(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년03월09일
(11) 등록번호 10-1836871
(24) 등록일자 2018년03월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01M 3/28 (2006.01) *G01M 3/26* (2006.01)
G01N 21/3504 (2014.01) *G01N 21/61* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01M 3/2815 (2013.01)
G01M 3/26 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0107771
(22) 출원일자 2017년08월25일
심사청구일자 2017년08월25일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020090096622 A*
KR1020030079189 A
KR101379674 B1
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
주식회사 지오그린21
서울특별시 구로구 디지털로33길 55, 901호 (구로동, 이앤씨벤처드림타워2차)
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
전성천
서울특별시 노원구 동일로230길 63 조흥한신아파트 1동 303호 (상계동, 한신아파트)
천정용
서울특별시 강동구 고덕로 240 신동아아파트, 3동 101호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
전원

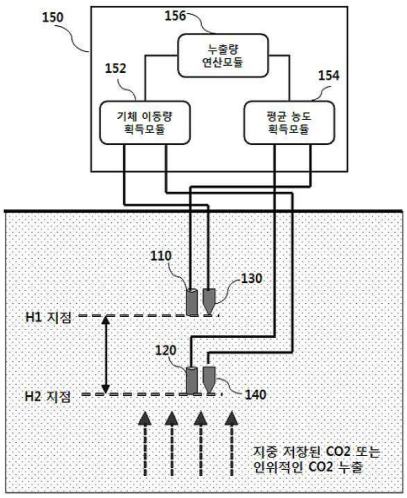
전체 청구항 수 : 총 5 항 심사관 : 한재섭

(54) 발명의 명칭 **지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템**

(57) 요 약

지중 이산화탄소 누출량을 실시간으로 모니터링할 수 있는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템이 개시된다. 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템은, 제1 이산화탄소 측정센서, 제2 이산화탄소 측정센서, 제1 기체압력 측정센서, 제2 기체압력 측정센서 및 이산화탄소 누출량 평가모듈을 포함한다. 제1 이산화탄소 측정센서는 지중의 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 기체압력을 측정한다. 제1 기체압력 측정센서는 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도를 측정한다. 제2 이산화탄소 측정센서는 지중의 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 기체압력을 측정한다. 제2 기체압력 측정센서는 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 측정한다. 이산화탄소 누출량 평가모듈은 제1 기체압력, 제2 기체압력, 제1 이산화탄소 농도 및 제2 이산화탄소 농도를 근거로 이산화탄소 누출량을 평가한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G01N 21/3504 (2013.01)
G01N 21/61 (2013.01)
(72) 발명자
이명재
경기도 성남시 분당구 동판교로 275 풍성신미주아파트 109동 701호 (삼평동, 봇들마을)
윤성택
서울특별시 성북구 월곡로14길 26 월곡래미안루나밸리아파트 108동 1003호 (하월곡동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2014001810001
부처명 환경부
연구관리전문기관 한국환경산업기술원
연구사업명 CO2 저장 환경관리기술개발사업
연구과제명 CO2 지중 저장 환경관리 기술 개발 (Integrated Environmental Management of Geological CO2 Storage)
기 여 율 1/1
주관기관 고려대학교 산학협력단
연구기간 2014.04.01 ~ 2018.03.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제1 기체압력과, 제2 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제2 기체압력을 각각 측정하는 단계;

제1 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도와, 제2 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 각각 측정하는 단계; 및

상기 제1 기체압력, 상기 제2 기체압력, 상기 제1 이산화탄소 농도 및 상기 제2 이산화탄소 농도를 근거로 이산화탄소 누출량을 평가하는 단계를 포함하되, 상기 이산화탄소 누출량(F_{CO_2})은

$$F_{CO_2} = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right) \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$

(여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극 내 기체의 동점성도(dynamic viscosity), P1은 제1 기체압력, P2는 제2 기체압력, L은 두 지점 사이의 수직적인 거리, C1은 제1 이산화탄소 농도, C2는 제2 이산화탄소 농도)에 의해 산출되는 것을 특징으로 하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 이산화탄소 누출량을 평가하는 단계는,

상기 제1 기체압력과 상기 제2 기체압력 간의 차이를 이용하여 기체 이동량 데이터를 획득하는 단계;

상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 이용하여 이산화탄소 평균 농도 데이터를 획득하는 단계; 및

상기 기체 이동량 데이터 및 상기 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량을 연산하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법.

