



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년01월20일
(11) 등록번호 10-1586687
(24) 등록일자 2016년01월13일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B01J 19/00 (2006.01) B01D 53/14 (2006.01)
C01B 31/20 (2006.01) E02D 29/045 (2006.01)
E21D 13/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0136771

(22) 출원일자 2014년10월10일

심사청구일자 2014년10월10일

(56) 선행기술조사문헌

JP06182191 A

JP2008006367 A

(73) 특허권자

한국지질자원연구원

대전광역시 유성구 과학로 124 (가정동)

(72) 발명자

박용찬

대전 서구 문정로90번길 60, 109동 502호 (탄방동, 한우리아파트)

이태훈

서울특별시 송파구 성내천로37길 37 파크테일아파트 110동 202호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

임승섭

전체 청구항 수 : 총 8 항

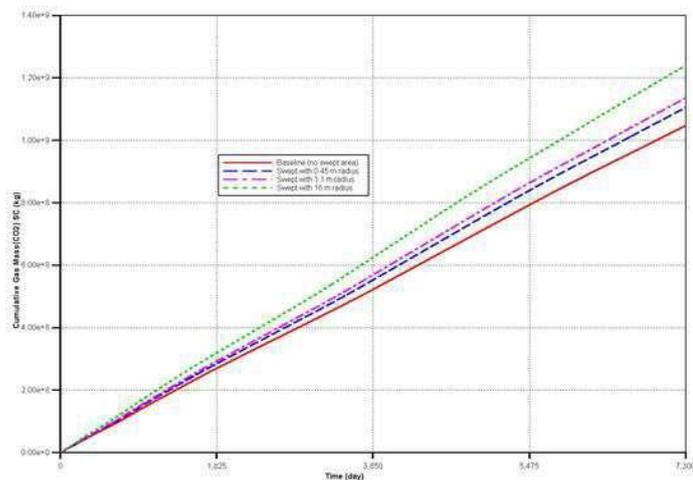
심사관 : 김준일

(54) 발명의 명칭 주입정 주변의 잔류수포화도 저감을 통한 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법

(57) 요약

본 발명에 따른 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법은 투수성 암질로 이루어진 지중의 가스 저장층까지 연결되어 있는 주입정을 통해 저장층의 잔류수포화도를 낮출 수 있는 저감제를 주입하는 단계와, 저감제 주입후 저장층에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 단계를 포함하여 이루어지며, 이산화탄소를 주입함에 따라, 저장층의 공극을 채우고 있던 저감제와 물은 함께 배출되어 주입정 주변의 잔류수포화도가 낮아짐으로써 저장층의 이산화탄소 주입성이 향상된다. 본 발명에서 저감제는 계면활성제를 사용하거나 또는 이산화탄소와 물에 모두 혼합(miscible)될 수 있는 물질을 사용할 수 있다.

대표도 - 도10



(72) 발명자

박권규

대전광역시 유성구 가정로 43 삼성한울아파트 106
동 1701호

이승우

대전광역시 유성구 과학로 124

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 GP2014-016

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 산업기술연구회

연구사업명 주요사업-기관고유임무형

연구과제명 현장 시험부지를 이용한 CO2 모니터링 및 누출탐지 기술의 현장 적용성 시험 및 평가

기 여 율 1/1

주관기관 한국지질자원연구원

연구기간 2014.01.01 ~ 2017.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

(a)투수성 암질로 이루어진 지층의 가스 저장층까지 연결되어 있는 주입정을 통해 상기 저장층의 잔류수포화도를 낮출 수 있는 저감제를 주입하는 단계; 및

(b)상기 (a)단계 후 상기 저장층에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 단계;를 포함하여 이루어지며,

상기 (b)단계에서 이산화탄소를 주입함에 따라, 상기 (a)단계 완료 후에 상기 저장층의 공극을 채우고 있던 상기 저감제와 물은 함께 배출되어 상기 주입정 주변의 잔류수포화도가 낮아짐으로써 상기 저장층의 이산화탄소 주입성이 향상되는 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 저감제는 계면활성제인 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 저감제는 이산화탄소와 물에 모두 혼합(miscible)될 수 있는 물질인 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 저감제는 아세톤, 메탄올, 에탄올, 아세트산 중 적어도 어느 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 저감제는 상기 주입정을 중심으로 미리 정해진 일정 반경 내에만 주입되도록, 저감제 주입량을 조절하는 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 (b)단계에서 이산화탄소를 주입하는 중간에 상기 저감제를 재주입하는 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 주입정 주변에 상기 저장층까지 연결되는 별도의 배출정을 시추하여,

상기 (b)단계에서 상기 저장층의 공극에서 나오는 상기 저감제와 물을 상기 배출정을 통해 회수하는 것을 특징으로 하는 지층 가스 저장층의 주입성 향상방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 배출정을 통해 나온 저감제와 물을 상호 분리하여 상기 저감제를 재사용하는 것을 특징으로 하는 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 이산화탄소를 육상 또는 해저 지하 심부의 개발 완료된 유전, 가스전 또는 대수층 등을 이용하여 저장하는 지중 가스 저장기술에 관한 것으로서, 특히 지중 대수층에 이산화탄소의 주입성을 향상시키기 위한 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 지구온난화를 일으키는 온실가스는 메탄, 프레온가스, 이산화탄소 등 그 종류가 다양하지만, 이들 중 이산화탄소가 전체에서 차지하는 비중이 80%로 가장 클 뿐만 아니라 규제가능한 가스(controlable gas)이므로 온실가스 문제는 주로 이산화탄소에 초점이 맞춰져 있다.

