

# CWFS모델변수 결정을 위한 손상제어시험 및 이를 활용한 취성파괴모델링

천대성<sup>1</sup>, 정용복<sup>1\*</sup>, 박 찬<sup>1</sup>, 전석원<sup>2</sup>

## Damage-controlled test to determine the input parameters for CWFS model and its application to simulation of brittle failure

Dae-Sung Cheon, Yong-Bok Jung, Chan Park, Seokwon Jeon

**Abstract** When a tunnel or an underground structure is excavated in deep geological environments, the failure process is affected and eventually dominated by stress-induced fractures growing preferentially parallel to the excavation boundary. This fracturing is generally referred to as brittle failure by spalling and slabbing. Continuum models with traditional failure criteria such as Hoek-Brown or Mohr-Coulomb criteria have not been successful in prediction of the extent and depth of brittle failure. Instead cohesion weakening and frictional strengthening (CWFS) model is known to predict brittle failure well. In this study, CWFS model was applied to predict the brittle failure around a circular opening observed in physical model experiments. To obtain the input parameters for CWFS model, damage-controlled tests were carried out. The predicted depth and extent of brittle failure using CWFS model were compared to the results of the physical model experiment and numerical simulation using traditional model.

**Keywords:** Deep geological environments, brittle failure, Mohr-Coulomb criteria, CWFS model, damage-controlled test

**요 지** 일반적으로 고심도에 건설되는 암반구조물의 경우 높은 현지응력과 공동의 굴착에 따른 유도응력으로 인하여 공동 경계면에서 스폐링(spalling)이나 슬래빙(slabbing)과 같은 취성파괴가 발생할 수 있다. Hoek-Brown과 Mohr-Coulomb 파괴기준과 같은 전통적인 파괴기준을 적용한 결과 취성파괴현상과 파괴심도 등을 예측할 수 없는 것으로 나타나 취성파괴를 예측하기 위한 여러 모델이 제안되었으며, 그 중 CWFS 모델이 적합한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 모형실험에서 얻어진 원형공동주변의 취성파괴현상을 모델링하기 위하여 CWFS 모델을 적용하였으며, 입력자료의 산정을 위해 암석의 손상정도과 손상에 따른 물성의 변화를 측정하는 손상제어시험을 수행하였다. CWFS 모델에 의해 예측된 파괴양상을 전통적인 파괴기준에 의한 해석결과 및 모형실험결과와 비교하여 취성파괴모델링의 적용성을 평가하였다.

**주요어:** 고심도, 취성파괴, Mohr-Coulomb 파괴기준, CWFS 모델, 손상제어시험

### 1. 서 론

암반구조물의 파괴는 초기응력의 크기, 무결암의 강도 그리고 단층이나 절리와 같이 암반 내에 존재하는 불연속면의 상태에 의해 좌우된다. 낮은 현지응력이 작용하는 암반의 파괴과정은 불연속면의 분포 특성에 의해 결정되나, 높은 현지응력이 작용하는 경우 유도응력(induced stress)에 의해 파괴가 발생하며, 일반적으로 취성파괴(brittle failure) 형태를 나타낸다(Kaiser et al., 2000). 암반의 취성파괴에 영향을 주는 핵심변수는 응력수준과 암반강도로서, Fig. 1에서 보는 바와 같이 중간정도의

응력수준에서 생성된 균열의 영역은 암반구조물의 굴착면 근처에서 국부적으로 발생한다. 그러나 좀 더 높은 응력수준에서 발생된 균열은 굴착면의 전 경계로 넓어진다.

이러한 취성파괴의 발생은 암반이 충분한 강도와 지지력을 가지고 있음에도 불구하고 현지응력의 크기가 크거나, 터널의 형상과 현지응력의 방향에 의해 암반의 강도를 초과하는 응력집중이 발생하는 경우 나타날 수 있다. 취성파괴는 주로 고심도의 광산에서 보고가 되었으나, 고심도의 암반구조물 건설이 증가함에 따라 터널이나 URL(underground research laboratory)과 같은 암반구조물에서의 발생사례가 증가하고 있다. 특히 국내의 여수추가비축기지에서 발생한 취성파괴현상은 고심도가 아닌 150 m의 저심도에서도 과지압에 의해 취성파

<sup>1</sup>정회원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

<sup>2</sup>종신회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

\*교신저자: 정용복 (ybjung@kigam.re.kr)

	Massive (RMR > 75)	Moderately Fractured (50 > RMR > 75)	Highly Fractured (RMR < 50)
Low In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_3 < 0.15$ )	 Linear elastic response.	 Falling or sliding of blocks and wedges.	 Unravelling of blocks from the excavation surface.
Intermediate In-Situ Stress ( $0.15 > \sigma_1 / \sigma_3 > 0.4$ )	 Brittle failure adjacent to excavation boundary.	 Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.
High In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_3 > 0.4$ )	 Brittle failure around the excavation.	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.	 Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.

Fig. 1. Examples of tunnel instability and brittle failure as a function of RMR and in-situ stress (after Hoek et al., 1995)

과가 발생할 수 있음을 보여주고 있다(최영태 등, 2006). 국내·외에서 보고된 대표적인 취성파괴의 사례는 캐나다 AECL의 시험터널을 비롯하여, 프랑스의 Mont Blanc 터널, 스위스의 Gotthard 터널, 노르웨이의 고속도로터널 등과 국내의 도수터널 등이 있다(Martin, 1993; Kaiser et al., 2000, Lee et al, 2004).