청구항 4

제3항에 있어서, 상기 기체 이동량 데이터는 지표면에 대해 수직적인 이동량인 것을 특징으로 하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법.

청구항 5

지중의 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 기체압력을 측정하는 제1 이산화탄소 측정센서;

상기 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도를 측정하는 제1 기체압력 측정센서;

지중의 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 기체압력을 측정하는 제2 이산화탄소 측정센서;

상기 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 측정하는 제2 기체압력 측정센서; 및

상기 제1 기체압력, 상기 제2 기체압력, 상기 제1 이산화탄소 농도 및 상기 제2 이산화탄소 농도를 근거로 이산화탄소 누출량을 평가하는 이산화탄소 누출량 평가모듈을 포함하되, 상기 이산화탄소 누출량(F_{CO_2})은

$$F_{CO_2} = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right) \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$

(여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극 내 기체의 동점성도(dynamic viscosity), P1은 제1 기체압력, P2는 제2 기체압력, L은 두 지점 사이의 수직적인 거리, C1은 제1 이산화탄소 농도, C2는 제2 이산화탄소 농도)에 의해 산출되는 것을 특징으로 하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템.

청구항 6

삭제

청구항 7

제5항에 있어서, 상기 이산화탄소 누출량 평가 모듈은,

상기 제1 기체압력과 상기 제2 기체압력 간의 차이를 이용하여 기체 이동량 데이터를 획득하는 기체 이동량 획득모듈;

상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 이용하여 이산화탄소 평균 농도 데이터를 획득하는 평균 농도 획득모듈; 및

상기 기체 이동량 데이터 및 상기 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량을 연산하는 누출량 연산모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는 지중 이산화탄소 누출량(또는 유동량)을 모니터링할 수 있는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 오늘날 전세계적으로 큰 문제가 되고 있는 지구 온난화 현상은 이산화탄소가 가장 큰 요인으로 작용한다. 이산화탄소는 석탄을 이용하는 화력발전소, 철광석을 원료로 하는 제철소, 석유를 원료로 하는 석유화학공장 등과 같은 인간 활동을 영위하기 위한 산업체의 배출가스에 많이 포함되어 있다. 따라서, 지구 온난화 현상을 최대한 방지하기 위해서는, 상기와 같은 원인 등에 의해 발생하는 이산화탄소가 처리되어야 한다.

[0003] 이산화탄소의 처리기술 중 가장 각광받고 있는 것은 이산화탄소를 포집하여 지하 지층에 저장하는, 이른바 이산화탄소 지중 저장이다. 이산화탄소 지중 저장 기술은 산업체 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여, 지하 800m 이상에 반영구적으로 저장하는 기술이다.

[0004] 이때, 지중에 저장된 이산화탄소가 다시 지표로 누출되지 않아야 하나, 지중에 저장된 이산화탄소는 여러 가지 이유로 지표로 누출될 수 있다. 이산화탄소가 누출되는 경우, 이산화탄소 지중 저장사업은 많은 비용을 투입한 상태에서 실패로 끝날 수 있고, 또한 지상설비의 안전성을 확보하지 못하게 된다.

[0005] 이산화탄소의 지중 저장시 저장된 이산화탄소의 누출여부를 모니터링하는 것은 매우 중요하며, 혹시 누출이 감지되는 경우에는 이산화탄소 누출량(flux)을 측정 또는 계산하여, 이산화탄소 지중 저장의 성공 및 실패 여부를 판단하여야 한다.

[0006] 이와 관련하여 현재 지표면에서 이산화탄소의 농도와 누출량(flux)을 측정하는 장치가 개발되어 있으며, 지중에서는 이산화탄소 농도 측정 장치가 개발되어 있다.

