

# 짧은 보 압축 시험법을 이용한 암석의 모드 II 파괴 인성 측정

고태영<sup>1\*</sup> · Kemeny, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>정회원, SK건설 Infra기술2팀 과장

<sup>2</sup>비회원, University of Arizona, 교수

## Mode II fracture toughness determination of rocks using short beam compression test

Tae Young Ko<sup>1\*</sup>, J. Kemeny<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SK Engineering & Construction, Infra Engineering Team 2, Manager

<sup>2</sup>University of Arizona, Professor

**ABSTRACT:** The mode II fracture toughness and strength due to shear stress are important parameters in the stability of caprock and injection zone with application to geological sequestration of carbon dioxide. In this research, a short beam compression test has been used to determine the shear strength and the mode II fracture toughness for Coconino sandstone. The average value of the shear strength and mode II fracture toughness are estimated to be 23.53 MPa and 1.58 MPa $\sqrt{m}$  respectively. The stress intensity factor is suggested by finite element analysis using the displacement extrapolation method. The effect of biaxial stress and water saturation on the fracture toughness has also been investigated. The fracture toughness increases with confining stresses, but decreases by 11.4% in fully saturated condition.

**Keywords:** Mode II fracture toughness, Shear strength, Stress intensity factor, Fracture mechanics, Coconino sandstone

**초 록:** 전단응력에 의한 전단강도 및 모드 II 파괴인성은 이산화탄소 지중저장에서의 덮개암 및 주입층의 안정성 평가에 활용되는 중요한 인자들이다. 본 연구에서는 짧은 보 압축시험을 이용하여 코코니노 사암의 전단강도 및 모드 II 파괴인성을 측정하였다. 측정된 평균 전단강도는 23.53 MPa이며, 모드 II 파괴인성은 1.58 MPa $\sqrt{m}$ 이다. 응력확대계수(stress intensity factor)는 변위외삽법(displacement extrapolation method)을 이용한 유한요소법으로 결정하였다. 또한 이축응력(biaxial stress)과 수분포화(water saturation)가 모드 II 파괴인성에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 이축응력이 증가할수록 파괴인성도 증가하였고, 완전포화된 시험편의 파괴인성은 건조상태의 파괴인성보다 대략 11.4% 감소하였다.

**주요어:** 모드 II 파괴인성, 전단강도, 응력확대계수, 파괴역학, 코코니노 사암

## 1. 서론

산업화로 인한 대기 중의 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등의 온실가스의 증가는 지구온난화의 주요한 원인으로 알려져 있으며, 이러한 지구온난화는 기후 변화를 가져와 생태계에 변화를 일으키며 인류사회에 심각한 환경적, 경제적 피해를 줄 것으로 예상된다.

세계 각국은 지구온난화에 따른 기후변화를 최소화하기 위해 에너지절약, 이용효율 향상, 신·재생 에너지 개발과 같은 온실가스 배출을 줄일 수 있는 기술개발에 연구와 투자를 하고 있다.

경제성 있는 신·재생 에너지가 주요 에너지원으로 개발되기 전까지 기존 화석연료 중심의 산업구조를 유지하면서 이산화탄소의 배출을 효과적으로 줄일 수 있는 대안으로 이산화탄소 포집 및 저장(carbon dioxide capture and storage, CCS)이 주목 받고 있다.

이산화탄소 포집 및 저장은 발전소, 제철소, 석유화학공장 등과 같이 화석연료를 사용하는 대규모 온실

\*Corresponding author: Tae Young Ko  
E-mail: tyko@sk.com

Received \*\* \*\*, 2013; Revised \*\* \*\*, 2013;

Accepted \*\* \*\*, 2013

가스 배출원에서 포집한 이산화탄소를 압축하고 수송하여 육상 또는 해상의 지질구조 즉 폐유/가스전, 폐석탄층, 대염수층 등에 저장하는 기술이다.

지중에 저장된 이산화탄소는 누출없이 오랜기간 동안 격리되어야 하나, 과도한 주입압에 의한 주입층 및 상부 덮개암(caprock)의 파괴 등에 의해 예상치 않은 누출이 있을 수 있다. 따라서 이산화탄소 지중 저장의 장기적인 안정성 평가를 위해서는 저장 주입층 및 덮개암의 파괴강도(fracture strength)나 파괴인성(fracture toughness)과 같은 물성값을 알아야 하고, 이러한 물성들을 고려하여 주입량과 주입압을 선정해야 할 것이다.

Rutqvist와 Tsang (2003), Rutqvist 등(2008)은 TOUGH-FLAC 연계해석을 이용하여 이산화탄소를 30년동안 주입하였을 때 주입층과 덮개암의 전단파괴 및 인장파괴 발생률을 모델링하여 지중 저장된 이산화탄소의 누출 경로 발생 가능성을 평가하였다. 그 결과 이미 주입층 혹은 덮개암에 존재하는 균열을 따라 전단파괴가 발생할 확률이 인장파괴의 확률보다 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과를 볼 때 주입층 및 덮개암의 전단파괴와 관련된 전단강도와 모드 II 파괴인성 측정이 중요하다고 볼 수 있다.