고심도에 건설된 캐나다 AECL의 시험터널에서 천정과 바닥부에서 약 0.43 ~ 0.52 m의 V-형태의 파괴영역이 발생하였으며, Read와 Martin(1996)에 의해 Hoek-Brown의 파괴기준식과 구성모델을 바탕으로 유한요소 프로그램인 Phase2에 의해 수치실험을 수행하였다. 그러나 Fig. 2에서와 같이 제안된 어느 모델로도 관찰된 V-형태의 파괴형상과 일치하는 파괴영역을 예측할 수 없었다. 기존에 제시되었던 파괴기준이 실제 현장에서 발생하는 취성파괴영역을 적절하게 예측하지 못하여 이를 해결하기 위한 여러 모델들이 제시되었으며, 제시된 여러 모델 중에서 변형률의존 CWFS(cohesion weakening and frictional strengthening)과 입자결합모델이 취성파괴영역을 해석하는 데 적합한 것으로 평가되었다.

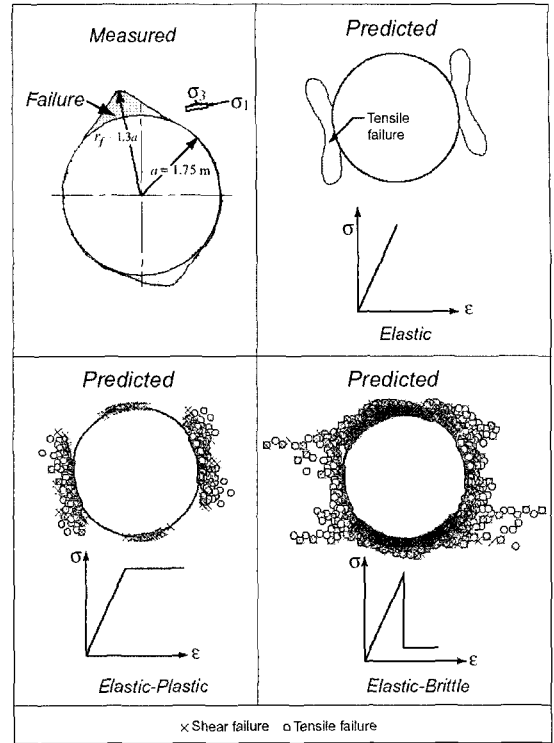


Fig. 2. Measured failure around the mine-by test tunnel compared to the predicted failure using various constitutive models in Phase2 program (after Read & Martin, 1996)

본 연구에서는 모형실험에서 관찰된 취성파괴현상을 예측하기 위하여 점착력과 마찰강도가 소성변형률에 따라 달리 발현되는 CWFS 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다. 또한 CWFS 모델의 입력자료를 산정하기 위하여 재하-제하를 반복하여 암석의 손상정도와 손상에 따른 물성의 변화를 측정하는 손상제어시험을 수행하였다. CWFS 모델에 의해 예측된 파괴현상을 Mohr-Coulomb 기준에 의한 해석결과 및 모형실험결과와의 비교를 통해 CWFS 모델의 취성파괴모델링의 적용성을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 CWFS 모델

현장에서 발생하는 불안정한 취성파괴가 재료의 최대 강도 이후의 거동에 따른 결과로서 터널의 안정성 및 설계에 있어 중요한 요인이기 때문에 최대강도 이후의 거동을 고려해야 한다(Aglawe, 1999). 본 연구에서는

고심도 터널에서 발생할 수 있는 취성파괴를 모델링하기 위해서 암반공학분야에서 널리 사용되고 있는 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델과 Hajiabdolmajid et al.(2002)이 제안한 변형률연화(strain softening)모델의 일종인 CWFS 모델을 사용하였다. Fig. 3은 수치모델링에서 사용된 파괴 이후의 거동을 나타내는 구성모델의 모식도이다.

Mohr-Coulomb 모델은 전단응력이 수직응력에 의해 결정되며, 어느 일정한 값에 도달할 때 또는 최대인장응력이 재료의 인장강도에 도달할 때 파괴가 일어나며,  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$ 로 표현할 수 있다.

Hajiabdolmajid et al.(2002)이 제안한 CWFS 모델은 토질역학에서 사용되던 상호연결구조(interlocked structure)

를 암석에 적용한 모델이다. CWFS 모델은 암석의 일반적인 강도가 a) 구속압과 무관한 점착력(cohesion) 또는 입자경계의 흡착력(grain boundary adhesion), b) 구속압에 비선형적으로 좌우되는 상호연결강도(interlocking strength), c) 구속압에 선형적인 관계를 갖는 마찰강도(frictional strength)로 구성되어 있다는 이론을 근거로 제안되었다. Fig. 4는 구속압에 따른 강도요소의 모식도를 나타내며, 재료에 따라 점착력과 상호결합강도의 형태는 서로 다른 형상을 갖는다고 보고되었다. Fig. 5는 일축압축시험과 경암 주변의 공동에서 강도요소의 발현에 대한 개념도를 보여준다.

Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델의 가장 큰 차이는 두 모델에서 적용된 가정에 기인한다. Mohr-Coulomb 모

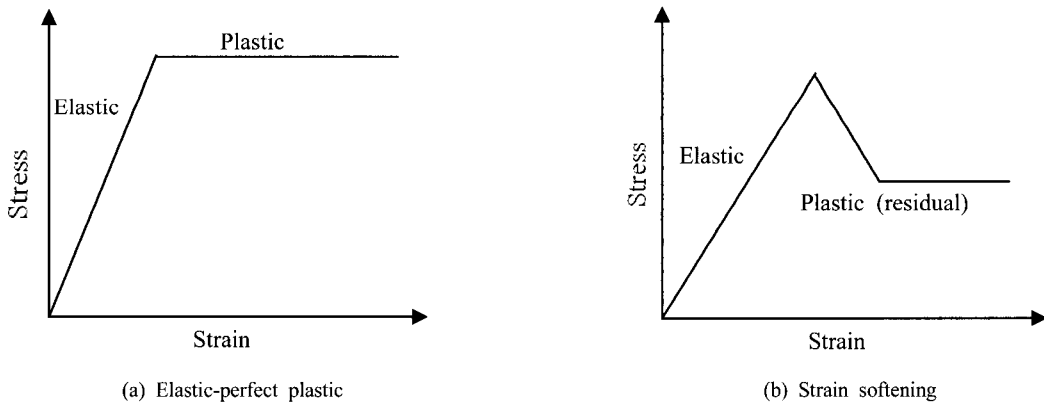


Fig. 3. Various constitutive models for characterizing the post-failure

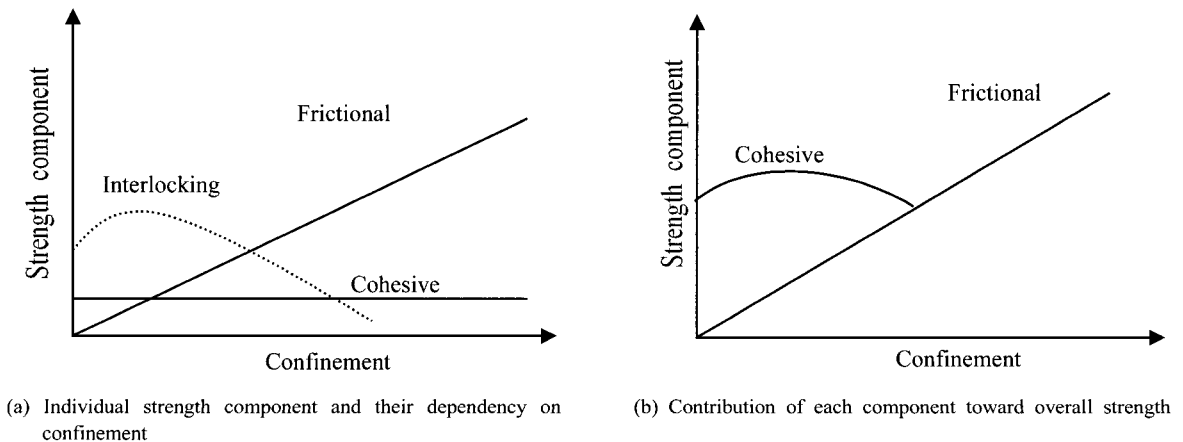


Fig. 4. Schematic representation of the strength components (after Hajiabdolmajid, 2001)

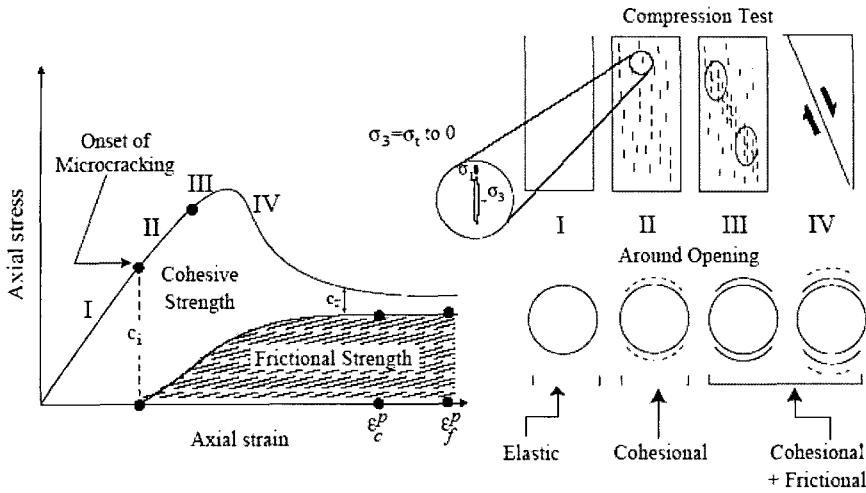


Fig. 5. Representation of individual strength components in uniaxial compression test and around opening ( $C_c$ : maximum cohesion,  $C_r$ : residual cohesion) (after Hajiabdolmajid, 2001)