[0007] 그러나, 지중에서 이산화탄소 누출량을 측정 또는 실시간 모니터링하는 장치는 현재까지 개발되어 있지 않다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-1080095호 (2011. 10. 31. 자 등록)(이산화탄소가 지중 저장되는 부지의 비포화대 이산화탄소 농도 모니터링 시스템 및 모니터링 방법)

(특허문헌 0002) 한국등록특허 제10-1454007호 (2014. 10. 16. 자 등록)(누출 검출 시스템 및 방법)

(특허문헌 0003) 한국등록특허 제10-1520721호 (2015. 05. 11. 자 등록)(전도성 나노 입자를 이용한 이산화탄소 거동 모니터링 장치 및 방법)

(특허문헌 0004) 한국등록특허 제10-1118622호 (2012. 02. 14. 자 등록)(이산화탄소의 저장 상태 모니터링 및 누출 여부의 검출 방법)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 이에 본 발명의 기술적 과제는 이러한 점에 착안한 것으로, 본 발명의 목적은 지중 이산화탄소 농도와 토양내 기체의 압력변화를 측정하여 지중 이산화탄소 누출량(또는 유동량)을 실시간으로 모니터링할 수 있는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법을 제공하는 것이다.

[0010] 본 발명의 다른 목적은 상기한 상기한 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법을 수행하는 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기한 본 발명의 목적을 실현하기 위하여 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법은, 제1 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제1 기체압력과, 제2 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제2 기체압력을 각각 측정하는 단계; 제1 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도와, 제2 깊이의 지중에 대응하여 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 각각 측정하는 단계; 및 상기 제1 기체압력, 상기 제2 기체압력, 상기 제1 이산화탄소 농도 및 상기 제2 이산화탄소 농도를 근거로 이산화탄소 누출량을 평가하는 단계를 포함한다.

[0012] 일실시예에서, 상기 이산화탄소 누출량(F_{CO_2})은 $$F_{CO_2} = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right) \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$ (여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극내 기체의 동점성도(dynamic viscosity), P1은 제1 기체압력, P2는 제2 기체압력, L은 두 지점 사이의 수직적인 거리, C1은 제1 이산화탄소 농도, C2는 제2 이산화탄소 농도)에 의해 산출될 수 있다.

[0013] 일실시예에서, 상기 이산화탄소 누출량을 평가하는 단계는, 상기 제1 기체압력과 상기 제2 기체압력 간의 차이를 이용하여 기체 이동량 데이터를 획득하는 단계; 상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 이용하여 이산화탄소 평균 농도 데이터를 획득하는 단계; 및 상기 기체 이동량 데이터 및 상기 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량을 연산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0014] 일실시예에서, 상기 기체 이동량 데이터는 지표면에 대해 수직적인 이동량일 수 있다.

[0015] 상기한 본 발명의 목적을 실현하기 위하여 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템은, 제1 이산화탄소 측정센서, 제2 이산화탄소 측정센서, 제1 기체압력 측정센서, 제2 기체압력 측정센서 및 이산화탄소 누출량 평가모듈을 포함한다. 상기 제1 이산화탄소 측정센서는 지중의 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 기체압력을 측정한다. 상기 제1 기체압력 측정센서는 상기 제1 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도를 측정한다. 상기 제2 이산화탄소 측정센서는 지중의 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 기체압력을 측정한다. 상기 제2 기체압력 측정센서는 상기 제2 깊이에 배치되어, 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 측정한다. 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈은 상기 제1 기체압력, 상기 제2 기체압력, 상기 제1 이산화탄소 농도 및

상기 제2 이산화탄소 농도를 근거로 이산화탄소 누출량을 평가한다.

[0016] 일실시예에서, 상기 이산화탄소 누출량(F_{CO_2})은 $$F_{CO_2} = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right) \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$ (여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극 내 기체의 동점성도(dynamic viscosity), P1은 제1 기체압력, P2는 제2 기체압력, L은 두 지점 사이의 수직적인 거리, C1은 제1 이산화탄소 농도, C2는 제2 이산화탄소 농도)에 의해 산출될 수 있다.

[0017] 일실시예에서, 상기 이산화탄소 누출량 평가 모듈은, 기체 이동량 획득모듈, 평균 농도 획득모듈 및 누출량 연산모듈을 포함할 수 있다. 상기 기체 이동량 획득모듈은 상기 제1 기체압력과 상기 제2 기체압력 간의 차이를 이용하여 기체 이동량 데이터를 획득한다. 상기 평균 농도 획득모듈은 상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 이용하여 이산화탄소 평균 농도 데이터를 획득한다. 상기 누출량 연산모듈은 상기 기체 이동량 데이터 및 상기 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량을 연산한다.

발명의 효과

[0018] 이러한 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템에 의하면, 지중의 수직적인 두개의 지중 심도에서 지중 공극 내 기체의 이산화탄소 농도와 기체의 압력변화를 실시간으로 측정하여 지중 이산화탄소 누출량(또는 유동량)을 실시간으로 모니터링할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템을 설명하기 위한 개략도이다.