[0003] 이산화탄소 감축기술의 하나로서 최근 CCS(Carbon Capture & Storage)에 대한 기대가 증대되고 있다. 특히 국제에너지기구(IEA)에 의하면 2050년에는 이산화탄소 감축량 중 19%인 연간 약 92억톤의 이산화탄소를 CCS 기술이 담당해야 하는 것으로 분석되었다. 실증 또는 상용화 규모라 부를 수 있는 CCS프로젝트가 현재 전세계에서 4개 정도만 가동되고 있지만, 계획 중인 프로젝트는 약 300개 정도이며, 2050년에는 3500개 이상의 프로젝트가 필요하다는 예측도 나와 있다.

[0004] CCS의 저장분야인 지중저장기술은 발전소 등에서 포집된 이산화탄소를 육상 또는 해저 지하의 심부에 반영구적으로 저장시키는 기술로서 지질학적 환경에 따라 유전, 가스전, 대수층 등이 주요 저장소이다. 저장소를 결정할 때 가장 중요한 조건으로는 적어도 800m 이상 심부 지역이어야 하며, 저류암(저장층)은 공극률과 투수율이 커야하고 그 상부에는 주입된 이산화탄소가 지상으로 누출되지 않는 불투수층(상부 덮개암)이 존재해야 한다.

[0005] CCS의 성공을 위해서는 대규모 저장이 가능한 대용량 심부 저장층의 확보와 함께 저장층의 주입성이 매우 중요하다. 대용량의 저장층 확보 및 주입성은 모두 잔류수포화도와 관계가 있다.

[0006] 즉, 대용량 저장층이란 이산화탄소가 저장될 수 있는 공간이 크다는 것을 의미하는데, 이를 위해서는 저장층 자체의 볼륨도 커야 하지만, 저장층을 이루는 암석의 공극률도 커야 한다. 또한, 공극 내 잔류수포화도가 낮아야 한다. 저장층을 이루는 암석의 공극에는 이산화탄소를 계속적으로 주입해도 이산화탄소에 의하여 완전히 포화되지 않고 얼마간의 물이 남아 있게 되는데 이를 잔류수포화도(irreducible water saturation)라고 한다. 잔류수포화도가 높다는 것은 이산화탄소가 채워질 수 있는 공간이 적어진다는 것을 의미하므로 실제 저장 공간이 줄어들게 된다. 또한, 저장층 내 투과성은 포화도(saturation)와 관계되는데, 예컨대 공극에 이산화탄소의 포화도가 올라갈수록 이산화탄소의 투과성이 향상되며, 반대의 경우 투과성이 저하된다. 잔류수포화도가 높아지면 상대적으로 이산화탄소의 포화도가 낮아지므로 이산화탄소의 투과성 저하로 이어진다. 투과성이 낮아지면 주입성도 함께 낮아지므로 CCS 사업 전체의 경제성에도 바람직하지 않다. 결국, 대용량 저장층의 확보와 이산화탄소의 주입성 증대는 모두 저장층 내 공극의 잔류수포화도와 깊게 연관된다.

[0007] 대수층은 친수성(water-wet)을 보이는데 대부분 잔류수포화도가 50% 근처로 높고 상대유체투과도(relative permeability)는 낮은 양상을 보인다고 보고되고 있다. 그리고 발명자가 암석코어에 대하여 수행한 실험에서도, 도 1의 표에 나타난 바와 같이, 암석코어는 매우 높은 잔류수포화도와 낮은 상대유체투과도(krCO₂)를 보이고 있다.

[0008] 이상에서 설명한 바와 같이, 저장층의 잔류수포화도가 높을 경우 저장층의 용량저하를 나타낼 뿐만 아니라, 상대유체투과도도 저하시켜 이산화탄소의 주입성에 부정적인 영향을 미치게 된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 이산화탄소가 주입되는 주입정 주변에서 저장층의 잔류수포화도를 저감시켜 저장층 전체에 대한 이산화탄소의 주입성을 향상시키기 위한 방법을 제공하는데 그 목적이

있다.