암석의 모드 I 파괴인성 측정에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해서 수행되었으나(Ouchterlony, 1988; Fowell et al., 1995; Donovan and Karfakis, 2004; Yoon and Choi, 1993; Kim and Baik, 1994; Yang and Kim, 2007; Ko et al., 2008; Lee, 2010), 모드 II 파괴인성 측정에 관한 연구는 상대적으로 적은 편이다(Backers et al., 2002; Rao et al., 2003; Yoon and Jeon, 2003). 이는 모드 II 파괴인성 측정을 위해서는 순수 전단응력에 의한 전단파괴가 이루어져야 하나, 암석의 경우 순수 전단응력을 가하더라도 전단파괴보다 인장에 의한 파괴가 먼저 일어나는 경우가 많기 때문이다. 따라서 순수 전단파괴가 일어날 수 있도록 시험편의 형상을 제작하는 것이 중요하다(Backers et al., 2002; Rao et al., 2003).

특히 주입층이나 덮개암의 물성을 측정할 수 있는 시험편은 시추를 통해서 회수된 직경이 21 mm부터 85 mm 사이의 코어에서 얻을 수 있기 때문에 시험편의 크기가 제한적이다.

본 연구에서는 코어시료로부터 시험편의 성형이 가능한 짧은 보 압축시험(short beam compression test)(Watkins and Liu, 1985)을 이용하여 암석의 모드 II 파괴인성을 측정하는 방법을 제안하고 코코니노 사암(Coconino sandstone)의 전단강도 및 모드 II 파괴인성을 측정하였다. 선행연구(Ko and Kemeny, 2006)에 Watkins and Liu(1985)가 적용했던 시험방법과 본 연구에 적용된 시험방법의 차이, 시험편의 형상에 대한 검토를 수행하였으며, 그 결과로 도출된 인장균열에 의한 파괴가 발생하지 않고 순수한 전단균열에 의한 파괴가 생길 수 있는 시험편의 형상을 적용하였으며, 응력확대계수(stress intensity factor)는 변위의 삼법(displacement extrapolation method)을 이용한 유한요소법으로 결정하였다. 또한 이축응력(biaxial stress)과 수분포화(water saturation)가 전단강도 및 모드 II 파괴인성에 미치는 영향을 분석하여, 실제 지하 심부에 구속된 암석의 전단강도 및 파괴인성의 경향을 유추할 수 있도록 하였다.

## 2. 짧은 보 압축시험

### 2.1 시험편의 물성

본 연구에서 사용된 시험편은 코코니노 사암(Coconino Sandstone)으로 아리조나, 콜로라도, 유타, 네바다 주 등에 고루 분포하며 그랜드캐년의 절벽을 이루는 주요한 암석으로 그 두께는 지역마다 다르나 대략 20 m부터 180 m까지이다. 코코니노 사암은 주로 분급이 잘된 세립의 석영과 약간의 K-장석으로 구성되어 있으며, 노란색에서부터 분홍색을 띠고 있다. 본 시험에서 사용된 코코니노 사암의 평균 공극률은 대략 15%였다. 일축압축시험, 삼축압축시험, 압열인장시험 등

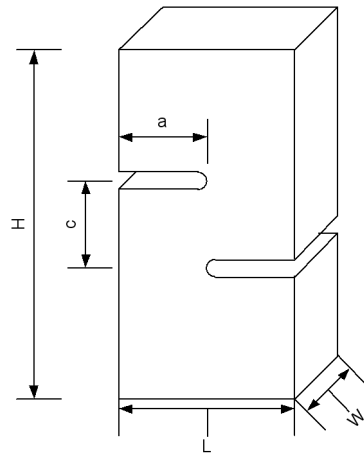
**Table 1.** Mechanical properties of Coconino sandstone

Uniaxial compressive strength $\sigma_c$ [MPa]	Tensile strength $\sigma_t$ [MPa]	Poisson's ratio $\nu$	Young's modulus $E$ [GPa]	Cohesion $C$ [MPa]	Internal friction angle $\Phi$ [°]
118.0	6.4	0.36	24.3	22.7	50.6

을 실시하여 일축압축강도, 인장강도, 포아송비, 탄성계수, 내부마찰각, 점착력 등의 물성을 측정하였으며 그 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

