



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2010년06월21일  
(11) 등록번호 10-0964713  
(24) 등록일자 2010년06월10일

(51) Int. Cl.  
G01V 3/00 (2006.01) G01V 3/38 (2006.01)  
G06F 19/00 (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2010-0023976  
(22) 출원일자 2010년03월17일  
심사청구일자 2010년03월17일  
(56) 선행기술조사문헌  
논문 2007  
US7319332 B2  
논문 2001

(73) 특허권자  
한국지질자원연구원  
대전 유성구 가정동 30번지  
(72) 발명자  
박삼규  
대전광역시 유성구 신성동 한울아파트 108동 1303호  
유타카 사사키  
일본, 후쿠오카 카스야군 신구쵸 미나토자카 2-1-3  
조성준  
대전광역시 유성구 진민동 엑스포아파트 107동 1405호  
(74) 대리인  
강경찬, 변창규, 정인규

전체 청구항 수 : 총 7 항

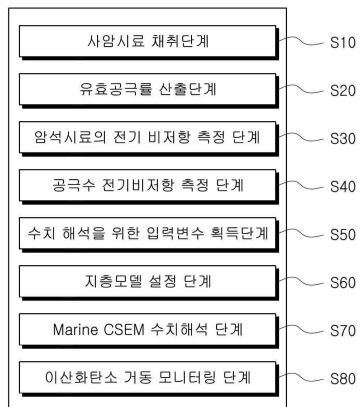
심사관 : 김혜원

(54) 해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법

(57) 요약

본 발명은 해저지층에서의 사암시료 채취단계(S10); 상기 채취한 시료의 유효공극률을 산출하는 단계(S20); 상기 채취한 시료의 전기비저항을 측정하는 단계(S30); 농도가 다른 공극수의 전기비저항을 측정하는 단계(S40); 수치 해석을 위한 입력변수 획득단계(S50); 지층모델 설정단계(S60); 상기 입력변수를 이용한 수치해석 수행단계(S70); 수치해석결과에 의해 이산화탄소 거동을 모니터링 단계(S80)를 포함하는 것을 특징으로 하는, 해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법에 관한 것이다.

대표도 - 도11



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 GP2009-023

부처명 지식경제부

연구사업명 기본사업

연구과제명 광상 맞춤형 자원탐사. 채광최적기술개발

주관기관 한국지질자원연구원

연구기간 2009년01월01일 ~ 2011년 12월 31일

---

**특허청구의 범위**

**청구항 1**

해저지층에서의 사암시료 채취단계(S10); 상기 채취한 시료의 유효공극률을 산출하는 단계(S20); 상기 채취한 시료의 전기비저항을 측정하는 단계(S30); 농도가 다른 공극수의 전기비저항을 측정하는 단계(S40); 수치해석을 위한 입력변수 획득단계(S50); 지층모델 설정단계(S60); 상기 입력변수를 이용한 수치해석 수행단계 (S70); 수치해석결과에 의해 이산화탄소 거동을 모니터링 단계(S80)를 포함하는 것을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**청구항 2**

청구항 1에 있어서,

상기 S40 단계에서, 전기비저항 측정을 하기 위한 시스템은,

전류를 흘려 보내는 송신부(function generator);

전위차를 측정하는 신호조정부(signal conditioner);

전류 및 전위차로부터 전기비저항을 산출하는 자료처리부(data processor) 및 측정용기로 구성됨을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**청구항 3**

청구항 1에 있어서,

상기 S50 단계에서의 입력변수 결정은, 사암 시료의 전기비저항 측정결과로부터 이하의 아키(Archie) 경험식을 이용하여, 실험정수 a, 고결계수(cementation factor, m)가 산출되되, 상수 a 및 고결계수 m 값의 획득은, 상기 S30 단계에서 측정된 시료의 전기전도도(전기비저항의 역수)와 공극수의 전기전도도의 상관관계 그래프로부터 회귀곡선(regressive curve) 일차함수 절편과 기울기에 의해 얻어지는 것을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

$$R = F R_w S_w^{-2} \quad F = \frac{R}{R_w} = a \Phi^{-m}$$

(R은 시료의 전기비저항,  $\phi$ 는 공극률, n은 상수,  $S_w$ 는 물포화도)

**청구항 4**

청구항 1에 있어서,

상기 S60 단계에서의 수치해석을 위한 지층 모델은, 2층 지질구조로 단순화하여 사암층 위에 불투수층의 셰일이 덮개암으로 존재하고, 사암층이 CO<sub>2</sub> 주입대상이 되며, 주입영역이 일정하게 정해지는 것으로 설정되는 것을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**청구항 5**

청구항 1에 있어서,

상기 S70 단계는 해양 CSEM(MARINE CONTROLLED SOURCES ELECTROMAGNETICS)에 의한 수치해석이 수행되는 단계인 것을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**청구항 6**

청구항 1에 있어서,

상기 S70 단계와 S80 단계의 이산화탄소 거동 모니터링 방법은,

해저 염수 대수층에 이산화탄소가 주입되는 경우 주입된 영역에서 전기비저항이 변하는 것에 의거,

이산화탄소 주입 전, 후에 대하여 Marine CSEM(CONTROLLED SOURCES ELECTROMAGNETICS)에 의한 수치해석적 탐사를 반복적으로 수행하여,

이산화탄소 투입 전, 후에 있어서의 지층의 전기장 진폭과 위상의 변화를 이용함으로써 이산화탄소의 주입범위와 거동을 모니터링할 수 있는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**청구항 7**

청구항 6에 있어서,

상기 S70 단계와 상기 S80 단계에서의 이산화탄소 모니터링 방법은,

지층 모델에 대하여 송신 주파수를 고정하고, 송신기를 일정위치에 고정시킨 상태에서 수치해석이 수행되고, CO<sub>2</sub>를 주입하기 전과 후의 정규화된 전기장 진폭과 위상차를 획득함으로써, 이산화탄소 거동에 대한 모니터링이 수행되는 것을 특징으로 하는,

해양 전자탐사를 이용한 염수 대수층 내에서의 이산화탄소 거동을 모니터링하는 방법.

**명세서**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 해저 사암 지층 내에 주입된 이산화탄소의 거동을 모니터링하기 위한 방법에 관한 발명으로서, 보다 구체적으로는 해양 (Marine) CSEM (Controlled-Sources Electromagnetics)의 수치해석 결과에 의해서 해양 염수 대수층 내에서 이산화탄소의 거동을 모니터링하는 방법에 대한 것이다.

[0002] 즉, 해저에서 채취한 사암을 이용하여 염화나트륨(NaCl) 농도가 다른 여러 가지 용액에 포화시켜 전기비저항을 측정함으로써 아키(Archie)의 경험식을 유도하고, 이 경험식으로부터 사암층 내의 이산화탄소 주입량에 따른 전기비저항을 산출할 수 있는 경험식을 정립하며, 또한 이산화탄소를 지중에 저장하기에 적합한 다공질 사암과 이를 덮고 있는 불투수층의 세일로 이루어진 단순 지층 모델을 만들고, 이산화탄소 주입량에 따른 사암층의 전기비저항 입력값을 경험식으로부터 산출한다. 염수로 포화되어 있는 사암 지층에 이산화탄소를 주입하면 전기비저항이 상승하는데 해양 CSEM의 수치해석을 통해서 이산화탄소 주입 전과 후의 지층 전기장 진폭과 위상 변화로부터 사암층 내에서 이산화탄소의 거동을 모니터링 할 수 있는 방법에 관한 것이다.

