



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2017년12월26일  
 (11) 등록번호 10-1811858  
 (24) 등록일자 2017년12월18일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
 G01N 3/12 (2006.01) G01N 3/24 (2006.01)  
 G01N 33/24 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
 G01N 3/12 (2013.01)  
 G01N 3/24 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-0085721  
 (22) 출원일자 2017년07월06일  
 심사청구일자 2017년07월06일
- (56) 선행기술조사문헌  
 김아람, 국내 이산화탄소 지중격리저장 실증실험 후보부지의 역학적 안정형 평가 기초해석, 터널과 지하공간제27권제2호, 한국암반공학회, 2017.04.  
 김정찬, 지중주입된 이산화탄소 거동 및 누출 모니터링 현장적용 기술개발, 한국지질자원연구원 기술개발보고서, 한국지질자원연구원, 2015.12.  
 송철우, 한반도 남동부 마이오세 포항분지 내 이산화탄소 지중저장 후보지에 관한 연구, 지질학회지 제51권제1호, 대한지질학회, 2015.02.  
 허철, 이산화탄소 포집 및 지중저장 기술의 청정 개발체제로의 수용 여부에 대한 정책적 고찰, 한국해양환경공학회지 제14권제1호, 한국해양에너지학회, 2011.02.

- (73) 특허권자  
**한국지질자원연구원**  
 대전광역시 유성구 과학로 124 (가정동, 한국지질자원연구원)
- (72) 발명자  
**이희권**  
 대전광역시 유성구 신성로58번길 42-5 (신성동)  
**신영재**  
 대전광역시 유성구 노은로 416, 508-702 (하기동, 송림마을아파트 5단지)
- (74) 대리인  
**특허법인 대아**

전체 청구항 수 : 총 7 항

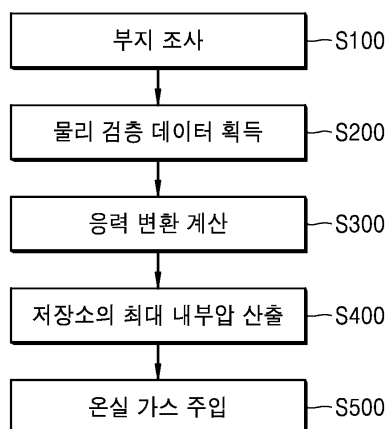
심사관 : 한별

(54) 발명의 명칭 **지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법**

**(57) 요약**

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압을 산출하기 위한 방법은, (A) 상기 지중 유체 저장 부지 부근의 물리 검층 데이터를 확보하는 단계; (B) 상기 물리 검층 데이터로부터, 상기 지중 유체 저장 부지에 가해지는 수직 응력( $S_v$ )과 전단 응력( $\tau$ )을 구하는 단계; 및 (C) 상기 수직 응력( $S_v$ ) 및 상기 전단 응력( $\tau$ )으로부터 최대 허용 유체압을 산출하는 단계;를 포함하는 하며, 이때 물리 검층 데이터로는 음파 물리 검층 데이터인 것이 바람직하다.

**대표도 - 도1**



(52) CPC특허분류

- G01N 33/24 (2013.01)
- G01N 2203/0019 (2013.01)
- G01N 2203/0025 (2013.01)
- G01N 2203/0048 (2013.01)
- G01N 2203/0075 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	20170142
부처명	미래창조과학부
연구관리전문기관	국가과학기술연구회
연구사업명	주요사업-기초미래선도형
연구과제명	대규모 CO2 지중저장 후보지 잠재성 평가
기 여 율	1/1
주관기관	한국지질자원연구원
연구기간	2017.01.01 ~ 2017.12.31
공지예외적용	: 있음

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압을 산출하기 위한 방법에 있어서,

(A) 상기 지중 유체 저장 부지의 선정 및 그 부근의 물리 검층 데이터를 확보하는 단계;

(B) 상기 물리 검층 데이터로부터, 상기 지중 유체 저장 부지에 가해지는 수직 응력( $S_n$ )과 전단 응력( $\tau$ )을 구하는 단계; 및

(C) 상기 수직 응력( $S_n$ ) 및 상기 전단 응력( $\tau$ )으로부터 최대 허용 유체압을 산출하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

**청구항 2**

청구항 1에 있어서,

상기 물리 검층 데이터는, 음과 물리 검층 데이터인 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

**청구항 3**

청구항 1에 있어서,

상기 수직 응력( $S_n$ )과 전단 응력( $\tau$ )은, 하기 수학적 식 1에 의해서 결정되는 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

[수학적 식 1]

$$\tau = \mu \sigma_n = \mu (S_n - \alpha P_p - \Delta P_p)$$

여기에서,  $\tau$ 는 단층에 가해지는 전단 응력,  $\sigma_n$ 은 단층에 가해지는 유효 수직 응력,  $\mu$ 는 마찰 계수,  $S_n$ 은 해당 단층에 가해지는 유효 전단 응력, 및  $P_p$ 는 해당 단층에서의 공극압.

여기에서, 또한, 전단 응력은,  $\{S_n, 0, 0; 0, S_n, 0; 0, 0, S_n\}$ 을  $S_{ics}$ (현장 응력 텐서)라고 하면, 하기 수학적 식 2를 통해 ICS 좌표계의 현장 주응력을 ECS 좌표계의 응력 성분으로 응력 변환(stress transformation)하고, 이어서 하기 수학적 식 3의 행렬을 도출하고, 도출된 행렬 내의 각 원소(element)를 하기 수학적 식 4에 대입하여 산출됨.

[수학적 식 2]

$$S_{ics2ecs} = E^T S_{ics} E$$

단,  $E$ 는 변환 행렬이고,  $E^T$ 은 행렬( $E$ )의 전치 행렬이며, 특히 행렬( $E$ )은 통상의 기술자라면 잘 알고 있는 바와 같이 방향 코사인(directional cosine)으로 정의되는 행렬.

[수학식 3]

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}$$

[수학식 4]

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}$$

#### 청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 최대 허용 유체압은, 하기 [수학식 5]의 조건을 만족하는 유체압인 것을 특징으로 하는, 지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

[수학식 5]

$$\tau \geq \mu(\sigma_n - P_p), \quad P_p = \sigma_n - \frac{\tau}{\mu}$$

이때,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\sigma_n$ 는 인장 응력,  $P_p$ 는 저장소 내부의 압력,  $\mu$ 는 0.25 또는 0.6.

#### 청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 단계(C)에서, 상기 최대 허용 유체압( $\mu$ )은, 단층의 미끌림을 유발하지만 상기 지중 유체를 주입할 수 있는 하한 최대 허용 유체압( $\mu_1$ )과 단층의 미끌림을 유발하기 때문에 상기 지중 유체의 주입이 즉각 중단되어야 하는 상한 최대 허용 유체압( $\mu_2$ )으로 이루어지는 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

#### 청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 하한 최대 허용 유체압( $\mu_1$ )은 3 MPa인 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

#### 청구항 7

청구항 5에 있어서,

상기 상한 최대 허용 유체압( $\mu_2$ )은 6 MPa인 것을 특징으로 하는,

지중 유체 저장 부지의 최대 허용 유체압 산출 방법.

#### 발명의 설명

**기술분야**

[0001] 본 발명은 유체압 산출 방법에 관한 것으로, 더욱 구체적으로는, 이산화탄소와 같은 유체를 지중 저장하기 위한 지중 유체 저장 부지에서 지진을 일으킬 수 있는 단층의 미끄러짐을 방지할 수 있는 최대 허용 유체압을 산출하는 방법에 관한 것이다.

**배경기술**

[0003] 바람직하지 않은 기후 변화를 초래하는 지구 온난화는 기존 대기 중에 존재하거나, 특히 화력 발전소나 제철소와 같은 대형 산업 설비에서 배출되는 다량의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 및 기타 자연 발생적으로 생성되거나 산업 활동 등에 의해서 발생하는 메탄(CH<sub>4</sub>)과 같은 온실 가스에 의해 유발되는 것으로 알려져 있다.

[0004] 이와 같은 지구 온난화 정도를 완화하는 하나의 방법으로, 통상 지표로부터 수백 미터 아래 안정적인 지층과 지층 사이의 저장고에 이들 온실 가스를 주입해 저장하는 방법이 제안되고 있다.

[0005] 특히, 석유와 천연 가스로 알려진 탄화 수소를 채취하고 남은 유정 공동(空洞), 기타 대수층이나 미채굴 석탄층 등을 저장고로 활용할 경우 연간 수 기가 톤 정도의 온실 가스를 지하에 주입하여 저장할 수 있을 것으로 예상된다.

[0006] 이때, CO<sub>2</sub>와 같은 온실 가스는 대부분 초임계 상태의 유체로 주입되며, 이 초임계 상태의 유체는 저장소 내의 공간에 단순히 충전되거나, 저장소 내의 각종 유체 또는 광물과 반응하여 이들 유체 또는 광물에 용해되거나 고착될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

[0007] 그러나, 방대한 양의 온실 가스를 한꺼번에 주입하는 경우, 저장소 내부의 압력에 변동이 발생하고, 이에 따라서 저장소 주변의 응력 상태가 변화될 소지가 크다.

[0008] 특히, 온실 가스를 주입하게 되면, 저장소의 내부 압력이 통상 상승하게 되고, 저장소 또는 그 주변에 크랙(crack)이나 단층(fault)이 존재하는 경우, 이 크랙이나 단층에 작용하던 기존의 유효 정상 응력이 주로 감소하는 방향으로 변화하게 될 우려가 있다.

[0009] 따라서, 일반적으로, 원자력 발전 등에서 생성되는 방사성 폐기물을 폐기하는 경우와 마찬가지로, CO<sub>2</sub>와 같은 온실 가스를 저장하기 위한 저장소로는 지질학적으로 안정한 상부 지층(cap layer)을 갖는 저장소를 선택하고 있다.

[0010] 그러나, 학술적인 의미에서의 지질학적으로 안정한 지층 구조의 퇴적층을 찾는 것은 시간과 비용면에서 현실적으로 불가능하며, 그렇다고 해서 무작정 지중 유체 저장소를 단순히 견고하게 유지하는 것 역시 해결책이 될 수 없기 때문에, 저장소의 결함, 즉 단층(fault)이나 크랙 또는 지각 자체의 지각 운동(예컨대, 조산 운동이나 지진 등)으로 인해 이 저장소에 저장된 CO<sub>2</sub>와 같은 온실 가스가 외부로 유출될 가능성이 있다.

[0011] 후자의 지각 운동 자체에 대해서는, 사실상 대처할 수 없으나, 지질학적으로, 긴 시간 동안 상대적으로 안정적인 지층은 선택할 수 있다.

[0012] 저장소 주위의 지층에 대해서 수직 응력은 감소하나 전단 응력은 변화가 없는 경우, 쿨롱 파괴 기준(Coulomb failure criterion)에 의해서 단층이 미끄러질 가능성이 높아질 우려가 있다.

[0013] 여기에서, 쿨롱 파괴 기준은 다음의 수학식 1에 의해서 정의될 수 있다.

**수학식 1**

[0014] 
$$\tau = \mu\sigma_n = \mu (S_n - P_p)$$

[0015] 여기에서,  $\tau$ 는 단층을 따라서 작용하는 전단 응력,  $\mu$ 는 단층에 대한 마찰 계수,  $S_n$  및  $\sigma_n$ 은 단층에 작용하는 전체 및 유효 수직 응력을, 그리고  $P_p$ 는 단층이 받는 공극압을 각각 나타낸다.

[0016] 저장소 내부의 공극 압력이 제한 임계치(임계 한계)에 도달하게 되면, 쿨롱 실패 기준(Coulomb frictional failure criterion)에 따라서 단층이 재활성화될 수도 있으며, 단층이 재활성화될 경우, 단층면에 발생하는 마

찰력의 변화되는 크기에 따라 일정 규모(magnitude)를 갖는 인공 지진이 발생할 수도 있다.

- [0017] 지진핵을 형성하게 되는 불안정한 단층 미끌림은 단층을 이루는 암석에서의 "속도 약화"(velocity weakening) 거동으로부터 알 수 있으며, 속도 약화 거동은 마찰률 파라미터(friction rate parameter)( $a - b, < 0$ )에 의해서 판별될 수 있다.
- [0018] 마찰률 파라미터는 통상의 기술자라면 단층을 이루는 재료에 대해서 "속도 변화"(velocity stepping) 진단 시험을 통해서 측정될 수 있음을 잘 알 것이다.
- [0020] 많은 경우에 있어서, 지하에 다량의 유체를 주입하는 경우 인공 지진이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 가장 대표적인 경우로는 1960년대 미국에서 유독성 화학 물질을 포함하는 폐기물을 처분하기 위해 3.6 킬로미터 깊이의 시추공을 천공한 로키 마운틴 아스널(Rocky Mountain Arsenal)에서의 인공 지진이 있다.
- [0021] 따라서, 온실 가스 역시 지중 저장하는 경우에, 불가피하게 인공 지진을 발생시킬 가능성이 높기 때문에, 지중 유체 저장 부지의 저장소에서 내부 압력이 과도하게 높아지지 않도록 하여 단층의 재활성화 가능성을 원천적으로 차단할 필요가 있다.
- [0022] 이때, 저장소의 내부 압력은 단층의 방위, 마찰 계수, 단층면의 밀착(cohesion), 및 현장 응력 상태 등과 같은 단층 파라미터에 의해서 결정될 수 있으며, 대부분의 경우 단층은, 있다면, 단층을 이루고 있는 암석이 극단적으로 작기 때문에 밀착은 일어나지 않는 것으로 간주하고 있다.
- [0023] 그러나, 예를 들어, 단층을 이루는 암석에 물이 침투하는 경우, 이들 단층을 이루는 암석의 정적(static) 마찰 계수가 천천히 높아지게 되면서 밀착이 발생할 수도 있다.
- [0024] 따라서, 밀봉의 관점에서 보았을 때, 온실 가스(CO<sub>2</sub> 등)를 주입하기 전에 인공 지진을 유발하지 않는 범위 내에서의 제반 조건을 고려하여 해당 저장소의 유지 가능한 내부 압력을 산출할 필요가 있다.
- [0025] 유지 가능한 내부 압력이 산출되면, 저장소의 내부 압력 한계를 초과하지 않도록 제어하여, 단층이 활성화될 위험성을 최소로 하고, 저장소에 주입된 온실 가스가 재활성화된 단층에 도달하고 이 단층을 통해서 잠재적으로 유출되지 않도록 하고, 또한 지중 내 체류 유체(connate formation fluid)의 유출을 방지할 수 있다.
- [0026] 그러나, 지중 유체 저장소는 통상 지하 수백 미터에 형성되기 때문에 해당 부지의 물리적인 현재 상황 및 미래 상황의 추정에 대해서 직접적으로 면밀하게 검토할 수 없다는 문제가 있었다.
- [0028] 본 발명과 관련된 종래 기술로서 특허 문헌 1은 고압 구속 조건 하에서 시편의 인장 파괴 및 시편의 수압 파쇄를 유도하는 삼축 압축 시험의 구성에 대해서 개시하고 있으나, 지열 발전이나 셰일 가스의 채취를 목적으로 하고 있어 시편의 인장 파괴 시험을 목적으로 하고 있을 뿐, 지중 유체 저장 부지 주변의 응력 상태의 변화 여부, 특히 그 주변에 형성되어 있을 가능성이 매우 높은 단층(fault)에 작용할 수 있는 정상 상태(steady state)의 응력의 변화에 의한 단층의 재활성화 여부와는 전혀 무관한 구성에 대해서 개시하고 있을 뿐이며, 이와 같은 사정을 감안하여 본원 발명자들은 각고의 노력 끝에, 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 창출하기에 이르렀다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0030] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제 10-1683619 호(발명의 명칭: 대심도 시추공의 고압 구속응력 상태 모사 및 유체주입을 통한 인장파괴 유도가 가능한 삼축압축시험용 삼축셀 및 이를 이용한 삼축압축시험 방법, 2016년 12월 07일 공고)

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0031] 따라서, 본 발명은, 지중 유체 저장 부지 주변의 단층에 작용하고 있는 정상 상태 응력의 변화에 의한 단층 미끌림과 같은 단층의 재활성화 여부를 파악할 수 있는 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 제공하는 것을 그 해결하고자 하는 과제로 한다.

