이스에 유선통신 또는 무선통신을 통해 연결되어 데이터를 제공받는 구조, 또는, 별도

의 출력장치와 연결되어 처리결과를 출력장치에 출력하는 구조로 구현될 수 있다.

[0099] 이상에서 본 발명의 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

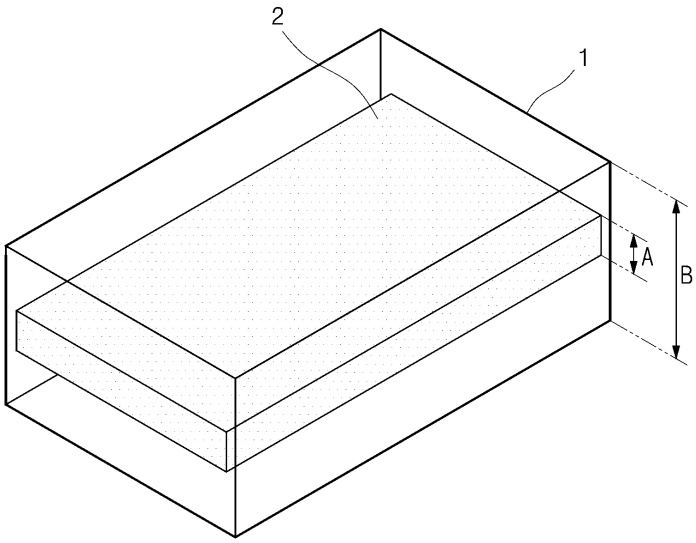