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법 및 그 시스템을 보다 상세하게 설명하고자 한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0021] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다. 첨부된 도면에 있어서, 구조물들의 치수는 본 발명의 명확성을 기하기 위하여 실제보다 확대하여 도시한 것이다.

[0022] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.

[0023] 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0024] 또한, 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0025] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템을 설명하기 위한 개략도이다.

[0026] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 시스템은, 제1 이산화탄소 측정센

서(110), 제2 이산화탄소 측정센서(120), 제1 기체압력 측정센서(130), 제2 기체압력 측정센서(140) 및 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)을 포함한다.

[0027] 상기 제1 이산화탄소 측정센서(110)는 지중의 제1 깊이(H1)에 배치되어 토양 공극내 제1 기체압력을 측정하고, 측정된 제1 기체압력 데이터를 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)에 제공한다. 본 실시예에서, 제1 기체압력이라는 용어와 제1 기체압력 데이터라는 용어는 혼용적으로 사용한다.

[0028] 상기 제2 이산화탄소 측정센서(120)는 지중의 제2 깊이(H2)에 배치되어 토양 공극내 제2 기체압력을 측정하고, 측정된 제2 기체압력 데이터를 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)에 제공한다. 본 실시예에서, 제2 기체압력이라는 용어와 제2 기체압력 데이터라는 용어는 혼용적으로 사용한다.

[0029] 본 실시예에서, 제2 깊이(H2)는 제1 깊이(H1)보다 깊다. 본 실시예에서, 상기 제1 이산화탄소 측정센서 및 상기 제2 이산화탄소 측정센서 각각은 비분산적외선(Non Dispersive Infra-Red; NDIR) 센서일 수 있다.

[0030] NDIR 센서는 이산화탄소 농도를 측정하기 위해 바람직하게 사용된다. 통상적으로, 지중 내 이산화탄소는 일반적으로 지중 내 기체 시료를 채취하여 가스크로마토그래피(Gas Chromatography)로 분석하거나, NDIR 센서를 이용하여 측정할 수 있다. 이중에서 시료 채취와 가스크로마토그래피를 이용한 지중 내 이산화탄소의 농도 분석은 많은 시간이 소요되며, 많은 인력과 비용이 소요된다. 상기 분석법은 결정적으로 이산화탄소 농도 증가시 빠르게 대응할 수 있는 시간적인 여유가 없게 된다. 이에 반면, NDIR 센서는 기체 시료 내의 이산화탄소 함량을 측정하는 센서로서, 간편하고 정확도를 높일 수 있는 장점이 있으므로, 이를 이용하는 것이 더 바람직하다고 볼 수 있다.

[0031] 상기 제1 기체압력 측정센서(130)는 상기 제1 깊이(H1)에 배치되어 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도를 측정하고, 측정된 제1 이산화탄소 농도 데이터를 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)에 제공한다. 본 실시예에서, 제1 이산화탄소 농도라는 용어와 제1 이산화탄소 농도 데이터라는 용어는 혼용적으로 사용한다.

[0032] 상기 제2 기체압력 측정센서(140)는 상기 제2 깊이(H2)에 배치되어, 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도를 측정하고, 측정된 제2 이산화탄소 농도 데이터를 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)에 제공한다. 본 실시예에서, 제2 이산화탄소 농도라는 용어와 제2 이산화탄소 농도 데이터라는 용어는 혼용적으로 사용한다.

[0033] 상기 이산화탄소 누출량 평가모듈(150)은 기체 이동량 획득모듈(152), 평균 농도 획득모듈(154) 및 누출량 연산모듈(156)을 포함하고, 상기 제1 기체압력 데이터와 상기 제2 기체압력 데이터 간의 차이를 이용하여 기체 이동량을 평가하고, 상기 제1 이산화탄소 농도 데이터와 상기 제2 이산화탄소 농도 데이터의 평균 농도 데이터를 계산하고, 수직적인 이산화탄소 누출량을 평가한다.

[0034] 상기 이산화탄소 누출량(F_{CO_2})은 아래와 같은 수식 1에 의해 산출될 수 있다.

