

이산화탄소 주입에 의한 균열 전단활성 실내 실험 연구

이성복 · 장찬동[‡]

충남대학교 지질환경과학과

요 약

대표적 이산화탄소 지중저장 저류암인 사암에 이산화탄소를 주입시 사암 내 균열의 거동과 전단활성을 유발하는 임계 압력조건을 분석하기 위한 실내 실험을 수행하였다. 인공적으로 임의의 각도로 기울어진 균열면을 형성시킨, 물로 포화된 Berea 사암시편에 삼축압축 응력조건 하에서 이산화탄소를 단계적으로 주입하여 균열의 전단활성을 유도하였다. 실험을 통해 측정된 균열 전단활성을 유발시키는 임계공극압을 쿨롱마찰법칙을 통해 유추한 이론적 임계공극압과 비교하였다. 모든 실험에서 균열의 전단활성은 이론적으로 유추한 임계공극압보다 최소 8%, 최대 133% 이상 높은 공극압에서 발생하였다. 이 결과는 물로 포화된 사암 내 이산화탄소를 주입시 공극압 증가에 따른 단순한 역학적 변화를 초래하는 것 이상의 물-이산화탄소-암석 간의 화학적 상호작용에 의한 물성 변화가 있음을 암시한다. 이를 확인하기 위한 방법으로 이산화탄소와 물로 동시에 포화된 사암시편에 대해 균열 전단 물성을 측정해 보니 물과 이산화탄소로 포화된 시편 내 균열의 점착력은 단순히 물로만 포화된 균열의 점착력 보다 높아 있음을 확인하였다. 즉, 물, 이산화탄소, 암석 간의 상호작용에 의한 균열 강화가 진행된다는 점을 의미하며 이는 이산화탄소 주입, 운영에 있어 호의적인 측면으로 작용한다.

주요어: 이산화탄소 주입실험, 균열 전단활성, 임계공극압, 쿨롱마찰법칙, 물-이산화탄소-암석 상호작용

Sungbok Lee and Chandong Chang, 2015, Laboratory experimental study on fracture shear-activation induced by carbon dioxide injection. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 3, p. 281-288

ABSTRACT: We investigated critical pore pressures that could trigger shearing along a fracture when we injected carbon dioxide into water-saturated Berea sandstone. We gradually increased pore pressure by injecting CO₂ into cylindrical sandstone specimens containing a saw-cut fracture subjected to triaxial compression. Shearing along fracture occurred when pore pressure reached a critical value higher by 8-133% of that theoretically predicted by the Coulomb friction law. This result suggests a water-CO₂-rock interaction leading to an enhancement of shear strength of fracture, which may be best described as a chemical-mechanical coupling. To confirm this inference, we conducted another series of tests, in which the same specimens saturated with both water and CO₂ were loaded under triaxial compression to determine frictional properties of the fractures, and found that the cohesion of fractures increased above that of water-saturated samples. Thus, such a strengthening effect of water-CO₂-rock interaction on fracture can work favorably in CO₂ sequestration projects.

Key words: CO₂ injection tests, fracture shear activation, critical pore pressure, Coulomb friction law, water-CO₂-rock interaction

(Sungbok Lee and Chandong Chang, Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea)

1. 서 론

온실가스를 저감시키기 위한 다양한 대책 중 한 방법은 이산화탄소를 대기로 배출시키지 않고 장심도 시추공을 이용하여 지하에 저장, 격리시키는 기술이다

(Bachu, 2008). 성공적인 지중저장을 위한 선결 사항은 목표로 하는 충분한 양의 이산화탄소를 지표로 누출되지 않도록 격리시킬 수 있는 적절한 사이트의 대상층을 찾는 것이며 이에 따라 다양한 지질 조건에 대한 적합성, 저장 용량 등을 평가하는 연구가 국내외에서 활발

[‡] Corresponding author: +82-42-821-6430, E-mail: cchang@cnu.ac.kr

히 진행되어 오고 있다(Nicot, 2008; Hong *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2013). 또한 이산화탄소 주입과 저장, 운영 과정에서 발생하는 다양한 지화학적(Benson and Cole, 2008), 수리지질학적(Tsang *et al.*, 2008), 지질역학적(Rutqvist and Tsang, 2002; Streit and Hillis, 2004; Yamamoto and Takahashi, 2004) 프로세스에 대한 연구들이 수행되어 왔다. 최근에는 세계 여러 지역(In Salah, Sleipner, Weyburn 등)에서 실제 이산화탄소 주입 경험을 토대로 한 이산화탄소 지중저장 기술의 가능성과 이산화탄소 주입에 의한 여러 가지 시나리오에 대한 실증 연구들이 이루어지고 있다(Onuma and Ohkawa, 2009; Rutqvist *et al.*, 2010; Verdon *et al.*, 2013).