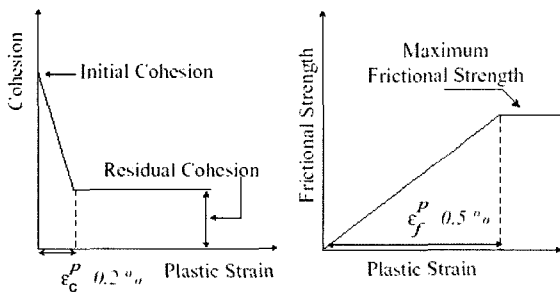


Fig. 6. Schematic diagram of CWFS model (after Hajiabdolmajid, 2001)

델은 재료의 강도를 결정짓는 하나의 전단파괴면(shear failure plane)이 존재하고, 재료의 점착력과 마찰강도가 파괴과정에서 동시에 발현한다고 가정하고 있다. 반면, CWFS 모델은 재료에서 발생하는 소성변형률(plastic strain)에 따라 점착력과 마찰강도가 다르게 발현한다고 가정하였다. CWFS 모델에서 점착력은 암석이 손상을 받음에 따라 약화되어 잔류점착력으로 안정화되고, 이후에 마찰강도가 발현되기 시작한다고 하였다. 재료에 따라 점착력과 마찰강도가 발현되는 소성한계변형률(plastic strain limit)은 각기 다르며, 특히 경암의 경우 소성변형률의 초기단계에서 발현된 마찰강도는 무시할 정도로 작아 0으로 보아도 무방하다고 하였다. Hajiabdolmajid et al.(2001)의 연구에 따르면 AECL의 Lac du Bonnet

화강암 시험터널에 대한 역해석 결과로부터 초기 파괴 과정에서 마찰강도의 발현은 점착력이 잔류값으로 안정화되는 소성한계변형률( $\epsilon_f^p$ )보다 더 늦은 속도로 발현될 수 있음을 보고한 바 있다. 손상제어시험과 시험터널의 역해석 결과로부터 Lac du Bonnet 화강암에 대한 점착력의 소성한계변형률( $\epsilon_c^p$ )과 마찰강도의 소성한계변형률( $\epsilon_f^p$ )은 0.2%와 0.5%로 제시되었다. Fig. 6은 Lac du Bonnet에서 사용된 CWFS 모델의 모식도를 보여준다.

## 2.2 손상제어시험

Mohr-Coulomb 모델에 사용되는 입력변수는 일축압축시험, 인장시험, 삼축압축시험으로부터 구한 결과를 Mohr 응력원에 도시하고 이를 선형화시킨 직선으로부터 결정된 점착력과 마찰각을 사용한다. 이에 반하여 CWFS 모델에 사용되는 입력변수는 Martin and Chandler(1994)가 제안한 손상제어시험(damage-controlled test)으로부터 소성변형률의 함수로 표현되는 점착력과 마찰각을 사용한다.

손상제어시험은 암석코어시료에 대해 재하(load)와 제하(unload)를 반복수행하여 시료에 대한 완전응력-변형률 곡선(complete stress-strain curve)을 구하고, 이로부터 발생한 소성변형률에 따른 균열손상응력(crack damage stress,  $\sigma_{cd}$ )과 최대강도를 결정한다. 일반적으로 균열손상응력은 Fig. 7에서와 같이 축방향 변형률(axial strain)과 체적변형률(volumetric strain)에

의해 결정된다. 체적변형률은 축방향 변형률과 횡방향 변형률에 의해 식 (1)과 같이 구해지며, 축방향 및 횡방향의 손상을 모두 포함하고 있어 균열손상응력과 관련 지을 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \approx \epsilon_{axial} + 2\epsilon_{lateral} \quad (1)$$

재하-제하시험동안 손상증분(i), 즉 재하-제하반복은 영구적인 체적손상(permanent volumetric damage)을 발생시킨다. 발생된 체적손상은 손상파라미터( $\omega$ )에 의해 표현

되며, 이는 축적된 영구적인 체적변형률( $\epsilon_v^p$ )에 의해 식 (2)와 같이 정의된다. 손상파라미터는 최대강도 및 균열손상응력을 도시하는 데 유용하게 사용된다. Fig. 8은 체적변형률에서 결정되는 체적손상과 균열손상응력을 도시한 것이다.

$$\omega = \sum_{i=1}^n (\epsilon_v^p)_i \quad (\%) \quad (2)$$

### 3. 손상제어시험에 의한 입력변수 산정

파괴모델링에 사용된 입력변수는 모형실험체의 재료인 시멘트 모르타르의 물성을 사용하였다(Cheon et al., 2006). Mohr-Coulomb 모델에 사용되는 입력변수는 ISRM에서 제안한 실내 시험법에 따라 구하였으며, 시

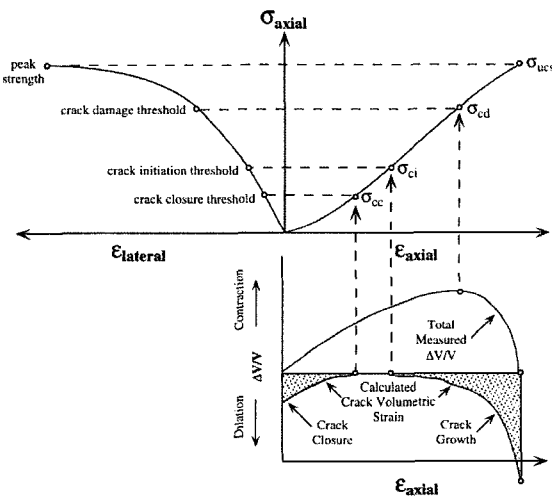


Fig. 7. Stress-strain diagram obtained from a uniaxial compression test (after Martin and Chandler, 1994)