## 2.2 시험편의 형상 및 시험 방법

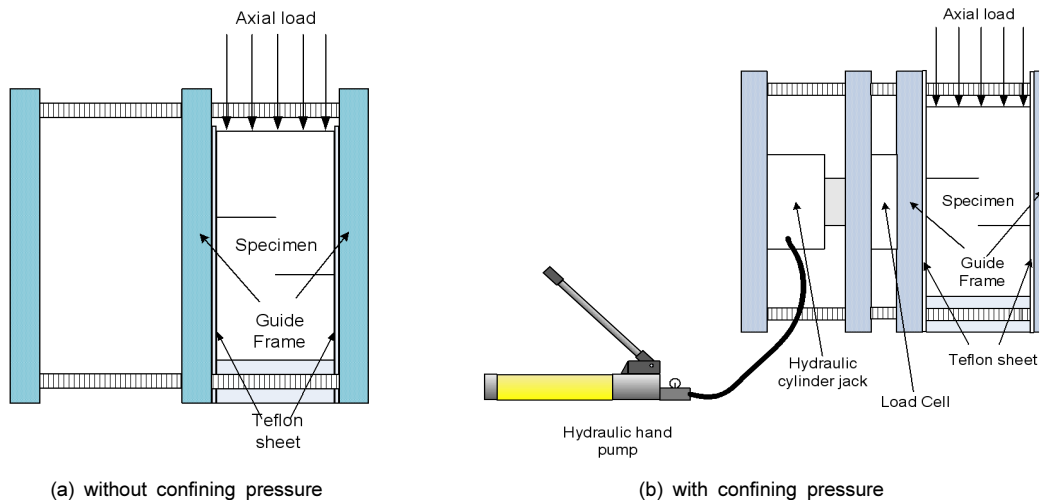
본 연구에서 사용된 시험편은 Fig. 1과 같이 직육면체의 형태로 선행연구(Ko and Kemeny, 2006)에서 결정된 크기인 높이(H) 101.6 mm, 길이(L) 50.8 mm, 너비(W)는 25.4 mm이다. HQ 크기(63.5 mm) 이상의 코어나 블록형태의 과상을 절삭하거나 연마하여 시험편을 성형하였다. 크기(a)가 25.4 mm인 두 개의 초기노치(notch)를 회전톱을 이용하여 간격(c) 20.32 mm만큼 떨어져 서로 반대방향에 생성하였다. 시험편의 모든 표면은 연마기로 매끄럽게 연마하였으며, 연마 후 40°C의 오븐에서 24시간동안 건조한 후 시험 전에 데시케이터에서 시험편을 식힌 후 시험을 수행하였



**Fig. 1.** Specimen geometry for short beam compression test

다. 시험실의 온도는 22°C, 습도는 15 %로 일정하게 유지하여 온도와 습도가 시험 결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다.

하중을 가하는 도중 시험편의 좌굴(buckling)이나



**Fig. 2.** Short beam compression test setup

휨(bending)을 방지하고, 시험편 내부에서 생성되는 인장응력을 최소화하기 위해 강철로 된 안내틀(guide frame) 사이에 시험편을 설치하고 안내틀이 움직이지 않게 고정된 후 시험하였다. 또한 시험편과 안내틀 사이에 테프론(Teflon) 시트를 넣어 안내틀과 시험편 사이의 마찰력을 최소화하였다(Fig. 2).

이축응력이 파괴인성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 Fig. 2b)와 같이 수동 유압기를 이용하여 5, 10, 15 MPa의 구속압을 시험편에 적용하여 파괴인성을 측정하였으며, 적용된 구속압이 정확한 지 알기 위해 유압기와 안내틀 사이에 로드셀을 넣어서 구속압을 측정하였다.

또한 수분포화가 파괴인성에 미치는 영향을 보기 위해서 시험편을 24시간 동안 수조에 담근 후 꺼내서 페이퍼 타월로 표면의 물기를 제거한 후, 시험 중에 시험편의 표면에서 수분이 증발되는 것을 방지하기 위해 비닐랩으로 싸서 시험을 실시하였다.

본 연구에서는 하중제어로 하중속도를 조절하였으며 그 속도는 1 MPa/s로 대략 20~30초 내로 시험편이 파괴되었다.

### 3. 응력확대계수의 결정

#### 3.1 유한요소법을 이용하는 방법

응력확대계수는 균열을 가지는 재료에 하중이나 응력이 가해 질 때 균열의 선단 근방의 응력장의 세기를 나타내는 계수로 응력과 균열 길이의 함수로 이루어져있다. 응력확대계수는 일반적으로 닫힌 해나 엄밀 해 등을 이용한 해석적(analytical) 방법이나 유한요소 해석 등을 이용한 수치적(numerical) 방법으로 구한다.

유한요소 해석을 이용할 경우 균열의 크기를 증가시켜 가며 균열 선단 주변의 요소망을 세밀하게 분할하고 해석을 수행하여 각각의 균열의 크기에 따른 응력확대계수의 값을 결정하고 균열의 길이를 시험편

의 길이로 정규화하여 응력확대계수의 식을 결정하게 된다.

본 연구에서 사용된 짧은 보 압축 시험편의 경우 균열이 노치와 같은 방향으로 성장하지 않고 하중방향과 같은 노치와 직교하는 방향으로 성장한다. 따라서, 노치 선단에서의 응력확대계수를 유한요소 해석에서 직접 구할 수 없기 때문에 Fig. 3과 같이 노치와 직교하는 방향으로 크기가 아주 작은 길이가 가상의 균열이 있다고 가정하고, 가상 균열의 크기가 0으로 접근할 때 이 가상 균열의 선단에서의 노달 응력확대계수를 노치에서의 응력확대계수로 가정해서 사용하였다. 가상 균열의 길이가 아주 작게 되면 더욱 더 세밀한 요소망이 필요한 데 이러한 경우 해석 시간이 많이 소요되고 요소망 구성에 어려움이 따른다. 그리고 유한요소 해석에서 요소망의 크기가 지나치게 작을 경우에는 균열 선단에서의 응력 특이성(singularity)을 나타내기가 힘들기 때문에 그 값의 정확성이 떨어진다(Chan et al., 1970).