[0100] 1 : 오일샌드 지층 2 : 셰일층

100 : 주입정 110 : 배출공

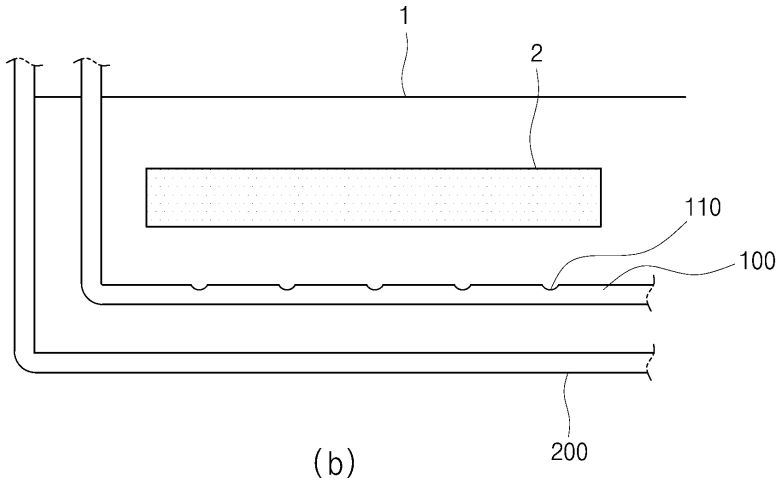
200 : 생산정

도면

도면1

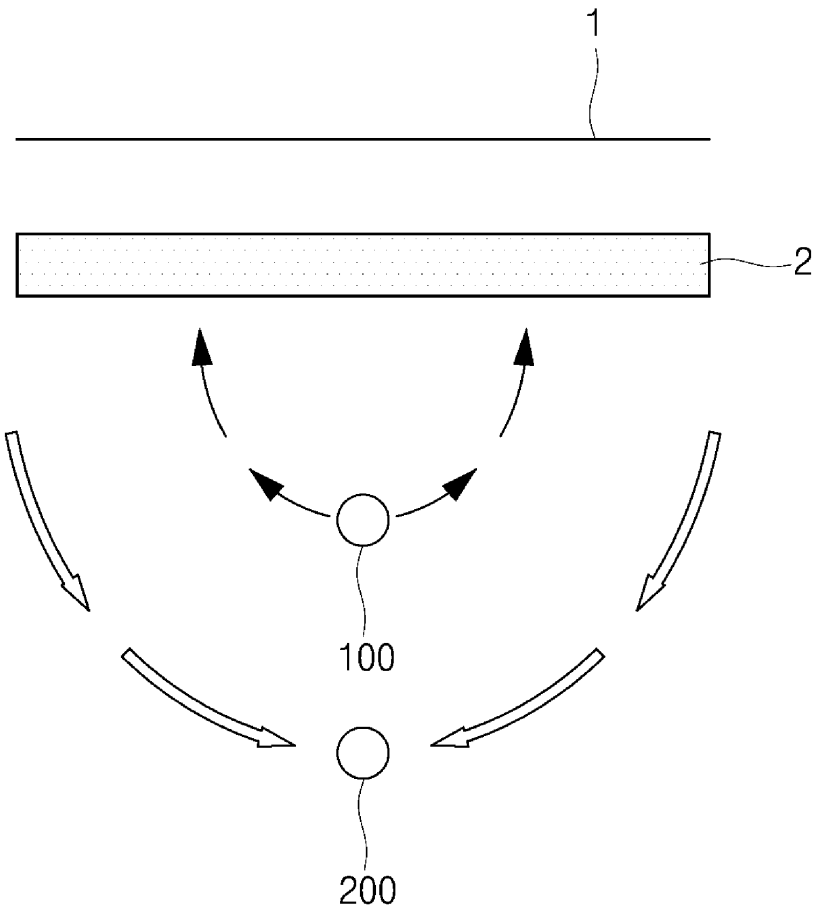


(a)

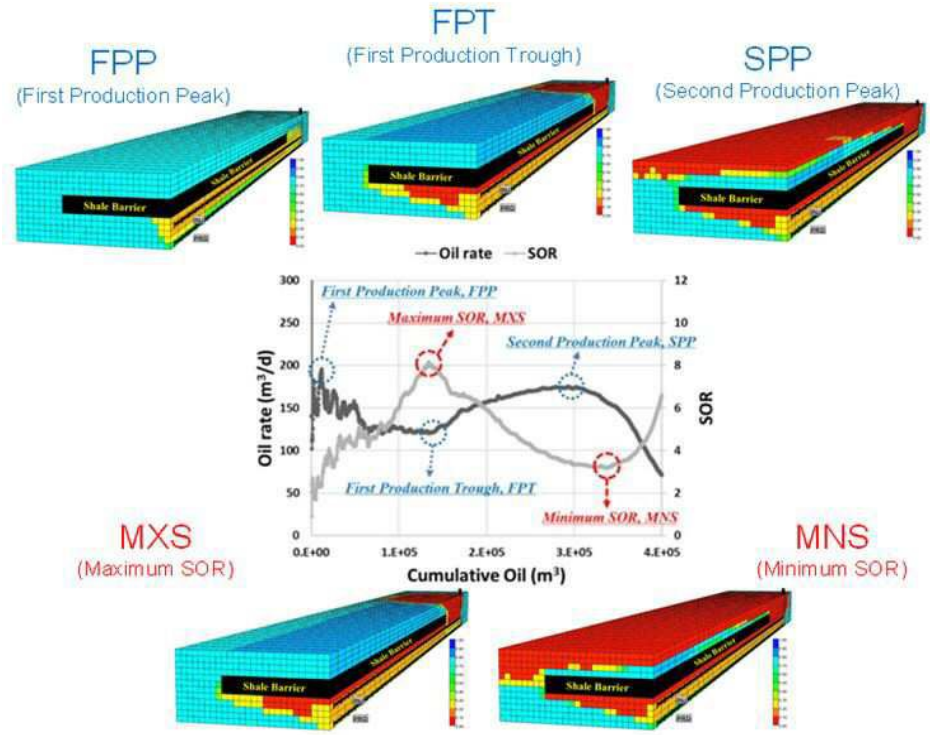


(b)