이산화탄소 지중저장 프로젝트의 운영 과정에서 최악의 시나리오는 주입되거나 저장되어 있는 이산화탄소가 단기적으로 또는 장기적으로 지표로 누출되는 것이다(Zoback and Gorelick, 2012; Verdon *et al.*, 2013). 이러한 가능성은 보통 저장층 상부를 밀봉하는 덮개암의 기밀성, 투수성 단층 및 균열의 존재 여부 등과 관련 있는데 아무리 적합한 저장층 일지라도 지중저장 운영 과정에서 주입에 따른 압력 변화와 암반 변형에 의해 단층이나 균열이 재활성되는 기작으로 이산화탄소가 누출될 가능성에 대해 여러 학자들이 제기해 오고 있다(Mcgarr *et al.*, 2002; Damen *et al.*, 2006; Rutqvist, 2012; Zoback and Gorelick, 2012). 이 때문에 주입에 동반되어 관찰되는 미소지진들은 규모가 -2 또는 -3 정도의 지극히 작은 규모임에도 불구하고 이산화탄소 지중저장 사이트에서 누출을 초래하는 단층, 균열의 재활성에 의한 신호일 수 있으므로 이에 대한 모니터링은 중요하다(Zoback and Gorelick, 2012).

대부분의 경우 주입에 의한 저장층 압력 증가는 대상층 내부 또는 인근 덮개암 내 불연속면들의 전단활성 운동에 유리하도록 조건을 형성시킨다(Rutqvist and Tsang, 2002). 주입에 의한 과도한 압력 증가는 결국 균열의 전단활성과 이에 동반된 미소지진을 유발하므로 이에 대한 예측 및 방지는 이산화탄소 지중저장 프로젝트의 운영에 있어 매우 중요한 사항이다(Li and Wu, 2005). 퇴적암 내 물, 석유, 가스 등 유체압 증가에 의한 균열 전단활성 거동에 관해서는 기존에 많은 연구들이 진행되어 왔으며 이론적으로도 상당히 명확하게 규명되어 있다(Talwani and Acree, 1984; Ellsworth, 2013). 그러나 이산화탄소라는 특수한 유

체에 의한 암반 균열의 지질역학적 거동에 대해서는 실증적 차원의 연구들이 다소 미흡한 상황이다.

본 논문에서는 대표적 저장층 퇴적암인 사암에 이산화탄소를 주입할 경우 사암 내 균열의 거동과 균열 재활성을 유발하는 압력조건 예측에 초점을 두어 수행한 실내 실험 결과를 보고한다. 실험은 대표적인 석영 사암인 Berea 사암에 대해 실시하여 암석 내 불순물과 이산화탄소간의 가능성 있는 반응들을 최소화함으로써 실험 결과가 가능한 압력, 응력, 전단 등 지질역학적인 요소만을 반영할 수 있도록 의도하였다. 본 실험 결과를 기존의 지질역학적 이론에 기반한 유추 값과 비교하고 그 의미에 대해 논의한다.

2. 이론적 배경

유체 주입에 의한 지하 암반 균열의 전단활성에 대해서는 여러 형태로 확인되고 있다. 미국 콜로라도 덴버지역에서 1962-1965년 동안 발생한 지진 수는 당시 이 지역에서 실시된 폐기 유체 주입의 양상과 거의 일관된 관계를 보이며 증가 감소를 반복하여 이 지진들이 유체 주입에 의해 발생했음을 인지하였다(Evans, 1966). 또한 지열이나 세일가스 개발에서 암반수리자극을 위해 물을 주입하는 경우에도 균열 전단활성에 의한 미소지진들이 다발성으로 발생한다는 것은 잘 알려진 사실이다(Majer and Peterson, 2007; Warpinski *et al.*, 2012).

지질역학적으로 균열의 전단활성은 균열면에 작용하는 전단응력(τ)이 균열의 전단운동에 대한 저항성, 즉 전단강도(τ_c)를 초과하게 되면 발생한다. 유체 주입에 의한 균열 전단활성 기작은 공극압 증가로 인한 균열 전단강도의 감소로 설명되며 쿨롱마찰법칙

$$\tau_c = c + \mu(\sigma_n - p_c) \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 c 는 균열의 점착력, μ 는 마찰계수, p_c 는 균열 전단을 유발시키는 임계공극압이며, σ_n 은 균열면에 작용하는 수직응력이다. 균열의 점착력과 마찰계수는 균열면의 고유 물성이며 수직응력은 균열면 전단응력과 함께 해당 심도에서 작용하는 암반 초기응력 텐서에 대한 균열의 방향을 통해 계산되는 값이다. 따라서 균열의 물성(점착력, 마찰계수), 균열의 방향과 해당 심도에서 작용하는 초기

응력 텐서를 알면 균열의 전단활성을 위해 필요한 공극압(임계공극압)을 유추할 수 있다.

이와 같은 잘 알려진 지질역학적 이론이 이산화탄소 가 사암에 주입되는 과정에서 사암 내 균열의 전단활성을 유발되는 현상에도 동일하게 적용되는지를 확인하기 위한 비교적 간단한 실내 실험을 실시하였다.