[0035] [수식 1]

[0036]
$$F_{CO_2} = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right) \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$

[0037] 여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극 내 기체의 동점성도(dynamic viscosity), P1은 제1 기체압력, P2는 제2 기체압력, L은 두 지점 사이의 수직적인 거리, C1은 제1 이산화탄소 농도, C2는 제2 이산화탄소 농도이다.

[0038] 상기 기체 이동량 획득모듈(152)은 상기 제1 기체압력과 상기 제2 기체압력 간의 차이를 이용하여 기체 이동량 데이터를 획득하고, 획득된 기체 이동량 데이터를 상기 누출량 연산모듈(156)에 제공한다.

[0039] 상기 평균 농도 획득모듈(154)은 상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 이용하여 이산화탄소 평균 농도 데이터를 획득하고, 획득된 이산화탄소 평균 농도 데이터를 상기 누출량 연산모듈(156)에 제공한다.

[0040] 상기 누출량 연산모듈(156)은 상기 기체 이동량 데이터 및 상기 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량을 연산한다.

[0041] 그러면, 이하에서 상기한 수식 1을 유도하는 일련의 과정을 설명한다.

[0042] 이산화탄소 누출량(수직적인 이동량, flux)은 아래와 같은 수식 2를 통해 계산할 수 있다.

[0043] [수식 2]

[0044] $$F_{CO_2} = q_{gas} \times C_{CO_2}$$

[0045] 여기서, F_{CO_2}는 이산화탄소 이동량(flux), q_{gas}는 기체 이동량, C_{CO_2}는 이산화탄소 농도이다.

[0046] 지중의 수직적인 두 지점에서 기체의 이동량(q_{gas})은 지하매질의 기체 전도도(gaseous conductivity)와 두 지점에서 기체 포텐셜(potential)의 차이를 이용하여 아래와 같은 수식 3을 통해 계산할 수 있다.

[0047] [수식 3]

[0048] $$q_{gas} = -K_{gas} \times I = -K_{gas} \times \frac{\Delta H_{gas}}{\Delta z}$$

[0049] 여기서, K_{gas}는 지하 매질의 기체 전도도(gaseous conductivity), I는 지중공극 내 기체 포텐셜 구배(gradient), ΔH_{gas}기체 포텐셜의 차이(길이 단위로 표현), Δz는 두 지점의 수직적인 거리 차이이다. 식 앞에 붙는 음(-)은 포텐셜이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐름을 의미한다.

[0050] 기체 전도도(gaseous conductivity, K_{gas})는 지하수의 수리전도도(hydraulic conductivity, K_{water})와 동일하게 아래와 같은 수식 4로 구성된다.

[0051] [수식 4]

[0052] $$K_{gas} = \frac{\rho g k}{\mu}$$

[0053] 여기서, ρ는 토양 공극 내 기체의 밀도, g는 중력가속도, k는 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability), μ는 토양 공극 내 기체의 동점성도(dynamic viscosity)이다.

[0054] 이중에서 지하 매질의 고유투과도(intrinsic permeability)는 지중 이산화탄소 농도 및 누출량 모니터링을 시작하기 전에 투기시험(pneumatic test) 등을 통하여 도출되어야 한다.

[0055] 길이 단위로 표현된 기체 포텐셜(Φ)은 아래와 같은 수식 5와 같이 압력 포텐셜과 고도 포텐셜로 구성되다.

[0056] [수식 5]

[0057] $$\Phi = \frac{P}{\rho g} + z$$

[0058] 여기서, P는 기체압력, z는 기준면 대비 고도이다.

[0059] 따라서, 지중의 두 지점 H_1, H_2의 기체 포텐셜 구배는 아래와 같은 수식 6에 의해 계산될 수 있다.

[0060] [수식 6]

[0061] $$I = \frac{\Delta \Phi}{|\Delta z|} = \frac{\left(\frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2\right) - \left(\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1\right)}{|z_2 - z_1|}$$

[0062] 여기서, P_i는 H_i지점의 기체압력, ρ_i는 H_i지점의 밀도, z_i는 H_i지점의 고도이다.

[0063] I는 양(+) 또는 음(-)의 값을 모두 가질 수 있는데, 이는 기체의 흐름 방향이 반대로 된다는 의미이다.

[0064] 두 지점 사이의 수직적인 거리를 L이라고 하고, 두 지점의 거리가 근접하여 기체의 밀도와 점성도에 차이가 거의 없다고 가정하면, 아래와 같은 수식 7과 같이 변형이 가능하다.