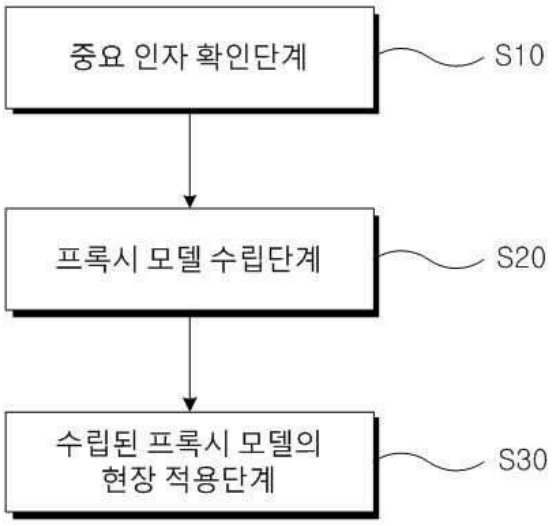
도면2



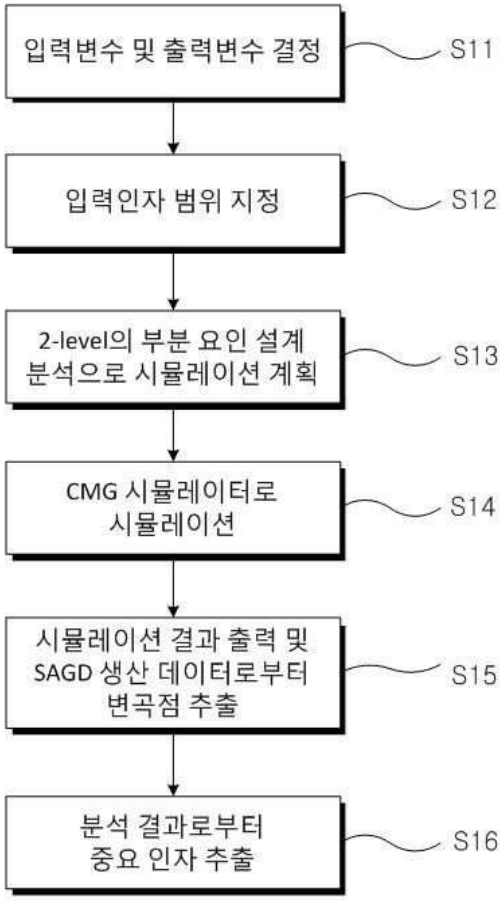
도면3


FPP
(First Production Peak)
FPT
(First Production Trough)
SPP
(Second Production Peak)
Shale Barrier
Oil rate
SOR
First Production Peak, FPP
Maximum SOR, MXS
Second Production Peak, SPP
First Production Trough, FPT
Minimum SOR, MNS
Oil rate (m³/d)
SOR
Cumulative Oil (m³)
MXS
(Maximum SOR)
MNS
(Minimum SOR)