**배경기술**

[0003] 온실가스 감축을 위한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 지중 저장에 있어서 CO<sub>2</sub> 거동 모니터링 기술 개발이 매우 중요하다. 실내 및 파일럿 사이트에서의 전기비저항 및 탄성파속도를 이용하고 있지만, 해저 CO<sub>2</sub> 지중 저장에 대한 모니터링 기

술 개발이 탄성과 탐사 외는 전무한 상태이다.

- [0004] 국내에서는 이산화탄소(Carbon dioxide) 지중(地中) 저장에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있지만, 아직까지 현장 실증 단계에는 이르지 못하고 있다. 그 이유 중 하나는 육상 퇴적분지 중에서 CO<sub>2</sub> 지중저장의 파일럿 사이트(여러가지 관련 실험, 실측을 하기에 적합한 장소를 말함)로 적합한 부지 선정이 쉽지 않기 때문이다.
- [0005] 종래 기술로서는, 경산분지 및 호남분지 등에 분포하고 있는 사암층을 대상으로 CO<sub>2</sub> 지중저장 가능성과 추정 매장량을 예비 평가하고 있지만, 사암층의 CO<sub>2</sub> 저장 능력을 좌우할 수 있는 공극률이 2~8% 범위로 작고, CO<sub>2</sub> 주입 후 누출에 대한 지질조건의 충족 여부에 대한 조사 필요성을 남겨놓고 있다.
- [0006] 일본 나고야(Nagaoka) 지역이나 독일 케친(Ketzin) 지역의 CO<sub>2</sub> 지중저장 파일럿 사이트의 지층특성 및 지질구조를 보면, CO<sub>2</sub> 주입 대상이 되는 사암층은 공극률이 20% 이상이고, 이를 투수성이 낮은 이암층이 덮고 있어 CO<sub>2</sub> 주입 후 누출되지 않는 지질조건을 갖추고 있다(Andrea Forster et al., 2006; Xue, et al., 2006). 국내에도 이와 비슷한 지층특성 및 지질구조를 가진 대륙붕에서 물리탐사 및 시추조사의 자료 분석을 통하여 CO<sub>2</sub> 해양 지중저장의 가능성을 시사하고 있다.
- [0007] 특히 2004년부터 양질의 천연가스를 생산 중인 동해-1 가스전이 포함된 고래 V 구조의 경우, CO<sub>2</sub> 저장 잠재력이 1억 5천만 톤 이상으로 추정되고 있다. 또한 울릉분지 내에서 다수의 가스 발견 구조를 비롯한 23개의 탐사, 평가, 생산정 자료가 있으므로 이를 활용할 경우 수 억 톤 이상의 저장 잠재력을 확보할 것으로 기대하고 있다.
- [0008] CO<sub>2</sub> 지중저장 기술이 실용화되기 위해서는 무엇보다도 지중에 주입된 CO<sub>2</sub> 거동 및 저장 포텐셜을 평가할 수 있어야 하며, 이를 위해서 실내실험 및 파일럿 사이트에서 다양한 실험이 이루어지고 있다.
- [0009] 실내에서 행하는 실험으로는 사암에 CO<sub>2</sub>를 주입하기 전과 후에 전기비저항이나 탄성과속도를 측정하여 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 전기비저항의 증가나 탄성과속도 감쇄를 이용하여 주입량 및 거동을 평가하고 있다(Onishi, et al., 2006; Xue and Lei, 2006). 또한 파일럿 사이트에서는 탄성과 토모그래피탐사 뿐만 아니라 중력탐사, Well logging 등 다양한 탐사의 모니터링 기법을 이용하여 CO<sub>2</sub> 지중 거동을 평가하고 있다(Xue, et al., 2006; Saito et al., 2006; Sherlock et al., 2006).
- [0010] 이들 탐사방법 중 전기비저항 및 탄성과 토모그래피 탐사는 시추공을 이용해야 하는 어려움은 있지만, 탐사결과의 분해능이 높아 CO<sub>2</sub> 지중 거동을 해석하는데 유용한 방법으로 소개되고 있다.
- [0011] 해양 이산화탄소 지중 저장에서는 전기비저항 및 탄성과 토모그래피 탐사 방법의 접근이 용이하지 않아 해양탄성과 탐사를 사용한 사례가 보고되고 있다(Chadwick, et al., 2009). 그러나 탄성과탐사의 경우 CO<sub>2</sub> 주입 전과 후에는 큰 속도 감쇄가 일어나 주입범위를 해석하는 데는 유리하지만, CO<sub>2</sub> 주입량이 늘어남에 따라 속도 감쇄가 일어나지 않아 주입량을 정량적으로 평가하기에는 어려운 단점이 있다.
- [0012] 반면 전기비저항은 CO<sub>2</sub> 주입 전과 후뿐만 아니라 CO<sub>2</sub> 주입량이 늘어남에 따라 전기비저항이 계속 증가(지층의 전기장 진폭과 위상이 변함)하므로, CO<sub>2</sub> 주입범위 뿐만 아니라 주입량을 정량적으로 평가하기에 용이하기 때문에

해양 CSEM (Controlled-Sources Electromagnetics)에 의한 적용성을 검토할 필요가 있다.

[0013] 따라서 본 발명에서는 다음과 같은 절차에 의해서 해저 지층 저장된 이산화탄소의 거동을 모니터링 하는 방법을 제시하고자 한다.

[0014] 즉 첫째, 우리나라 동해-1 가스전 돌고래 V구조에서 채취된 사암 시료를 사용하여 전기비저항을 측정하고, 둘째, 이를 이용한 Archie의 경험식으로부터 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 사암층의 전기 비저항을 산출하며, 셋째, 돌고래 V 구조에 대한 단순 지층모델을 설정하여 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 사암층의 전기비저항을 입력 자료로 사용하여 CO<sub>2</sub> 주입 전과 후의 해양 CSEM에 의한 수치해석을 수행하고, 넷째, 이 결과로부터 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 전기장 진폭과 위상차를 계산하여 사암층 내에서의 CO<sub>2</sub> 주입 거동을 모니터링 하는 방법이 개시된다.

### 선행기술문헌

#### 비특허문헌

- [0015] (비특허문헌 0001) Andrea Forster et al., 2006; Xue, et al., 2006
- (비특허문헌 0002) Onishi, et al., 2006; Xue and Lei, 2006
- (비특허문헌 0003) Xue, et al., 2006; Saito et al., 2006; Sherlock et al., 2006
- (비특허문헌 0004) Chadwick, et al., 2009
- (비특허문헌 0005) Chadwick, et al., 2009
- (비특허문헌 0006)

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0016] 본 발명의 목적은, 해저에 분포되어 있는 사암층 내에 이산화탄소가 주입된 후, 그 거동을 모니터링하는 방법을 수립하고자 하는 것이다.

#### 과제의 해결 수단

[0017] 전술한 목적을 달성하기 위하여 본 발명은 사암시료 채취단계(S10); 시료의 유효공극률 산출단계(S20); 시료의 전기비저항 측정단계(S30); 공극수의 전기비저항 측정단계(S40); 수치해석을 위한 입력변수 획득단계(S50); 지층모델 설정단계(S60); 수치해석단계(S70); 수치해석결과에 의해 이산화탄소 거동을 모니터링하는 단계(S80)을 포함하는 것을 특징으로 하되, 상기 전기비저항 측정을 하기 위한 시스템은 전류를 흘려 보내는 송신부(function generator), 전위차를 측정하는 신호조정부(signal conditioner), 전류 및 전위차로부터 전기비저항을 산출하는 자료처리부(data processor) 및 측정용기로 구성됨을 특징으로 한다.

[0018] 상기 수치해석을 위한 입력변수 결정은, 사암 시료의 전기비저항 측정결과로부터 아래의 아키(Archie) 경험식을 이용하여 실험정수 a, 고결계수(cementation factor, m)을 산출하는 것을 특징으로 한다.

$$R = F R_w S_w^{-2} \quad F = \frac{R}{R_w} = a \Phi^{-m}$$

[0019]

[0020] 여기서 R은 시료의 전기비저항,  $\phi$  는 공극률, n은 상수,  $S_w$  는 물포화도이다.