3. 시험시편 및 마찰계수 측정

실험에 이용된 Berea 사암은 미국 오하이오주에서 산출되는 사암으로 대부분 석영으로 이루어져 있으며 입자의 크기가 대체로 균질(약 0.13-0.17 mm 크기의 아각상 형태)하고 다양한 역학적 물성이 균질하여 암석역학 실험을 위한 표준 사암 중 하나이다. 헬륨 공극률측정기(helium porosimeter)를 이용하여 측정된 공극률은 21-23%의 범위를 보이며 투수율은 $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 이다(Menéndez *et al.*, 1996).

먼저 균열면 물성(점착력, 마찰계수)을 측정하기 위해 삼축압축 응력조건에서의 균열 전단시험을 수행하였다. 원주형 시편(직경 24.9 mm, 길이 약 63 mm)

을 제작하여 시편의 윗면으로부터 60°의 경사를 갖는 평탄한 균열을 암석 절단기로 형성시켜 실험에 이용하였다. 평탄한 균열을 이용한 이유는 균열면의 거칠기에 따른 실험 결과의 복잡성을 최소화시켜 결과 해석을 단순화하기 위함이다. 물로 포화되어 있는 저류층 사암 상태를 모사하기 위해 모든 사암시편을 물로 포화시켜 시험하였다.

균열을 포함하는 사암시편을 압력셀(Hoek cell)에 위치시키고 일정 구속압(3-20 MPa)을 가한 상태에서 일축하중기(uniaxial compression machine)를 이용하여 시편의 축방향으로 일정한 변위속도($1 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$)로 압축하며 균열의 전단 발생을 유도하였다(그림 1). 모든 시험에서 축방향 응력과 구속압은 서보제어(servo-control)하며 가하였고 축방향 응력(axial stress)은 하중기 피스톤에 설치된 응력계(load cell)로 측정하였으며 구속압은 압력계를 통해 측정하였다. 축방향 응력과 구속압은 균열면에 작용하는 전단응력과 수직응력을 계산할 때 사용된다. 축방향 변위는 압력셀에 설치된 두 개의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 계측치의 평균값을 이용하여 측정하였으며 이를 균열면상의 전단변위로 변환하여 분석에 이용하였다.

삼축전단실험을 통해 얻은 여러 구속압 하에서의 전단응력-전단변위 관계 곡선의 예를 그림 2에 보였다. 실시된 모든 실험에서 전단응력은 시험된 전단변위 범위 내에서는 지속적으로 증가하는 양상을 보인다. 이는 가해진 응력조건(일정한 구속압, 증가하는 축응력) 하에서 균열면에 작용하는 전단응력과 수직응력이 공히 증가하기 때문이다. 주어진 구속압 상태에서 전단응력과 전단변위는 시험 초기에 준선형적인 관계로 증가하는 양상을 보이다가 어느 변위 이상부터는 곡선의 기울기가 급격히 감소하는 양상으로 관찰된다. 초기의 준선형 관계는 균열 전단에 의한 변위가 아니라 암석자체의 압축변형 또는 균열면 주변에서의 전단변형에 의한 결과로 여겨지며 기울기가 감소하기 시작하는 점에서 실제 균열면의 전단이 시작되는 것으로 사료된다. 이 추측은 그림 2에서 전단응력-전단변위 관계곡선 기울기가 변화하기 시작하는 전단변위가 약 0.12-0.22 mm로 Berea 사암 입자크기와 유사하여 실제 전단변위가 시작하기 위해서는 한 입자 크기 이상의 이격이 발생하여야 실제 전단이 시작되는 것이라는 점에 기인한다. 따라서 본

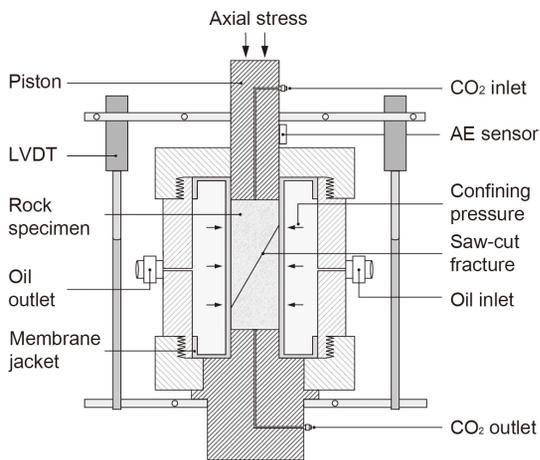


Fig. 1. Experimental setup for two types of experiments presented in this study: fracture shear tests and CO₂ injection tests. Cylindrical Berea sandstone specimens contain a saw-cut fracture at 60° from the top face of the sample. For fracture shear tests, in which frictional properties of fracture are measured, specimens are loaded axially while confining pressure is maintained constant. For CO₂ injection tests, in which critical pore pressure is determined, CO₂ is injected while both axial stress and confining pressure are maintained constant. Slip along the fracture is measured using LVDTs.

연구에서는 실제 전단이 발생하기 시작할 때의 균열면의 물성을 측정하기 위해 전단응력-전단변위 곡선이 선형성을 이탈하기 시작할 때의 전단응력을 균열면 전단강도로 정의하였다. 실험 결과는 구속압이 증가함에 따라 균열 전단강도가 증가함을 보인다.