Table 1. Physical and mechanical properties of cement mortar

Properties	Cement mortar
Bulk specific gravity	2.02
Absorption ratio (%)	0.32
P-wave velocity (m/sec)	3,590
S-wave velocity (m/sec)	1,840
Uniaxial compressive strength (MPa)	38
Brazilian tensile strength (MPa)	3
Young's modulus (GPa)	11.5
Poisson's ratio	0.21
Cohesion (MPa)	9
Friction angle (°)	40

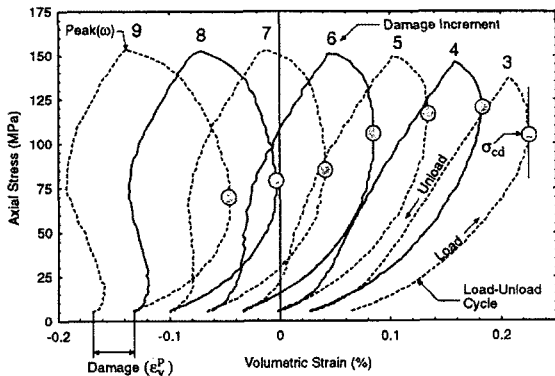


Fig. 8. Damage defined as the permanent volumetric strain from a single damage increment (after Martin and Chandler, 1994)

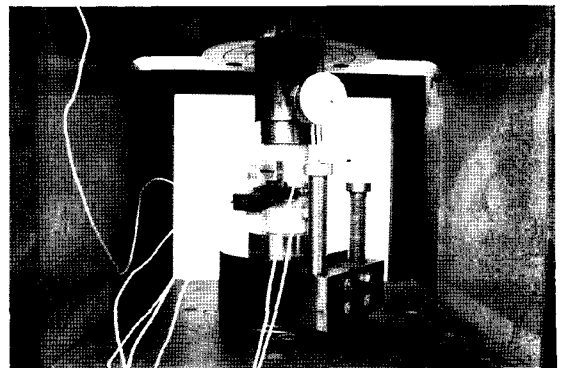


Fig. 9. View of damage-controlled test

멘트 모르타르의 물리적, 역학적 특성은 Table 1에 제시하였다. CWFS 모델의 입력변수는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 손상제어시험을 통하여 결정하였다.

본 연구에서 손상제어시험은 다음과 같은 방법으로 수행되었다.

- 1) 축방향 응력을 변위제어에 의해 0.008 mm/sec의 속도로 재하한다.
- 2) 시험이 수행되는 동안 응력-변형률 곡선을 참조하여 재하 시기를 결정한다. 재하는 0.08 mm/sec의 속도로 수행한다.
- 3) 최대강도에 접근하면, 파괴 이후의 갑작스러운 파괴가 일어나지 않도록 주의한다.
- 4) 완전 응력-변형률 곡선을 구할 때까지 하중의 재하-제하를 15~20회 반복 수행한다.

Fig. 10과 Fig. 11은 손상제어시험으로부터 구해진 응력-변형률 곡선을 보여준다. 암반의 손상을 나타내는 지수인 손상파라미터( $\omega$ )는 재하-제하의 증분에서 발생하는 영구적인 체적변형률로 정의된다. Fig. 8에서 정의된 바와 같이 최대강도(peak strength,  $P(\omega)$ )는 일정 손상파라미터에서의 최대응력을 의미하며, 균열손상응력은 체적변형률이 감소하는 지점의 응력을 의미한다. 시멘트 모르타르에 대한 손상제어시험 결과로부터 균열손상응력은 최대강도의 약 80% 수준에서 발생하며, Fig. 12에서와 같이 시험의 초기단계에서 급

격하게 감소하고, 시료에 손상이 축적됨에 따라 일정한 잔류값으로 안정화된다. 이러한 결과는 AECL의 Lac du Bonnet 화강암의 반복시험에서 관찰된 현상과 일치하며, 모든 구속조건에서 매우 유사한 경향을 보인다고 보고된 바 있다(Martin, 1993; Martin & Chandler, 1994).

점착력과 마찰강도가 동시에 발현되지 않고, 점착력이 발현된 후 마찰강도가 발현된다는 CWFS의 이론에 따르면 비구속 일축압축시험에서 미끄러짐이 시작될 때의 균열손상응력에 해당하는 점착력은 식 (3)에 의해 구할 수 있다. 또한 마찰강도를 나타내는 마찰각은 식 (4)로부터 유도된 식 (5)에 의해 계산될 수 있다.