Fig. 4에 나타난 것처럼 유한요소법으로 계산한 노달 응력확대계수의 값은 가상 균열의 길이가 작을수록 0으로 수렴하고 아주 클 경우 무한대로 발산하며 적절한 길이( $0.05 \leq 2l/c \leq 0.5$ )일 경우 선형으로

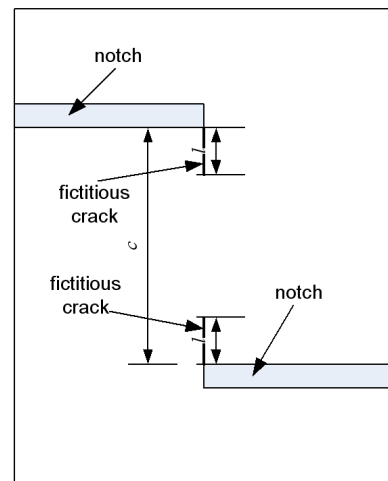


Fig. 3. Small fictitious cracks perpendicular to the pre-existing notches

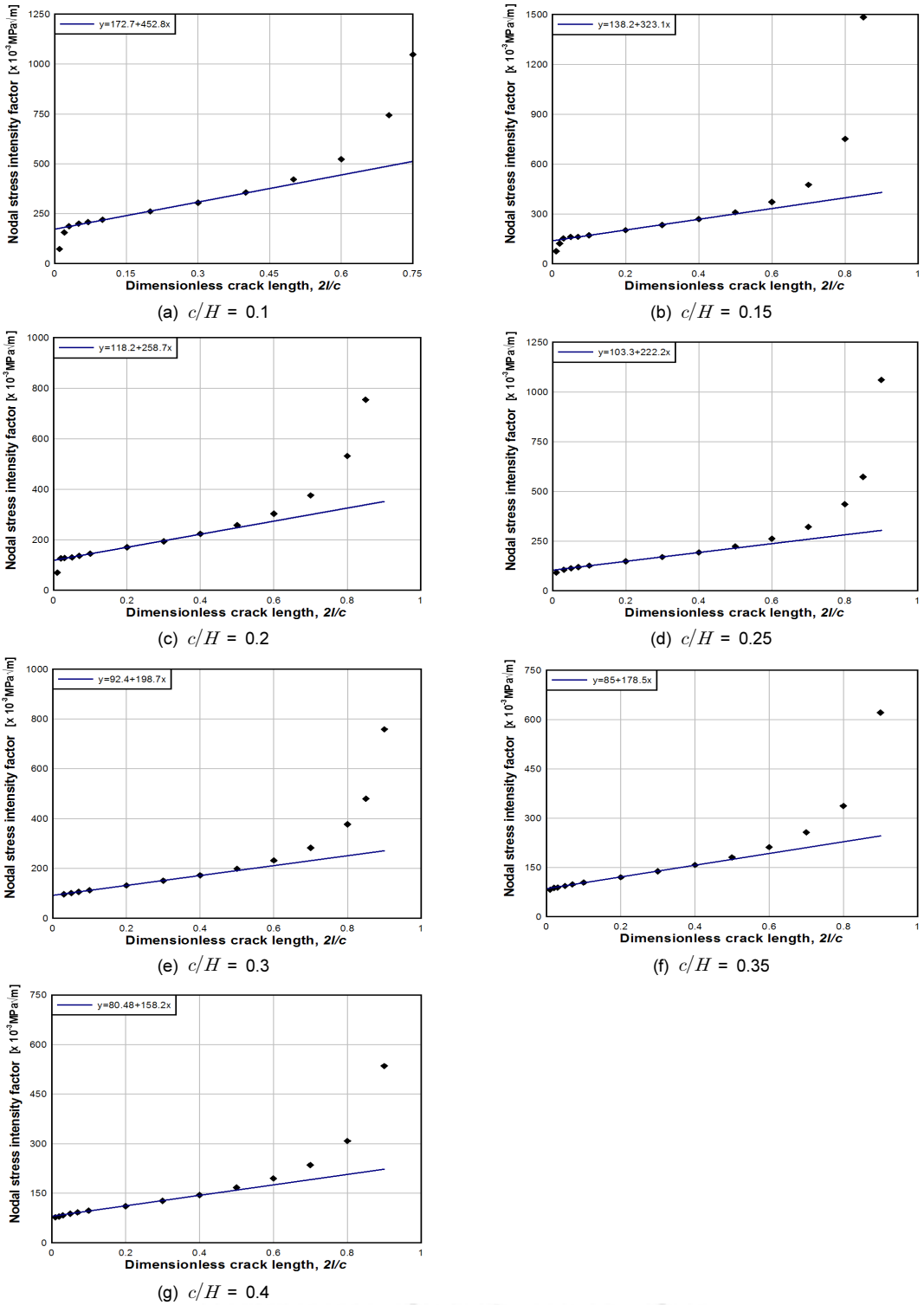


Fig. 4. Nodal stress intensity factors determined from an extrapolation of the curve at a given  $c/H$

변한다. 따라서 가상 균열의 길이가 0일 경우에서의 응력확대계수는 선형으로 변하는 노달 응력확대계수 값으로부터 외삽(extrapolation)하여 결정하였다.

유한요소 해석에 사용된 프로그램은 FRANC2D/L 이며 해석에 사용된 시험편의 크기는 실제 시험에 사용된 것과 동일한 크기를 사용하였으며 적용된 하중( $P$ )은 0.8896 kN (200 lbf)이었다. 해석에 사용되었던 유한요소망을 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.2 짧은 보 압축 시험편의 응력확대계수

일반적으로 전단응력( $t$ ) 하에서의 모드 II 응력확대 계수( $K_{II}$ )는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{II} = Y\tau\sqrt{a} \quad (1)$$

여기서,  $Y$ 는 시험편의 형상에 따라 결정되는 형상 함수이며,  $a$ 는 노치의 길이이다.