과제의 해결 수단

- [0010] 상기 목적을 해결하기 위한 본 발명에 따른 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법은 (a)투수성 암질로 이루어진 지중의 가스 저장층까지 연결되어 있는 주입정을 통해 상기 저장층의 잔류수포화도를 낮출 수 있는 저감제를 주입하는 단계; 및 (b)상기 (a)단계 후 상기 저장층에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 단계;를 포함하여 이루어지며, 상기 (b)단계에서 이산화탄소를 주입함에 따라, 상기 (a)단계 완료 후에 상기 저장층의 공극을 채우고 있던 상기 저감제와 물은 함께 배출되어 상기 주입정 주변의 잔류수포화도가 낮아짐으로써 상기 저장층의 이산화탄소 주입성이 향상되는 것에 특징이 있다.
- [0011] 본 발명에 따르면, 상기 저감제는 계면활성제 또는 이산화탄소와 물에 모두 혼합(miscible)될 수 있는 물질을 사용할 수 있다. 예컨대, 상기 저감제는 아세톤, 메탄올, 에탄올, 아세트산 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0012] 본 발명에서 상기 저감제는 상기 주입정을 중심으로 미리 정해진 일정 반경 내에만 주입되도록, 저감제 주입량을 조절하는데 중요한 특징이 있다. 저장층 전체에 저감제를 확산시킬 필요는 없으며 오히려 비경제적이기 때문이다.
- [0013] 한편, 본 발명의 일 실시예에서는 상기 (b)단계에서 이산화탄소를 주입하는 중간에 상기 저감제를 재주입할 수 있다.
- [0014] 그리고, 상기 주입정 주변에 상기 저장층까지 연결되는 별도의 배출정을 시추하여, 상기 (b)단계에서 상기 저장층의 공극에서 나오는 상기 저감제와 물을 상기 배출정을 통해 회수할 수 있다. 그리고 상기 배출정을 통해 나온 저감제와 물을 상호 분리하여 상기 저감제를 재사용하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

- [0015] 본 발명에서는 이산화탄소 저장층에서 주입정 주변의 잔류수포화도를 낮춤으로써 주입정 주변의 이산화탄소 상대투과율을 향상시켜, 저장층 전체에서의 이산화탄소 주입성을 향상시킬 수 있다는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0016] 도 1은 암석코어 시료에 대한 상대유체투과도 실험의 결과를 나타낸 표이다.
- 도 2는 상대유체투과율 측정할 때의 주입되는 물과 이산화탄소의 함량비를 나타낸 표이다.
- 도 3은 도 2의 조건으로 유체들을 코어시료에 주입한 경우의 이산화탄소 포화도, 물과 이산화탄소의 상대투과도를 나타낸 그래프이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 5의 그래프는 사암으로 이루어진 대수층에 이산화탄소를 주입할 때의 CO₂-물의 상대유체투과도 그래프이고, 도 6의 그래프는 도 5의 대수층에 저감제를 전처리한 경우에 변화된 상대유체투과도 그래프이다.
- 도 7 및 도 8은 저류층 시뮬레이션에 활용된 격자시스템으로, 도 7은 평면이고, 도 8은 수직단면이다.
- 도 9는 주입정 주변의 격자구성이다(이때 파랑색은 일반적인 상대유체투과도 곡선을 사용하며 빨강색 격자는 잔류수포화도를 최소화시킨 것을 나타냄).
- 도 10은 시뮬레이션 결과로서 이산화탄소의 누적량을 나타낸 그래프이다.
- 도 11은 장기간 동안 이산화탄소를 주입시 이산화탄소의 누적량과 개선 정도를 나타낸 표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0017] 본 발명은 이산화탄소 포집 및 지중 저장 시스템(이하, "CCS"라 한다)에서 이산화탄소의 주입성을 향상시키기 위한 방법에 관한 것이다. CCS가 성공적으로 운용되기 위해서는 앞서도 설명하였듯이 대용량의 저장층과 원활한 주입성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 그리고 저장층의 용량과 주입성은 모두 저장층의 잔류수포화도 및 이산화탄소의 상대 투과도와 관련된다. 다만, 본 발명에서는 저장층의 용량의 증대는 주요 관심사가

아니며, 저장층의 주입성 향상이라는 점에 초점을 맞추고 있다는 점을 미리 밝혀둔다.