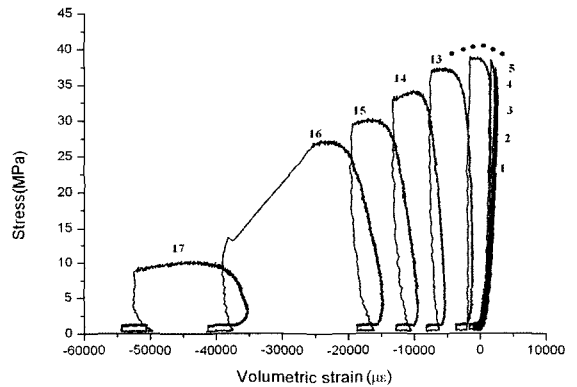


Fig. 11. Stress-volumetric strain curve from the damage-controlled test

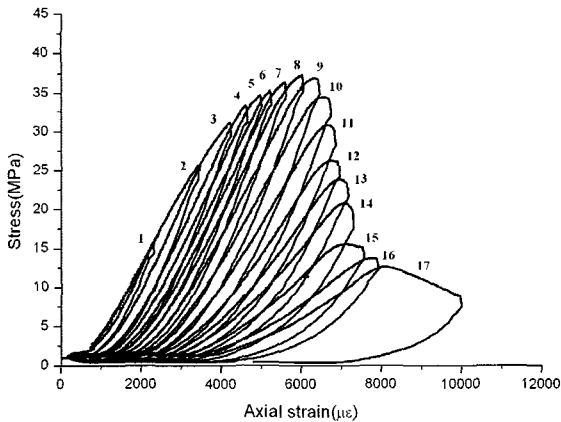


Fig. 10. Repeated loading and unloading in the damage-controlled test

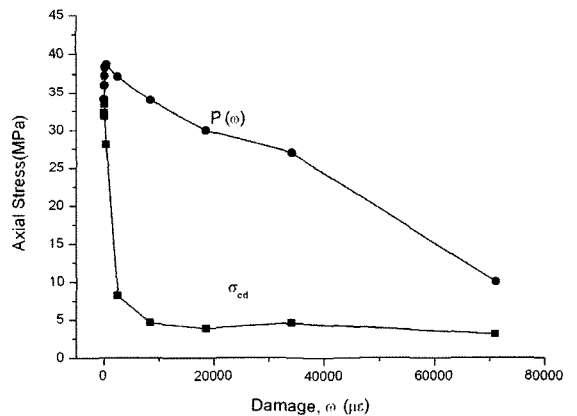


Fig. 12. Peak strength and crack damage stress as a function of damage for cement mortar

$$c = \frac{\sigma_{cd}}{2} \tag{3}$$

$$P(\omega) = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \tag{4}$$

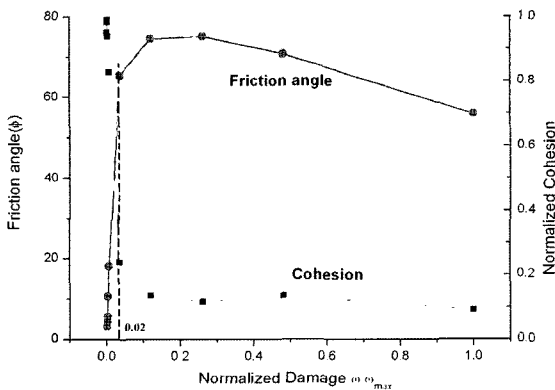
$$\phi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{P(\omega)}{\sigma_{cd}}\right) - \frac{\pi}{2} \tag{5}$$

Table 2는 시멘트 모르타르에 대한 손상제어시험으로부터 결정된 소성변형률(plastic strain)에 따른 점착력과 마찰각의 변화를 나타낸 것으로 FLAC의 변형률연화모델을 이용하여 CWFS 모델을 구현하는 데 사용된다.

손상파라미터와 최대강도를 각각 최대 손상파라미터( $\omega_{max}$ )와 일축압축강도로 정규화하고, 정규화된 손상파라미터에 대해 식 (3)과 (5)로부터 구해진 점착력과 마

**Table 2.** Cohesion and friction angle changes with plastic strain

Plastic strain ( $\mu\epsilon$ )	Cohesion (MPa)	Friction angle ( $^\circ$ )
80	161.0	3.1
143	166.5	4.5
180	169.2	5.4
210	159.0	10.6
498	140.0	18.1
2562	40.5	65.4
8447	23.0	74.5
18571	19.5	75.2
34159	23.0	70.7
71016	15.4	55.9



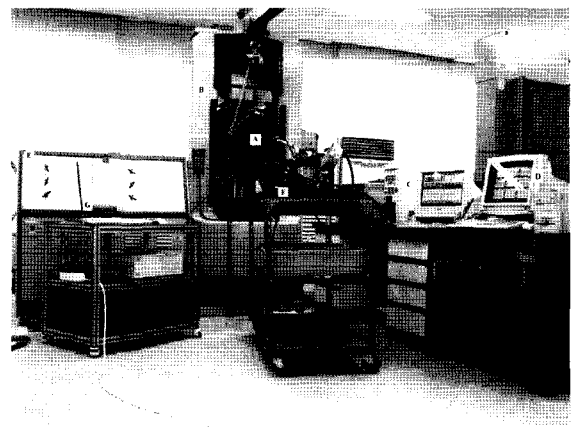
**Fig. 13.** Mobilization of friction angle and cohesion as a function of normalized damage

찰각을 도시하면 Fig. 13과 같이 표현된다. Fig. 13으로부터 최대마찰각(약 75°)은 점착력의 대부분이 소진되었을 때 도달됨을 보여주며, 손상이 증가함에 따라 마찰강도는 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 점착력은 초기부분에 급격한 감소와 함께 잔류점착력에 도달하게 된다. Martin & Chandler(1994)가 Lac du Bonnet 화강암에 대해 수행한 손상제어시험의 연구결과에 따르면 마찰강도는 손상이 진전됨에 따라 점차적으로 감소하여 잔류마찰각과 유사한 값을 갖는다고 보고한 바 있다.