[0021] 상기 상수 a 및 고결계수 m 값의 획득은, 실험으로부터 측정된 시료의 전기전도도(전기비저항의 역수)와 공극수의 전기전도도의 상관관계 그래프(도 4)로부터 회귀곡선(regressive curve) 일차함수 절편과 기울기에 의해 얻어지는 것을 특징으로 한다.

[0022] 상기 수치해석 과정에서는, 해저 염수 대수층에 이산화탄소가 주입되면 주입된 영역에서 전기비저항이 변하며, 이러한 이산화탄소 주입 전후의 전기비저항 값을 반복적으로 수치 해석을 수행함으로써, 이산화탄소의 주입범위와 거동을 모니터링할 수 있게 된다. 바람직하게는 상기 수치해석 수행은 해양 CSEM(CONTROLLED SOURCES ELECTROMAGNETICS) 기법을 적용한다.

**발명의 효과**

[0023] 온실가스 감축을 위한 CO<sub>2</sub> 지중 저장에 있어서 CO<sub>2</sub> 거동 모니터링 기술 개발이 중요하며 실내 및 파일럿 사이트에서 전기비저항 및 탄성파속도를 이용하고 있지만, 해저 CO<sub>2</sub> 지중 저장에 대한 모니터링 기술 개발이 탄성파탐사 외는 전무한 상태인데, 본 발명에 따른 이산화탄소 거동 모니터링 방법의 효과를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

[0024] 즉, 동해의 울릉분지 등 해저 CO<sub>2</sub> 지중 저장에 대한 모니터링 기술 개발을 위하여, 동해-1 가스전에서 채취한 사암시료를 이용하여 실내 전기비저항 측정결과로 아키(Archie) 경험식을 산출하고, 이를 바탕으로 단순 해저 지층 모델에 대한 입력 값을 설정하여 해양 CSEM에 대한 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 사암층에 대해 CO<sub>2</sub> 주입 전 값에 대해 30%와 50%의 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때를 정규화 시킨 진폭과 위상차가 변화하는 것을 확인하였으며, 또한 송신주파수 4.25 헤르츠(Hz)를 사용하고 CO<sub>2</sub>가 사암층에 50% 포화되었을 때 읍셋(송신기로부터 수신기까지의 거리) 1,600 m의 경우 정규화 시킨 진폭은 1.6 정도, 위상차는 42도 정도로 매우 크게 나타남을 확인하는 등 해양 CSEM탐사가 해저 CO<sub>2</sub> 거동 모니터링 기술로 매우 유용하게 이용될 수 있음을 입증하였으며 이로써, 시료로 채취한 암석과 공극수의 전기비저항을 측정하여 수치해석에 필요한 입력변수를 산출하고 이를 이산화탄소 거동을 위한 수치해석기법에 이용함으로써, 용이하게 해저 사암 내에 주입된 이산화탄소의 거동을 파악할 수 있게 된다.

**도면의 간단한 설명**

- [0025] 도 1는 국내 대륙붕 VI-1광구 내 동해-1 가스전 위치를 나타낸 것이고,
- 도 2는 고래 V구조 지역의 현장 탄성파탐사 자료를 이용한 최종 중합 단면도이고,
- 도 3a, 3b는 전기비저항 측정기 모식도이고,
- 도 4a, 4b, 4c 는 사암 시료에 대한 공극수와 암석의 전기전도도 관계를 나타낸 것이며,
- 도 5는 해양 CSEM 수치해석을 위한 동해-1 가스전 고래 V구조의 단순한 2층 지질구조 모델이고,
- 도 6는 해양 CSEM 탐사 모식도이며,
- 도 7는 사암층에 CO<sub>2</sub> 주입 전과 CO<sub>2</sub>를 30%, 50%로 포화시켰을 때의 해양 CSEM 수치해석 결과이고,

도 8는 도 7과 같은 조건에서 송신주파수만 4.25 Hz로 바꾼 경우의 결과이며,

도 9는 CO<sub>2</sub> 주입 전과 30%와 50%의 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때의 3가지 지층 모델에 대하여 송신주파수 4.25 Hz를 사용하여 얻은 전기장 진폭(a)과 위상(b)을 읍셋(송신기로부터 수신기까지의 거리) 800 m에서 2,200 m까지 표시한 것이며,

도 10은 도 9의 결과를 CO<sub>2</sub> 주입 전의 전기장 진폭과 위상에 대하여 CO<sub>2</sub>를 30%와 50%로 주입했을 때의 진폭과 위상을 정규화 시켜 표시한 것이다.

도 11은 본발명의 모니터링 방법의 각 단계를 도시한 것이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0026] 염수에 포화되어 있는 사암층의 경우 전기비저항에 영향을 미치는 주요인으로는 공극률, 간극수의 전기비저항을 들 수 있다. 이들 요인 중에서 간극수의 전기비저항이 변하면 지층의 전기비저항도 변한다. 국내외적으로 CO<sub>2</sub> 지층 저장으로 가장 이상적인 지질 및 지층 조건은 배사구조를 이루며, 공극률이 큰 사암 지층 위에 셰일층이 덮개암으로 있는 경우이다. 이러한 염수 대수층은 공극률이 크고 간극수의 전기전도도가 높아서 지층의 전기비저항이 수 ohm-m로 비교적 낮은데 초임계 상태의 CO<sub>2</sub>를 주입하게 되면 간극수의 일부를 밀어내고 그 자리에 CO<sub>2</sub>가 채워지기 때문에 지층의 전기비저항은 높아지며 전기장의 진폭과 위상이 변한다.

[0027] 사암을 이용한 실내 CO<sub>2</sub> 주입실험 결과에 의하면 공극의 50% 정도까지 CO<sub>2</sub>가 채워지는 것으로 알려져 있는데, 염수보다 초임계 상태나 액체 상태의 CO<sub>2</sub>가 전기전도도가 낮기 때문에 CO<sub>2</sub> 주입량이 증가하면 지층의 전기비저항은 높아진다.

[0028] 해저 CO<sub>2</sub> 지층저장에 있어서 해결해야 할 과제 중에 하나가 CO<sub>2</sub> 주입 거동에 대한 모니터링 기술 개발이고, 해저 염수 대수층에 CO<sub>2</sub>가 주입되면 주입된 영역에서는 전기비저항이 변하기 때문에 CO<sub>2</sub> 주입 전과 후를 해양 CSEM으로 반복 탐사함으로써 전기장 진폭과 위상차로부터 CO<sub>2</sub> 주입범위 및 거동을 평가할 수 있다는 것에 착안하여 본 발명이 완성되었다.

[0029] 상기 목적을 달성하기 위한, 본 발명의 바람직한 실시 단계를 요약하여 설명하면 아래와 같다.

[0030] 본 발명은 사암시료 채취단계(S10); 시료의 유효공극률 산출단계(S20); 시료의 전기비저항 측정단계(S30); 공극수의 전기비저항 측정단계(S40); 수치해석을 위한 입력변수 획득단계(S50); 지층모델 설정단계(S60); 수치해석 단계(S70); 수치해석결과에 의해 이산화탄소 거동 모니터링 단계(S80)을 포함하는 것을 특징으로 하되, 상기 전기비저항 측정을 하기 위한 시스템은 전류를 흘려 보내는 송신부(function generator), 전위차를 측정하는 신호조정부(signal conditioner), 전류 및 전위차로부터 전기비저항을 산출하는 자료처리부(data processor) 및 측정용기로 구성됨을 특징으로 한다.