균열 전단이 발생하기 시작할 때의 전단응력(즉 전단강도)과 그 순간의 균열면 수직응력을 계산하여 균열면 수직응력의 함수로서 전단강도의 변화를 그림 3에 도시하였다. 총 4개의 시편(다른 기호로 표

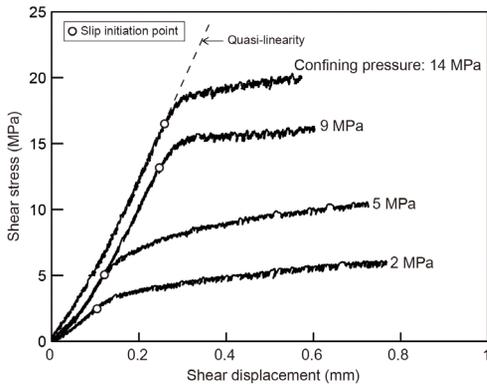


Fig. 2. Examples of fracture shear test results for a confining pressure of 2, 5, 9 and 14 MPa. The relationships between shear stress and shear displacement along the fracture are initially quasi-linear, followed by decreases in slope. Shear activation along the fracture is initiated at the point (marked by circle) where the slope starts to deviate from the initial linearity. We define the shear stress at the slip initiation point as shear strength of the fracture.

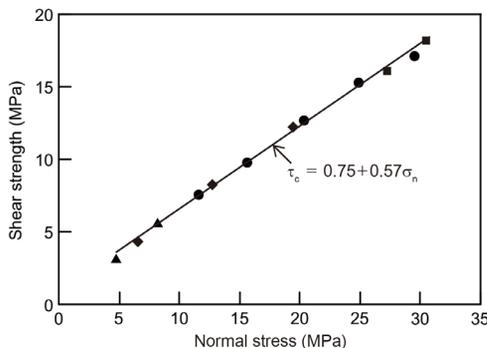


Fig. 3. Shear strength as a function of normal stress at slip initiation, showing that shear strength increases linearly with normal stress acting on the fracture. The data can be fit by a straight line in the form of $\tau_c = 0.75 + 0.57\sigma_n$, from which we determine a cohesion of 0.75 MPa and a frictional coefficient of 0.57.

시)에 대한 12회의 실험 결과들은 수직응력이 증가함에 따라 전단강도가 규칙적인 선형관계를 보이며 증가함을 보여준다. 이 자료들에 대한 최적 선형식은

$$\tau_c = 0.75 + 0.57\sigma_n \quad (2)$$

로 점착력(절편)은 0.75 MPa, 마찰계수(기울기)는 0.57로 규명되었다. 이 물성들은 다음 장에 기술될 이산화탄소 주입실험 결과 분석, 특히 식 (1)에 근거한 이론적 임계공극압을 유추하기 위해 필요한 Berea 사암 균열의 기본 물성이다. 구해진 선형식은 균열면에 작용하는 수직응력을 알면 어떤 전단응력이 가해졌을 때 균열면의 전단활성이 발생하는지를 지시한다. 이 식은 유체 주입에 의해 공극압이 증가함에 따라 균열면의 유효수직응력(=수직응력-공극압)이 감소하므로 어떤 공극압에 도달하면 균열이 전단활성 되는지를 파악하기 위해 사용된다.

4. 이산화탄소 주입실험 및 결과

유체 주입에 의해 증가하는 공극압으로 인해 발생하는 균열의 거동과 이에 동반되어 나타나는 미소지진의 양상을 파악하기 위해 유체 주입실험을 수행하였다. 이산화탄소 주입에 앞서 먼저 쿨롱마찰법칙(식 (1))을 확인하기 위한 물 주입 시험을 실시하였다. 물은 시린지 펌프를 이용하여 시편 상부 피스톤에 있는 주입구를 통해 주입하였고(그림 1 참조) 이 때 공극압은 시편 전체에 가해진다. 주입 전 시편 내 균열의 전단이 발생하지 않을 수준의 일정한 축응력(12.5 MPa)과 구속압(7 MPa)을 유지한 상태에서 LVDT 측정치를 통해 균열의 전단이 발생하지 않는 것을 확인한 후 물을 단계적으로 주입하여 공극압을 증가시켰다(그림 4). 공극압은 압력셀의 상부와 하부 피스톤에 각각 연결된 압력계를 통해 측정하였다. 물 주입 초기에는 LVDT 측정치가 점진적으로 감소하는 현상이 나타났으며 이는 공극압 증가에 따라 시편이 축방향으로 팽창하는 다공질탄성적(poroelastic) 거동에 기인한다. 공극수압이 증가하면서 어느 순간 LVDT로 측정된 전단변위가 미세하게 증가하기 시작되는데(즉, 축방향 수축) 이때부터 균열 전단이 시작되었음을 지시하며 이때의 공극압이 임계공극압이 된다. 이 실험에서 임계공극압은 5.0 MPa로 측정되었으며 이 값은 쿨