짧은 보 시험편에서의 전단응력은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{P}{cW} \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 작용하는 하중이다.

식 (1)과 (2)를 결합하게 되면 모드 II 응력확대계수 ( $K_{II}$ )는 다음의 식 (3)과 같게 되며 형상함수  $Y$ 를  $c/H$ 의 함수인  $F(c/H)$ 라고 하면  $F(c/H)$ 는 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$K_{II} = Y\tau\sqrt{a} = Y\frac{P}{cW}\sqrt{a} \quad (3)$$

$$Y = F(c/H) = \frac{K_{II}cW}{P\sqrt{a}} \quad (4)$$

유한요소 해석으로부터 주어진  $c/H$ 에 대한 모드

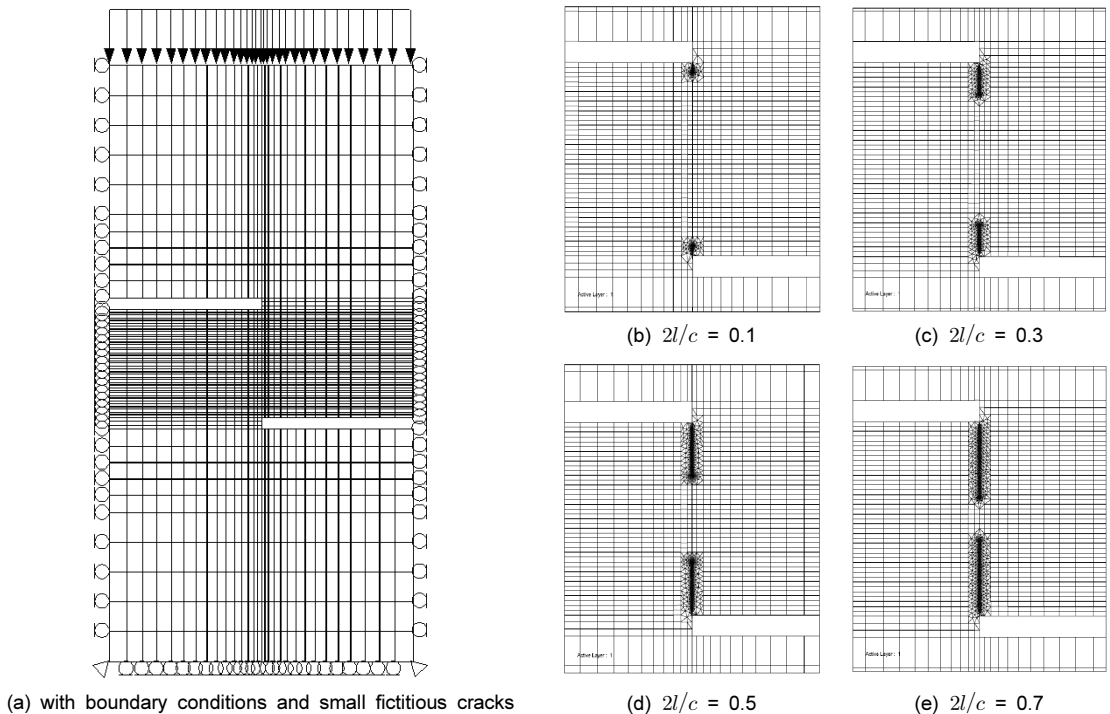


Fig. 5. Finite element mesh for the short beam compression specimen

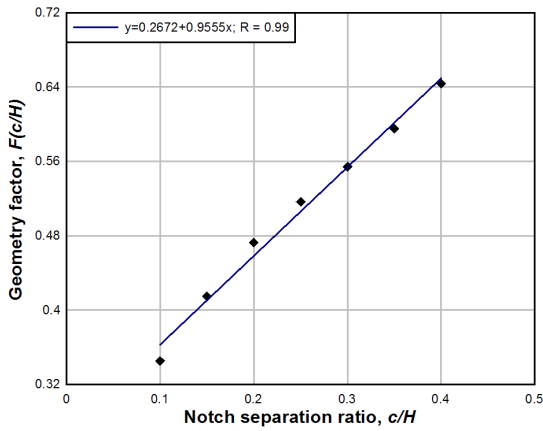


Fig. 6. Variation of the geometry factor with respect to notch separation ratio

II 응력확대계수를 구할 수 있다.  $F(c/H)$ 와  $c/H$ 의 관계를 도시화하면 Fig. 6과 같으며, 이로부터  $F(c/H)$ 의 식을 선형 회귀하여 구하면 다음의 식 (5)와 같다.

$$F\left(\frac{c}{H}\right) = 0.2672 + 0.9555\left(\frac{c}{H}\right) \quad (5)$$

따라서, 최종적으로 모드 II 응력확대계수는 다음의 식 (6)과 같다.

$$K_{II} = \left(0.2672 + 0.9555\left(\frac{c}{H}\right)\right) \frac{P}{cW} \sqrt{a} \quad (6)$$