[0031] 상기 수치해석을 위한 입력변수 결정은, 사암 시료의 전기비저항 측정결과로부터 아래의 아키(Archie) 경험식을 이용하여 실험정수 a, 고결계수(cementation factor, m)을 산출하는 것을 특징으로 한다.



$$R = F R_w S_w^{-2} \quad F = \frac{R}{R_w} = a \Phi^{-m}$$

[0032]

[0033] 여기서 R은 시료의 전기비저항,  $\phi$ 는 공극률, n은 상수,  $S_w$ 는 물포화도이다.

[0034] 상기 상수 a 및 고결계수 m 값의 획득은, 실험으로부터 측정된 시료의 전기전도도(전기비저항의 역수)와 공극수의 전기전도도의 상관관계 그래프(도 4)로부터 회귀곡선(regressive curve) 일차함수 절편과 기울기에 의해 얻어지는 것을 특징으로 한다.

[0035] 상기 수치해석 과정에서는, 해저 염수 대수층에 이산화탄소가 주입되면 주입된 영역에서 전기장의 진폭과 위상이 변하며, 이러한 이산화탄소 주입 전후의 전기장 진폭과 위상변화에 대한 반복적인 수치 해석을 수행함으로써, 이산화탄소의 주입범위와 거동을 모니터링할 수 있게 된다. 바람직하게는 상기 수치해석 수행은 해양 CSEM 기법을 적용한다.

[0036] 이제, 상술한 본 발명의 첫번째 단계부터 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예 및 본 발명의 효과 확인을 위한 실험방법, 수치해석 준비과정 및 수치해석 결과 분석 등에 대하여 자세히 설명한다.

[0037] (1단계) 사암시료 채취단계

[0038] 우리나라 동해-1 가스전 고래 V구조에서 채취된 사암 시료를 사용하여 전기비저항을 측정하는 단계에 대하여 설명 한다.

[0039] 우리나라는 1980년대 이후부터 한국석유공사(KNOC) 주도로 대륙붕탐사가 이루어지고 있으며, 이 중 VI-1광구 내 국내 유일의 생산유전인 동해-1 가스전(도 1)에는 고래 V를 비롯한 6개의 시추공에서 천연가스 및 원유가 발견되었다.

[0040] 도2 에서는, 동해-1 가스전 고래 V구조 지역의 현장 탄성파탐사 자료를 이용한 최종 중합 단면도를 나타내고 있다. 점선 타원 부분이 가스 저류층 영역으로 사암 시료를 채취한 위치이다. 저류층의 지질시대는 Mid-Miocene이며, 각 층(layer)에 대한 구체적 깊이(depth), 세일을 소량 함유하고 있는 사암층으로 물리검층 결과에 의한 지층의 탄성파속도(p파와 s파 속도) 및 포아송비(poisson ratio), 밀도(density)는 표 1에 나타낸 것과 같다.

**표 1**

Layers	Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\sigma$ (Poisson' ratio)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
B2	2,235	3,330	1,960	0.235	2.300
B4	2,270	3,330	2,050	0.195	2.300

[0041]

[0042] <표 1. 물리검층에 의한 고래 V구조 저류층의 물성>

[0043] (2단계) 유효공극률 산출 단계 및 암석시료의 전기비저항 측정 단계

[0044] 동해 가스전 고래 V 구조에서 채취한 사암을 공극 내의 유체성질에 따라 전기비저항이 달라지는 것을 파악하기

위하여 기본물성 및 전기비저항을 측정하였다. 사용된 사암시료는 원주형으로 성형하였으며, 유효 공극률( $\phi$ )은 아래의 식 (1)로부터 산출하였다.

$$\phi = (W_a - W_d) / (W_a - W_w)$$

[0045] 식 (1)

[0046] 여기서,  $W_a$ 와  $W_w$ 는 성형된 암석시료인 공시체를 진공펌프로 72시간 이상 강제습윤 시킨 후에 각각 공기 중에서의 수중에서의 무게(g)이며,  $W_d$ 는 공시체를 건조로에서 72시간 이상 건조시킨 후의 무게(g)이다.

[0047] 표 2는 암석시료의 크기와 유효 공극률을 나타내고 있는데, 유효공극률은 약 15~18%의 범위에 속한다. 표에서 Samples(시료)에 대한 길이(length), 지름(diameter), 공극률(porosity)의 구체적 값을 보이고 있다.

표 2

Samples	Length (mm)	Diameter (mm)	Porosity (%)
B2-1	108.56	53.49	18.50
B2-2	104.22	52.61	18.04
B4-1	101.85	52.23	15.49

[0048]

[0049] <표 2. 사암 시료의 크기 및 공극률>

[0050] 암석 시료의 전기비저항을 측정하기 위하여 도 3과 같은 전기비저항 측정 시스템을 이용하였다. 이 측정시스템은 전류를 흘려 보내는 송신부(function generator), 전위차를 측정하는 신호조정부(signal conditioner), 전류 및 전위차로부터 전기비저항을 산출하는 자료처리부(data processor) 및 측정용기로 구성되어 있다.

[0051] 암석시료의 측정용기는 도 3 (b)와 같이 절연체의 아크릴을 사용하여 6면체로 만들었으며 공시체는 양쪽의 스펀들을 이용하여 고정시킬 수 있게 하였다. 전기비저항을 측정할 때 공시체 양단의 전류 및 전위전극은 80 메쉬(mesh)의 구리 망을 사용했으며, 전극과 공시체 사이에는 0.1N(농도)의 염화나트륨 용액에 포화시킨 여과지를 삽입하였다.

[0052] 또한 공시체의 전기비저항 측정 중 공시체 표면의 수분이 증발되지 않도록 하기 위하여 측정용기 바닥에 소량의 물을 부고 뚜껑을 닫아 공기 중에 수분이 포화상태를 유지하도록 하였다. 암석시료의 양 단면에 축 방향으로 평행하게 전류가 흘렀을 때 전위전극으로부터 전위차를 측정하여 아래 식(2)로부터 전기비저항을 산출하였다.

$$R = \frac{S}{L} \frac{\Delta V}{I}$$

[0053] 식 (2)

[0054] 여기서 R은 공시체의 전기비저항(ohm-m), S는 공시체의 단면적(cm<sup>2</sup>), L은 공시체의 길이(cm), I는 전류(A)이고  $\Delta V$ 는 전위차(V)를 나타낸다.

[0055] (3단계) 공극수 전기비저항 측정단계

[0056] 사암을 농도가 다른 3가지 염화나트륨 용액에 포화시켜 전기비저항을 측정한 결과를 표 3에 나타낸다. 사암 시료의 공극률은 15~18% 범위이다. 표에서 샘플(samples)에 대한 구체적인 공극수 전기비저항(pore fluid resistivity), 샘플의 전기비저항(resistivity), 공극률(porosity)을 보이고 있다.

[0057] 동일 사암시료에 대해서는 공극수의 전기비저항이 높을수록 암석시료의 전기비저항도 높아지고 있으며, 동일한 공극수의 전기비저항이라도 유효 공극률이 큰 사암시료일수록 체적함수량이 많아 전기비저항은 낮게 나타난다.

[0058] 그러나 B4-1 시료보다 B2-2 시료의 유효공극률이 커지만 동일 공극수의 전기전도도에 대해서 B4-1 시료보다 B2-2 시료의 전기비저항이 높다. 이것은 사암에 포함되어 있는 세일이나 점토 등의 세립분 함유량이 B4-1 보다 B2-2 시료가 적기 때문이다.