[0065] [수식 7]

[0066] $$I = \frac{\Delta\Phi}{|\Delta z|} = \frac{\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + z_2 - z_1}{L} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g L} + 1$$

[0067] 여기서, 이산화탄소가 지하 심부에서 천부로 이동하는 것을 평가하는 것이므로, H_1는 상대적으로 심부 지점, H_2는 상대적으로 천부 지점으로 두면, 천부 지점의 고도가 높으므로 $z_2 - z_1$는 L과 같다.

[0068] 따라서, 지중에서의 기체 이동량(q_{gas})는 아래와 같은 수식 8에 의해 계산될 수 있다.

[0069] [수식 8]

[0070] $$q_{gas} = -K_{gas} \times I = -\frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g L} + 1 \right) = \frac{\rho g k}{\mu} \times \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho g L} - 1 \right)$$

[0071] 위의 수식 8을 이용하면, 지중의 2개 지점의 압력 차이를 실시간으로 측정함으로써 지중에서 기체 이동량을 실시간으로 모니터링할 수 있다.

[0072] 참고로 자연상태에서 지중 이산화탄소의 농도는 질소나 산소의 그것에 비하여 매우 낮은 함량을 가지므로, 대기 성분의 밀도와 동점성도를 이용할 수 있으나, 이산화탄소 농도가 크게 증가하는 경우에는 몰분율 등을 고려하여 변경해야 한다. 지중의 평균 온도와 압력 조건을 고려할 수도 있다.

[0073] 지중의 수직적인 두 지점에서 이산화탄소의 누출량(수직적인 이동량, Flux)은 기체 이동량과 이산화탄소 농도의 곱으로 계산할 수 있다.

[0074] 그런데, 이산화탄소 농도는 지중의 상부와 지중의 하부에서 다소 다르게 나타나므로, 각 심도에서의 농도를 이용하여 이산화탄소 누출량을 계산할 수 있으며, 기체 이동량이 두 지점 사이의 값이므로 두 지점의 평균 이산화탄소 농도를 이용하여 하나의 이산화탄소 누출량을 계산할 수 있다.

[0075] [수식 9]

[0076] $$F_{CO_2} = q_{gas} \times C_{CO_2} = q_{gas} \times \frac{(C_1 + C_2)}{2}$$

[0077] 여기서, C_i는 i지점의 이산화탄소 농도이다.

[0078] 기체의 농도는 부피비율 또는 몰비율 농도이므로, 질량/부피 형태로 변형이 필요하다.

[0079] 이상에서 설명된 바와 같이, 본 발명에 따르면, 지중의 수직적인 두개의 지중 심도에 이산화탄소 측정센서와 기체압력 측정센서를 각각 배치하여 지중 공극 내 기체의 이산화탄소 농도와 기체의 압력변화를 실시간으로 측정하여 지중 이산화탄소 누출량을 실시간으로 모니터링할 수 있다. 따라서, 혹시 누출이 감지되는 경우에도 이산화탄소 누출량이 측정 또는 계산될 수 있어, 이산화탄소 지중 저장의 성공 및 실패 여부를 판단할 수 있다.

[0080] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 지중 이산화탄소 누출 모니터링 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0081] 도 2를 참조하면, 제1 깊이의 토양 공극내 제1 기체압력이 측정되고(단계 S110), 제2 깊이의 토양 공극내 제2 기체압력이 측정된다(단계 S120). 본 실시예에서, 제1 기체압력이 측정된 후 제2 기체압력이 측정되는 것을 예로 설명하였으나, 제2 기체압력이 측정된 후 제1 기체압력이 측정될 수도 있고, 제1 기체압력과 제2 기체압력이 동시에 측정될 수도 있다.

[0082] 상기 제1 기체압력 및 상기 제2 기체압력 간의 압력차이를 이용하여 기체 이동량 데이터가 획득된다(단계 S130).

[0083] 제1 깊이의 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도가 측정되고(단계 S102), 제2 깊이의 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도가 측정된다(단계 S122). 본 실시예에서, 제1 이산화탄소 농도가 측정된 후 제2 이산화탄소 농도가 측정되는 것을 예로 설명하였으나, 제2 이산화탄소 농도가 측정된 후 제1 이산화탄소 농도가 측정될 수도 있고, 제1 이산화탄소 농도와 제2 이산화탄소 농도가 동시에 측정될 수도 있다.