- [0018] 먼저, 본 발명에 대한 기초적 이해를 위하여 잔류수포화도 및 상대유체투과도에 대하여 설명하기로 한다.
- [0019] 암석(저류암) 내 유체의 투과율은 절대투과율, 유효투과율 및 상대유체투과율로 구분된다. 절대투과율이란 단상(single phase)의 유체가 암석을 통해 유동할 때의 흐름의 용이도에 관한 것이며, 유효투과율이란 물과 오일, 물과 기체 등과 같이 복수의 유체(multi phase)가 함께 암석을 통해 유동할 때의 각 성분의 흐름 용이도에 관한 것이며, 또한 상대유체투과율이란 절대투과율에 대한 각 성분의 유효투과율의 비로 나타낸다.
- [0020] 저류암 내에 단상의 유체만 존재할 경우 이 유체의 흐름을 절대투과율만으로 나타낼 수 있지만, 대부분의 저류암에는 2상 이상의 유체가 존재하며 이들은 서로의 흐름에 영향을 미치기 때문에 복수의 유체의 흐름을 나타내기 위한 상대유체투과율 개념이 반드시 필요하다.
- [0021] 상대유체투과율은 저류암 내 유체의 포화율과 비례하며, 유체(기체)의 포화율은 잔류수포화도(물과 기체가 유동한다고 가정할 때)에 의하여 큰 영향을 받는다.
- [0022] 이산화탄소와 물이 저장층에서 유동된다고 가정하여 이 저장층에 대한 암석 코어시료의 잔류수포화도와 상대유체투과율을 측정하는 실험에 대하여 도 2 및 도 3의 표를 참고하여 설명한다. 도 2는 상대유체투과율 측정할 때의 주입되는 물과 이산화탄소의 함량비를 나타낸 표이며, 도 3은 도 2의 조건으로 유체들을 코어시료에 주입한 경우의 이산화탄소 포화율, 물과 이산화탄소의 상대투과율을 나타낸 그래프이다.
- [0023] 실험에서는 먼저 코어시료에 대하여 건조, 가열 및 부압을 인가하여, 코어시료 내부의 공극을 완전하게 진공으로 만든 상태에서 이 공극을 물(염수, brine)로 완전히 포화시킨다. 공극은 완전히 물로 채워진 상태가 된다. 이러한 상태에서, 도 2의 표에 나타난 것처럼, point1 ~ point5까지 일정 시간 간격으로 물과 이산화탄소의 상대 주입량을 변경해가면서 코어시료에 유체들을 주입한다. 즉, 코어시료가 완전히 물로 포화된 조건에서, point1 지점에서는 물만 0.8cc 주입하고 이산화탄소는 주입하지 않았으며, point2부터 point4까지 이산화탄소의 양을 점차 늘려가면서 주입하였고, point5에서는 물은 주입하지 않고 이산화탄소만 주입하였다. 그리고 각 포인트에서 각 유체의 상대유체투과율을 구하였고 이산화탄소의 포화율을 측정하여, 도 3의 상대유체투과율 그래프로 나타냈다. 지금까지 이산화탄소의 포화율을 측정하는 것으로만 설명하였으나, 코어시료의 공극은 이산화탄소와 물에 의하여 포화되어 있으므로, 코어시료 내의 이산화탄소의 포화율이 0.2라면 역으로 물의 포화율은 0.8이 되는 것이므로, 도 3의 그래프에서 X축 좌표를 이산화탄소 또는 물어는 것으로 상정해도 된다. 다만, 2개의 유체 중 습윤도(wettability)가 상대적으로 높은 유체의 포화율을 기준으로 하는 것이 일반적이다.
- [0024] 도 3의 그래프를 참고하면, 코어시료를 완전히 진공으로 만든 상태에서 이산화탄소는 전혀 주입하지 않고 물만 주입한 경우 물의 상대투과율은 1이다. 그러나 이산화탄소의 양을 증가시켜 가면 이산화탄소의 상대투과율은 점차 높아지고 물의 상대투과율은 점차 하강하게 된다.
- [0025] point5의 지점에서는 물은 전혀 주입하지 않고 이산화탄소 가스만 주입하므로, 이 지점에서는 point1의 지점과 반대로 이산화탄소의 상대투과율이 1, 물의 상대투과율 0, 그리고 코어시료의 이산화탄소 포화율이 1이 되어야 하지만, 도 3의 그래프에 나타난 바와 같이, 코어시료 내 이산화탄소의 포화율은 1이 아니라 0.7정도에 머물고 있다.
- [0026] 즉, 물은 전혀 주입하지 않고 이산화탄소만 계속적으로 주입하는 경우라도 코어시료 내의 공극에는 물이 유착되어 더 이상 배출되지 않는 최소로 잔존하는 양이 있다는 것을 알 수 있다. 이렇게 최소로 잔존하는 물의 포화율을 잔류수포화도라고 한다.
- [0027] point1 지점도 마찬가지다. 즉, 본 실험에서는 처음에 초기화단계를 통해 인위적으로 코어시료 내의 공극을 완전히 진공으로 만들고 물을 채웠으므로, 물의 포화도가 1이 되었다. 그러나 point5의 지점에서 다시 역으로 물의 함량을 늘려가고 이산화탄소의 양을 줄여가는 과정을 통해 최종적으로 물만 100% 주입하는 경우, 원래의 point1지점으로 돌아가지 않고 코어시료 내 물의 포화도는 1미만으로 형성된다. 즉, 물만 100% 주입하는 경우라도 이산화탄소가 코어시료에 유착하여 배출되지 않는 최소량이 잔존한다. 즉, 자연상태의 저류층에서 다상의 유체가 유동될 때 각 유체의 최소 잔존량이 존재하게 되는데 이를 잔류포화도라고 한다.
- [0028] 잔류포화도는 CCS에서 실질적으로 매우 중요한 의미를 갖는다. 즉, CCS에서 이산화탄소를 저장하고자 할 때 저류층의 잔류수포화도가 낮으면 이산화탄소 주입가능량(저장층의 용량)이 커진다.
- [0029] 또한, 잔류수포화도가 낮으면 도 3의 그래프와 같이 이산화탄소의 포화율이 증가하여 이산화탄소의 상대투과율이 증대된다. 상대투과율의 증대는 이산화탄소의 주입성을 향상시킨다. 저장층의 이산화탄소의 주입성

(Injectivity Index, II)은 하기의 식(1)과 같이 상대투과율에 의해 결정된다.

$$II = q / \Delta p = \frac{k_{CO_2} h_i}{141.2 \mu_{CO_2} B_{CO_2} (\ln r_e / r_w + S)} \dots \text{식(1)}$$