## 4. 고심도 터널의 취성파괴모델링

### 4.1 모형실험

CWFS 모델을 이용하여 고심도 터널의 취성파괴특성을 분석하기에 앞서 Cheon et al.(2006)이 수행하였던 진삼축 모형실험결과를 이용하였다. Cheon et al.(2006)이 수행한 진삼축 모형실험은 손상제어시험에서 수행된 것과 동일한 성분의 시멘트 모르타르를 사용하였으며, 60 mm 크기의 원형공동이 모형실험체의 중간까지 천공되어 있는 290 mm의 정육면체에 대해 삼축에서 하중을 재하하여 공동주변에서 발생한 취성파괴현상을 재현하였다. Fig. 14는 진삼축 모형실험이 수행되는 모습이며, Fig. 15와 Fig. 16은 모형실험에서 관찰된 원형공동 주



**Fig. 14.** General view of physical model experiment (A: True triaxial chamber, B: Interlaken rock testing machine, C: Controller, D: Data acquisition system, E, F: Confining pressure system, G: AE measurement system)

변의 파괴모습을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 최대응력인  $S_V(S_V > S_{H2} > S_{H1})$ 와 평행한 방향에서 스폐링현상이 관찰되었으며, V-형태로 파괴가 발생하였다. 발생된 파괴범위는  $29^\circ \sim 42^\circ$ 이며, 공동중앙에서 파괴가 발생된 최대깊이까지의 거리로 표시하는 파괴심도는 1.009a~1.143a(a: 공동의 반경)의 범위를 보였다.

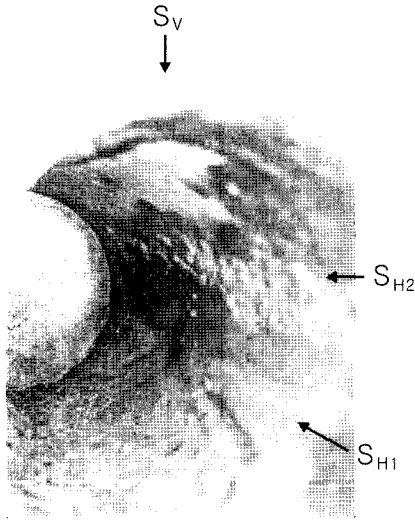


Fig. 15. Spalling observed around the opening after physical model experiments



Fig. 16. V-shape notch around the opening from CT image

#### 4.2 구성모델에 따른 파괴모델링

구성모델에 따라 발생하는 고심도 터널의 파괴현상을 비교하기 위하여 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델과 변형률연화모델의 하나인 CWFS 모델에 의해 모델링하였으며, 이의 결과를 모형실험결과와 비교하였다. CWFS 모델의 입력변수는 손상제어시험에 의해 구해진 소성변형률에 따른 점착력과 마찰각으로 표현되며, FLAC의 내장언어인 Fish를 이용하였다.

Fig. 17과 Fig. 18은 각각  $FLAC^{2D}$ 와  $FLAC^{3D}$ 에 의해 수행한 모델링결과를 보여준다. 그림에서와 같이 동일한 응력조건에서 CWFS 모델에 의한 수치실험은 모형실험에서 관찰된 V-형태의 파괴형상을 잘 묘사하였으나, Mohr-Coulomb 모델에 의한 수치실험의 경우 경계면에서의 파괴만을 묘사하였을 뿐 V-형태의 노치를 묘사하지 못하였다. 반면 CWFS 모델은 Mohr-Coulomb 모델에 비해 예측된 인장파괴영역(공동의 천단과 하부영역)과 전단파괴영역( $S_V$ 에 평행한 경계면)의 범위가 다소 크게 나타났다. 이는 Mohr-Coulomb 모델은 점착력과 마찰각이 파괴초기부터 모두 발현하나, CWFS 모델의 경우는 파괴초기에 점착력요소만 발현하여 동일한 응력조건에서 상대적으로 낮은 파괴기준이 적용되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 구성모델에 따른 차이는 파괴범위에 비해 파괴심도에서 더욱 뚜렷하게 발생하였다.

위의 결과로부터 CWFS 모델이 취성암석에서 나타나는 변형률연화현상을 묘사하고 V-형태의 파괴형상을 묘사함에 있어 Mohr-Coulomb 모델에 비해 보다 적합한 것으로 판단된다.

그러나 Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델을 이용한 수치모델링에서 예측된 파괴영역은 동일한 응력조건에서 수행된 모형실험에 비해 과대평가되는 경향을 보였다. 이는  $FLAC^{3D}$ 의 경우 원형공동의 곡률에 따른 크기 효과가 존재하지 않으나 실제 현장이나 실내 모형실험의 경우에는 곡률에 따른 크기효과가 존재하기 때문으로 해석된다. 특히, Martine & Chandler(1994)의 연구에 따르면 곡률이 증가함에 따라 공벽이 파괴되기 위해 요구되는 최대접선응력은 감소하는데, 모형실험과 같이 작은 원형공동의 경우는 원형공동의 곡률에 따라 공벽이 파괴되기 위해 요구되는 최대접선응력은 재료의 일축압축강도보다 2배 이상 클 수 있다고 보고된 바 있다.