[0084] 상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화탄소 농도를 근거로 토양 공극내 이산화탄소 평균 농도 데이터가 획득된다(단계 S124). 예를들어, 이산화탄소 평균 농도 데이터는 상기 제1 이산화탄소 농도와 상기 제2 이산화

탄소 농도의 산출 평균값일 수 있다.

[0085] 본 실시예에서, 기체 이동량 데이터가 획득되는 단계가 수행된 후 이산화탄소 평균 농도 데이터가 획득되는 단계가 수행되는 것을 설명하였으나, 이산화탄소 평균 농도 데이터가 획득되는 단계가 수행된 후 기체 이동량 데이터가 획득되는 단계가 수행될 수도 있다. 한편, 기체 이동량 데이터가 획득되는 단계와 이산화탄소 평균 농도 데이터가 획득되는 단계가 동시에 수행될 수도 있다.

[0086] 이어, 단계 S130에서 획득한 기체 이동량 데이터와 단계 S124에서 획득한 이산화탄소 평균 농도 데이터를 근거로 수직적인 이산화탄소 누출량이 평가된다(단계 S130).

[0087] 여기에서의 방법(들)의 동작들이 특정한 순서로 도시되고 설명되었지만, 각 방법의 동작들은 특정한 동작들이 역순서로 수행될 수도 있도록 또는 특정한 동작이 다른 동작들과 적어도 부분적으로 동시에 수행될 수도 있도록 변경될 수도 있다. 다른 실시예에서, 개별 동작들의 명령들 또는 서브-동작들은 단속적 및/또는 교호 방식에 있을 수도 있다.

[0088] 상술한 명세서에서, 본 발명은 본 발명의 특정한 예시적인 실시예들을 참조하여 설명되었다. 그러나, 첨부한 청구항들에 설명된 본 발명의 더 넓은 사상 및 범위를 벗어나지 않고 다양한 변경물들 및 변동물들이 이루어질 수도 있다는 것이 명백할 것이다. 따라서, 명세서 및 도면들은 제한적인 관점 보다는 예시적인 관점으로 간주되어야 한다.