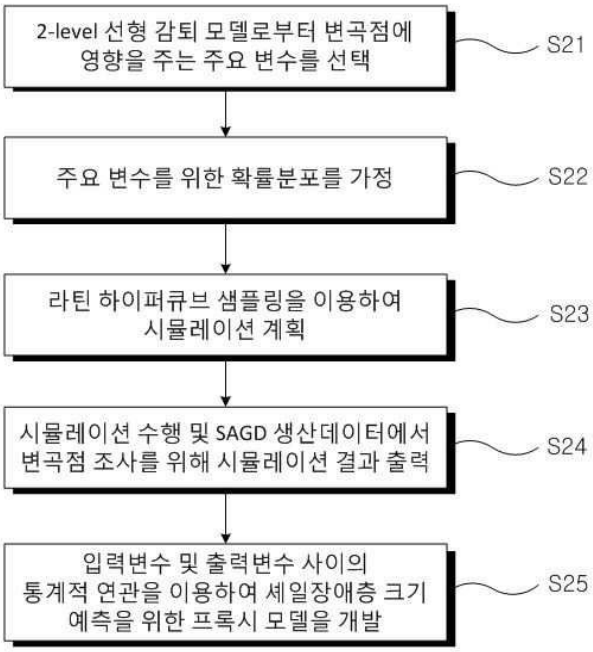
도면4


중요 인자 확인단계
S10
프록시 모델 수립단계
S20
수립된 프록시 모델의
현장 적용단계
S30

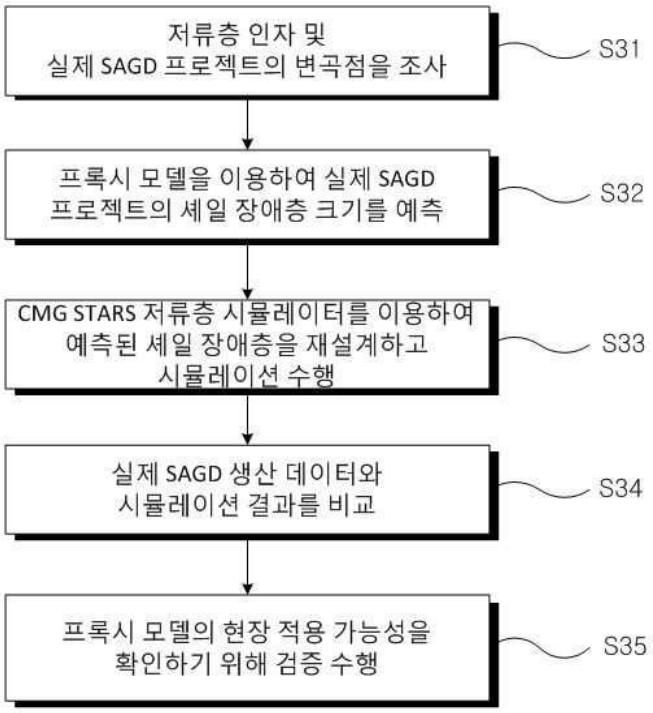
도면5


입력변수 및 출력변수 결정
S11
입력인자 범위 지정
S12
2-level의 부분 요인 설계 분석으로 시뮬레이션 계획
S13
CMG 시뮬레이터로 시뮬레이션
S14
시뮬레이션 결과 출력 및 SAGD 생산 데이터로부터 변곡점 추출
S15
분석 결과로부터 중요 인자 추출
S16

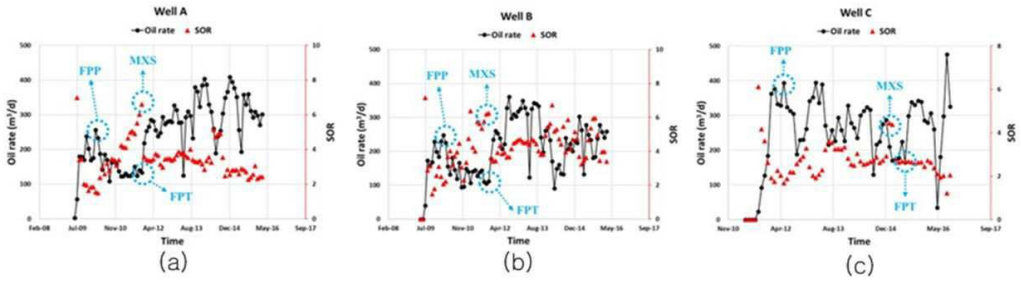
도면6


2-level 선형 감퇴 모델로부터 변곡점에 영향을 주는 주요 변수를 선택
S21
주요 변수를 위한 확률분포를 가정
S22
라틴 하이퍼큐브 샘플링을 이용하여 시뮬레이션 계획
S23
시뮬레이션 수행 및 SAGD 생산데이터에서 변곡점 조사를 위해 시뮬레이션 결과 출력
S24
입력변수 및 출력변수 사이의 통계적 연관을 이용하여 셰일장애층 크기 예측을 위한 프록시 모델을 개발
S25