[0033] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 이상에서 언급한 과제(들)로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제(들) 역시 이하의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자("통상의 기술자")라면 명확하게 이해할 수 있을 것이다.

**과제의 해결 수단**

[0035] 상기 과제를 해결하기 위해서, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 본 발명의 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법은, (A) 상기 지중 유체 저장 부지의 선정 및 그 부근의 물리 검층 데이터를 확보하는 단계; (B) 상기 물리 검층 데이터로부터, 상기 지중 유체 저장 부지에 가해지는 수직 응력( $S_n$ )과 전단 응력( $\tau$ )을 구하는 단계; 및 (C) 상기 수직 응력( $S_n$ ) 및 상기 전단 응력( $\tau$ )으로부터 최대 허용 유체압을 산출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0036] 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 상기 물리 검층 데이터는, 음파 물리 검층 데이터일 수 있다.

[0037] 또한, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 상기 수직 응력( $S_n$ )과 전단 응력( $\tau$ )은, 하기 수학적 1에 의해서 결정될 수 있다.

[0038] [수학적 1]

[0039] 
$$\tau = \mu \sigma_n = \mu (S_n - \alpha P_p - \Delta P_p)$$

[0040] 여기에서,  $\tau$ 는 단층에 가해지는 전단 응력,  $\sigma_n$ 은 단층에 가해지는 유효 수직 응력,  $\mu$ 는 마찰 계수,  $S_n$ 은 해당 단층에 가해지는 유효 전단 응력, 및  $P_p$ 는 해당 단층에서의 공극압이다.

[0041] 여기에서, 전단 응력은,  $\{S_n, 0, 0; 0, S_n, 0; 0, 0, S_n\}$ 을  $S_{ics}$ (현장 응력 텐서)라고 하면, 하기 수학적 2를 통해 ICS 좌표계의 현장 주응력을 ECS 좌표계의 응력 성분으로 응력 변환(stress transformation)하고, 이어서 하기 수학적 3의 행렬을 도출하고, 도출된 행렬 내의 각 원소(element)를 하기 수학적 4에 대입하여 산출될 수 있다.

[0042] [수학적 2]

[0043] 
$$S_{ics2ecs} = E^T S_{ics} E$$

[0044] 단,  $E$ 는 변환 행렬이고,  $E^T$ 은 행렬( $E$ )의 전치 행렬이며, 특히 행렬( $E$ )은 통상의 기술자라면 잘 알고 있는 바와 같이 방향 코사인(directional cosine)으로 정의되는 행렬이다.

[0045] [수학적 3]

[0046] 
$$\begin{bmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}$$

[0047] [수학적 4]

[0048] 
$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}$$

[0050] 또한, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 상기 최대 허용 유체압은, 하기 [수학적 5]의 조건을 만족하는 유체압인 것이 바람직하다.

[0051] [수학적 5]

[0052] 
$$\tau \geq \mu (\sigma_n - P_p), \quad P_p = \sigma_n - \frac{\tau}{\mu}$$

[0053] 이때,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\sigma_n$ 은 인장 응력,  $P_p$ 는 저장소 내부의 압력,  $\mu$ 는 0.25 또는 0.6이다.

[0054] 또한, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따르면, 상기 단계(C)에서, 상기 최대 허용 유체압( $\mu$ )은, 단층의 미끌

림을 유발하지만 상기 지중 유체를 주입할 수 있는 하한 최대 허용 유체압( $\mu_1$ )과 단층의 미끌림을 유발하기 때문에 상기 지중 유체의 주입이 즉각 중단되어야 하는 상한 최대 허용 유체압( $\mu_2$ )으로 이루어질 수 있다.

[0055] 이때, 상기 하한 최대 허용 유체압( $\mu_1$ )은 3 MPa인 것이 바람직하고, 상기 상한 최대 허용 유체압( $\mu_2$ )은 6 MPa인 것이 바람직하다.

[0057] 기타 본 발명의 바람직한 실시예의 구체적인 사항은 상세한 설명 및 첨부 도면에 포함되어 있다.

[0058] 본 발명의 이점 및/또는 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부하는 도면을 참조하여 더욱 상세하게 설명하고 있는 이하의 각 실시예를 참조하면 명확해질 것이다.

[0059] 그러나, 본 발명은 이하에서 설명하는 실시예만으로 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 본 발명의 각 실시예는 단지 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 통상의 기술자에게 본 발명의 범위 및 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구 범위의 각 청구항의 범위에 의해 정의될 뿐임을 알아야 한다.

**발명의 효과**

[0061] 본 발명의 바람직한 실시예에 따르면, 본 발명은 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 제공할 수 있다.

[0062] 또한, 본 발명의 바람직한 실시예에 따르면, 지중 유체 저장 부지에 유체를 저장하기 전에 해당 저장소의 최대 허용 유체압을 알 수 있으므로, 유체의 지중 저장시에 더욱 안정적으로 유체를 지중 저장할 수 있어, 추가적인 경제성을 제공할 수 있다.

[0063] 더욱이, 본 발명에 따르면, 저장소의 내부압을 최대 내부압 이하로 유지할 수 있기 때문에 저장소에 온실 가스를 주입하더라도 저장소 주변 단층의 재활성화를 억제할 수 있고, 따라서 인공 지진이 발생할 위험을 극소화 또는 회피할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

[0065] 도 1은, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 설명하기 위한 전체적인 순서도이다.

도 2의 (a)는, 지중 유체 저장 부지로 선정된 대상 지역(적색 사각형으로 표시)을 나타내는 지도이고, 도 2의 (b)는, 대상 지역의 지질도로, 기존 시추공의 위치와 함께 암석 분포 및 단층 흔적을 나타낸 도면이다.

도 3의 (a)는, 지중 유체 저장 부지의 지층 상부를 나타내는 도면이고, 도 3의 (b)는 도 3의 (a)의 X-X' 선을 따른 지진파 단면도이며, 도 3의 (c)는 해당 지중 유체 저장 부지의 3D 지형 모형을 나타낸 입체도이다.

도 4는, 탐사용 시추공에서 추출한 코어 전체로부터 입수한 정보를 나타낸 지층 구분 단면도이다.

도 5는, 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 설명하기 위한 기본적인 좌표 변환을 설명하기 위해서, 도 5의 (a)는 지구 좌표계(ECS, earth coordinate system;  $X_e$ - $Y_e$ - $Z_e$ )와 현장 응력 좌표 시스템(ICS, In-situ stress Coordinate System,  $X_s$ - $Y_s$ - $Z_s$ ) 사이의 좌표 관계를 설명하기 위한 도면이고, 도 5의 (b)는 ECS와 FCS(Fault Coordinate System, x-y-z) 사이의 좌표 관계를 설명하기 위한 도면이다.

도 6은, 지중 유체 저장 부지 인근 지역에서 실행한 음파 물리 검층 결과 알아낸 공벽 파쇄(breakout)와 시추로 인한 인장 파괴(DITF, drilling-induced tensile failure)를 분석한 현장 응력의 방향을 나타내는 그래프이다.

도 7의 (a)는, 1999 년 이래 대한민국 지역에서 기록된 76 회의 지진 진원 메커니즘의 해(solution)로부터 해석한 최대 수평 응력의 방향을 나타내는 도면이고, 도 7의 (b)는 도 7의 (a)의 사각형 점선 영역의 상세도이며, 비치 볼(beach ball)에 동시에 표시한 숫자는 진원까지의 거리를 km로 표시한 도면이다.

도 8의 (a)는, 지중 유체 저장 부지의 시험용 시추공에서의 깊이별 현장 응력의 변화를 나타낸 그래프이고, 도 8의 (b)는 육상의 시추공에서의 깊이별 현장 응력의 변화를 나타낸 그래프이다.

도 9는, 지중 유체 저장 부지 인근에 위치한 시추공으로부터 얻은 단층 가우지(fault gouge, 이하 시료)의 입자 크기의 분포를 나타내는 그래프이다.



도 10의 (a)는, 지중 유체 저장 부지 인근 시추공에서 얻은 시료의 전단 시험을 위한 이중 전단 시험 장치(double direct-shearing apparatus)의 도면 대응 사시 사진이며, 도 10의 (b)는, 도 10의 (a)에 나타난 이중 전단 시험 장치의 동작을 개념적으로 설명하기 위한 개략 단면도이다.

도 11의 (a) 및 (b)는, 지중 유체 저장 부지 인근의 다른 시추공에서 얻은 시료에 대한 서로 다른 수직 응력에 대한 마찰 변위 곡선을 나타낸 그래프이다.

도 12의 (a) 내지 (c)는, 시료에 대해서 서로 다른 수직 응력에 대한 전단 변위 함수로서 마찰률 파라미터(friction-rate parameter)를 나타내는 그래프이다.

도 13은, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 단층면(fault surface) 및 단층 마찰 계수가 0.25 일 때의 대응하는 임계 압력의 섭동 분포를 나타내는 사시도이다.

도 14는, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 단층면 및 단층 마찰 계수가 0.6 일 때의 대응하는 임계 압력의 섭동 분포를 나타내는 사시도이다.

도 15는, 지중 유체 저장 부지 또는 인근의 모든 단층에 대해 서로 다른 단층 마찰 계수( $\mu$ )에 따른 임계 압력의 섭동 분포를 나타내는 그래프이다.

도 16은, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 각 단층면에 가해지는 수직 응력의 분포를 나타내는 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0066] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 여러 가지 실시예에 대해서 상세하게 설명하기로 한다.
- [0068] 본 발명에 대해서 상세하게 설명하기 전에, 본 명세서에서 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 무조건 한정하여 해석되어서는 아니되며, 본 발명의 발명자가 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 각종 용어의 개념을 적절하게 정의하여 사용할 수 있고, 더 나아가 이들 용어나 단어는 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야 함을 알아야 한다. 즉, 본 명세서에서 사용된 용어는 본 발명의 바람직한 실시예를 설명하기 위해서 사용되는 것일 뿐이고, 본 발명의 내용을 구체적으로 한정하려는 의도로 사용된 것이 아니며, 이들 용어는 본 발명의 여러 가지 가능성을 고려하여 정의된 용어임을 알아야 한다.
- [0069] 또한, 본 명세서에 있어서, 단수의 표현은 문맥상 명확하게 단수의 의미만을 가지는 것으로 지시하지 않는 이상, 복수의 표현을 포함할 수 있으며, 유사하게 복수로 표현되어 있다고 하더라도 단수의 의미를 포함할 수 있음을 알아야 한다.
- [0071] 더욱이, 본 명세서의 전체에 걸쳐서 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소를 "포함"한다고 기재하는 경우에는, 특별히 반대되는 의미의 기재가 없는 한 임의의 다른 구성 요소를 제외하는 것이 아니라 다른 임의의 구성 요소를 더 포함할 수 있음을 의미할 수 있다.
- [0072] 더 나아가서, 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소의 "내부에 존재하거나, 연결되어 설치된다"고 기재한 경우에는, 이 구성 요소가 다른 구성 요소와 직접적으로 연결되어 있거나 접촉하여 설치되거나, 일정한 거리를 두고 이격되어 설치되어 있을 수도 있으며, 일정한 거리를 두고 이격되어 설치되어 있는 경우에 대해서는 해당 구성 요소를 다른 구성 요소에 고정 내지 연결시키기 위한 제 3의 구성 요소 또는 수단이 존재할 수 있으며, 이때 제 3의 구성 요소 또는 수단에 대한 설명은 생략될 수도 있음을 알아야 한다.
- [0073] 반면에, 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "직접 연결"되어 있다거나, 또는 "직접 접촉"되어 있다고 기재되는 경우에는, 이 제 3의 구성 요소 또는 수단이 존재하지 않는 것으로 이해하여야 한다. 마찬가지로, 각 구성 요소 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 " ~ 사이에"와 "바로 ~ 사이에", 또는 " ~ 에 이웃하는"과 " ~ 에 직접 이웃하는" 등의 표현도 동일한 취지를 가지고 있는 것으로 해석되어야 한다.
- [0075] 또한, 본 명세서에 있어서 "일면", "타면", "일측", "타측", "제 1", "제 2" 등의 용어는, 사용된다면, 하나의 구성 요소에 대해서 이 하나의 구성 요소가 다른 구성 요소로부터 명확하게 구별될 수 있도록 하기 위해서 사용되며, 이와 같은 용어에 의해서 해당 구성 요소의 의미가 제한적으로 사용되는 것은 아님을 알아야 한다.
- [0076] 또한, 본 명세서에서 "상", "하", "좌", "우" 등의 위치와 관련된 용어는, 사용된다면, 해당 구성 요소에 대해서 관련 도면에서의 상대적인 위치를 나타내고 있는 것으로 이해하여야 하며, 이들의 위치에 대해서 절대적인 위치를 특정하지 않는 이상은, 이들 위치 관련 용어가 각 구성 요소의 절대적인 위치를 언급하고 있는 것으로 이해하여서는 아니된다.