여기서 k_{CO_2} 는 CO₂ 상에 대한 투과율로 절대투과율과 상대유체투과율의 곱으로 나타낸다. h 는 주입층의 두께, μ 는 점성도, r_e 와 r_w 는 경계까지와 주입정의 반경, S 는 스킨인자(skin factor)이며 위의 식에서 Injectivity의 단위는 bbl/psi이다.

k_{CO_2} 를 다시 나타내면 $k \cdot k_{CO_2}$ 이다. 이때 k 는 절대투과율(absolute permeability)로 암석의 물성이므로 수압과쇄 등을 하지 않을 경우 개선할 수 없다. 따라서 주입성은 이산화탄소의 상대투과도(k_{CO_2})를 증대시켜야 한다.

정리하면, CCS에서 이산화탄소의 주입성을 향상시키기 위해서는 저장층의 잔류수포화도를 낮추어야 하며, 본 발명은 저장층의 잔류수포화도를 낮춤으로써 CCS를 보다 경제적으로 운용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 중요한 점은 저장층 전체의 잔류수포화도를 낮추는 것이 아니라 주입정 주변의 잔류수포화도만을 낮추는 것을 목표로 한다. 저장층의 주입정 주변의 잔류수포화도를 낮추어 주는 것을 통하여 저장층 전체에서의 이산화탄소 주입성 향상에 목적을 두고 있다.

즉, 이산화탄소가 주입되는 지점(주입정 주변)에서 이산화탄소는 3차원의 방사형으로 퍼져 나가기 때문에, 주입 지점 근처에서의 투과성이 향상되면 저장층 전체에서의 투과성이 향상될 수 있기 때문이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 지중 가스 저장층의 주입성 향상방법을 설명하기 위한 도면이다.

도 4를 참고하면, 지상으로부터 지하 심부의 저장층(10)까지 주입정(20)이 설치되어 있다. 저장층(10)은 다공성 암질로서 공극률이 매우 크다. 본 발명에서는 먼저 주입정(20)을 통해 저장층(10)의 잔류수포화도를 저하시킬 수 있는 저감제를 고압으로 주입한다. 저장층(10)의 공극은 물로 채워져 있는 상태에서, 저감제가 주입됨에 따라 공극에서 일부의 물이 밀려 나가면서 그 자리를 저감제가 채우게 된다. 저감제는 저장층(10)의 공극을 따라 주입정(20) 주변으로 방사형으로 확산된다. 상기한 바와 같이, 저감제를 주입하면 주입정(20) 주변의 저장층(10) 내 공극은 저감제와 물에 의하여 포화된 상태가 된다.

상기한 상태에서 주입정(20)을 통해 이산화탄소를 주입하면 저감제와 물이 함께 공극으로부터 배출되면서 그 자리를 이산화탄소가 채우게 된다. 주목할 점은 잔류수포화도이다. 저감제를 사전에 주입하지 않고 물로 포화되어 있는 상태에서 이산화탄소를 주입하는 경우 대수층의 경우 잔류수포화도가 50% 정도이므로 공극에는 50% 정도의 이산화탄소 포화율을 보이게 된다. 그러나 저감제를 먼저 주입한 경우 공극 내 물이 더 많이 배출됨으로써 잔류수포화도가 획기적으로 저하된다. 즉, 이산화탄소의 포화율이 50%보다 훨씬 높아지는 결과를 나타낸다. 이는 저감제의 작용에 기인한다.

본 발명에서 저감제는 계면활성제 또는 혼합제가 사용될 수 있다. 혼합제로는 아세톤, 메탄올, 에탄올, 아세트산 중 하나 또는 이들을 혼합하여 사용할 수도 있다. 혼합제는 이산화탄소와 물에 모두 잘 섞이는(miscible) 성질을 가진다. 화학적으로는 혼합제는 물과 이산화탄소 모두에 잘 결합된다고 표현할 수도 있다. 혼합제가 공극 내 물과 결합(혼합)되어 있는 상태에서 이산화탄소가 주입되면 혼합제는 이산화탄소와도 결합된다. 이산화탄소가 계속적으로 주입 및 확산되면, 이산화탄소는 저감제와 함께 물을 바깥쪽으로 밀어내게 된다.

상기한 혼합제의 작용은 계면활성제의 일종인 비누나 세제와 비슷한 작용으로 설명할 수 있다. 즉, 비누는 친수성 부분과 친유성 부분을 모두 포함하고 있어 기름때가 비누의 친유성 부분에 결합된 상태에서 물로 손을 씻어내면 비누의 친수성 부분이 물에 결합되어 비누와 기름때가 모두 물과 함께 씻겨 내려가는 것과 마찬가지로 할 수 있다. 본 발명에서도 저감제로서 계면활성제를 사용하여 물과 이산화탄소 사이의 계면 장력을 줄임으로써 위에서 설명한바와 같은 동일한 성과를 얻을 수 있다.

상기한 바와 같이 저감제를 사용하면 공극 내 물이 계속적으로 배출되어 공극 내 잔류수포화도가 저감제를 사전 처리 하지 않은 경우에 비하여 훨씬 낮아지게 된다. 공극 내 잔류수포화도가 낮아지므로 거꾸로 이산화탄소의 포화율과 상대투과율은 증가하는 바, 이산화탄소의 주입성이 향상되는 결과로 이어진다.