롱마찰법칙으로부터 예측한 5.5 MPa의 임계공극압과 유사한 값으로 균열의 전단활성을 오차 범위 내에서 이론적으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

이번에는 동일한 방법으로 물로 포화된 사암시편에 대해 기체 상태의 이산화탄소를 주입하는 실험을 실시하였다. 전단에 의한 미소음(acoustic emission: AE)을 감지하기 위한 시도로 시편에 직접 닿아있는 피스톤에 미소음 센서를 부착하여 시험에 이용하였다(그림 1 참조). 그림 5는 실험 결과의 한 예를 보여준다. 물 주입 경우와 같이 이산화탄소 주입 초기에는 다공질 탄성에 의한 미세한 크기의 시편의 팽창이 발생하였다. 이 과정 중에는 미소음 발생이 거의 감지되지 않아 취성적 전단거동은 발생하지 않았음을 알 수 있다. 증가하던 공극압이 6.9 MPa이 되는 순간 급격한 균열의 전단(LVDT신호의 증가를 통해 감지)이 관찰되었다. LVDT 측정치를 균열의 전단변위로 환산하면 약 0.4 mm의 변위가 90초간에 걸쳐 발생한 것이다. 이 순간에 미소음 수의 급격한 증가가 동반되었으며 그 이후로도 공극압이 증가 또는 일정하게 유지되는 과정에도 전단에 의한 미소음은 빈번하게 감지됨을 확인할 수 있다. 그 후 공극압이 감소하는 경우에는 미소음 발생 빈도가 안정화되는 경향이 있다.

주어진 응력조건과 균열의 방향에 대해 쿨롱마찰법칙으로 예측한 임계공극압은 3.9 MPa로 계산된다. 이 값은 실험을 통해 규명된 임계공극압(6.9 MPa)보다 현

저하게 낮은 값이다. 이 실험의 경우 실험을 통해 규명한 값은 이론적으로 예측한 값에 비해 77%나 높게 나타났다. 이 결과는 쿨롱마찰법칙을 통해 임계공극압을 산정할 때 요구되는 물성들(점착력, 마찰계수)이 이산화탄소 주입에 의해 변화했을 수 있음을 암시한다.

이에 대한 보다 명확한 확인을 위해 여러 다른 응력조건에서 사암 내 이산화탄소 주입실험을 실시하였다. 각 실험을 통해 규명된 임계공극압과 쿨롱마찰법칙으로부터 이론적으로 예측한 임계공극압을 그림 6에 도시하였다. 그림 6에서 파선으로 표시된 대각선은 실험치와 이론치가 1:1 대응되는 기준선이고 이로부터 벗어날수록 두 값에 차이가 심해짐을 나타낸다. 실시된 11개 시편에 대한 모든 실험에서 균열의 전단활성을 유발시키는 이산화탄소 임계공극압은 쿨롱마찰법칙을 통해 이론적으로 예측한 임계공극압보다 항상 높은 수준으로 나타났으며 전자는 후자에 비해 최소 8%, 최대 133% 높은 수준이다. 쿨롱마찰법칙은 물 주입의 경우에는 그대로 유효하지만 이산화탄소 주입의 경우에는 실험치와 이론치에 현저한 차이를 보이므로 그 사용에 있어서 주의해야 한다는 점을 이 결과는 보여준다.

이산화탄소 주입의 경우 실험치와 이론치의 현저한 차이에 대한 해석으로 이산화탄소 주입시 어떠한 원인에 의해 점착력과 마찰계수로 표현되는 사암 균열의 마찰물성이 변화될 수 있다는 점을 들 수 있다.

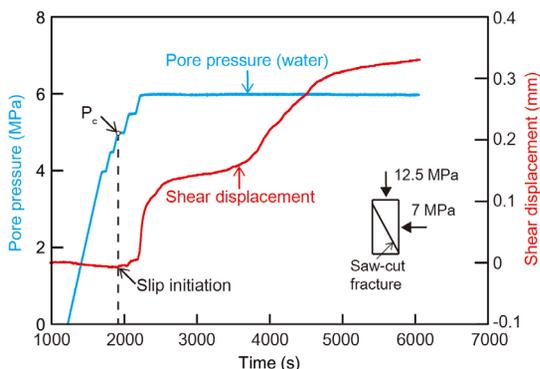


Fig. 4. Example of water injection test result. In this test, pore pressure was increased in step by injecting water into a specimen subjected to a constant triaxial compression (confining pressure of 7 MPa and axial stress of 12.5 MPa). The critical pore pressure (P_c) was determined to be 5 MPa, at which shear slip along the fracture initiated.