표 3

Samples	Pore fluid resistivity (ohm-m)	Resistivity (ohm-m)	Porosity (%)
B2-1	0.314	4.26	18.50
	0.490	6.96	
	0.728	9.34	
B2-2	0.314	4.86	18.04
	0.490	7.93	
	0.728	10.78	
B4-1	0.314	4.70	15.49
	0.490	7.68	
	0.728	10.41	

[0059]

[0060] <표 3. 3가지 NaCl 용액에 포화시켜 전기비저항을 측정한 결과>

[0061] (4단계) 수치해석을 위한 입력변수 획득 단계

[0062] 사암의 전기비저항은 공극률, 포화도, 공극수의 전기비저항 등에 의하여 크게 좌우되며, Archie(1942)에 의한 경험식이 널리 이용되고 있다. 이 경험식은 사암의 저류능력을 평가하기 위하여 지층의 전기비저항  $R$ , 공극수의 전기비저항  $R_w$  및 포화도  $S_w$  사이의 관계를 아래 식 (3)으로 나타낸다.

$$R = F R_w S_w^{-2}$$

[0063] 식 (3)

[0064] 여기서  $F$ 는 지층비저항계수(Formation factor)라고 불리며 아래 식 (4)와 같다.

$$F = \frac{R}{R_w} = a \Phi^{-m}$$

[0065] 식 (4)

[0066] 여기서  $a$ 는 실험정수로서 경험적으로 0.6~3.5사이의 값을 가지며,  $\phi$ 은 지층의 공극률이다.  $m$ 은 고결계수(cementation factor)로 공극의 기하학적 형태 및 고결의 정도에 따라서 다르지만, 일반적으로 1.4~2.2의 값을 가진다. 아키(Archie)의 경험식은 간극수의 전기비저항을 알면 지층의 공극률을 평가할 수 있기 때문에 석유 저류량 산출에 많이 사용되어 왔다.

[0067] 동해-1 가스전 고래 V 구조에서 채취한 사암시료를 농도가 다른 3가지 염화나트륨 용액에 포화시켜 측정된 전기비저항을 이용하면 Archie 경험식에서의 고결계수  $m$ 을 구할 수 있다. 식 (3)과 (4)에서 암석의 전기비저항을 역수로 취하면 암석의 전기전도도가 되고, 암석시료가 염화나트륨 용액으로 포화된 상태임으로  $S_w$ 가 1이 된다. 따라서 암석시료의 전기전도도( $\sigma$ )와 공극수의 전기전도도( $\sigma_w$ )의 관계는 아래 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_w \frac{X}{F} + Y$$

[0068] (5)

[0069] 여기서  $X$ 와  $Y$ 는 공극의 기하학적 형태, 점토함유량과 이온의 활동도 등에 좌우되는 변수이다.

[0070] 도 4는 사암을 농도가 다른 3가지 용액에 포화시켜 전기비저항을 측정된 결과로부터 공극수의 전기전도도와 암석의 전기전도도 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

[0071] 이 그래프로부터 포화상태의 사암의 경우, 암석시료의 전기전도도는 공극수의 전기전도도에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이들의 상관관계로부터 1차회귀식을 구하고, 그 절편으로부터 Archie 경험식의 고결계수  $m$ 을 산출했다. 암석시료 B2-1, B2-2와 B4-1의 고결계수  $m$ 은 각각 1.563, 1.612, 1.464였다.

[0072] (5단계) 지층 모델 설정 및 수치해석 단계

[0073] 이하 본 발명의 바람직한 수치해석 실시예를 설명한다.

[0074] 해양 CSEM 수치해석을 위한 지층모델은 도 2의 동해-1 가스전 고래 V구조 지역의 현장 탄성과 탐사와 물리검층 결과를 바탕으로 2층 지질구조로 단순화하여 사암층 위에 불투수층의 셰일이 덮개암으로 존재하는 것으로 도 5와 같이 설정하였다. 이 지층모델에서 사암층이 CO<sub>2</sub> 주입대상이 되며, 주입영역을 일정하게 정하고 CO<sub>2</sub> 주입량에 따라 사암층의 전기비저항 변화를 Archie의 경험식으로 계산하였다.

[0075] 표 4는 동해-1 가스전 고래 V구조에서 채취한 사암시료 중에서 대표성을 가진 B2-1의 전기비저항 측정결과를 바탕으로 Archie의 경험식을 이용하여 산출한 사암층의 CO<sub>2</sub> 포화도에 따른 전기비저항 입력 값을 나타내고 있다.

[0076] 수치단계(numerical stages)는 3단계(phase 1~3)이고  $a$ 는 상수, porosity는 공극률,  $m$ 은 고결계수, pore fluid resistivity는 공극수 전기비저항, CO<sub>2</sub> saturation은 이산화탄소 포화도를 의미한다.

- [0077] Phase 1은 사암층에 CO<sub>2</sub>를 주입하기 전 단계로 지층의 공극은 염수로 포화되어 있는 상태이므로 실내 전기비저항 측정값을 바탕으로 텃개암인 세일은 1 ohm-m로, 사
- [0078] 암층은 4.26 ohm-m로 설정하였다.
- [0079] Phase 2와 3은 사암층의 공극에 CO<sub>2</sub>가 각각 30%와 50%로 주입되었을 때를 가정하여 이 때 주입영역의 전기비저항은 Archie의 경험식으로 계산한 8.68 ohm-m와 17.02 ohm-m를 입력 자료로 설정했다. 표4에서 water saturation은 사암층 내의 물포화도이다.

**표 4**

Numerical stages	Resistivity (ohm-m)	$\alpha$	Porosity	$m$	Water saturation	$n$	Pore fluid resistivity (ohm-m)	CO <sub>2</sub> saturation
Phase 1	4.26	0.97	0.185	1.563	1.0	2	0.314	0.0
Phase 2	8.68	0.97	0.185	1.563	0.7	2	0.314	0.3
Phase 3	17.02	0.97	0.185	1.563	0.5	2	0.314	0.5

- [0080]
- [0081] <표 4. Archie 경험식에 의한 CO<sub>2</sub> 포화도에 따른 사암층 전기비저항 입력치>
- [0082] 단순한 2층 지질구조 모델에 대해서 CO<sub>2</sub>를 주입 전과 후의 각 단계별 Marine CSEM 수치해석을 수행하였다.
- [0083] 원래 CSEM은 인공적으로 가해진 전자기장에 의해 지하에 유기되는 유도전류에 의한 2차장 또는 합성장을 측정하여 지향의 전기전도도 분포를 파악하는 물리탐사법이다.
- [0084] Marine CSEM은 해양 중의 송신기에서 발생된 전기장이 해저 지층 속으로 전파되고, 이에 의해 해저 지층에 유기되는 유도전류에 의한 2차 전기장의 진폭 및 위상성분을 해저에 설치된 수신기에서 측정하는 방법이다.
- [0085] 수치해석 상의 탐사 목표는 CO<sub>2</sub>가 주입되는 사암층의 위쪽부분으로 정하고(도 5에서 점들로써 표시한 부분임) 수심 및 해저면은 적용성을 확대하기 위하여 실제 동해-1 가스전 지역보다 수심을 깊게 설정했다. 따라서 해저면의 경사에 따라 수심도 700~1,300 m로 변화한다. Marine CSEM 수치해석에 있어서 송,수신기는 동일선법(inline mode)으로 배열하고, 송신원은 x방향의 Electric dipole source(Jx)를 사용하였으며 동일선법에 따라 수신기도 x방향으로 전개시켰다.
- [0086] 또한 수신기는 도 6과 같이 해저면에 100 m 간격으로 총 37개를 설치하고, 송신기를 해저면에서 100 m 띄워 끌고 가면서 탐사를 수행했다. 송신기는 x방향으로 거리 50 m부터 시작하여 200 m 간격으로 이동하면서 자료를 획득하였으며, 총 이동수는 19번 하였다.
- [0087] 해양 CSEM 수치해석을 위해서 3D staggered-grid finite-difference algorithm (Sasaki and Meju, 2009)을 사용했다. 수치해석 전체 영역은 x, y 및 z 방향으로 106×58×66 개의 격자로 형성하였으며 해저면 근처에는 격자를 50×100×25 m로 작게 설정하고, 경계부에는 격자를 3,200×3,200×3,200 m로 크게 설정했다.
- [0088] (6단계) 이산화탄소 거동 모니터링 단계