- [0077] 더욱이, 본 발명의 명세서에서, "...부", "...기", "모듈", "장치" 등의 용어는, 사용된다면, 하나 이상의 기능이나 동작을 처리할 수 있는 구성 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 또는 소프트웨어, 또는 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있음을 알아야 한다.
- [0079] 또한, 본 명세서에서는 첨부 도면에 나타난 각각의 구성 요소에 대해서 그 도면 부호를 명기함에 있어서, 동일한 구성 요소에 대해서는 이 구성 요소가 비록 다른 도면에 표시되더라도 동일한 도면 부호를 가지고 있도록, 즉 명세서 전체에 걸쳐 동일한 구성 요소는 동일한 참조 부호에 의해서 지시하고 있다. 또한, 첨부 도면에서 본 발명을 구성하는 각 구성 요소의 크기, 위치, 결합 관계 등은 본 발명의 사상을 충분히 명확하게 전달할 수 있도록 하기 위해서 또는 설명의 편의를 위해서 일부 과장 또는 축소되거나 생략되어 기술되어 있을 수 있고, 따라서 그 비례나 축척은 엄밀하지 않을 수 있다.
- [0080] 또한, 본 명세서에 기재된 각 단계에 있어 식별 부호(예를 들어, 도면 부호)는 설명의 편의를 위하여 사용되는 것일 뿐이며, 이들 식별 부호는 각 단계의 순서를 확정적으로 지정하여 설명하는 것이 아니며, 문맥상 각 단계의 특정 순서를 명시적으로 기재하지 않는 이상 본 명세서에 기재된 각 단계의 순서와 상이하게 발생할 수도 있다.
- [0081] 즉, 본 발명의 각 단계는 본 명세서에서 기재된 순서대로 발생할 수도 있고, 실질적으로 동시에 수행될 수도 있으며, 필요하다면 순차적으로 진행되는 것이 아니라 이와 정반대로 역방향의 순서대로 수행될 수도 있으며, 필요에 따라서 일부 단계를 생략한 채로 수행될 수도 있음을 알아야 한다.
- [0082] 또한, 이하에서, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 구성, 기타 통상의 기술자라면 충분히 기술적으로 유추할 수 있는 구성, 및 종래 기술을 포함하는 공지 기술에 대한 구성 등에 대한 상세한 설명은 생략될 수도 있음을 알아야 한다.
- [0084] 온실 가스의 지중 주입으로 인한 인공 지진을 피하기 위해서는 지중 유체 저장 부지로 선정된 곳에 존재하는 단층(fault)이 재활성화될 가능성을 가장 먼저 파악하여야 하며, 이를 위해서는 임계 공극압 섭동(CPP: critical pore pressure perturbation) 기법을 사용할 수 있으며, 본 발명의 발명자들은 지중 유체 저장에 의해서 초래되는 다공 탄성 응력을 사용하는 반해석적(semi-analytic) 방법을 사용하여 단층의 재활성화 가능성을 알 수 있었다.
- [0085] CPP는 초기 저장소 압력(initial reservoir pressure)과 온실 가스를 주입할 때의 단층의 재활성화를 초래할 수 있는 압력간의 차이를 의미한다. 따라서, CPP를 알 수 있으면 단층의 재활성화 여부 또한 예측할 수 있을 것으로 기대된다.
- [0086] 이 CPP를 추정하기 위해서는 몇 가지 기본 자료, 즉 단층의 구조와 마찰 계수, 현장(in-situ) 응력의 방위(orientation)와 크기, 및 저장소 암석의 물성치 등이 확보되어야 한다.
- [0087] 여기에서, 단층의 구조는 지중 저장 부지에서 얻은 지진 데이터를 해석하여 작성한 3 차원 단층 지도로부터 알 수 있다.
- [0088] 또한, 마찰 계수는 저장소 인근의 단층으로부터 얻은 천연 단층 가우지(gouge)에 대해 일련의 직접 진단 시험을 수행하여 측정될 수 있으며, 이는 도 10의 (a) 및 (b)를 참조하여 후술하기로 한다.
- [0089] 또한, 온실 가스 주입 전의 현장 응력장(in-situ stress field)은 저장소의 파일럿 시추공에서 추출한 코어 시료를 측정하고, 저장소 인근의 시추공에서 수행한 웰 로그(well log) 및 웰 시험(well test) 데이터와 같은 물리 검층 데이터를 통합하여 결정될 수 있다.
- [0090] 현장 응력은 CO<sub>2</sub>와 같은 온실 가스가 주입됨에 따라서 변동되며, 따라서 단층의 재활성화 여부를 해석함에 있어서, 이와 같은 현장 응력의 변동을 이용할 수 있다.
- [0092] 도 1은, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 설명하기 위한 전체적인 순서도이다.
- [0093] 도 1에 따르면, 본 발명의 바람직한 일 실시예에 따른 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법은, 부지를 조사하는 단계(S100), 조사된 부지의 물리 검층 데이터를 획득하는 단계(S200), 물리 검층 데이터를 해석하여 응력 변환을 계산하는 단계(S300), 계산 결과 단층이 파괴될 우려가 있는 저장소의 최대 내부압을 산출하는 단계(S400), 및 온실 가스 주입 단계(S500)를 포함할 수 있다.

- [0094] 부지를 조사하는 단계(S100)는, 온실 가스를 지중 저장하기 위한 대상 지역을 조사하여 최종적으로 온실 가스의 지중 저장에 적합한 부지를 선정하는 단계이며, 이때 온실 가스의 지중 저장에 적합한 부지로는, 상술한 바와 같이, 비어있는 탄화 수소층, 대수층 또는 미채굴 석탄층 중에서 하나 이상이 선택될 수 있다.
- [0095] 이들 부지에 대해서는 공허 모암(cap rock)의 존재를 확인하여야 하나, 비어있는 탄화 수소층의 경우에는 통상 모암의 존재가 확실하므로, 가장 바람직한 저장소 후보라고 할 수 있다.
- [0096] 대수층의 경우에는, 대수층에 유지되어 있는 유체를 밀어내면서 온실 가스가 주입될 수 있으며, 석탄층의 경우에는, 다수의 공극이 형성되어 있기 때문에 이들 공극에 온실 가스가 주입될 수 있다.
- [0097] 이와 같은 후보 부지는 전지구적으로 작성된 지질 데이터를 참조하여 비교적 용이하게 조사·결정할 수 있다.
- [0098] 한편, 저장소로 조사·선정된 부지에 대해서는 일괄적으로 결함이나 단층 또는 가우지(gouge)가 있는지 확인하여야 한다.
- [0099] 특히, 결함이나 단층의 확인을 위해서 지질 탐사를 수행할 수 있으며, 탐사공을 굴착하여 필요한 가우지를 획득할 수 있다.
- [0101] 다음으로, 물리 검층 데이터를 획득하는 단계(S200)는 조사된 부지에 대해서 필요한 물리 검층 데이터(단순히, 검층 데이터, 또는 데이터라고도 함)를 획득하는 단계로서, 이 검층 데이터에는, 예를 들어, 온도, 밀도(density), 음파, 전기 전도도, 전기적 성질에 따른 비저항, 코어 시료의 공극률, 중성자, 자연 방사선 붕괴 데이터 등을 들 수 있으나, 본 발명의 범위 내에서는, 음파와 관련된 데이터만 획득하여도 충분하므로, 본 발명에 서 물리 검층 데이터는 음파 물리 검층 관련 데이터를 의미함을 알아야 한다.
- [0102] 즉, 본 발명에 있어서 물리 검층 데이터의 획득에는 음파 탐사가 수행될 수 있으며, 이 음파 탐사를 통해 저장소 부지 내의 다수 개의 지층이 식별될 수 있다. 이때, 음파는 초음파일 수 있다.
- [0103] 더욱이, 음파 탐사를 통해서 지층의 조성 또는 종류까지도 도출될 수 있으며, 더 나아가서 각 지층의 3 차원 모델화도 가능(도 3의 (c) 참조)하다.
- [0105] 다음으로, 이 물리 검층 데이터를 해석하여 응력 변환을 계산하는 단계(S300)는, 저장소에 가해지는 응력을 도출하는 단계로, 대상 지역(다르게는 저장소) 또는 그 인근 시추공에서 획득된 응력 정보를 근거로 3 차원 모델 중 저장소로 선정된 지층에 존재하는 응력 및 방향을 유한 요소 해석법을 사용하여 산출할 수 있다.
- [0106] 이들 응력 및 방향은 삼각형 요소로 유한 분해한 3 차원 모델을 유한 요소 해석하여 계산할 수 있으며, 이때 응력은  $\{S_h, 0, 0; 0, S_H, 0; 0, 0, S_v\}$ 로 표현될 수 있으며, 여기에서  $S_h$ 는 최소 수평 응력,  $S_H$ 는 최대 수평 응력,  $S_v$ 는 수직 응력을 지칭한다.
- [0107] 또한, 본 응력 변환을 계산하는 단계(S300)에서, 인장 응력은  $S_h, S_H$ , 및  $S_v$ 의 벡터 합으로 산출될 수 있다.
- [0109] 한편, 본 응력 변환을 계산하는 단계(S300)에서, 전단 응력은,  $\{S_h, 0, 0; 0, S_H, 0; 0, 0, S_v\}$ 을  $S_{ics}$ (현장 응력 텐서)라고 하면, 하기 수학식 2를 통해 ICS 좌표계의 현장 주응력을 ECS 좌표계의 응력 성분으로 응력 변환(stress transformation)하고, 이어서 하기 수학식 3의 행렬(matrix)을 도출하고, 도출된 행렬 내의 각 원소(element)를 하기 수학식 4에 대입하여 산출될 수 있다.

**수학식 2**

[0110] 
$$S_{ics2ecs} = E^T S_{ics} E$$

[0111] 단,  $E$ 는 변환 행렬이고,  $E^T$ 은 행렬( $E$ )의 전치 행렬이며, 특히 행렬( $E$ )은 통상의 기술자라면 잘 알고 있는 바와 같이 방향 코사인(directional cosine)으로 정의되는 행렬이다.

수학식 3

[0112] 
$$\begin{bmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}$$

수학식 4

[0113] 
$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}$$

[0114] 다음으로, 이 계산의 결과 단층이 파괴될 우려가 있는 저장소의 최대 내부압을 산출하는 단계(S400)가 수행될 수 있으며, 상술한 방법에 의해서 도출한 인장 응력과 전단 응력을 하기 수학식 5에 대입하고, 이 수학식을 만족하는 경우의  $P_p$ 를 해당 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압으로 결정·산출할 수 있다.

수학식 5

[0115] 
$$\tau \geq \mu(\sigma_n - P_p), \quad P_p = \sigma_n - \frac{\tau}{\mu}$$

[0116] 이때,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\sigma_n$ 는 인장 응력,  $P_p$ 는 저장소 내부의 압력,  $\mu$ 는 0.2 ~ 0.8 일 수 있다.

[0117] 특히,  $\mu$ 는 지중 유체 저장 부지의 물리 검증 데이터를 획득하는 중에, 해당 지중 유체 저장 부지 또는 그 부근의 시추공에서 획득한 시료(시추 시료)를 분석하여 산출될 수 있으며, 이에 대해서는 추후에 설명하기로 한다.

[0118] 또한,  $\mu$ 는 조사된 저장소 후보지 중에서 선택된 저장소의 지층에 존재하는 가우지의 양에 반비례하여 산출될 수 있다.

[0120] 이때, 본 발명에서는 지중 유체 저장 부지로부터 시료를 직접 입수할 수 없는 경우를 상정하여, 실험적으로 마찰 계수( $\mu$ )의 하한을 0.25로, 마찰 계수( $\mu$ )의 상한을 설정하였으며, 이 설정값에 따라서 계산하면, 본 발명에 따른 CPP는  $\mu = 0.25$ 에 대해서는 ~ 3 MPa가,  $\mu = 0.6$ 에 대해서는 ~ 10 MPa가 산출된다.

[0121] 그러나, 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압, 즉 저장소의 압력 상한값은 안전, 즉 안전율을 고려하여 ~ 6 MPa 이하로 유지되는 것이 바람직하다.

[0122] 따라서, 본 발명으로부터 알 수 있는 바와 같이, 상술한 압력 상한값을 벗어나는 경우에 인공 지진이 발생할 수 있음을 알 수 있으며, 온실 가스의 지중 저장에 있어서, 안전을 고려한 압력 증가값은 최저 3 MPa로부터 최대 6 MPa 범위 내로 유지되는 것이 바람직함을 알 수 있다.

[0124] 실시예

[0125] 이하에서는, 본 발명의 바람직한 실시예를 통해 본 발명에 따른 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법에 대하여 살펴보기로 한다. 이하의 설명은 본 발명의 바람직한 예시로 제시된 것일 뿐이며, 어떠한 의미로도 이하의 설명에 의해서 본 발명 또는 본 발명의 범위가 제한되는 것으로 해석하여서는 아니된다.

[0127] 도 2의 (a)는, 지중 유체 저장 부지로 선정된 대상 지역(적색 사각형으로 표시)을 나타내는 지도이고, 도 2의 (b)는, 대상 지역의 지질도로, 기존 시추공의 위치와 함께 암석 분포 및 단층 흔적을 나타낸 도면이다.

[0128] 도 2의 (a)에 선정된 대상 지역은 대한민국의 포항만(Pohang basin)의 퇴적 분지이며, 본 발명의 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 도출하기 위해 사용한 구체적인 장소는 도 2의 (b)에서 Study Site로 표시하였다.

[0129] 도 2의 (b)는 포항만 연안을 나타내고 있으며, 도 2의 (b)에 있어서 해당 지질 구조는 지질학적 사건에 의해서

형성되었다는 점만 언급하고 그 구체적인 지질적 특징에 대해서는 그 설명을 생략하며, 다만, 굵은 실선과 점선은 각각 현재 알려진 단층 및 추정된 단층 구조를 지시하고 있음을 알아야 한다.