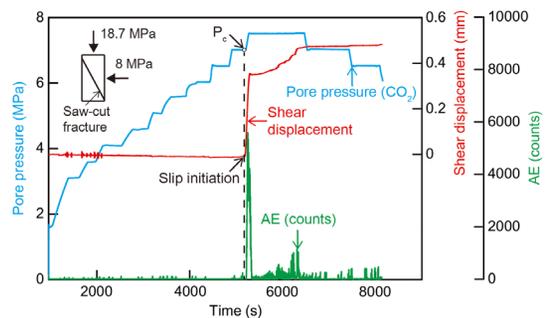


Fig. 5. Example of CO₂ injection test result in a water-saturated specimen. In this test, pore pressure was increased in step by injecting CO₂ into the specimen subjected to a constant triaxial compression (confining pressure of 8 MPa and axial stress of 18.7 MPa). The critical pore pressure (P_c) was determined to be 6.9 MPa, at which shear slip initiated and an emergence of AEs occurred.

동일한 물성에 대한 연구는 아니지만 CO₂ 유체 작용에 의한 암석의 역학적 물성 변화에 대한 가능성은 기존의 연구에서도 보고된 바 있다. Baer and Rigby (1978)는 CO₂의 증발시 탄산염 광물의 침전에 의해 구성성분 변화를 보인바 있다. Major *et al.* (2014)은 CO₂가 녹아있는 유체에 의한 변질에 의해 사암의 강도가 약 50% 감소하는 경향을 파악하였으며 반응시간에 따라 점진적인 강도저하 가능성을 제안하였다. 반면 Aziz and Ming-Li (1999)는 CO₂ 흡착 양이 증가함에 따라 석탄의 강도가 점진적으로 증가함을 실험적으로 보인 바 있다. 이렇듯 CO₂가 암석의 역학적 물성에 다양한 형태로 영향을 미치며 아직 그 구체적인 원인들에 대해서는 여전히 연구 진행 중이다. 본 연구에서 보인 CO₂ 주입에 의한 Berea 사암 균열의 전단강도 증가에 대해서도 이산화탄소가 어떤 구체적 기작으로 균열 마찰 특성을 증가시키는지 알 수 없으나 이산화탄소를 주입할 경우에만 임계공극압 증가가 발생하는 것으로 보아 적어도 현상적으로는 이산화탄소-물-암석 간의, 또는 이산화탄소-물의 이중상 유체에 의한 화학적-역학적 상호작용 효과일 수도 있다는 추측을 갖게 한다. 예를 들어 가능성은 낮지만 화학적 반응에 의한 침전물 형성, 이에 따른 균열 접촉면 증가와 전단강도의 증가의 결과일 수도 있고, 또는 이산화탄소-물 혼합에 의해 단일 유체에 의한 유효응력 법칙과는 다른 형태의 유효응력이 작용하기 때문에 발생한 결과

일 수도 있다. 이런 추측들을 확인하기 위해서는 균열면 상태에 대한 화학적 분석이 선행되어야 할 것으로 사료되며 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

5. 이산화탄소 주입에 의한 균열 마찰물성 변화

이산화탄소 주입에 의해 사암 균열의 물성이 변화하는지 실제 확인하기 위해 이산화탄소와 물의 이중상 (dual phase) 유체로 포화된 사암 균열시편에 대해 물성 측정을 시도하였다. 이 실험을 위하여 일정한 구속압(3-18 MPa 범위)이 가해져 있는 물 포화 사암 시편에 기체 상태의 이산화탄소를 주입하여 1 MPa의 공극압을 유지시킨 상태에서 물, 이산화탄소, 암석이 어느 정도 반응할 수 있도록 약 150분 대기하였다. 그 후 균열의 마찰계수를 측정할 때와 같은 변위속도 (1×10^{-3} mm/s)로 축방향으로 압축하며 균열의 전단 발생을 유도하였다. 역시 같은 방법으로 전단응력-전단변위 곡선에서 기울기가 완만해지기 시작하는 점의 전단응력을 전단강도로 규명하여 전단강도를 균열 전단이 발생할 때의 균열면 유효수직응력의 함수로 그림 7에 도시하였다. 비교를 위해 물로만 포화된 시편에 대한 결과(그림 3)도 같이 도시하였다. 이 결과는 주어진 균열면 유효수직응력에 대해 이산화탄소가 주입되어 있는 균열의 전단강도가 물로만 포화되어 있는 균열의 전단강도에 비해 항상 높게 나타난다는 것을 명백하게 보여준다. 전자의 전단강도가 후자

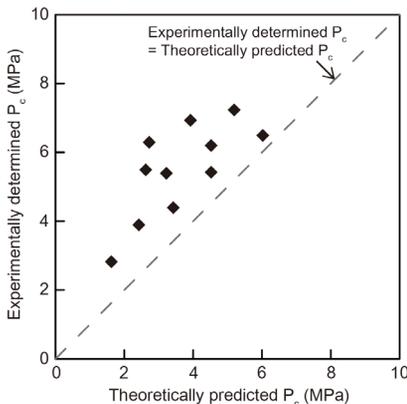


Fig. 6. Comparison between experimentally determined P_c and theoretically predicted P_c from Coulomb friction law for all CO₂ injection tests. The experimentally determined P_c values are higher with no exception than those predicted from the Coulomb friction law.