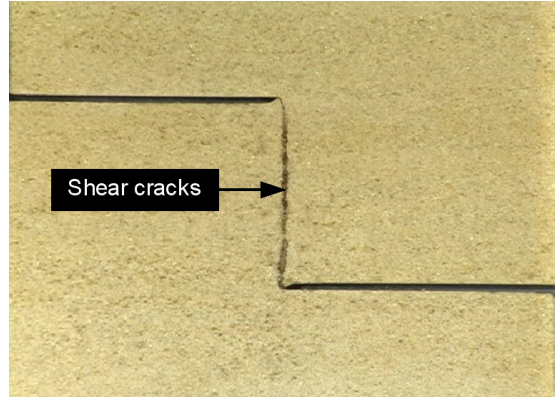


Fig. 7. Fracture trajectories of short beam compression test

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 전단강도 및 모드 II 파괴인성

파괴인성은 재료가 균열의 성장에 저항하는 정도를 나타내는 것으로 이 값이 클수록 균열의 성장이 어려워진다. 파괴인성은 응력확대계수의 식에 균열이 성장하여 파괴가 일어났을 때의 응력을 대입함으로써 구할 수 있다. 다음의 Table 2에 실험을 통해서 얻은 전단강도 및 파괴인성을 나타내었다. 총 7개의 시험편이 사용되었으며, 평균 전단강도는  $23.53 \pm 2.39$  MPa, 평균 파괴인성은  $1.58 \pm 0.19$  MPa $\sqrt{m}$  이었다. 삼축압축시험을 통해 구해진 점착력과 전단강도를 비교했을 때 그 값이 서로 유사함을 알 수 있다. 또한 Fig. 7에서와 같이 노치 사이의 파괴된 형상이 인장균열의 발생

Table 2. Experimental results of short beam compression test

Specimen No.	Shear strength [MPa]	Fracture toughness [MPa $\sqrt{m}$ ]
SBC03	21.25	1.45
SBC07	24.35	1.65
SBC11	23.90	1.64
SBC15	28.05	1.95
SBC19	23.06	1.51
SBC23	23.27	1.53
SBC27	20.80	1.36
Average	$23.53 \pm 2.39$	$1.58 \pm 0.19$

없이 전단에 의해서 생성되었다. 따라서 암석에 대한 짧은 보 압축시험의 적용성에 큰 문제가 없음을 판단할 수 있다.

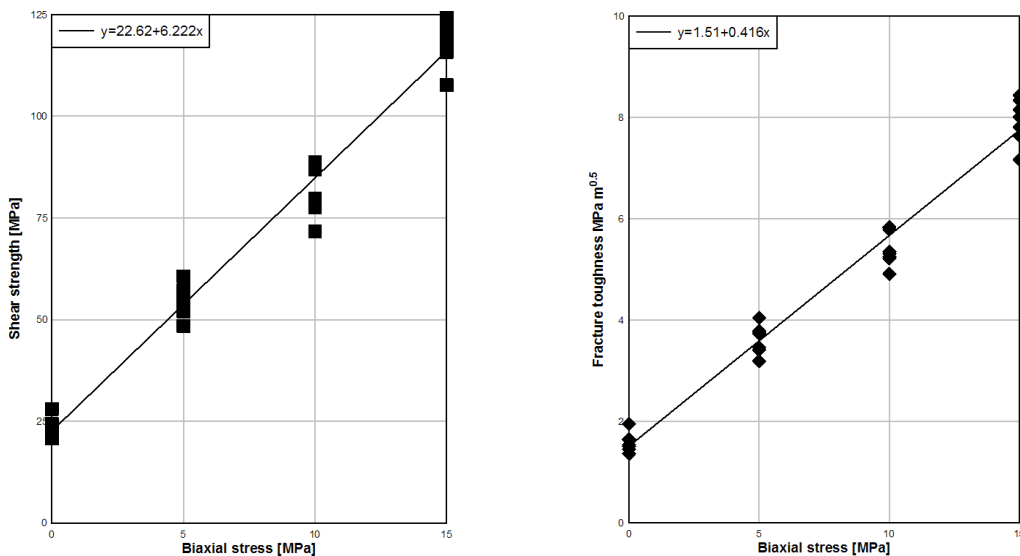
#### 4.2 이축응력의 영향

또한 이축응력이 전단강도 및 파괴인성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 5, 10, 15 MPa의 이축응력을 시험편에 적용하여 전단강도 및 파괴인성을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이축응력은 로드셀에서 측정된 하중과 시험편의 측면에서의 접촉면적을 이용해서 계산되었으며, 본 연구에서는 이축응력을 원거리(far-field)응력으로 간주하여 사용하기로 하였다. 시험편에 작용하는 수직하중의 증가에 대한 측방향 하중의 증가는 시험편이 파괴되었을 때 최대 200 N 정도 증가하는 것으로 관측되었으며, 시험결과에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단되었다.

각각의 이축응력에 대해 7개의 시험편이 사용되었으며, 5 MPa의 이축응력에 대해서는 평균 전단강도는  $54.62 \pm 3.70$  MPa, 평균 파괴인성은  $3.62 \pm 0.26$  MPa

$\sqrt{m}$  이며, 10 MPa의 이축응력에 대해서는 평균 전단강도는  $80.33 \pm 5.79$  MPa, 평균 파괴인성은  $5.38 \pm 0.32$  MPa $\sqrt{m}$  이며, 15 MPa의 이축응력에 대해서는 평균 전단강도는  $118.66 \pm 5.53$  MPa, 평균 파괴인성은  $7.93 \pm 0.44$  MPa $\sqrt{m}$  이었다. 이축응력이 증가할수록 파괴인성 및 전단강도 또한 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이축응력이 없을 때에 비해 이축응력이 15 MPa 일 때 전단강도는 대략 5배 증가하였고, 파괴인성도 유사하게 5배 정도 크게 나타났다. 일반적으로 이산화탄소 지층 저장에 초임계상태를 유지하기 위해 심도 800 m 이상에서 이루어지게 되므로 본 실험결과에서 유추할 수 있듯이 심부에서의 전단강도나 파괴인성은 구속압이 없는 경우에 비해서 최소 5배 이상 클 것으로 판단된다. Fig. 8에 이축응력에 대한 전단강도와 파괴인성의 변화를 나타내었다.