이를 상대투과율 그래프로 나타내면 도 5 및 도 6의 그래프와 같다. 도 5의 그래프는 사암으로 이루어진 대수층에 이산화탄소를 주입할 때의 CO₂-물의 상대유체투과율 그래프이고, 도 6의 그래프는 도 5의 대수층에 저감제를 전처리한 경우에 변화된 상대유체투과율 그래프이다. 도 5의 그래프에서는 이산화탄소의 포화율이 60%를 하

회하고 투과율도 0.3 이하였지만, 저감제를 전처리한 도 6의 그래프에서는 이산화탄소의 공극 내 포화율이 80%를 상회하면서 상대투과율도 0.5까지 상승된다.

- [0042] 한편, 본 발명에서는 저감제를 저장층(10)에서 주입정(20) 주변에만 주입하므로 저감제의 주입량을 미리 결정하거나, 일정 압력으로 일정 시간 주입하는 등의 방식을 통해 주입정을 기준으로 일정 반경 내의 영역에만 저감제가 주입되도록 한다.
- [0043] 그리고, 본 발명의 다른 실시예에서는 주입정 주변에 저감제 배출정을 별도로 형성할 수 있다. 즉, 주입정 주변에 배출정을 형성하고, 주입정에 저감제를 단독으로 주입한 후, 이산화탄소를 주입하면서 배출정에서 저감제와 물을 배출시킬 수 있다. 또는 저감제와 이산화탄소를 함께 주입정을 통해 주입하면서 저장층의 공극으로부터 배출된 물과 저감제 및 이산화탄소를 함께 배출정으로 배출시킬 수 있다. 상기한 과정을 통해 공극 내 잔류수포화도를 낮추어 놓은 상태에서 이산화탄소만을 주입하여 주입성을 증대시킬 수도 있다. 그리고 배출정을 통해 회수된 유체는 저감제와 물 및 이산화탄소를 상호 분리하여 저감제는 다시 재사용할 수 있다.
- [0044] 또한, 본 발명의 일 실시예에서는 이산화탄소를 주입하는 중간에 저감제를 간헐적으로 또는 주기적으로 재주입함으로써 주입정 주변에 잔류수포화도를 낮출 수도 있을 것이다.
- [0045] 본 발명의 연구진에서는 이상에서 설명한 바와 같은 저장층 주입정 주변의 잔류수포화도 저감을 통한 이산화탄소의 주입성 향상 여부를 검증하기 위해 저류층시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 모델은 캐나다 'Computer Modeling Group'의 'GEM' 2013년 버전이다.
- [0046] 발명에서 관심을 갖는 것은 주입정 주변의 상대유체투과도가 개선되는 것이 전체 필드의 주입성에 미치는 영향이므로 방사상 좌표계(radial coordinate system)을 가정하였다. 즉, 도 7에 도시된 바와 같이, 360° 중 1/12인 30° 에 해당하는 부분만을 대상으로 하여 r 방향으로 50km를 15개, 수직방향으로 50m를 5개로 분할하는 총 75개 격자를 사용하였다. 경계조건은 no-flow, 초기조건은 최상부층이 심도 1,000m에 압력은 110기압으로 설정하였다.
- [0047] 발명의 검증을 위하여 첫 번째 격자의 경우 r 방향으로 0.11 m, 두 번째 격자는 0.27 m, 세 번째 격자는 0.65 m의 크기를 갖도록 주입정 주변 격자를 조밀하게 구성하였다. 주입정 주변의 격자 구성은 도 9에 나타내었다. 도 9에서 파랑색은 일반적인 상대유체투과도 곡선을 사용하며 빨강색 격자는 잔류수포화도를 최소화 시킨 것을 나타낸다.
- [0048] 비교를 위한 베이스라인으로 기존의 상대유체투과도만의 시뮬레이션을 실시하였으며 그 다음으로 주입정으로부터 0.45, 1.1, 16 미터 반경 크기로 잔류수포화도가 낮아지고 CO₂ 상대유체투과도가 높아졌다고 가정하였다. 모든 Case에서 주입정의 압력을 130기압으로 유지하면서 상대유체투과도가 개선된 지역의 크기만 달리하였다.
- [0049] 결과는 도 10의 그래프와 같다. 0.45m 반경지역만 개선된 경우에도 뚜렷한 차이를 확인할 수 있다. 그리고 도 11의 표(단위 ton)와 같이 각 1년, 10년, 20년 시점의 누적주입량을 비교할 경우 최소 5.5%에서 최대 19.7%까지 이산화탄소의 누적 주입량이 개선되는 것으로 확인되었다.
- [0050] 본 발명은 첨부된 도면에 도시된 일 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 수 있을 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 보호 범위는 첨부된 청구 범위에 의해서만 정해져야 할 것이다.