부호의 설명

[0089] 110 : 제1 이산화탄소 측정센서 120 : 제2 이산화탄소 측정센서

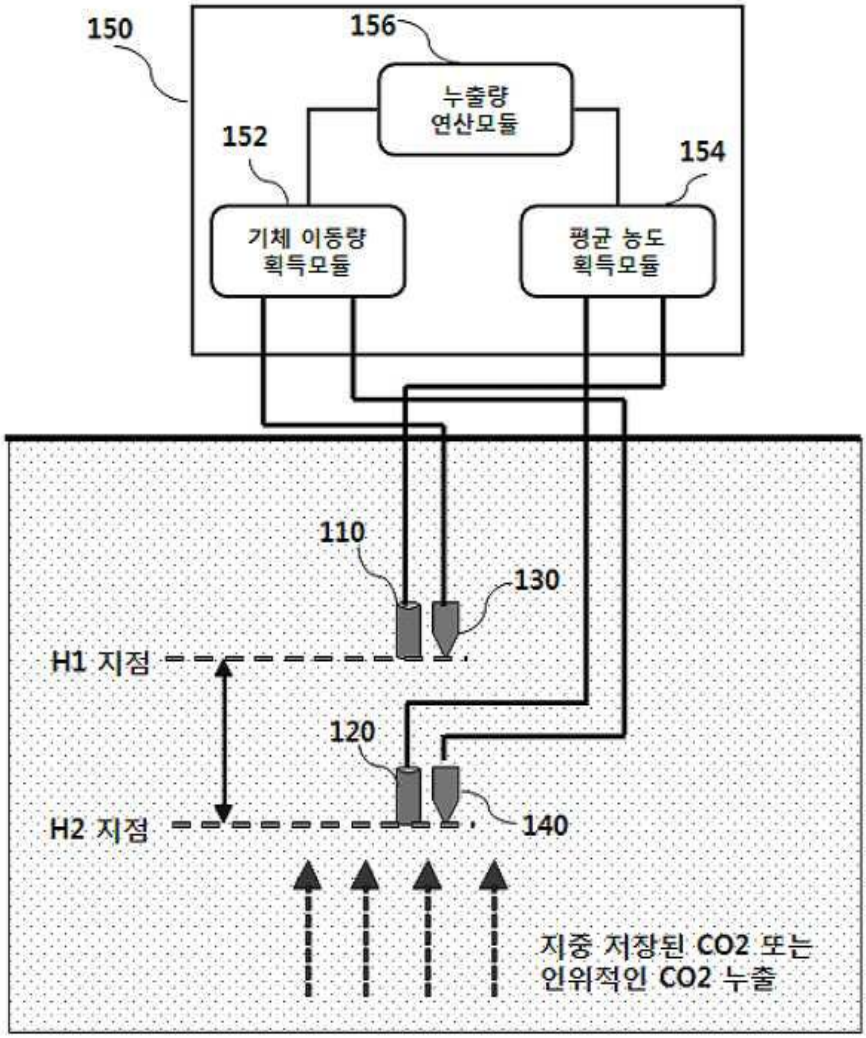
130 : 제1 기체압력 측정센서 140 : 제2 기체압력 측정센서

150 : 이산화탄소 누출량 평가모듈 152 : 기체 이동량 획득모듈

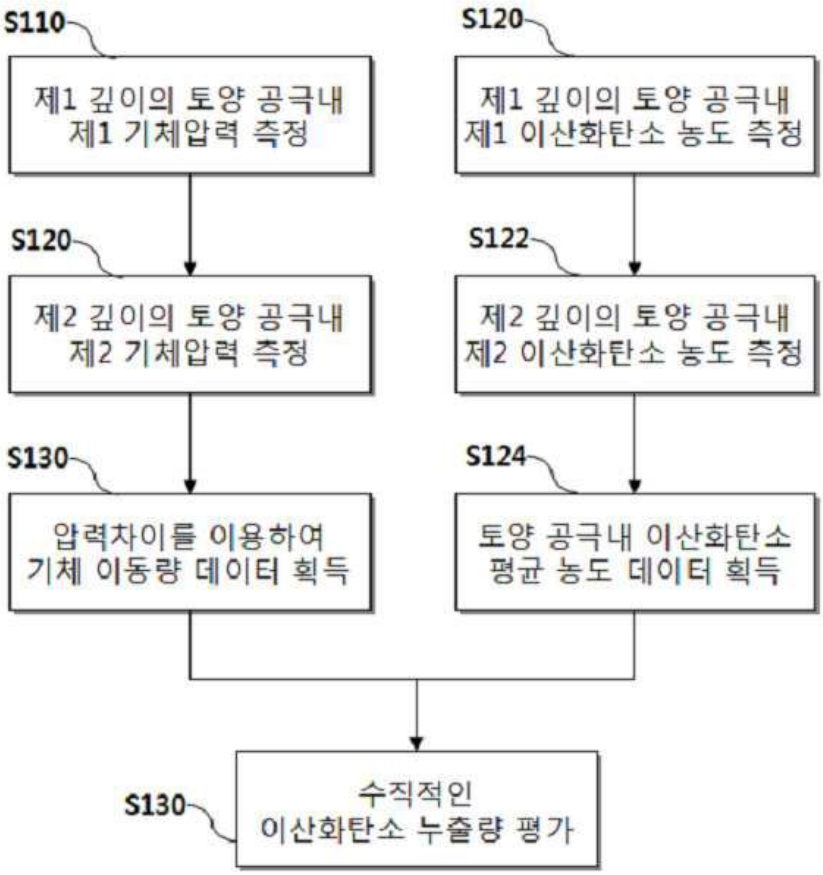
154 : 평균 농도 획득모듈 156 : 누출량 연산모듈

도면

도면1


150
156
누출량
연산모듈
152
154
기체 이동량
획득모듈
평균 농도
획득모듈
110
130
H1 지점
120
H2 지점
140
지중 저장된 CO2 또는
인위적인 CO2 누출

도면2


S110
제1 깊이의 토양 공극내 제1 기체압력 측정
S120
제1 깊이의 토양 공극내 제1 이산화탄소 농도 측정
S120
제2 깊이의 토양 공극내 제2 기체압력 측정
S122
제2 깊이의 토양 공극내 제2 이산화탄소 농도 측정
S130
압력차이를 이용하여 기체 이동량 데이터 획득
S124
토양 공극내 이산화탄소 평균 농도 데이터 획득
S130
수직적인 이산화탄소 누출량 평가