Fig. 9에 이축응력에 대한 정규화한 전단강도와 파괴인성의 변화를 나타내었다. 일반적인 삼축압축시험의 결과와 유사하게 이축응력이 증가할수록 전단강도 및 파괴인성이 증가하는 경향을 보였으며 증가율도 서로 유사한 것으로 나타났다.



(a) variation of shear strength with respect to biaxial stress (b) variation of fracture toughness with respect to biaxial stress

Fig. 8. Variation of shear strength and fracture toughness



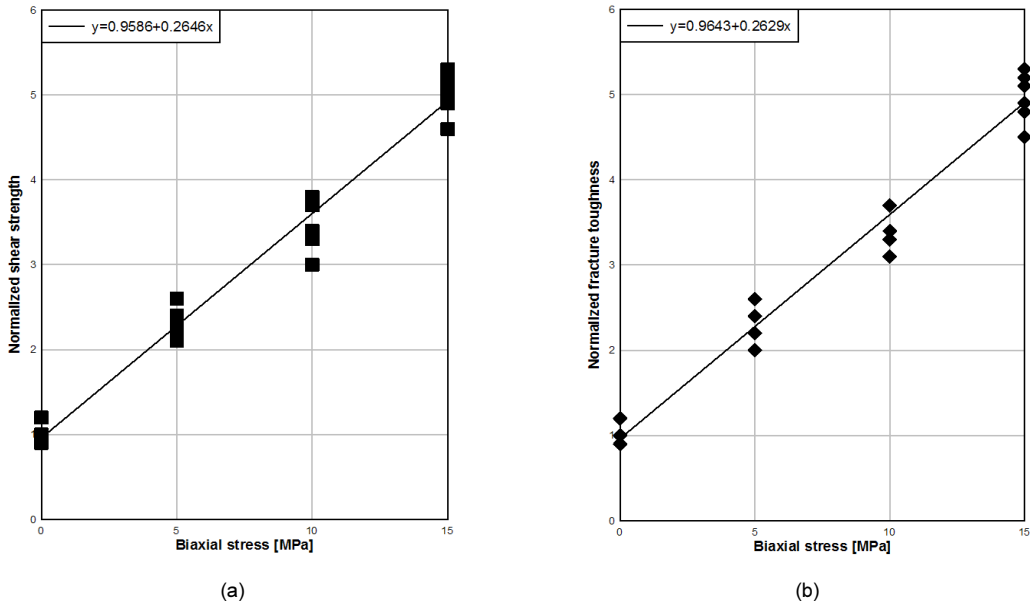


Fig. 9. Variation of normalized shear strength and fracture toughness with respect to biaxial stress

### 4.3 수분포화의 영향

이산화탄소 지중저장이 이루어지는 심도 800 m 이상의 대염수층 또는 대수층은 항상 포화되어 있거나 포화에 가까운 상태로 존재하게 된다. 따라서, 수분포화가 파괴인성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 시험편을 완전히 포화시킨 후 전단강도 및 파괴인성을 측정하였다. 시험편을 40°C의 오븐에서 건조시키면서 무게변화를 측정하였고 그 결과 대략 4시간 이후부터 무게변화는 거의 발생하지 않았다. 보다 보수적

으로 시험편을 24시간동안 건조한 후 완전 건조상태의 무게를 측정한 후에 수침하여 48시간동안 무게변화를 측정하였는데 수침 후 대략 6시간 이후로는 무게변화가 거의 발생하지 않았다. 따라서 24시간 완전 건조 후 24시간동안 수침한 시험편을 완전히 포화되었다고 판단하고 전단강도 및 파괴인성을 측정하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

총 7개의 시험편이 사용되었으며, 평균 전단강도는  $20.08 \pm 1.37$  MPa, 평균 파괴인성은  $1.40 \pm 0.08$  MPa  $\sqrt{m}$  이었다. 건조된 시험편에서의 결과와 비교할 때

Table 3. Experimental results of short beam compression test for biaxial stresses.