- [0130] 도 2의 (b)로부터 대부분의 단층은 형성 방향(trend)이 NE-SW 방향으로 되어 있음을 알 수 있다.
- [0132] 도 3의 (a)는, 지중 유체 저장 부지의 지층 상부를 나타내는 도면이고, 도 3의 (b)는 도 3의 (a)의 X-X' 선을 따른 지진파 단면도로 저장소 범위 내의 단층의 존재를 나타내며, 도 3의 (c)는 해당 지중 유체 저장 부지의 3D 지형 모형을 나타낸 입체도로 저장소의 단층, 및 지층 상부와 지층 하부를 나타내며, 도 4는, 탐사용 시추공에서 추출한 코어 전체로부터 입수한 정보를 나타낸 지층 구분 단면도이다.
- [0133] 도 3의 (a) 내지 (c)로부터, 지중 유체 저장 부지의 지표하 구조의 3D 지형을 알 수 있으며, 특히 본 발명의 발명자들이 속해 있는 한국지질자원연구원에서 자체적으로 수행한 3D 지진파 탐사에 의해서 얻은 도 3의 (a) 및 (b)를 깊이 변환 등의 기법을 사용하여 해석하여 도 3의 3D 지형을 얻었으며, 이로부터 9 개의 지층 층위(horizon)와 6 개의 기존 단층을 확인할 수 있다.
- [0134] 또한, 도 2의 (b)에서와 마찬가지로, 도 3의 (c)에서 식별된 각 단층은 대략 NE-SW 방향으로 연장되어 있음을 알 수 있다.
- [0135] 도 3의 (a)에서, 본 발명의 발명자들은 수직 탐사공을 BH1 지역(수심 15.7 m)에 천공하였으며, 그 깊이는 도 3의 (b)에 나타난 바와 같이, 대략 해저면하 1000 미터(1000 mbsf, meters below sea floor) 정도이며, 노란색으로 표시한 부분이 지중 유체 저장소에 대응한다.
- [0136] 탐사공(BH1)은 중간 영역으로서 700 mbsf까지 천공한 다음 시멘트 등을 사용하여 밀봉하였으며, 계속하여 목표 깊이(TD, total target depth)인 1000 mbsf에 도달할 때까지 천공하였다.
- [0137] 탐사공의 천공이 종료된 이후에 탐사공이 붕괴되었기 때문에 원래 목표였던 탐사공을 통한 추가적인 물리 검층 데이터 수집은 실패하였지만, 해당 탐사공의 시추 코어는 확보되었기에, 이를 분석하여, 도 4에서 나타난 바와 같은 지질 주상도(stratigraphic column)를 얻었고, 이를 분석하여 768 내지 782 mbsf 사이의 온실 가스의 지중 저장에 적합한 잠재적인 후보처(도 4에 있어서, Reservoir 2라고 표시된 부분)를 얻었다.
- [0138] 도 4로부터, 후보처의 상부 지층이 지중에 주입된 온실 가스의 유출을 적절하게 방지할 수 있는 지층으로 분석되었다.
- [0139] 또한, 모암(cap rock)의 평균 변위 압력(displacement pressure)은 수은 기공률 측정 장치(mercury porosimeter, 모델명: Micromeritics Autopore III)를 사용하여 측정하였으며, 대략 20.7 Mpa로 측정되었다.
- [0141] 투수성 저장소에 온실 가스(예컨대, CO<sub>2</sub> 또는 CH<sub>4</sub>)를 주입·저장하게 되면 공극압이 증가하게 된다.
- [0142] 한계를 초과하여 과도하게 공극압이 증가하게 되면, 기존 단층의 미끄러짐[slippage]을 유발할 수 있다.
- [0143] 한편, 도 3의 (a) 내지 (c)로부터 알 수 있는 바와, 온실 가스 지중 주입 후보처 주변에도 다수의 단층이 존재하고 있으며, 온실 가스의 주입에 의해서 이들 다수의 단층에 발생할 수도 있는 단층의 미끄러짐을 파악하기 위해서 본 발명의 발명자들은, 상술한 바와 같이, 반해석적 방법을 사용하였다.
- [0144] 구체적으로, 먼저, 3D 지진 탐사 결과 얻은 도 3의 (a) 내지 (c)의 데이터에 대해서 각각의 삼각형 요소로 이산화 처리(discretize)하였다.
- [0145] 이때 사용한 삼각형 요소는 통상적인 유한 요소 해석법에서 사용되는 것이며, 따라서 구체적인 이산화 처리 방법, 방법에 대해서는 통상의 기술자라면 잘 알고 있을 것이라 판단되어 더 이상의 설명은 생략하기로 한다.
- [0147] 또한, 통상의 기술자라면, 지표면하 유체 주입 등에 의해서 저장소 압력이 변동되면 석화된(lithified) 다공성 암석에 가해지는 다공 탄성 응력에 의한 수평 응력의 변화를 초래하며, 이 수평 응력의 변화는 다음 수학적 식 6으로 표현될 수 있음을 잘 알 것이다.

**수학적 식 6**

[0148] 
$$\Delta S_h = \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \Delta P_p$$

- [0149] 여기에서,  $\Delta S_h$ 는 최소 또는 최대 수평 방향 주응력의 변동율,  $\nu$ 는 포아송비(Poisson ratio)를,  $a$ 는 통상 1.0으로 간주되는 비오투(Biot) 계수를, 또한  $\Delta P_0$ 는 지표면하 유체의 주입 등에 의한 저장소 압력의 증가를 나타낸다.
- [0150] 본 발명에 있어서, 전체 수평 응력( $S_h$  및  $S_v$ )은 온실 가스(CO<sub>2</sub> 등)의 주입에 따른 과도한 압력으로 인해 증가하게 되지만, 반면에 상부에 위치하는 포화 암석 지층의 무게에 상응하는 전체 수직 응력( $S_v$ )은 수직 응력에서의 변화가 자유 이동 경계 조건에 의해서 작은 값을 가지기 때문에 다공 탄성(poroelasticity)에 있어서 일정하게 유지된다고 가정하였다.
- [0151] 동일한 깊이의 저장소에서는 거의 변동되지 않는다고 가정하면 과도한 압력( $\Delta P_0$ )에 의해서 초래되는 현장 응력 텐서(tensor)에서의 변동은 상술한 수학적 식 6을 사용하여 계산할 수 있다.
- [0152] 따라서, 현장 응력을 각각의 삼각형 요소로 분해하면 전단 응력과 수직 응력을 계산할 수 있다.
- [0153] 여기에서, 단층 요소(fault element)에 가해지는 현장 응력을 분해하기 위해서는 상호 좌표계를 변환하는 응력 변환(stress transformation)이 필요하다.
- [0154] 본 발명의 발명자들은 응력 변환을 위해서 세 가지 좌표계, 즉 지구 좌표계(ECS, Earth Coordinate System,  $X_e$ - $Y_e$ - $Z_e$ ), 현장 응력 좌표계(ICS, In-situ stress Coordinate System,  $X_s$ - $Y_s$ - $Z_s$ ), 및 단층 좌표계(FCS, Fault Coordinate System (FCS),  $x$ - $y$ - $z$ )를 정의하였으며, 이에 대해서 도 5의 (a) 및 (b)를 참조하여 이하 설명하기로 한다.
- [0156] 도 5는, 지중 유체 저장 부지에서의 최대 허용 유체압 산출 방법을 설명하기 위한 기본적인 좌표 변환을 설명하기 위해서, 도 5의 (a)는 지구 좌표계(ECS, earth coordinate system;  $X_e$ - $Y_e$ - $Z_e$ )와 현장 응력 좌표 시스템(ICS, In-situ stress Coordinate System,  $X_s$ - $Y_s$ - $Z_s$ ) 사이의 좌표 관계를 설명하기 위한 도면이고, 도 5의 (b)는 ECS와 FCS(Fault Coordinate System,  $x$ - $y$ - $z$ ) 사이의 좌표 관계를 설명하기 위한 도면이다.
- [0157] 도 5의 (a)에 따르면, ECS와 ICS의 좌표 관계를 알 수 있으며, 여기에서, ECS는 각도( $\alpha$  및  $\beta$ )로 정의될 수 있고,  $\alpha$ 는  $X_e$  축(북, North)으로부터 수평면 상의  $Z_s$  축에 투영되는 최소 수평 주응력 방향까지 측정된 각도이며,  $\beta$ 는  $Z_e$  축으로부터 수직 응력 방향까지 측정된 각도이다. 각도( $\beta$ )는 과도한 응력이 수직 방향으로부터 빗겨나게 되는 일반적인 경우를 가정하여 설정한 값이다.
- [0158] 이와 같은 과도한 응력에 의한 회전 어긋남은 전형적으로 지질학적 구조(예컨대, 단층) 부근이나 표면 형태가 현저하게 변형되는 경우 발생할 수 있다.
- [0159] 이와 같이,  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 결정되면, ICS에서의 현장 응력은 상술한 수학적 식 2를 사용하여 ECS에서의 응력 성분으로 변환될 수 있다.
- [0161] 다음으로, 도 5의 (b)는 ECS와 FCS 간의 관계를 나타내고 있으며, 여기에서 FCS는 소정의 각도( $\phi$ 와  $\gamma$ )로 정의된다. 각도( $\phi$ )는  $X_e$  축과 단층 요소에 대한 단위 법선(unit normal)의 방향 사이의 각도이다.
- [0162] 여기에서, 단층 요소에 대한 단위 법선은 다음 수학적 식 7에 의해서 결정될 수 있다.

**수학적 식 7**

$$\hat{n} = \frac{Ax+B}{|Ax+B|}$$

- [0163]
- [0164] 여기에서,  $A$  및  $B$ 는 3 차원 공간 내에서 세 점으로 결정되는 임의의 벡터이며, 예를 들면, 도 5의 (b)에서  $P_1$ ,  $P_2$ , 및  $P_3$ 일 수 있다.
- [0165] 또한,  $\gamma$ 는  $Z_e$  축과  $z$  축 사이의 각도를 나타낸다.

[0167] ECS에서의 각 응력 성분은 다음 수학적 식 8을 사용하여 FCS에서의 응력 성분으로 변환될 수 있다.

**수학적 식 8**

[0168] 
$$S_{ecs2fcs} = LS_{ics2ecs}L^T = \begin{pmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix}$$

[0169] 여기에서,  $S_{ecs2fcs}$ 는 ICS를 ECS로 변환하였을 때의 각 응력 성분이고,  $L$ 은 ECS를 FCS로 변환하였을 때의 변환 행렬이며,  $L^T$ 는 행렬( $L$ )의 전치 행렬이다.

[0170] 단층 요소에 가해지는 수직 응력( $S_n$ )은  $S_{xx}$ 와 동일하고, 또한 이 때의 전단 응력( $\tau$ )은, 수학적 식 4로 나타내는 바와 같이, 두 개의 전단 성분의 합성( $\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}$ )이다.

[0171] 단층 요소에 작용하는 수직 및 전단 응력을 얻은 다음에, 상술한 쿨롱 파괴 기준을 사용하여 어떤 단층 요소가 미끄러지게 될 것인지를 결정할 수 있다.

[0172] 상술한 수학적 식 1의 쿨롱 파괴 기준은, 다르게는 다음 수학적 식 9로 나타낼 수 있다.

**수학적 식 9**

[0173] 
$$\tau = \mu\sigma_n = \mu(S_n - \alpha P_p - \Delta P_p)$$

[0174] 여기에서,  $\tau$ 는 전단 응력을,  $\sigma_n$ 은 유효 수직 응력을,  $P_p$ 는 온실 가스 주입전 공극압(pore pressure)을,  $\Delta P_p$ 는 지표면하 유체의 주입 등에 의한 저장소 압력의 증가를, 또한  $\mu$ 는 마찰 계수이다.

[0175] 이 수학적 식 9를 정리하여, 이하의 수학적 식 10에 따라서 파괴 기준을 만족할 때의 공극압을 계산할 수 있으며, 단층이 재활성화될 때의 공극압은 임계 공극압(critical pore pressure) 또는 최대 유지 가능한 저장소 압력이라고 할 수 있다.

**수학적 식 10**

[0176] 
$$P_p^{crit} (= \alpha P_p + \Delta P_p) = S_n - \frac{\tau}{\mu}$$

[0177] 한편, 상술한 바와 같이, 온실 가스의 주입 결과 저장소의 압력이 지속적으로 증가하게 되고 따라서 현장 응력장이 변동(수학적 식 6 참조)될 수 있다.

[0178] 일련의 컴퓨터 계산을 거치면, 단층이 재활성화될 수 있는 공극압 증가 한계를 산출할 수 있으며, 본 발명의 발명자들은 수학적 식 11로 표현할 수 있는 임계 공극압 섭동(CPP: critical pore pressure perturbation)( $\Delta P_p$ )을 사용하여 임계 공극압과 기준 저장소 압력 간의 차이를 나타낼 수 있었다.

**수학적 식 11**

[0179] 
$$\Delta P_p = P_p^{crit} - \alpha P_p$$

[0180] 본 발명의 발명자들은 상기 수학적 식 11로 표현되는 임계 공극압 섭동(CPP)을 사용하여 결정적으로 어떤 단층 요소가 응력을 받는지를 알아냈다.

- [0182] 현장 응력의 특징
- [0183] 먼저, 현장 응력의 방향에 대해서 설명하기로 한다.
- [0184] 응력은 차수가 2 인 텐서(tensor)로 표현할 수 있고, 이때 응력은 세 개의 서로 직교하는 주응력, 즉  $S_1$ ,  $S_2$ , 및  $S_3$ 의 방향 및 강도로 나타낼 수 있다. 실용적으로 문제를 해결하기 위해서, 현장 주응력의 방향은 대략 수직 및 수평으로 존재하고 있다고 가정하고 있으며, 본 발명에서도 이와 동일한 가정을 채택하였다.
- [0185] 이 경우, 주응력은 수직 응력에 대해서는  $S_v$ 로, 최대 및 최소 수평 응력에 대해서는 각각  $S_H$  및  $S_h$ 로 나타낼 수 있다.
- [0186] 상술한 바와 같이, 탐사공의 천공이 종료된 이후에 탐사공이 붕괴되었기 때문에 저장소에서의 현장 응력의 방향을 한정할 수 있는 데이터를 수집할 수 없었으므로, 본 발명의 발명자들은 인근의 시추공(예를 들면, 도 2의 (b)의 GBH5)으로부터의 기존 응력 정보를 사용하였다.
- [0187] 시추공(GBH5)은 본 발명에서 사용한 저장소로부터 대략 7 킬로미터 정도 떨어져 있으며, 이 시추공으로부터 현장 응력의 방향을 한정하는데 매우 유용한 시추공 파쇄 및 시추로 인한 인장 파괴(DITF)를 보여줄 수 있는 이미지 로그(image log)를 얻을 수 있었다.
- [0188] 시추공 파쇄는 등방이고 균질한 암석층에 형성한 수직공에서의 최소 수평 주응력( $S_h$ )의 방향을 따라서 정렬된 직경 방향으로 대향하는 압축 파쇄 영역을 나타낸다.
- [0189] 이와 반대로, DITF는 최대 수평 주응력( $S_H$ )의 방향을 따라서 형성된 직경 방향으로 대향하는 인장 파괴를 나타낸다.
- [0190] 음파(sonic) 또는 비저항 이미지 로그로 파악할 수 있는 시추공 파쇄 및 DITF는 현장 응력의 방향을 나타내는데 신뢰성이 있는 방법으로 사용되고 있으며, 지중 유체 저장 부지 인근 지역에서 실행한 음파 물리 검층 결과 알아낸 공벽 파쇄(breakout)와 시추로 인한 인장 파괴(DITF, drilling-induced tensile failure)를 분석한 현장 응력의 방향을 나타내는 그래프를 도 6에 나타내었다.
- [0191] 도 6은, 지중 유체 저장 부지 인근 지역(GBH5, 도 2의 (b) 참조)에서 실행한 음파 물리 검층 결과 알아낸 공벽 파쇄(breakout)와 시추로 인한 인장 파괴(DITF, drilling-induced tensile failure)를 분석한 현장 응력의 방향을 나타내는 그래프이다.
- [0192] 도 6으로부터, 시추공 파쇄는 대략 670 미터 내지 대략 700 미터의 깊이(단위: mbsf)에서 발생하였고, DITF는 770 미터 내지 810 미터 사이의 깊이에 걸쳐서 검출되었으며, 시추공 파쇄 방향은 도면에서 수직 점선으로 나타내는 바와 같이 모두 일정함을 알 수 있었다.
- [0193] 또한, 시추공 파괴로부터 알 수 있는 바와 같이, 최소 수평 응력( $S_h$ )의 방위각은 대략  $40^\circ$  이며, 또한  $S_H$ 가  $S_h$ 에 대해서 수직이기 때문에  $S_H$ 는 대략  $130^\circ$  이다.
- [0194] 이들 현장 응력의 방향은 저장소 인근에서의 진앙면(earthquake focal plane) 메커니즘 분석으로부터 얻은 응력 방향과 대략 일치한다(도 7의 (a) 및 (b) 참조).
- [0195] 또한, 본 발명의 발명자들은 실험실에서의 직접 진단 실험을 통해서, 저장소 인근에서의 단층에서 얻은 단층 암석에 대한 마찰 계수는 0.2 내지 0.3의 범위 내에 있음을 알 수 있었으나, 본 발명에서는 마찰 계수를 하한으로서 0.25와 상한으로서 0.6을 채택하였으며, 참고적으로 본 발명의 단층 가우지는 속도 강화 거동(velocity-strengthening behavior, 즉  $a - b > 0$ )을 보여주고 있어 진단 미끄러짐이 발생한 이후에도 인공 지진을 동반하지 않은 단층 미끄러짐을 나타내고 있음을 알아야 한다.
- [0197] 도 7의 (a)는, 1999 년 이래 대한민국 지역에서 기록된 76 회의 지진 진원 메커니즘의 해(solution)로부터 해석한 최대 수평 응력의 방향을 나타내는 도면이고, 도 7의 (b)는 도 7의 (a)의 사각형 점선 영역의 상세도이며, 비치 볼(beach ball)에 동시에 표시한 숫자는 진원까지의 거리를 km로 표시한 도면이다.
- [0198] 도 7의 (a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이, 대부분의 지진은 10 내지 15 킬로미터 사이에서 깊이에서 발생(도 7의 (a)의 히스토그램 참조)하였으며,  $S_H$ 의 평균 방위각은 대략  $70^\circ$  였다(도 7의 (a)의 로즈 다이어그램(rose diagram) 참조).