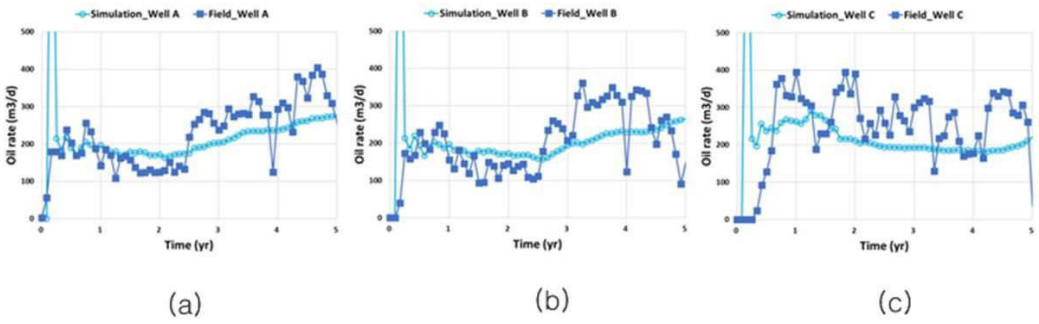
도면7


저류층 인자 및
실제 SAGD 프로젝트의 변곡점을 조사
S31
프록시 모델을 이용하여 실제 SAGD
프로젝트의 셰일 장애층 크기를 예측
S32
CMG STARS 저류층 시뮬레이터를 이용하여
예측된 셰일 장애층을 재설계하고
시뮬레이션 수행
S33
실제 SAGD 생산 데이터와
시뮬레이션 결과를 비교
S34
프록시 모델의 현장 적용 가능성을
확인하기 위해 검증 수행
S35

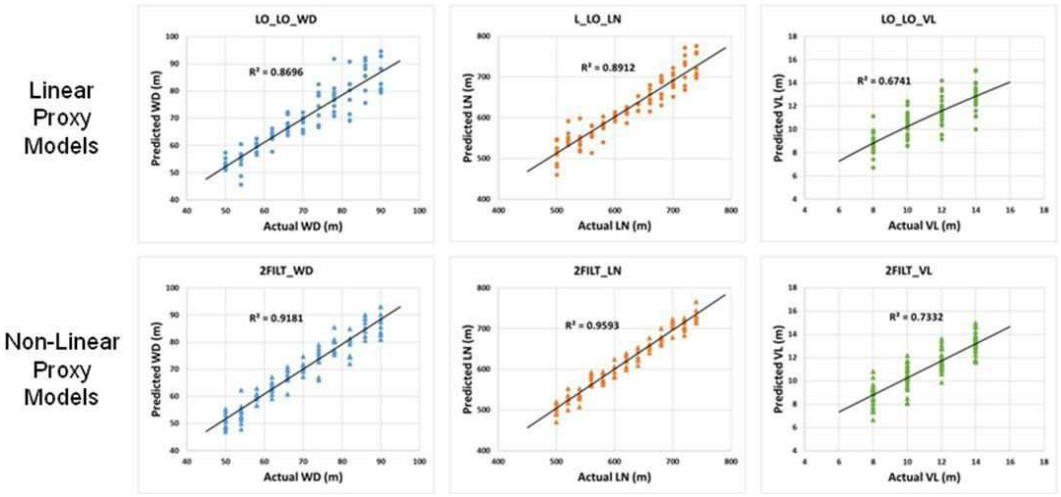
도면8


Well A
Well B
Well C
Oil rate
SOR
FPP
MXS
FPT
Time
(a)
(b)
(c)

도면9


Simulation_Well A
Field_Well A
Simulation_Well B
Field_Well B
Simulation_Well C
Field_Well C
Oil rate (m3/d)
Time (yr)
(a)
(b)
(c)

도면10


Linear Proxy Models
Non-Linear Proxy Models
LO_LO_WD
R² = 0.8696
Predicted WD (m)
Actual WD (m)
L_LO_LN
R² = 0.8912
Predicted LN (m)
Actual LN (m)
LO_LO_VL
R² = 0.6741
Predicted VL (m)
Actual VL (m)
2FILT_WD
R² = 0.9181
Predicted WD (m)
Actual WD (m)
2FILT_LN
R² = 0.9593
Predicted LN (m)
Actual LN (m)
2FILT_VL
R² = 0.7332
Predicted VL (m)
Actual VL (m)