도면

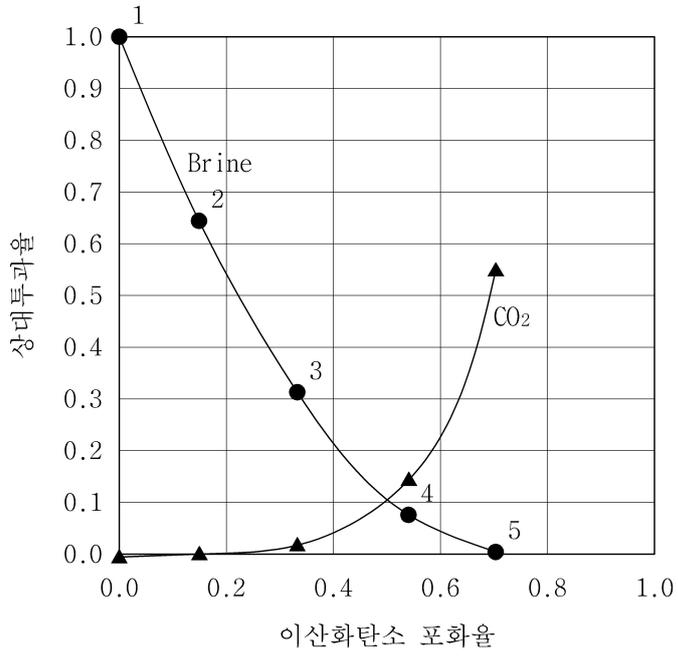
도면1

Sample	Length (cm)	Area (cm ²)	Porosity, %	Permeability, md	P & T, psi, °C	Swirr	k _{rCO2} at Swirr
Berea #1	30.3	11.9	17.1	100	1200, 35	0.53	0.22
Berea #2	30.2	11.9	17.5	96	1200, 35	0.57	0.23
Berea #3	30.2	11.9	18.4	236	1200, 35	0.55	0.23

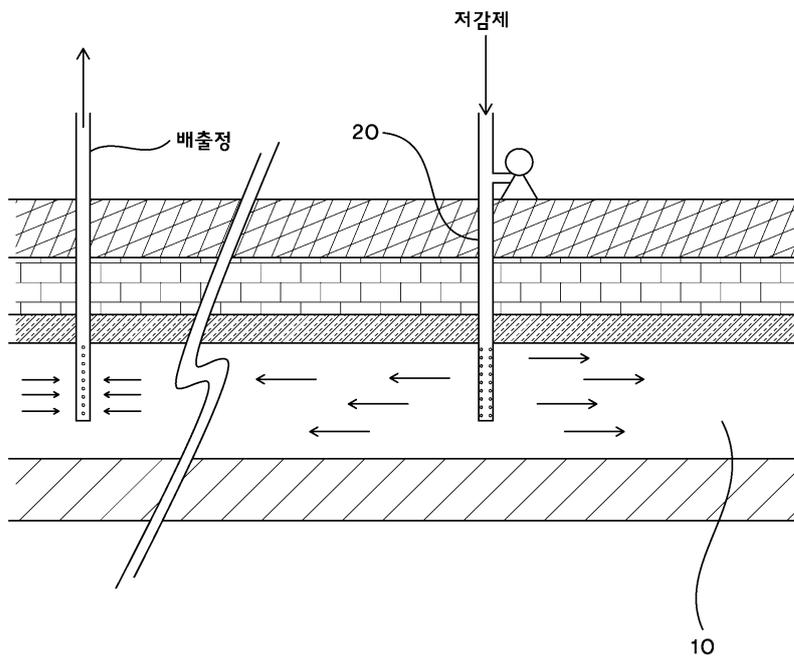
도면2

유량 포인트	Q _{brine}	Q _{CO2}
point 1	0.8	0
point 2	0.6	0.2
point 3	0.4	0.4
point 4	0.2	0.6
point 5	0	0.8