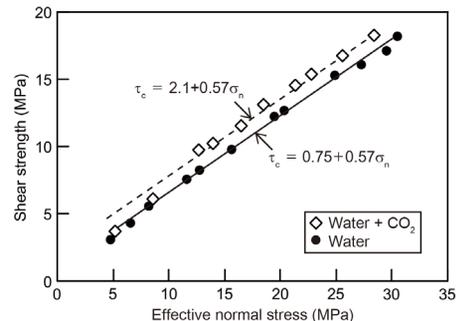


Fig. 7. Shear strength as a function of effective normal stress at slip initiation. The results of water-CO₂ saturated specimens (open symbols) can be fit by a straight line in the form of $\tau_c = 2.1 + 0.57\sigma_n$, from which we determine a cohesion of 2.1 MPa and a frictional coefficient of 0.57. The measured cohesion in water-CO₂ saturated specimens is higher by 1.35 MPa than that in water-saturated specimens.

의 전단강도에 비해 대체로 1-2 MPa 높게 측정되는 것으로 나타났다. 그러나 유효수직응력 함수로서의 전단강도 분포 기울기는 물로 포화된 균열의 자료와 유사한 것으로 관찰된다. 이를 통해 볼 때 이산화탄소 주입시에 수직응력에 따른 전단강도 증가분을 의미하는 마찰계수에는 큰 영향이 없고 균열의 점착력이 어느 정도 강화된다는 것을 알 수 있다. 이러한 점착력 강화의 본질이 물, 이산화탄소, 암석간의 화학적 상호작용에 의한 것이라면 그 반응시간이 길수록 그 효과 또한 증가되는 것일 수도 있다. 그러나 본 연구에서는 반응시간에 따른 물성 변화까지는 확인하지 못하였다. 어찌하였든 주어진 시간 동안에의 물, 이산화탄소, 암석간의 어떠한 상호작용에 의해 점착력이 증가하는 양상으로 균열의 마찰물성이 강화되는 형태로 물성 변화가 발생하는 것을 관찰하였다. 주어진 자료를 토대로 물과 이산화탄소로 포화된 사암시편의 전단강도 기준식은

$$\tau_c = 2.1 + 0.57\sigma_n \quad (3)$$

로 얻어져 이산화탄소가 균열의 점착력을 물로만 포화된 균열의 점착력에 비해 1.35 MPa 증가시키는 것으로 나타난다. 다시 언급하지만 이 결과는 150분 내외의 반응시간에 대한 결과이며 그 이상의 반응시간에 대해 적용할 수 있는지는 알 수 없다. 이산화탄소를 주입하는 경우의 증가된 점착력을 이용하여 쿨롱마찰법칙으로 임계공극압을 다시 계산하여 실험

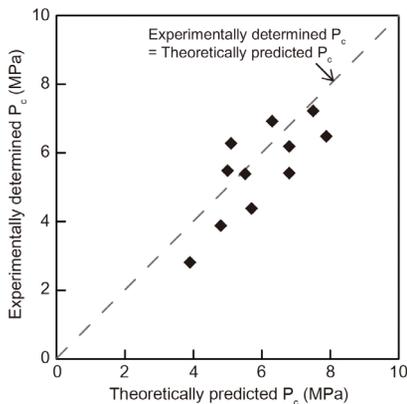


Fig. 8. Comparison between the experimentally determined P_c and theoretically predicted P_c recalculated based on the enhanced cohesion by water-CO₂-rock interaction. The measured and predicted P_c values appear to be quite comparable.

치와 비교한 결과를 그림 8에 도시하였다. 이 결과는 그림 6에서 보여주는 결과에 비해 훨씬 대각선 쪽으로 이동하여 이론치와 실험치가 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 이산화탄소 주입에 동반되어 발생할 수 있는 사암 내 균열의 전단활성을 야기시키는 임계공극압은 이론적으로 예측 가능하지만 이를 위해서는 이산화탄소가 균열의 마찰물성에 미치는 효과를 고려해야 한다는 점을 본 연구 결과는 시사한다.

6. 결론

이산화탄소 주입에 의한 사암 내 균열의 전단활성을 유발시키는 임계공극압 측정 실험을 통해 다음의 결론을 얻었다.

이산화탄소 주입에 의해 공극압이 일정 수준에 이르자 균열의 전단활성과 그에 동반되는 미소음이 발생하였고 이때의 공극압을 임계공극압으로 결정하였다. 모든 주입실험에서 규명된 임계공극압을 쿨롱마찰법칙을 이용한 이론적 예측 값과 비교한 결과 실험치는 이론치에 비해 항상 높은 수준으로 나타났다.

위의 결과는 이산화탄소 주입에 의해 균열의 전단강도가 증가하였음을 의미하며 그 원인을 규명하고자 이산화탄소와 물로 동시에 포화된 균열시편에 대해 물성 측정을 시도한 결과 균열면의 점착력이 증가하는 형태로 물성 변화가 발생하였음을 관찰하였다.