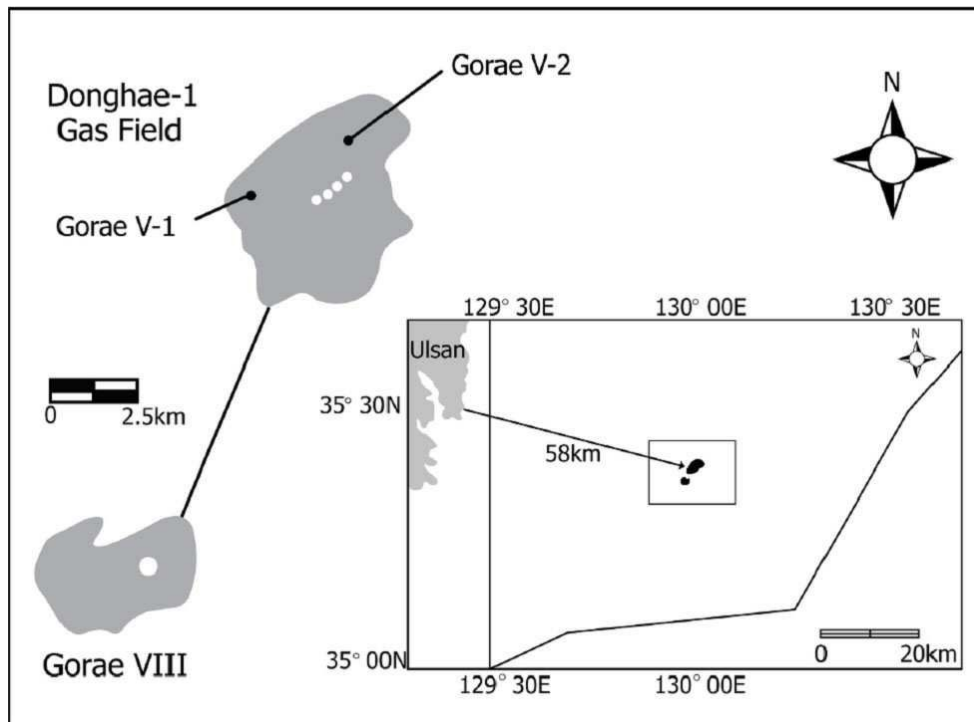
- [0089] 도 7은 지층 모델에 대하여 송신 주파수가 1.25 Hz이고, 송신기가 x 방향으로 1,250 m에 위치할 때 CO<sub>2</sub> 주입 전과 사암층에 CO<sub>2</sub>를 30%, 50%로 포화시켰을 때의 해양 CSEM 수치해석 결과를 보여주고 있다.
- [0090] 도 7의 a)와 b)는 CO<sub>2</sub> 주입 전과 후의 3가지 지층 모델에 대하여 전기장 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 보여주고 있으며, 도 c)와 d)는 각각 사암층에 대해 CO<sub>2</sub> 주입 전 값에 대해 30%와 50%로 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때를 정규화시킨 전기장 진폭과 위상차를 나타내고 있다. 이 도에 의하면 사암층에 30%와 50%로 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때 정규화된 전기장 진폭은 1.1~1.2이고, 위상차는 8~15도 정도이다.
- [0091] 도 8은 도 7과 동일한 조건에서 송신주파수만 4.25 Hz로 바꾼 경우이다. 도 c)와 d)의 정규화 시킨 전기장 진폭과 위상차를 보면 도 7의 송신주파수 1.25Hz에 비해서 진폭과 위상차는 거의 2배 정도로 크게 나타남을 알 수 있다.
- [0092] 도 9는 해양 CSEM 수치해석 결과를 가시화하기 위하여, CO<sub>2</sub> 주입 전과 30%와 50%의 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때의 3가지 모델에 대하여 송신주파수 4.25 Hz를 사용하여 얻은 전기장 진폭(a)과 위상(b)을 읍셋(송신기로부터 수신기까지의 거리) 800 m에서 2,200 m까지 표시한 것이다.
- [0093] 이때 가로축 상의 전기장 진폭과 위상 자료는 송·수신기 중간 지점을 잡아 그린 것이며, 도 중에 가는 점선은 CO<sub>2</sub> 주입 전을 나타내고, 굵은 점선과 실선은 각각 30%와 50%의 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때를 나타낸다. 이 결과는 육상에서 사용되고 있는 전기탐사에 나타나는 자료와 유사하며, CO<sub>2</sub> 저장에 따른 전기장 진폭과 위상 반응은 읍셋이 클수록 크게 나타남을 알 수 있다.
- [0094] 도 10은 도 9와 같은 결과를 CO<sub>2</sub> 주입에 따른 전기비저항의 변화를 보다 명확하게 나타내기 위하여 CO<sub>2</sub> 주입 전에 대하여 CO<sub>2</sub>를 30%와 50%로 주입했을 때의 전기장 진폭과 위상을 정규화 시켜 표시한 것이다.
- [0095] 도 a)와 b)는 CO<sub>2</sub>를 30% 주입했을 때 정규화 시킨 진폭과 위상차를 나타내고 있으며, 도 c)와 d)는 CO<sub>2</sub>를 50% 주입했을 때 정규화 시킨 진폭과 위상차를 나타내고 있다.
- [0096] 상기의 수치해석 결과로부터 해저 염수 대수층인 사암층에 이산화탄소를 주입했을 때 사암층의 전기비저항이 변함에 따라 해양 CSEM 탐사 결과의 전기장 진폭과 위상 변화가 뚜렷하게 나타난다. 도 5에서 이산화탄소 주입영역이 거리 1,000~2,500 m 사이에 분포하고 있는데, 이 영역에서 이산화탄소 주입 전과 후의 전기장 진폭과 위상 변화가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.
- [0097] 또한 도 10에서 나타낸 것과 같이 이산화탄소 주입량을 30% 에서 50% 로 증가시켰을 때 전기장의 진폭과 위상 변화가 크게 나타나는 것도 알 수 있는데, 이러한 결과를 통해서 사암층 내에서의 이산화탄소 주입에 따른 거동을 평가할 수 있게 된다.
- [0098] 상술된 본 발명과 그 입증을 위한 실시예 등을 요약하면, 아래와 같다.
- [0099] 즉 본 발명의 구체적인 일 실시예로서, 동해의 울릉분지 등 해저 CO<sub>2</sub> 지중 저장에 대한 모니터링 기술 개발을 위하여 동해-1 가스전에서 채취한 사암시료를 이용하여 실내 전기비저항 측정결과로 Archie 경험식을 산출하고, 이를 바탕으로 단순 해저 지층 모델에 대한 입력 값을 설정하여 해양 CSEM에 대한 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 사암층에 대해 CO<sub>2</sub> 주입 전 값에 대해 30%와 50%로 CO<sub>2</sub>를 주입했을 때를 정규화 시킨 전기장 진폭과 위상차는 크게 나타났고, 송신주파수 4.25 Hz를 사용하고 CO<sub>2</sub>가 사암층에 50% 포화되었을 때 읍셋 1,600 m의 경우 정

규화 시킨 진폭은 1.6 정도, 위상차는 42도 정도로 매우 크게 나타났으며 이러한 결과로부터 해저 염수 대수층의 이산화탄소 거동에 관한 모니터링 방법의 실효성이 입증되었다고 할 수 있다.