[0199] 도 7의 (a)에서 사각형 박스로 표시한 부분(저장소로부터 대략 50 킬로미터 이내의 지역)을 상세히 나타낸 도 7의 (b)로부터 탐사공에 인접하여 발생한 지진에 대한 진원 메커니즘의 해로부터 얻은  $S_H$ 의 방위각은 인접 시추공에서 관찰된 시추공 파괴(시추공 파쇄 및 DITF)의 분석 결과 얻은 방향(A, B, 및 C로 표시)과 유사함을 알 수 있다.

[0200] 응력 방향에 대한 모든 정보로부터 저장소 인근의 최대 수평 응력은 ESE-WNW 방향으로 작용하며, 일부 약간 상이한 곳도 있지만 수백 미터 정도의 얇은 곳에서 20 킬로미터 정도의 매우 깊은 곳까지 상대적으로 일정함을 알 수 있다.

[0202] 다음으로 현장 응력에서의 크기(magnitude)에 대해서 살펴보기로 한다.

[0203] 본 발명의 발명자들은 상술한 현장 응력의 방향에 추가하여, 세 가지의 현장 주응력( $S_v$ ,  $S_H$ , 및  $S_h$ )의 크기에 대해서도 살펴 보았다.

[0204] 먼저, 공극압(pore pressure)( $P_p$ )은 정수압(hydrostatic) 상태에 있다고 가정하였다. 또한, 통상적으로 정의되는 바와 같이, 수직 응력( $S_v$ )은 특정 깊이에서 가해지는 상부 암석 및 유체의 무게에 의한 응력으로 정의하였다.

[0205] 해상 시추공의 경우, 과도한 응력의 크기는 다음 수학적 식 12에 따라서 해저면으로부터의 수주(water column)의 무게를 깊이에 따른 겉보기 밀도 검층 데이터를 적분하여 얻은 유체 포화 암석의 무게에 추가하여 추정할 수 있다.

### 수학적 식 12

[0206] 
$$S_v = \rho_w g z_w + \int_{z_w}^z \rho_b(z) g dz$$

[0207] 여기에서,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도(대략  $1.03 \text{ g/cm}^3$ 으로 간주),  $\rho_b$ 는 유체 포화 암석의 겉보기 밀도,  $g$ 는 중력 가속도( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $z_w$ 는 수심,  $z$ 는 해저면으로부터 측정된 깊이이다. 상술한 바와 같이, 탐사공 위치에서의 수심은 대략 15.7 m이다.

[0209] 상술한 바와 같이, 본 발명의 발명자들이 천공한 탐사공은 천공 이후에 붕괴되었기 때문에 밀도 검층 데이터(density log)는 입수할 수 없었으며, 따라서 탐사공으로부터 확보한 시추 코어의 암석 샘플을 이용하여 밀도 검층 데이터를 간접적으로 측정하기로 하였다.

[0210] 먼저, 암석 샘플의 일부를 물로 포화시킨 다음, 헬륨 가스를 사용하는 비중병(pycnometer)(퀀타크롬 인스트루먼트사(Quantachrome Instruments)의 PENTAPYC 5200E)을 사용하여 겉보기 밀도를 측정(도 8의 (a) 참조)하였다.

[0211] 수학적 식 12를 사용하여 시추공을 따르는 수직 응력 프로파일을 얻었고, 또한 평균 응력의 기울기는 대략 19.5 MPa/km임을 알 수 있었다(도 8의 (a) 참조).

[0212] 이 기울기값은 시추공을 따라서 기록한 밀도 검층 데이터를 사용한 인접 시추공(예를 들면, 도 2의 (b)의 TB2, 본 발명의 탐사공으로부터 약 7 km 이격되어 위치함)에서 얻은 수직 응력 기울기(18.0 MPa/km, 도 8의 (b) 참조)와 유사하였으며, 두 시추공 간의 거리가 가깝기 때문에, 본 발명의 발명자들은 이들 사이의 지층 상태 역시 상당히 유사할 것이라고 간주하였다.

[0214] 최소 수평 주응력은 통상적 유압 파쇄 시험 또는 연장된 누설 시험을 통해서 측정될 수 있으며, 현장 시험에서 기록한 압력을 해석하여 파쇄 근접 압력, 즉 파쇄에 근접할 때의 최소 수평 응력의 크기와 동일한 파쇄 근접 압력을 얻을 수 있다.

[0215] 최대 수평 응력( $S_H$ )의 크기는 직접적으로 측정할 수 있는 방법이 없으므로 정량화하기 어려운 수치로 알려져 있지만, 본 발명이 속하는 기술 분야에서는 이를 간접적으로 측정하는 기법이 개발되어 있으며, 예를 들면, 시추공 파괴(파쇄 및/또는 DITF) 특성 데이터를 포함하는 응력 다각형(stress polygon)(또는 마찰 한계)을 사용하여  $S_H$ 의 크기를 한정할 수 있으며, 통상의 기술자라면 그 방법에 대해서 잘 알 것이므로 구체적인 설명은 생략하기로 한다.

- [0217] 상술한 바와 같이, 탐사공이 붕괴되었기 때문에, 인접한 시추공(TB2)에서 수행된 유압 과쇄 시험 데이터를 분석하여 얻은 응력비(stress ratio)를 사용하였다(도 8의 (b) 참조).
- [0218] 도 8의 (a)는, 지중 유체 저장 부지의 시험용 시추공에서의 깊이별 현장 응력의 변화를 나타낸 그래프이고, 도 8의 (b)는 육상의 시추공에서의 깊이별 현장 응력의 변화를 나타낸 그래프이다.
- [0219] 도 8의 (b)로부터, 시추공(TB2)에 대해서 최소 수평 응력대 수직 응력비( $K_{min} = S_h/S_v$ )는 0.91로 추정되었으며, 한편으로 최대 수평대 수직 응력비( $K_{max} = S_h/S_v$ )는 1.18로 추정되었다.
- [0220] 이들 응력비를 탐사공으로부터 얻은 수직 응력 프로파일에 곱하면, 온실 가스 저장소에 대한 최소 및 최대 수평 응력의 프로파일을 얻을 수 있으며(도 8의 (a) 참조), 구체적으로  $S_h$  및  $S_h$ 의 평균 기울기는, 각각, 17.8 MPa/km 및 23.5 MPa/km였다.
- [0221] 이들 응력 프로파일로부터 저장소에서의 응력 체계(stress regime)는 주향 이동 단층(strike-slip fault)을 생성(즉,  $S_h > S_v > S_h$ )하는 것을 나타내고 있으며, 이는 도 7의 (b)에 나타낸 바와 같이 저장소 주위의 영역에 대한 진앙(earthquake focal) 메커니즘의 결과와 일치함을 알 수 있다.
- [0223] 다음으로, 단층의 미끌림을 파악하는데 가장 중요한 단서를 제공할 것으로 기대되는 단층면 가우지(또는 단층 가우지)의 실제 전단 응력을 측정하는 방법에 대해서 간단하게 설명하기로 한다.
- [0224] 먼저, 본 발명에 있어서, 상술한 바와 같이, 탐사공의 붕괴 때문에 직접적인 지진파 물리 검층 데이터의 획득에 실패하였고, 또한 마찰 미끌림(friction sliding) 실험을 위한 단층 암석 재료(예컨대, 단층 가우지) 획득 또한 실패하였기 때문에, 예를 들어, 내부 단층 구조 및 광물 성분과 같은 물리적인 특성이 저장소 인근의 탐사공에서와 사실상 동일한 것으로 간주되는 인근 시추공(예를 들면, PB1 및 PB2, 도 2의 (b) 참조)의 시추 중에 얻은 단층 가우지를 사용하여, 마찰 미끌림 실험을 수행하기로 하였다.
- [0225] 본 발명의 마찰 미끌림 실험에서 사용한 단층 가우지는 시추공(PB1)에서는 579.0 내지 579.2 m에서, 시추공(PB2)에서는 531.9 내지 532.1 m의 깊이에서 채취한 것이다.
- [0226] 이들 자연 상태의 단층 가우지에 대해서, 소정의 사전 처리를 수행하였으며, 여기에는 탈이온수를 사용하여 250  $\mu\text{m}$  이하가 되도록 체질(sieve)하였고, 다음으로 가우지 내의 각종 광물 성분이 온도 때문에 변성되는 것을 막기 위해서 60  $^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에서 일주일간 건조시켰으며, 마지막으로 분쇄하였다.
- [0227] 도 9는, 지중 유체 저장 부지 인근에 위치한 시추공으로부터 얻은 단층 가우지(fault gouge, 이하 시료)의 입자 크기의 분포를 나타내는 그래프이다.
- [0228] 도 9로부터, 시추공(PB1)에서 얻은 단층 가우지는 모드(mode)가 두 개인 입자 크기를 가지고 있음을 알 수 있으며, 시추공(PB1)에서 얻은 단층 가우지의 평균 입자 크기는 20  $\mu\text{m}$ 로, 시추공(PB2)에서 얻은 단층 가우지의 평균 입자 크기는 9  $\mu\text{m}$ 로 분석되어, 시추공(PB1) 보다 시추공(PB2)의 입자가 더욱 미세한 것을 확인하였다.
- [0230] 다음으로, 단층 가우지의 마찰 미끌림 실험을 위한 실험 장치 및 실험 절차에 대해서 간단하게 설명하기로 한다.
- [0231] 도 10의 (a)는, 지중 유체 저장 부지 인근 시추공에서 얻은 시료의 전단 시험을 위한 이중 전단 시험 장치(double direct-shearing apparatus)의 도면 대응 사시 사진이며, 도 10의 (b)는, 도 10의 (a)에 나타낸 이중 전단 시험 장치의 동작을 개념적으로 설명하기 위한 개략 단면도이다.
- [0232] 단층 가우지의 마찰 미끌림 실험은 실온에서도 10의 (a) 및 (b)에 나타낸 이중 전단 시험 장치를 사용하여 수행하였으며, 도면에서 알 수 있는 바와 같이, 도면의 수직 방향이 전단력(shear force)을 인가하고 수평 방향이 법선력(normal force)을 인가하고 있다.
- [0233] 도 10의 (a) 및 (b)에 나타낸 이중 전단 시험 장치를 사용한 실험은, 예컨대 수직 블록이 전단력을 측정하고, 수평 블록이 수직력을 측정하고 있지만, 이와 같은 구성은 통상의 기술자라면 잘 알 것이므로 이에 대한 더욱 구체적인 설명은 생략하지만, 전단력 및 법선력의 변위 측정에는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 같은 센서를 사용하여 연속적으로 측정할 수 있음을 알아야 한다.
- [0235] 이후에, 단층 가우지의 마찰 계수를 측정하고 또한 마찰 구조 계수(friction constitutive parameter)(a 및 b)를 얻기 위해서, 세 개의, 예컨대 5, 10, 및 20 MPa의 수직 응력에서 속도 변화 시험을 수행하였다(도 11의

(a) 및 (b) 참조).