Specimen No.	Shear strength [MPa]	Fracture toughness [MPa $\sqrt{m}$ ]
SBCW100_03	21.71	1.50
SBCW100_07	19.41	1.35
SBCW100_11	19.83	1.38
SBCW100_15	20.54	1.41
SBCW100_19	18.01	1.27
SBCW100_23	19.28	1.40
SBCW100_27	21.79	1.47
Average	$20.08 \pm 1.37$	$1.40 \pm 0.08$

전단강도는 14.7% 감소하였고, 파괴인성은 11.4% 감소하였다. 수분이 사암 입자 사이의 점착력을 약화시키고 입자간의 마찰력을 저하하여 포화된 시험편의 전단강도 및 파괴인성이 건조된 상태에 비해서 감소한 것으로 판단된다. 또한 포화된 시험편의 전단강도 및 파괴인성에 대한 변이계수(coefficient of variation)는 각각 6.8%, 5.7%로 건조상태에서의 전단강도 및 파괴인성에 대한 변이계수 10.2%, 12.0% 보다 적어 포화상태의 전단강도 및 파괴인성이 더 고르게 측정되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 짧은 보 압축시험을 이용하여 암석의 모드 II 파괴인성을 측정하는 방법을 제안하고 코코니노 사암의 전단강도 및 모드 II 파괴인성을 측정하였으며, 이축응력과 수분포화가 전단강도 및 모드 II 파괴인성에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변위외삽법(displacement extrapolation method)을 이용한 유한요소법으로 짧은 보 압축시험에 대한 응력확대계수(stress intensity factor)를 제안하였다.
2. 제안된 응력확대계수를 이용하여 코코니노 사암의 모드 II 파괴인성을 측정하였으며 그 결과 평균  $1.58 \pm 0.19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이었다. 평균 전단강도는  $23.53 \pm 2.39 \text{ MPa}$ 이었다.
3. 이축응력이 파괴인성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 5, 10, 15 MPa의 이축응력을 시험편에 적용하여 전단강도 및 파괴인성을 측정하였으며, 이축응력이 증가할수록 파괴인성 및 전단강도 또한 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.
4. 짧은 보 압축시험에 의한 전단강도는 삼축압축시험에 의한 결과와 유사하였으며 파괴양상이 인장균열없이 전단에 의해서 이루어졌기 때문에 짧은 보 압축시험의 암석에 대한 적용성을 확인 할 수

있었다.

5. 시험편을 완전히 포화시킨 후 전단강도 및 파괴인성을 측정하였다. 건조된 시험편에서의 결과와 비교할 때 전단강도는 14.7% 감소하였고, 파괴인성은 11.4% 감소하였다.
6. 이산화탄소 지중 저장은 초임계상태를 유지하기 위해 심도 800 m 이상의 대염수층 또는 대수층에서 이루어지게 되므로 높은 구속압 및 포화상태를 가지게 된다. 따라서, 이산화탄소 지중 저장의 장기적인 안정성 평가를 위해서는 저장 주입층 및 덮개암의 파괴강도(fracture strength)나 파괴인성 등의 물성값들이 이러한 현지 내 상태(in-situ condition)를 고려한 값들을 사용해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Backers, T., Stephansson, O., Rybacki, E. (2002), "Rock fracture toughness testing in Mode II - punch-through shear test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, No. 6, pp. 755-769.
2. Chan, S.K., Tuba, I.S., Wilson, W.K. (1970), "On the finite element method in linear fracture mechanics", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-17.
3. Donovan, J.G., Karfakis, M.G. (2004), "Adaptation of a simple wedge test for the rapid determination of mode I fracture toughness and the assessment of relative fracture resistance", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, No. 4, pp. 695-701.
4. Fowell, R.J., Hudson, J.A., Xu, C., Chen, J.F. (1995), "Suggested method for determining Mode-I fracture-toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) Specimens", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 32, No.1, pp. 57-64.
5. Kim, J.D., Baik, S.K. (1994), "A study on the size

- and shape effects of specimen for the measurement of fracture toughness in rock”, Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 31, pp. 49-59.
6. Ko, T.Y., Kemeny, J. (2006), “Determination of Mode II stress intensity factor using short beam compression test”, Proceedings of the ISRM international symposium 2006 and the 4th Asian rock mechanics symposium, Singapore.
  7. Ko, T.Y., Kemeny, J., Moon, H.K. (2008), “Determination of the Mode I fracture toughness of rock using the Compact Tension specimen and the effect of specimen size and loading rate on the fracture toughness”, Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, Vol. 45, No. 3, pp. 234-241.
  8. Lee, S.E. (2010), “Characterization of microstructures and fracture toughness of SR specimen in granitic rocks”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 20, No. 3, pp. 217-224.
  9. Ouchterlony, F. (1988), “Suggested methods for determining the fracture toughness of rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, No. 2, pp. 71-96.
  10. Rao, Q., Sun, Z., Stephansson, O., Li, C., Stillborg, B. (2003), “Shear fracture (Mode II) of brittle rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, No. 3, pp. 355-375.
  11. Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Tsang, C.F. (2008), “Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO<sub>2</sub> injection in multilayered reservoir-caprock systems”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 45, No. 2, pp. 132-143.
  12. Rutqvist, J., Tsang, C.F. (2003), “TOUGH-FLAC: a numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous geological media under multi-phase flow conditions”, Proceedings of the TOUGH Symposium 2003, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
  13. Watkins, J., Liu, K.L.W. (1985), “A finite element study of the short beam test specimens under mode II loading”, Int J Cem Compos Lightweight Concr, Vol. 7, No. 1, pp. 39-47.
  14. Yang, H.S., Kim, J.G. (2007), “Trends of research in fracture toughness of rocks”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17, No. 6, pp. 448-452.
  15. Yoon, J.S., Choi, Y.S. (1993), “A study on fracture toughness following ISRM suggested method”, Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 30, pp. 83-92.
  16. Yoon, J.S., Jeon, S.W. (2003), “An experimental study on Mode II fracture toughness determination of rock”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 13, No.1, pp. 64-75.