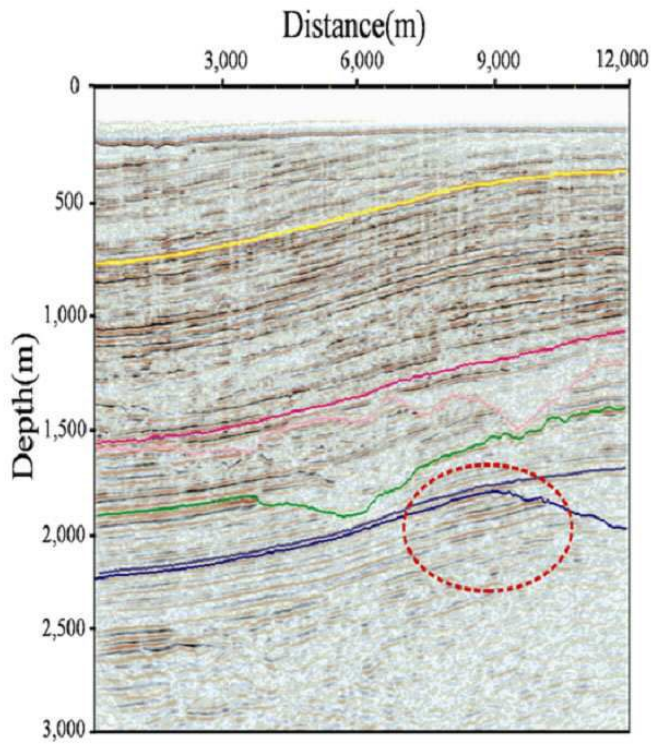
[0100] 본 발명의 기술적 사상은 당해 기술분야의 통상의 지식을 가진자가 다양하게 수정, 변경하여 동일한 목적을 달성할 수 있을 것이나, 이는 모두 본 발명 권리범위에 속함은 자명하다는 것을 밝혀둔다.