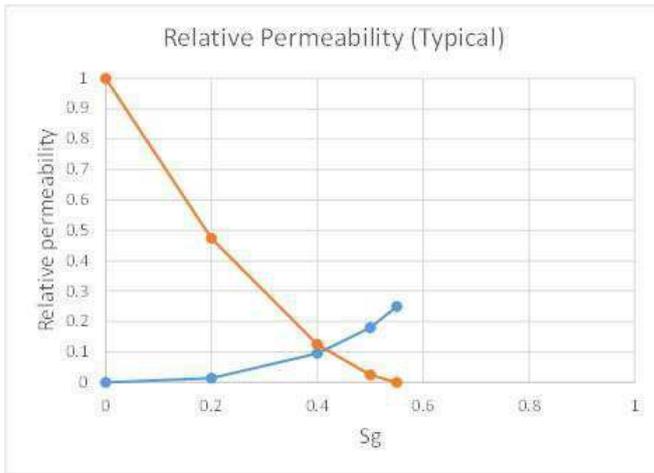
도면3



도면4



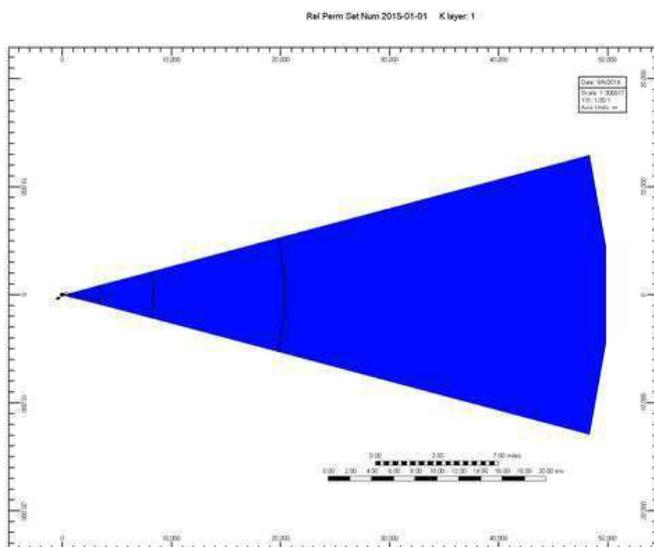
도면5



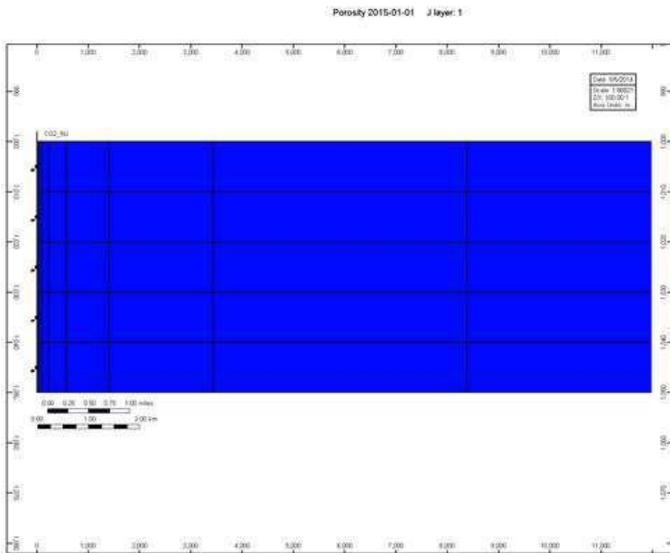
도면6



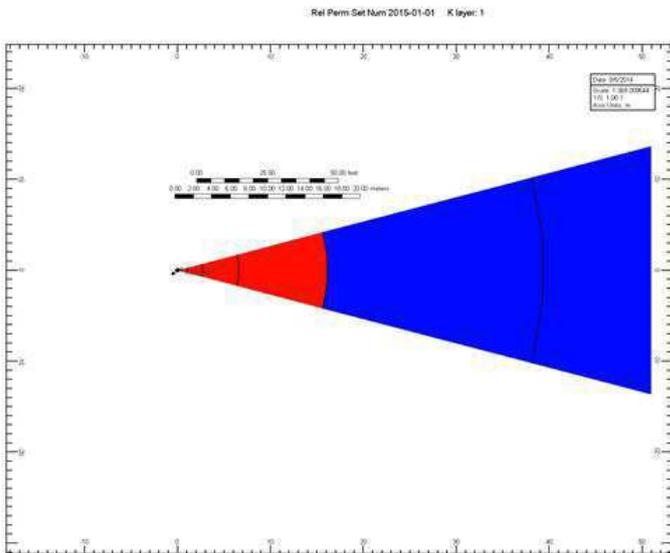
도면7



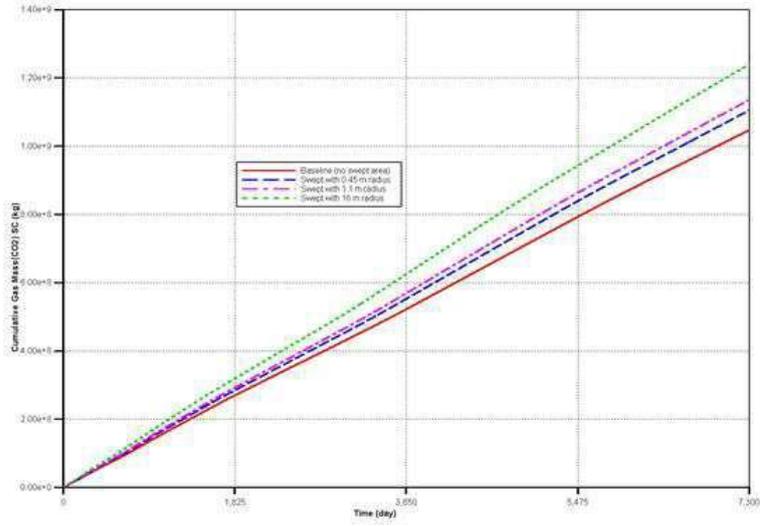
도면8



도면9



도면10



도면11

Time (day)	Case 1 (Baseline)	Case 2 (r=0.45 m)	Case 3 (r=1.1 m)	Case 4 (r=16 m)
365	55,000	58,168 (5.8%)	59,856 (8.8%)	65,435 (19.0%)
3650	522,873	553,222 (5.8%)	569,529 (8.9%)	625,620 (19.7%)
7300	1,047,514	1,105,521 (5.5%)	1,136,281 (8.5%)	1,239,917 (18.4%)