- [0237] 도 11의 (a) 및 (b)는, 지중 유체 저장 부지 인근의 다른 시추공에서 얻은 시료에 대한 서로 다른 수직 응력에 대한 마찰 변위 곡선을 나타낸 그래프이다.
- [0238] 도면으로부터, 5 및 10 MPa에서의 수직 응력에 대해서는, 각각, 정상 상태의 전단 강도에 도달할 때까지 10  $\mu\text{m/s}$ 에서 2 내지 3 mm 미끄러지도록 설정되었고, 미끄러진 이후 이 미끄럼 속도는 1 mm에 대해서 1  $\mu\text{m/s}$ 로 즉각적으로 감소하고, 이어서 10, 100, 10, 및 1  $\mu\text{m/s}$  단위로 변동함을 알 수 있으며, 이와 같은 속도 변화 순서대로 모두 세 번 반복하였다.
- [0239] 다음으로, 20 MPa에서의 수직 응력에 대해서는, 초기 미끄럼 이후의 속도 변화는 1, 3, 10, 30, 및 100  $\mu\text{m/s}$ 로 변동시켰으며, 마찬가지로 총 3 회 반복하였다.
- [0240] 이때, 가우지의 전단 강도는 수직 응력을 일정하게 인가하면서 미끄러지게 하여 연속적으로 측정하였으며, 가우지의 응집이 제로(0)라고 가정하였을 때의 마찰 계수를 산출하였다.
- [0241] 본 발명에서 사용한 가우지는 수직 응력의 강도에 따른 독특한 응력-변형(stress-strain) 거동을 나타내고 있다.
- [0242] 예를 들어, < 20 MPa의 수직 응력에서는, 잔존 정상 상태 강도에 도달하기 전까지 전단 변위를 증가시키면 명백한 피크 강도와 이어지는 약화가 특징인 변형 연화(strain-softening)가 관찰되었다.
- [0243] 이와 반대로, 20 MPa의 수직 응력에서는, 두 개의 가우지 모두 전단 시험 내내 강도가 점진적으로 증가하는 변형 경화(또는 가공 경화) 거동을 나타내고 있다.
- [0244] 실험에 사용한 단층 가우지는 또한 수직 응력에 따라서 변동되는 마찰 계수를 보여주고 있으며, 응력이 높아지면 반비례하는 관계를 나타내고 있다.
- [0245] 즉, 피크 마찰 계수( $\mu_{\text{peak}}$ )는, 수직 응력이 높아지면 감소하는데, 예를 들면, 시추공(PB1)에서,  $\sigma_n = 5$  MPa일 때  $\mu_{\text{peak}} = 0.291$ 로부터,  $\sigma_n = 20$  MPa일 때  $\mu_{\text{peak}} = 0.218$ 로 변동하고, 또한 시추공(PB2)에서,  $\sigma_n = 5$  MPa일 때  $\mu_{\text{peak}} = 0.324$ 로부터,  $\sigma_n = 20$  MPa일 때  $\mu_{\text{peak}} = 0.234$ 로 변동한다(이상, 도 11의 (b) 참조).
- [0246] 따라서, 동일한 수직 응력에서는 시추공(PB2)에서 채취한 가우지가 시추공(PB1)에서 채취한 가우지보다 약간 더 높은 피크 강도를 가지고 있다.
- [0247] 시추공(PB2)에서 관측된 더 높은 피크 강도는 가우지 내에 섞여 있는 실리케이트 광물(예컨대, 수정)의 함량이 더 높기 때문인 것으로 추정된다.
- [0249] 단층 영역의 안정성 평가는, 상술한 바와 같이, 마찰률 파라미터( $a - b$ )를 계산하여 알 수 있으며, 이때 양의 값을 갖는  $a - b$ 는 마찰률 강화 반응을 나타내며, 이는 미끄럼 속도가 증가하면, 이 미끄러짐에 대한 저항이 증가하여 미끄러짐이 안정해지고 전단 미끄러짐이 발생하여도 인공 지진을 일으키지 않고도 미끄러질 수 있음을 의미한다.
- [0250] 이와는 반대로, 음의 값을 갖는  $a - b$ 는 마찰률 약화 반응을 나타내며, 이는 미끄럼 속도가 증가하면, 이 미끄러짐에 대한 저항이 감소하게 되어 지진성 미끄러짐을 일으킬 가능성이 높아짐을 의미한다.
- [0251] 미끄럼 속도에서의 즉각적인 변동에 대한 마찰 응답으로부터 마찰 구조 계수( $a$  및  $b$ )를 결정하기 위해서, 도 11의 (a)에 삽입한 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이, Dieterich-Ruina rate-state constitutive law를 적용하였다.
- [0253] 도 12의 (a) 내지 (c)는, 시료에 대해서 서로 다른 수직 응력에 대한 전단 변위 함수로서 마찰률 파라미터(friction-rate parameter)를 나타내는 그래프이다.
- [0254] 도 11의 (a)는  $\sigma_n = 5$  MPa일 때, 도 11의 (b)는 10 MPa일 때, 또한 도 11의 (c)는  $\sigma_n = 20$  MPa일 때의 압력 섭동을 계산한 것이다.
- [0255] 도면으로부터 알 수 있는 바와 같이, < 20 MPa의 수직 응력에서는, 파라미터는 전단 변위가 증가함에 따라서 0.001 내지 0.002의 범위 내에서 감소함을 알 수 있고, 20 MPa의 수직 응력에서는, 파라미터는 0.002 내지 0.004의 범위를 가지고 있음을 알 수 있다.

- [0256] 또한, 도면으로부터, 마찰 구성 파라미터는 모두 양의 값을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이는 단층 미끄러짐이 시작되더라도 안정적인 미끄러짐을 기대할 수 있음을 나타냄을 알아야 한다.
- [0258] 다음으로, 단층의 재활성화 가능성을 파악하기 위한 구성에 대해서 설명하기로 한다.
- [0259] 주입전 현장 응력과 공극압, 단층 강도(즉, 마찰 계수)와 같은 지력학적(geomechanical) 입력 사항에 추가하여, 단층 재활성화 가능성의 분석시에는 저장소 암석의 재료 특성(비오투 계수 및 포아송비), 및 저장소 부지 내의 기존 단층의 구조(즉, 경사 및 경사 방향)에 대한 지식도 필요하다.
- [0260] 본 발명에서는, 비오투 계수 및 포아송비를 각각 1.0 및 0.25로 가정하였다.
- [0261] 도 3의 (a) 내지 (c)에 나타낸 바와 같이, 온실 가스 저장소 부근에는 여섯 개의 기존 단층이 존재하고 있음을 알 수 있다.
- [0262] 이때, 지표면하 온실 가스(CO<sub>2</sub> 등)의 주입에 따른 압력의 증가는 주로 저장소 내에서만 발생한다고 가정하고, 본 발명에서는 전체 단층면(fault plane)을 분석하지 않고, 저장소와 교차하는 단층 세그먼트(segment)에 대해서만 분석하여 계산량을 대폭 감소시켰다.
- [0263] 도 3의 (c)에 나타낸 3D 지진 탐사를 해석하여 나타낸 저장소의 상부면 및 하부면을 사용하여 각각의 단층면을 분할하고 또한 저장소와 교차하는 단층 섹션(section)을 분리하였다.
- [0264] 이후에, 상술한 바와 같이, 이들 단층 섹션을 삼각형의 단층 요소(fault element)로 이산화 처리하였다.
- [0265] 다공 탄성 응력을 고려하여, 과도한 압력에 의해서 변경된 현장 응력을 변환하여 각 단층의 개별적인 단층 요소에 작용하는 수직 응력 및 전단 응력으로 분해하였다.
- [0266]  $\mu = 0.25$  및  $\mu = 0.6$ 의 두 개의 마찰 계수에 대해서 단층 미끄러짐에 대한 가능성을 평가하기로 한다.
- [0267] 이때, 하한값으로서 0.25의 마찰 계수를 선택한 이유는 실험실 내에서 필로 규산염(phyllsilicate)이 풍부한 가우지에 대해서 수행한 마찰 미끄러짐 실험 결과 얻어진 실험적인 값이기 때문이다.
- [0268] 강조하는 바이지만, 본 발명에서는, 기본적으로 온실 가스 지중 저장소 또는 그 부근에서 찾아낸 모든 단층은 동일한 암석학적 기원을 가지고 있고, 또한 인근 시추공(PB1 및 PB2)과 교차하는 단층에서와 마찬가지로 동일한 변형을 일으킨다고 가정하였음을 알아야 한다.
- [0269] 이는 모든 단층이 동일한 광물학적 메커니즘과, 내부 구조, 및 단층 강도, 안정도, 및 수문학(水文學)적 특성을 조절하는 성숙도(maturity)를 가질 수 있음을 의미한다.
- [0271] 한편, 본 발명에 있어서 상한 한계로서는 0.6의 마찰 계수를 선정하였으며, 이 값은 단층의 강도 데이터를 입수할 수 없는 경우 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상적으로 선택되는 값이며, 다수의 지질학 분야에서 경험칙에 기초하여 이용되는 값을 알아야 한다.
- [0272] 참고로, 일반적인 경우에, 암석의 종류나 파괴면의 상태, 또는 파괴면에 가해지는 응력 등을 고려하더라도 마찰 계수의 상한 한계는 0.6 및 0.85 사이에 있는 것으로 알려져 있으며, 본 발명의 발명자들이 실험실에서 가우지를 사용하여 마찰 계수를 측정된 결과, 점토질이 풍부한 경우에는 상한 한계가 0.6 보다 낮은 경우도 발견할 수 있었으나, 본 발명에 있어서는 인공 지진의 발생을 우려하여 마찰 계수의 상한 한계를 충분히 안전한 한계값인 0.6으로 설정하였음을 알아야 한다.
- [0274] 본 발명의 사상에 따라서, 각각  $\mu = 0.25$  및  $\mu = 0.6$ 의 경우에 대해서, 단층 재활성화를 분석한 결과는 도 13 및 도 14에 나타내었다.
- [0275] 도 13은, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 단층면(fault surface) 및 단층 마찰 계수가 0.25 일 때의 대응하는 임계 압력의 섭동( $\Delta P_p = P_p^{crit} - P_p$ ) 분포를 나타내는 사시도이며, 도 14는, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 단층면 및 단층 마찰 계수가 0.6 일 때의 대응하는 임계 압력의 섭동 분포를 나타내는 사시도이다.
- [0276] 이들 도면에 있어서, 색상 명암은 본 발명에 따라서 산출한 임계 공극압과 초기 공극 유체압 간의 차이, 또는 임계 압력 섭동(수학적 10 참조)을 나타내고 있으며, 단층면에서의 차가운 색상(청색)은 단층이 파열되는데 필요한 공극압이 상대적으로 작은, 즉 단층이 재활성화하기 쉽다는 것을 보여주고 있으며, 뜨거운 색상(적색)은 단층의 단면이 섭동하기가 매우 어렵다는 것을 보여주고 있다.

- [0277] 또한, 이들 도면에 있어서, 최저의 임계 압력 섭동을 갖는 각 단층의 세그먼트에 대해서는 각각 화살표로 이를 나타내었다.
- [0279] 한편, 도 13 및 도 14에 나타난 각 단층에 대한 최저 임계 압력 섭동을 정리하여 도 15에 나타내었다.
- [0280] 도 15는, 지중 유체 저장 부지 또는 인근의 모든 단층에 대해 서로 다른 단층 마찰 계수( $\mu$ )에 따른 임계 압력의 섭동 분포를 나타내는 그래프이다.
- [0281] 도면으로부터,  $\mu = 0.25$ 인 경우(속이 빈 사각형으로 표시), 가장 미끄러지기 쉬운 WF2 및 EF3 단층이 가장 낮은 압력 섭동, 즉 ~3 MPa를 나타내고 있으며, 이는 저장소 내에서 압력이 증가(약 3 MPa)하게 되면 온실 가스(CO<sub>2</sub> 등)의 지중 저장시 이들 단층이 재활성화될 수 있음을 의미한다.
- [0282] 반면에,  $\mu = 0.6$ 인 경우(속이 찬 사각형으로 표시), 각 단층에 대한 임계 압력 섭동은  $\mu = 0.25$ 인 경우에 비교하여 현저하게 높은 것을 알 수 있다.
- [0283] 이와 같이 마찰 계수가 높은 경우에는, 특히 EF3 단층에 대해서 최저 임계 압력 섭동은 ~10 MPa 정도로 추정되었다.
- [0284] 그러나, 10 MPa의 과도한 압력은 저장소의 수평 수압 파쇄 현상을 초래할 우려가 있기 때문에 실제적으로는 이 값은 허용할 수 없는 값이 된다.
- [0285] 예를 들면, 온실 가스 지중 저장소의 깊이별 현장 응력의 변화를 나타낸 도 8의 (a)로부터 알 수 있는 바와 같이, S<sub>h</sub>와 S<sub>v</sub>의 차이가 작기 때문에, 저장소의 압력이 증가하게 되면, 과도한 압력에 응답하여 전체 수평 응력은 증가되어도 전체 수직 응력은 일정하게 유지하는 다공 탄성 응력이 현장 응력 체계의 변동을 초래하고 이에 의해서 주향 이동 단층이 생성되어 역단층(reverse fault)을 형성할 수 있으며, 이와 같이, 수평 방향의 수압 파쇄 현상이 발생한다는 것은 다공 탄성 응력에 의해서 수직 응력이 최소 주응력(S<sub>3</sub>)과 같아짐을 의미하며, 마찰 계수가  $\mu = 0.6$ 인 경우라고 해도 단층의 재활성화를 방지하고 인공 지진을 유발하지 않기 위해서는 최저 임계 압력 섭동값은 6 MPa로 설정되는 것이 바람직하다.
- [0287] 마지막으로, 도 16은, 지중 유체 저장 부지를 관통하는 각 단층면에 가해지는 수직 응력의 분포를 나타내는 그래프이다.
- [0288] 도 16은 전체 수직 응력 및 초기 공극압의 차이로 표시할 수 있는 각 단층에 대한 과도한 압력의 상한을 나타내고 있으며, 단층 중에서, EF3 단층은 6.2 MPa의 최저 과도 압력 제한을 보여주고 있다(도 16에 있어서 EF3 단층에 표시한 화살표 참고).
- [0289] 화살표로 표시한 단층의 일 세그먼트에서의 국부 압력이 과도 압력 한계를 초과하게 되면, 단층 세그먼트(또는 깊이)에서의 유효 수직 응력은 음(negative)의 값을 나타내게 되며, 저장소를 이루는 암석의 인장 강도가 제로(zero)라고 가정하는 경우, 해당 위치에서 수평 수압 파쇄가 발생할 수 있고, 따라서 저장소의 압력은 과도 압력 한계를 초과해서는 아니된다.
- [0291] 이상의 사항을 정리하여, 본 발명의 발명자들은 온실 가스(CO<sub>2</sub> 등)의 주입에 따른 단층의 재활성화 및 과도 압력 한계를 분석하여 지중 저장소에서 수압 파쇄가 발생할 수 있는 최고 허용 과도 압력, 즉 인공 지진을 회피할 수 있는 압력의 증가는 3 MPa 내지 6 MPa 내로 유지되어야 함을 알 수 있었다.
- [0293] 이상, 일부 예를 들어서 본 발명의 바람직한 여러 가지 실시예에 대해서 설명하였지만, 본 "발명을 실시하기 위한 구체적인 내용"에 기재된 여러 가지 다양한 실시예에 관한 설명은 예시적인 것에 불과한 것이며, 통상의 기술자라면 이상의 설명으로부터 본 발명을 다양하게 변형하여 실시하거나 본 발명과 균등한 내용을 갖는 실시를 수행할 수 있다는 점을 잘 이해하고 있을 것이다.
- [0294] 또한, 본 발명은 여러 가지 다양한 형태로 구현될 수 있기 때문에 본 발명은 상술한 설명에 의해서 한정되는 것이 아니며, 이상의 설명은 본 발명의 개시 내용이 완전해지도록 하기 위한 것으로 통상의 기술자에게 본 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것일 뿐이며, 본 발명은 청구 범위의 각 청구항의 범위에 의해서 정의될 뿐임을 알아야 한다.