도면

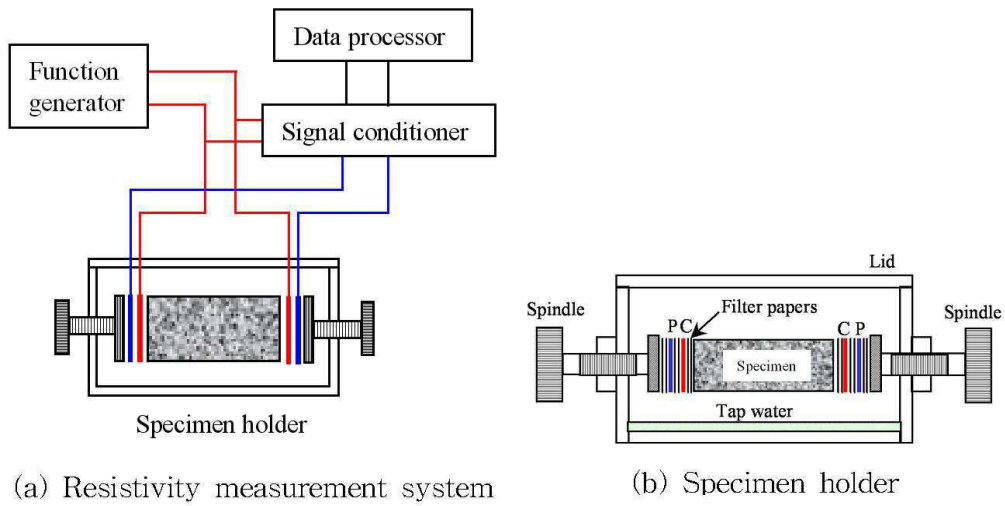
도면1



도면2

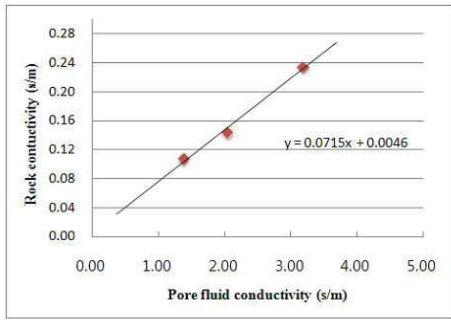


도면3

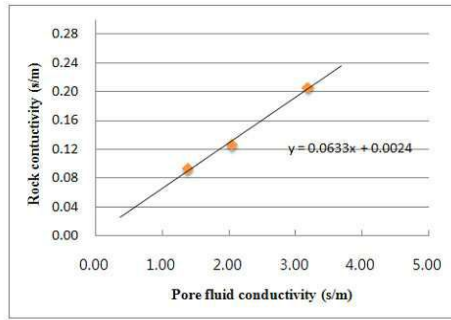




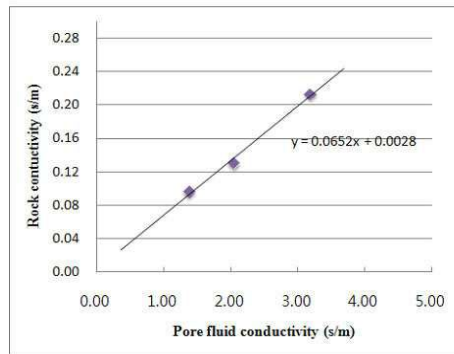
도면4



(a) B2-1 sandstone sample

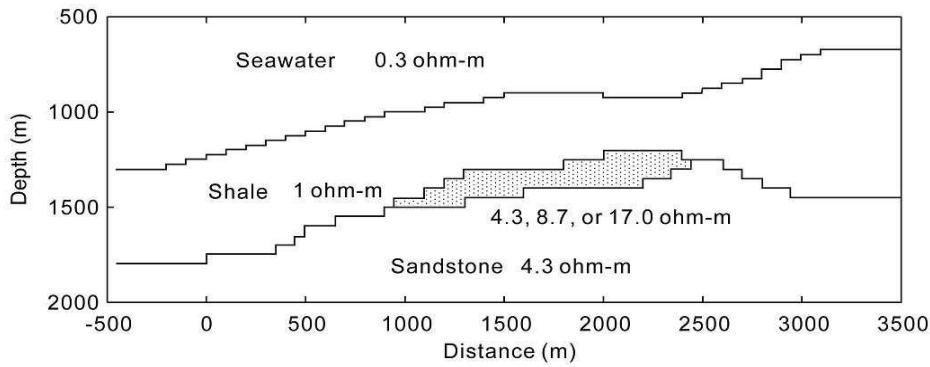


(b) B2-2 sandstone sample

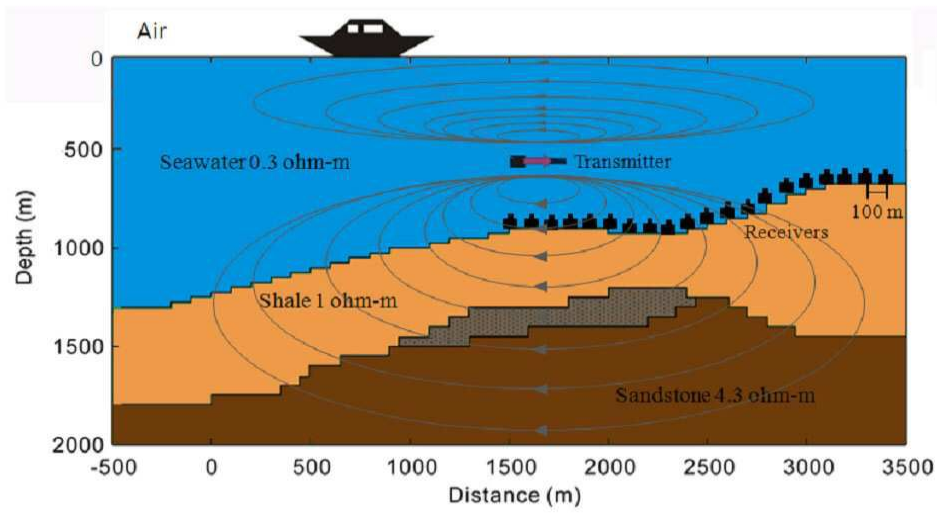


(c) B4-1 sandstone sample

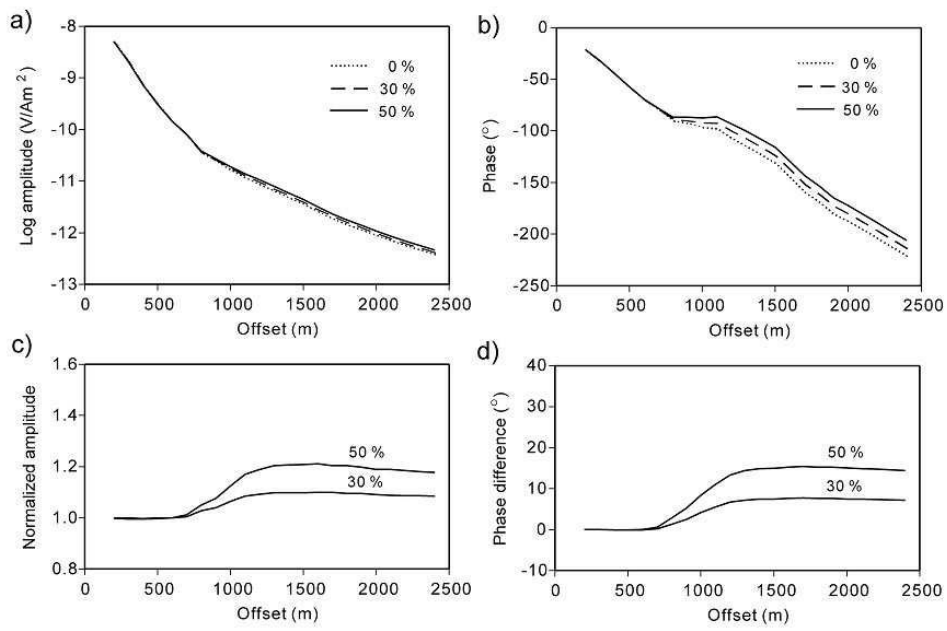
도면5



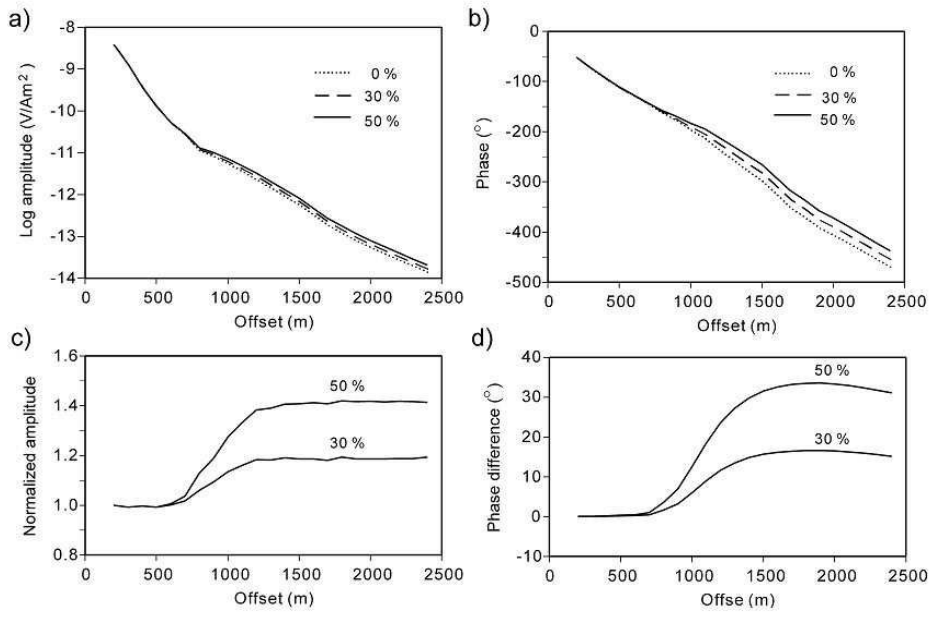
도면6



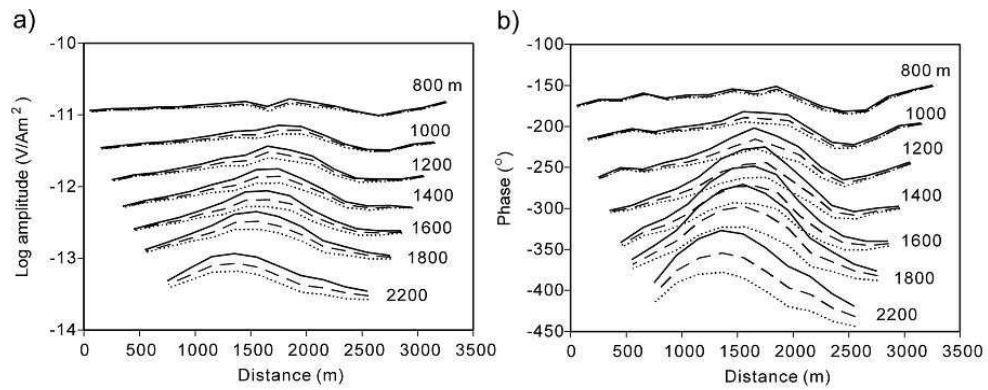
도면7



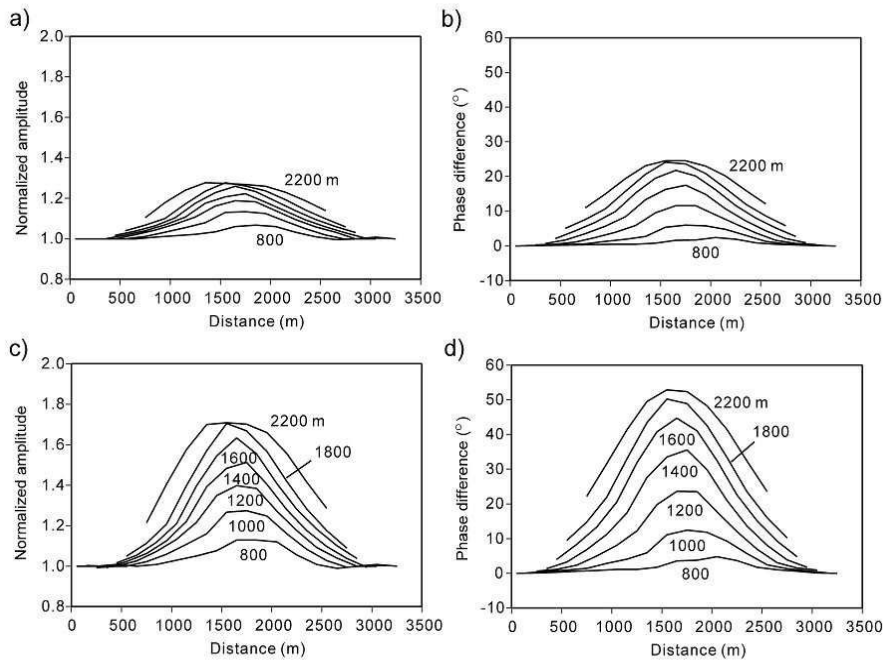
도면8



도면9



도면10



도면11