따라서 이산화탄소 주입시 임계공극압은 쿨롱마찰법칙을 통해 유추 가능하지만 이산화탄소에 의한 균열면 물성 보정(점착력 상승)을 고려하여야 함을 알 수 있다. 이 결과는 이산화탄소 주입시 균열의 전단활성을 발생시키는 실제 임계공극압은 단순한 역학적 산정을 통해 얻어진 값보다 더 높음을 의미하므로 이산화탄소 주입, 운영과정에서 저장층 압력조절 측면에서 호의적으로 작용함을 보여준다.

또한 균열면 원래 물성으로 단순 역학적으로 산정한 값은 임계공극압에 대한 보수적인 유추 값으로 사용할 수도 있다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20132010201760)입니다.

REFERENCES

- Aziz, N.I. and Ming-Li, W., 1999, The effect of sorbed gas on the strength of coal-an experimental study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17, 387-402.
- Bachu, S., 2008, CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 254-273.
- Baer, J.L. and Rigby, J.K., 1978, Geology of the Crystal Geyser and environmental implications of its effluent, Grand County, Utah. *Utah Geology*, 5, 125-130.
- Benson, S.M. and Cole, D.R., 2008, CO₂ sequestration in deep sedimentary formations. *Elements*, 4, 325-331.
- Damen, K., Faaij, A. and Turkenburg, W., 2006, Health, safety and environmental risks of underground CO₂ storage-overview of mechanisms and current knowledge. *Climatic Change*, 74, 289-318.
- Ellsworth, W.L., 2013, Injection-induced earthquakes. *Science*, 341, 1225942
- Evans, D.M., 1966, The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well. *The Mountain Geologist*, 3, 23-36.
- Hong, S.K., Lee, H., Egawa, K., Choi, T., Lee, M.K., Kihm J.H., Lee Y.I. and Kim, J.M., 2009, Preliminary evaluation for carbon dioxide storage capacity of the Chungnam, Taebaksan, Mungyeong and Honam basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 449-462 (in Korean with English abstract).
- Li, Q. and Wu, Z., 2005, A parametric study of fault mechanical changes associated with geological sequestration of carbon dioxide. *Journal of Applied Mechanics*, 8, 741-751.
- Major, J.R., Eichhubl, P., Dewers, T.A., Urquhart, A.S., Olson, J.E. and Holder, J., 2014, The effect of CO₂-related diagenesis on geomechanical failure parameter: fracture testing of CO₂-altered reservoir and seal rocks from a natural analog at Crystal Geyser, Utah. *Proceedings of 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Minneapolis, USA.
- Majer, E.L. and Peterson, J.E., 2007, The impact of injection on seismicity at The Geysers, California Geothermal Field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 1079-1090.
- McGarr, A., Simpson, D. and Seeber, L., 2002, Case histories of induced and triggered seismicity. *International Geophysics Series*, 81, 647-664.
- Menéndez, B., Zhu, W. and Wong, T.-F., 1996, Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Berea sandstone. *Journal of Structural Geology*, 18, 1-16.
- Nicot, J.P., 2008, Evaluation of large-scale CO₂ storage on fresh-water sections of aquifers: An example from the Texas Gulf Coast Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 582-593.
- Onuma, T. and Ohkawa, S., 2009, Detection of surface deformation related with CO₂ injection by DInSAR at In Salah, Algeria. *Energy Procedia*, 1, 2177-2184.
- Rutqvist, J. and Tsang, C.F., 2002, A study of caprock hydro-mechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation. *Environmental Geology*, 42, 296-305.
- Rutqvist, J., 2012, The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 525-551.
- Rutqvist, J., Vasco, D.W. and Myer, L., 2010, Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 225-230.
- Streit, J.E. and Hillis, R.R., 2004, Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO₂ in porous rock. *Energy*, 29, 1445-1456.
- Talwani, P. and Acree, S., 1984, Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics*, 122, 947-965.
- Tsang, C.F., Birkholzer, J. and Rutqvist, J., 2008, A comparative review of hydrologic issues involved in geologic storage of CO₂ and injection disposal of liquid waste. *Environmental Geology*, 54, 1723-1737.
- Verdon, J.P., Kendall, J.M., Stork, A.L., Chadwick, R.A., White, D.J. and Bissell, R.C., 2013, Comparison of geomechanical deformation induced by megatonne-scale CO₂ storage at Sleipner, Weyburn, and In Salah. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, E2762-E2771.
- Warpinski, N.R., Du, J. and Zimmer, U., 2012, Measurements of hydraulic-fracture-induced seismicity in gas shales. *SPE Production & Operations*, 27, 240-252.
- Wei, N., Li, X., Wang, Y., Dahowski, R.T., Davidson, C.L. and Bromhal, G.S., 2013, A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 231-246.
- Yamamoto, K. and Takahashi, K., 2004, Importance of the geomechanics for the safety of CO₂ geologic sequestration. *Proceedings of the International Society for Rock Mechanics International Symposium 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, Tokyo, Japan, 467-472.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M., 2012, Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 10164-10168.

Received : March 4, 2015

Revised : April 8, 2015

Accepted : April 15, 2015