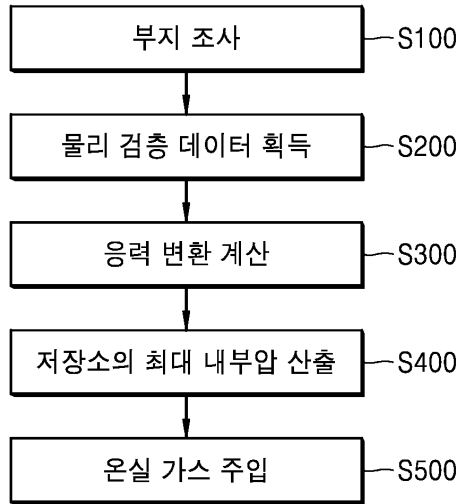
**부호의 설명**

- [0296] S100 : 부지 조사

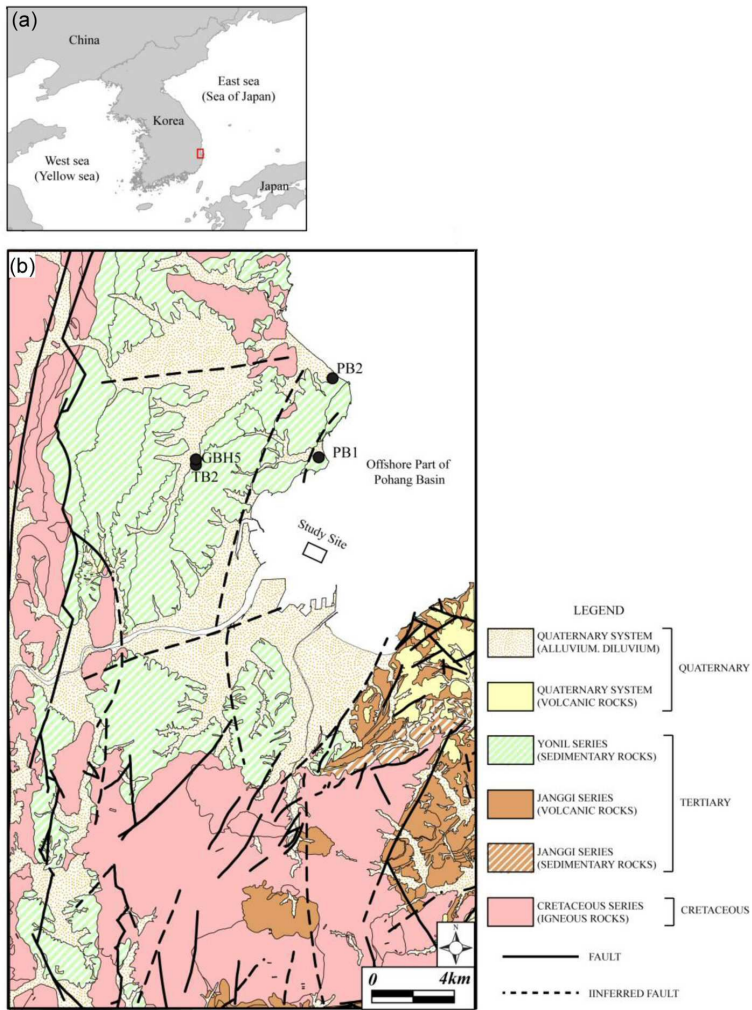
- S200 : 물리 검층 데이터 획득
- S300 : 응력 변환 계산
- S400 : 저장소의 최대 내부압 산출
- S500 : 온실 가스 주입

**도면**

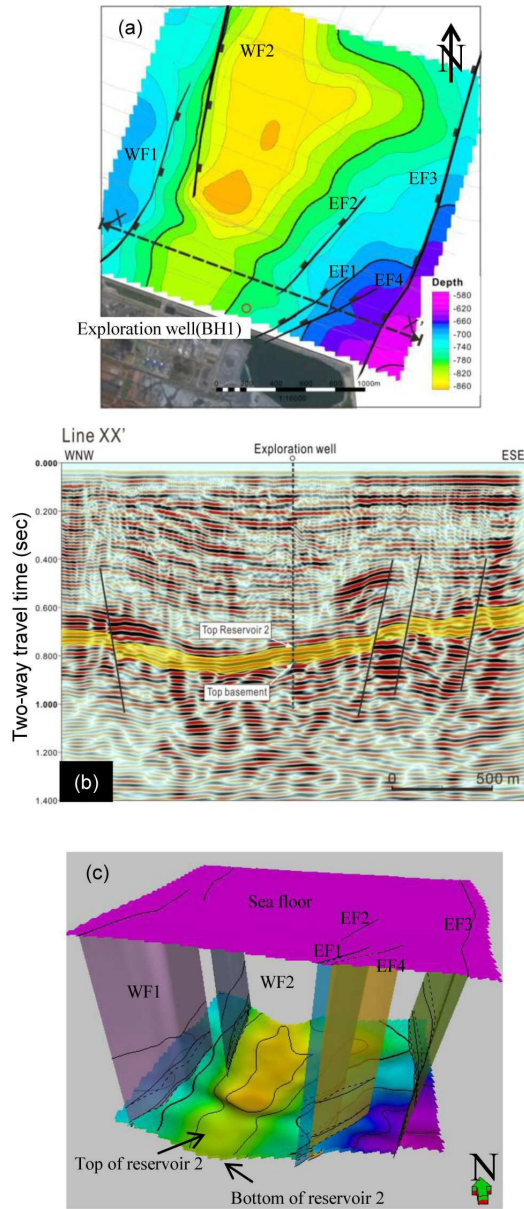
**도면1**



도면2

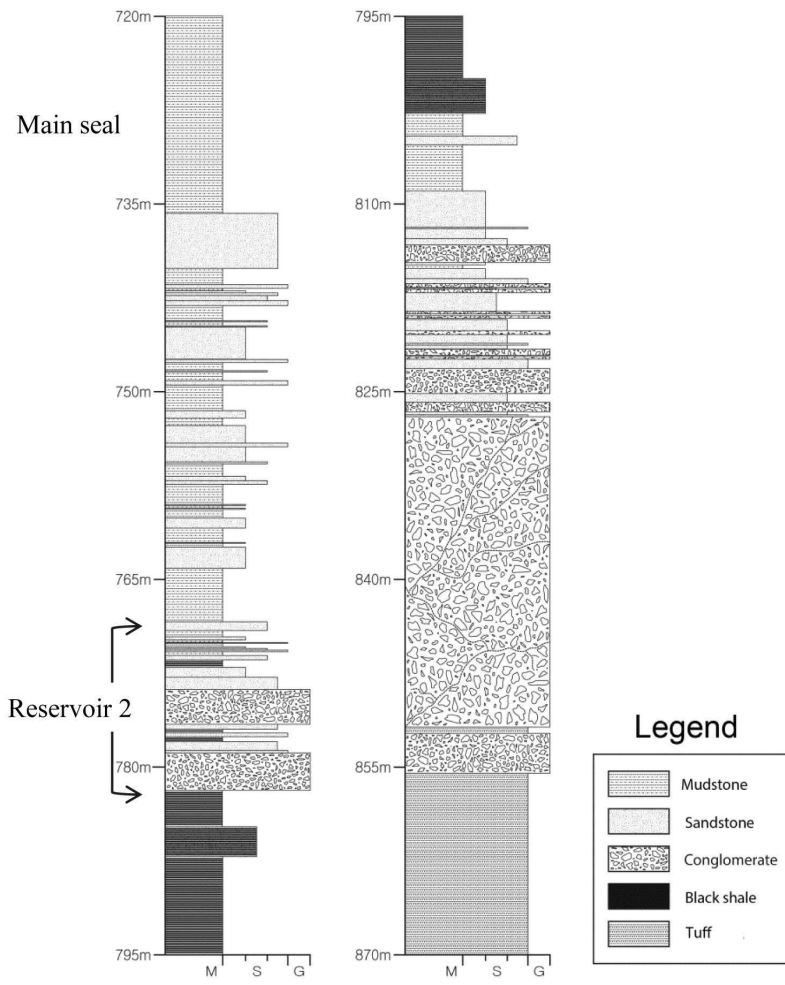


도면3

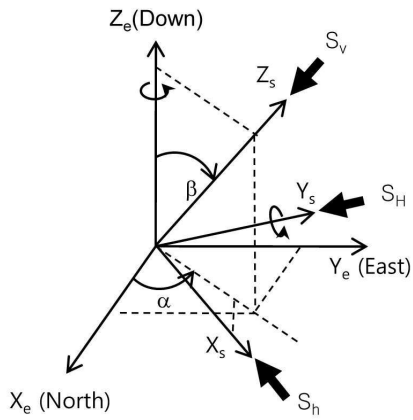




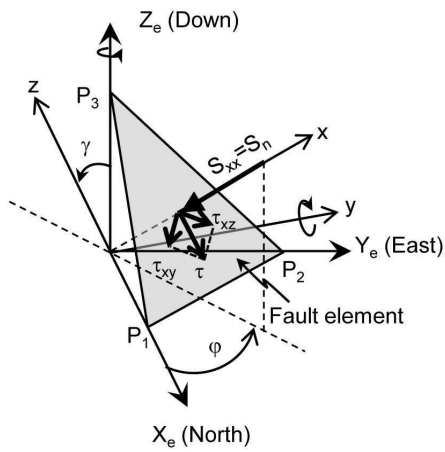
도면4



도면5

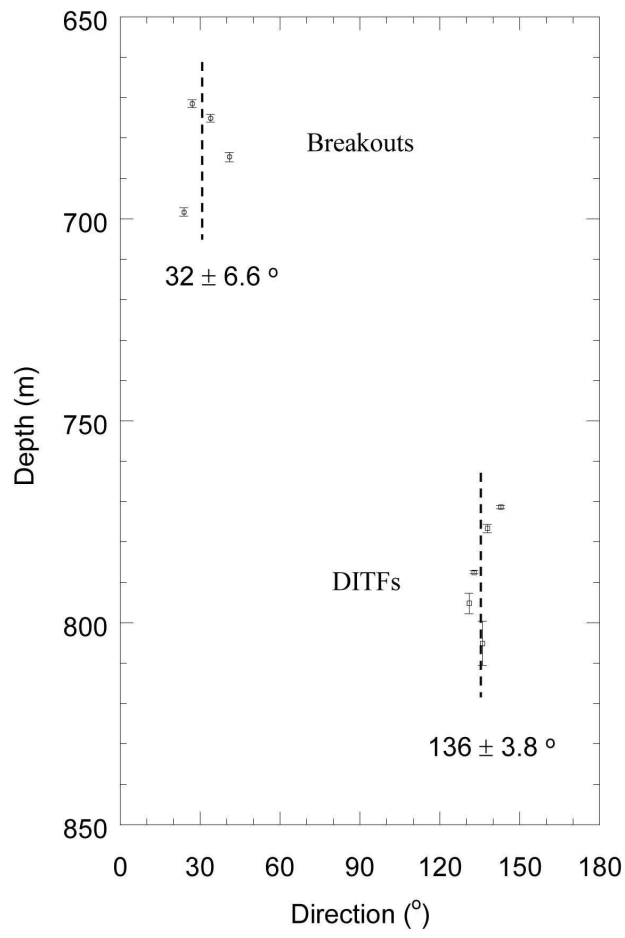


(a)

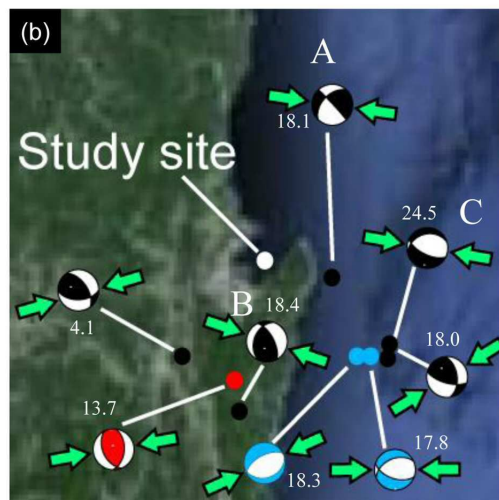
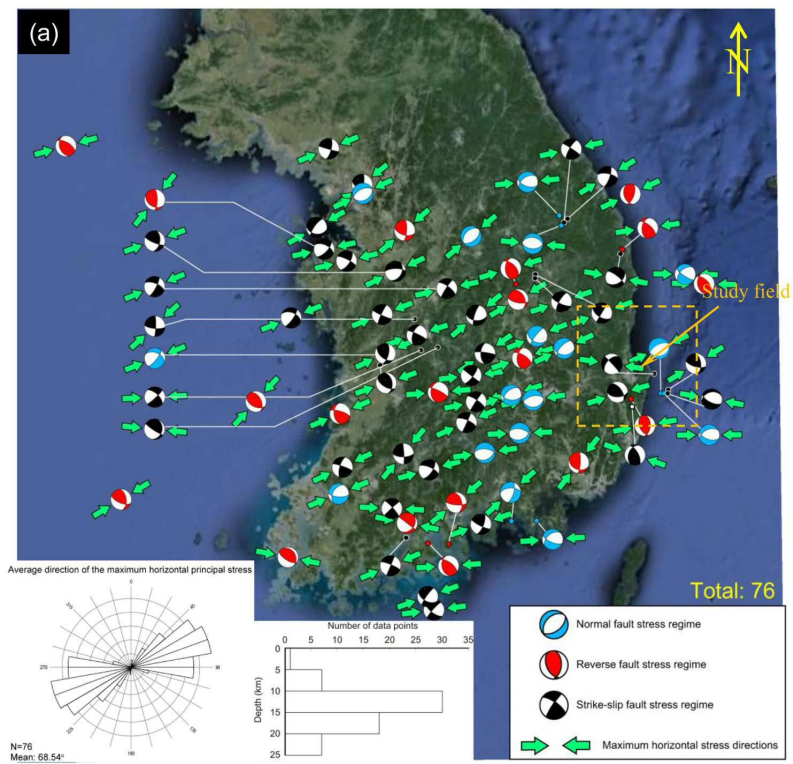


(b)

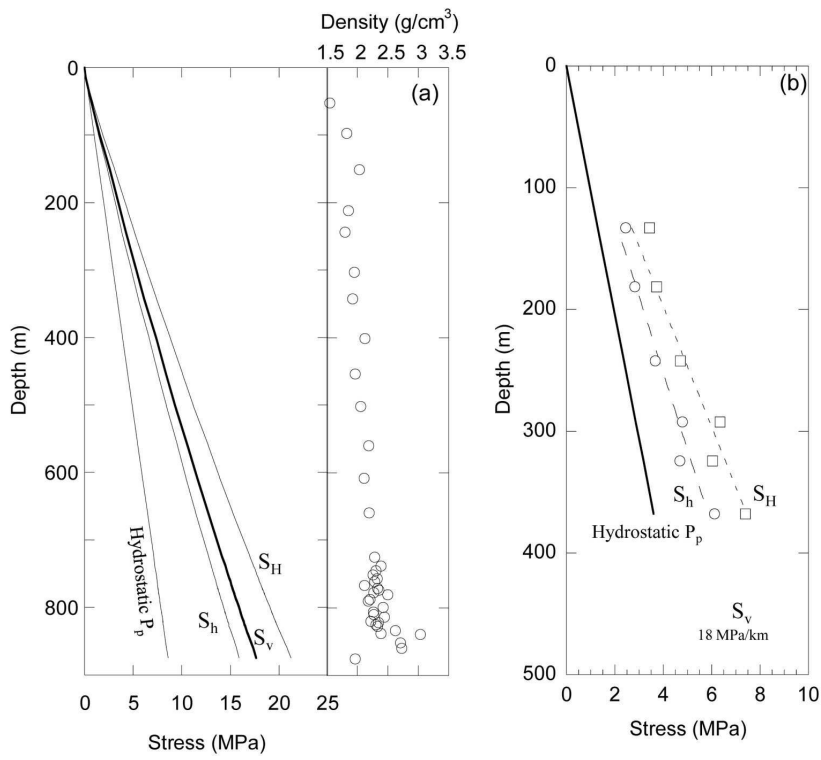
도면6



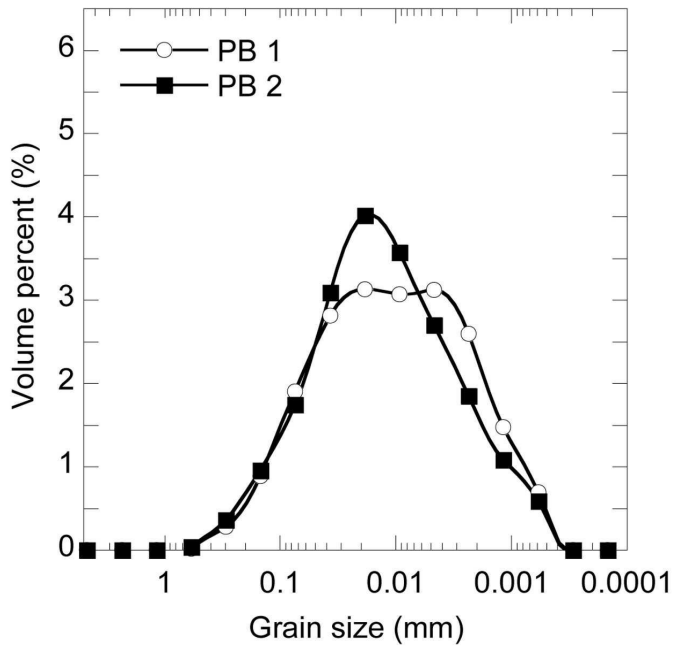
도면7



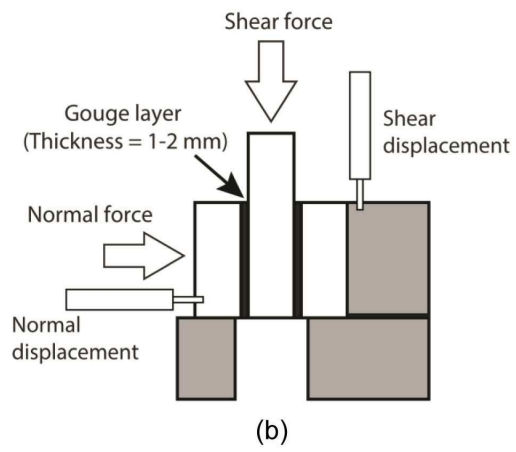
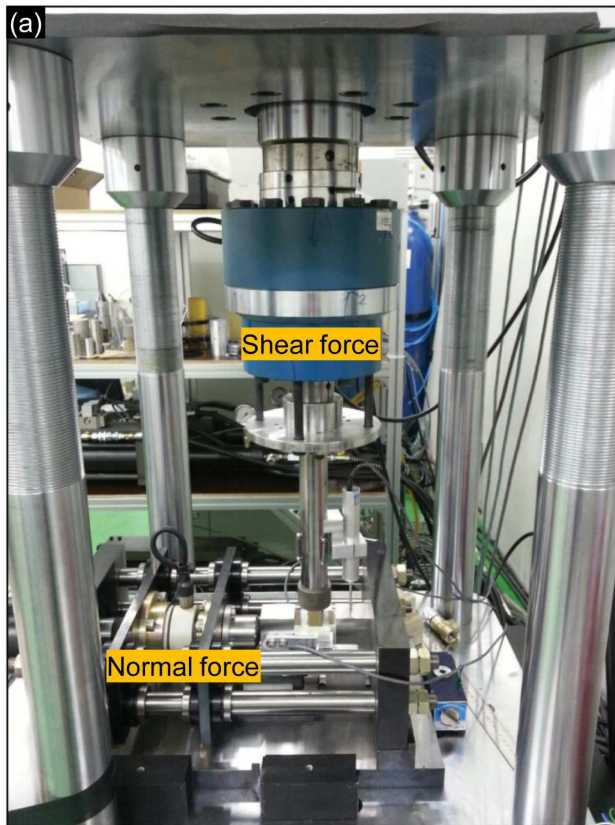
도면8



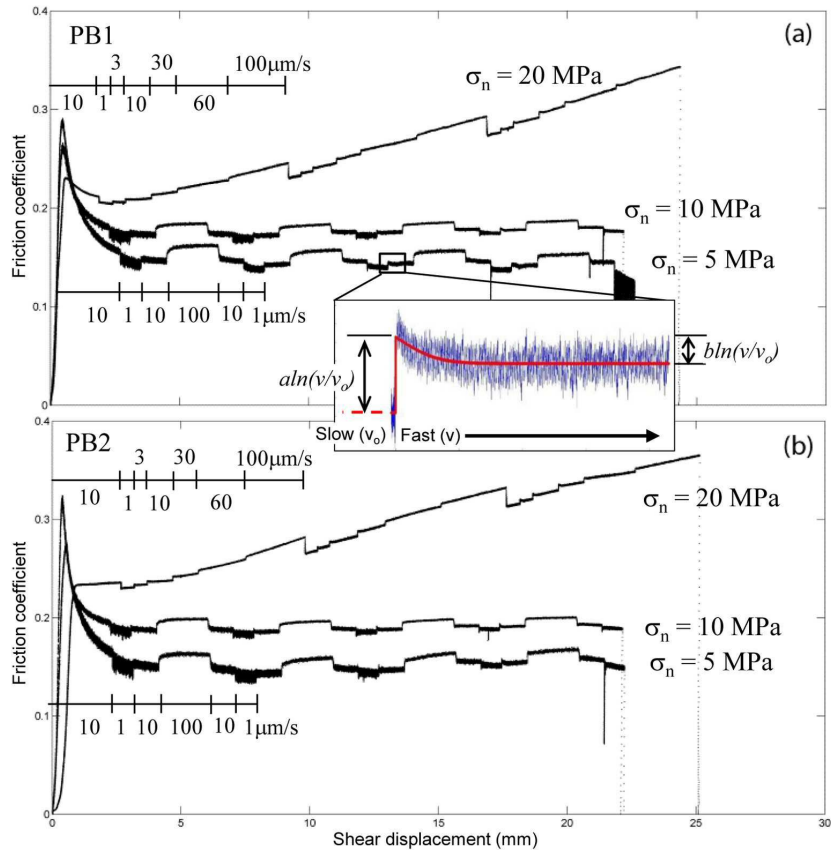
도면9



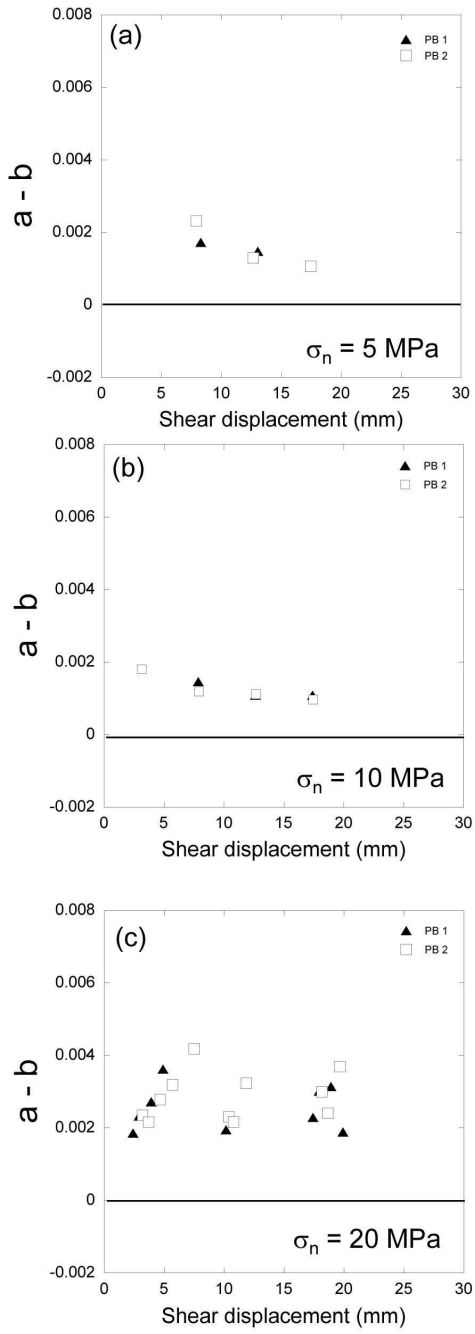
도면10



도면11

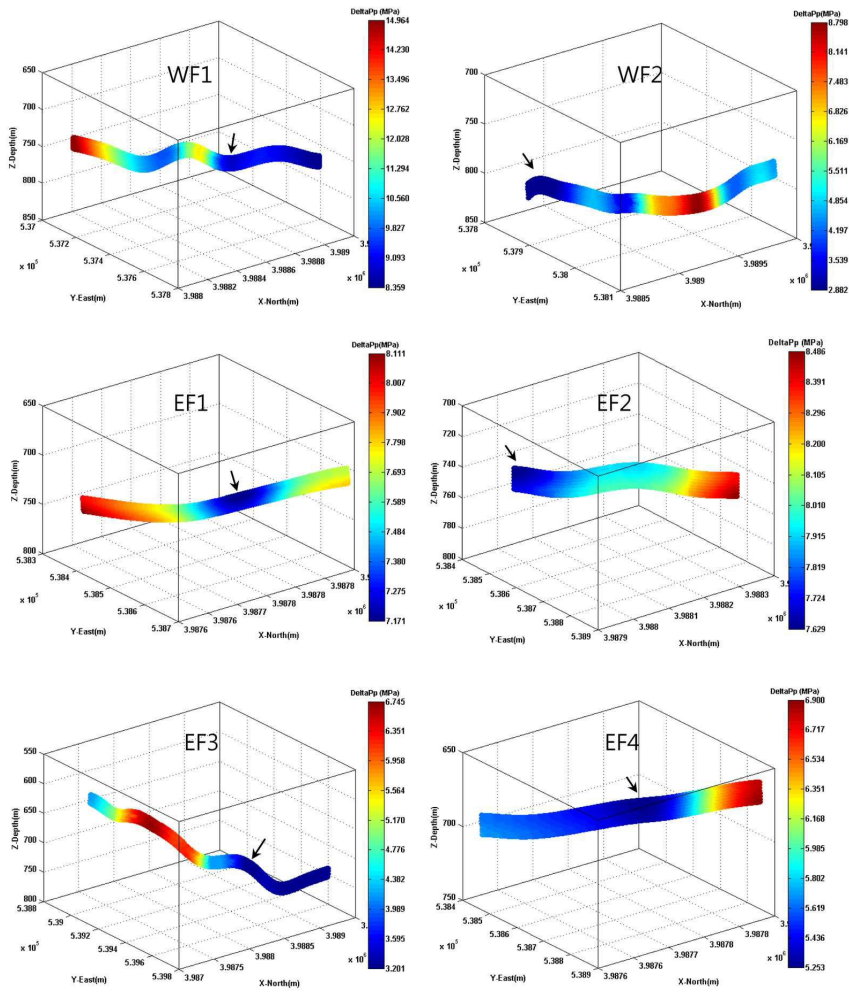


도면12

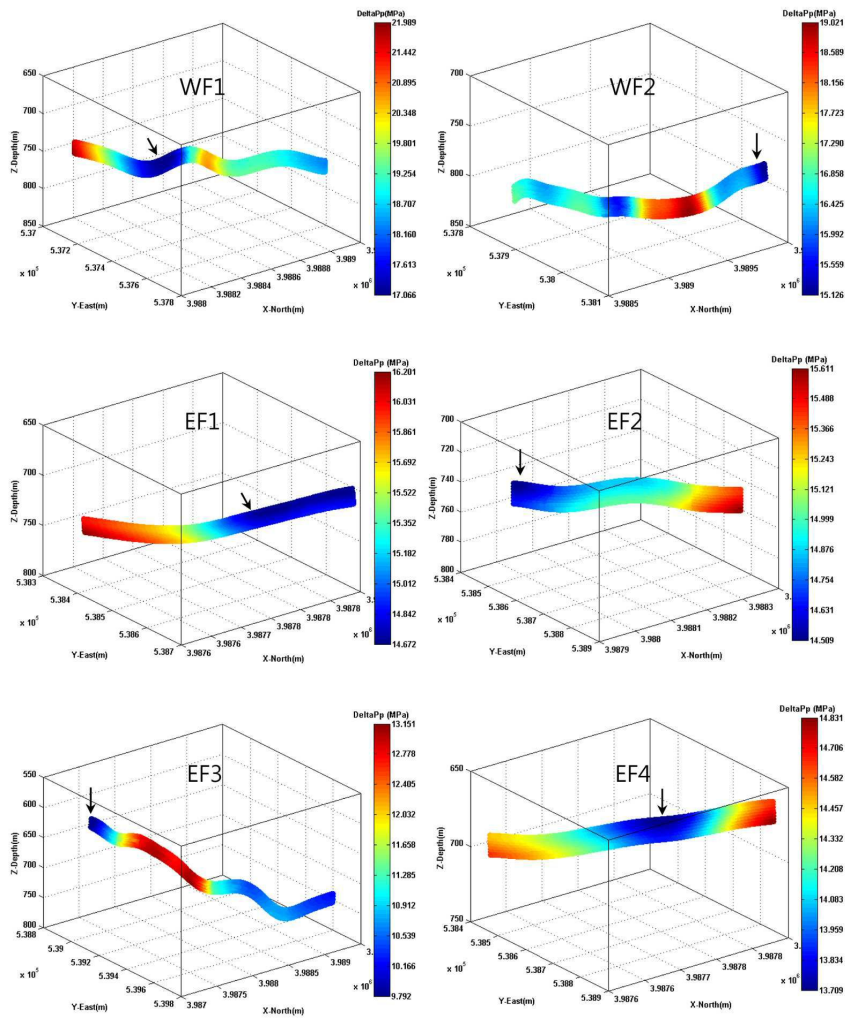




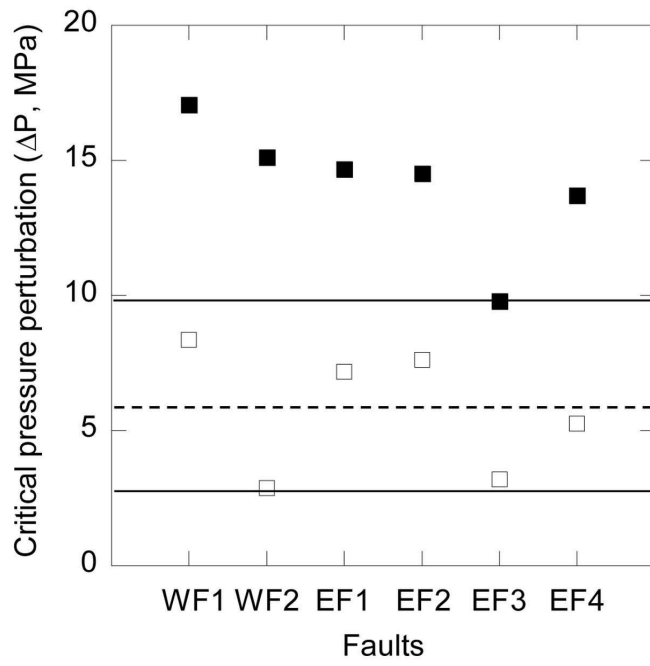
도면13



도면14



도면15



도면16