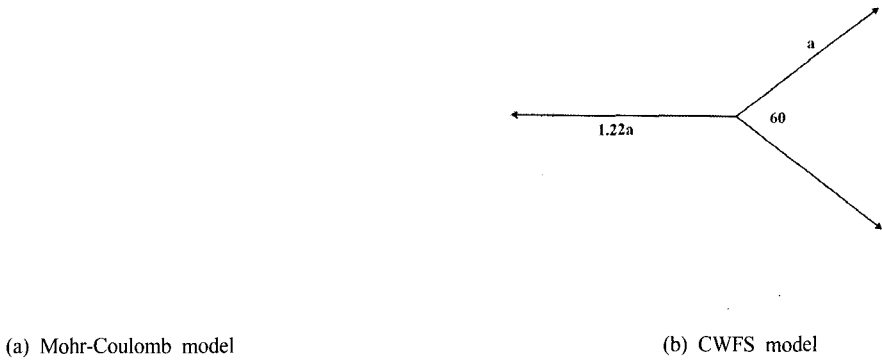


Fig. 17. Comparison of failure modeling between Mohr-Coulomb and CWFS model in 2D

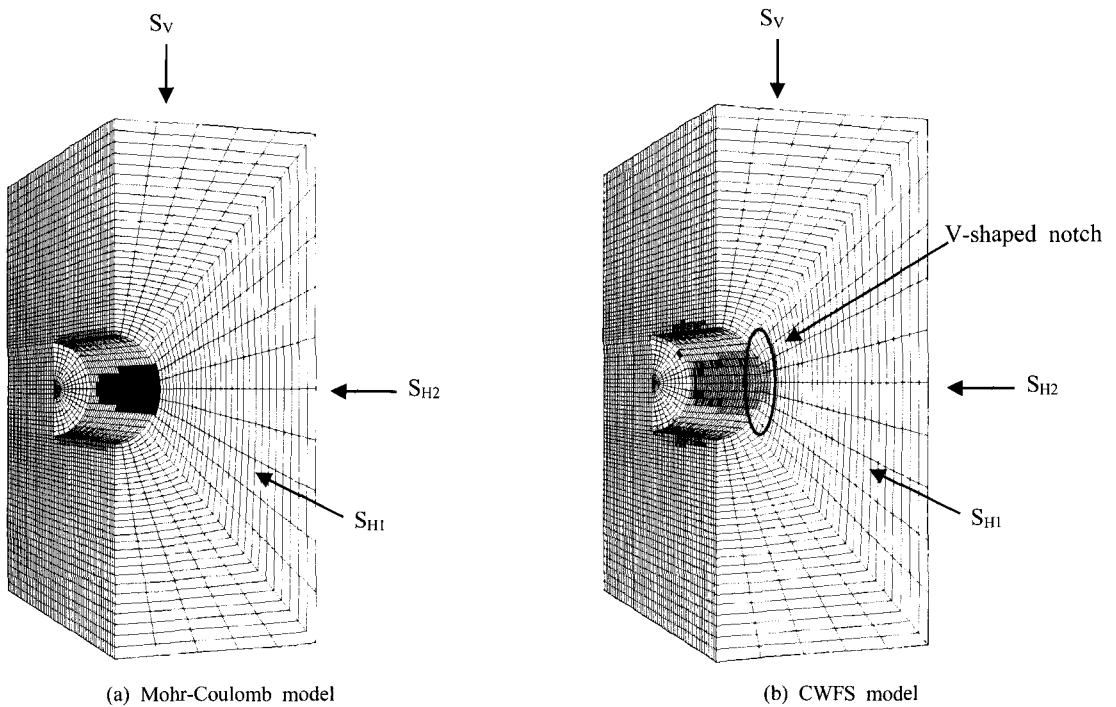


Fig. 18. Comparison of failure modeling between Mohr-Coulomb and CWFS model in 3D

## 5. 결 론

고심도 터널에서 발생할 수 있는 취성파괴를 평가하기 위하여 Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다. 특히, CWFS 모델의 입력자료

를 산정하기 위하여 재하-제하를 반복하는 손상제어시험을 수행하여 손상정도에 따라 물성의 변화를 모델링에 반영하였다. Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델을 이용한 해석결과는 진삼축 모형시험의 결과와 비교하여 사용 모델에 따른 취성파괴 모델링의 적용성을 평가하

었다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요한 결과들은 다음과 같다.

1. 진삼축 모형실험결과 최대응력과 평행한 방향에서 스펙링현상이 관찰되었으며, V-형태로 파괴가 발생하였다. 발생된 파괴범위는  $29^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 이며, 공동 중앙에서 파괴가 발생된 최대깊이로 표현되는 파괴심도는 1.009a~1.143a(a: 공동반경)의 범위를 보였다.
2. CWFS 모델의 입력변수를 결정하기 위한 손상제어시험에서 최대마찰각(약  $75^{\circ}$ )은 점착력의 대부분이 소진되었을 때 도달하였으며, 손상이 증가함에 따라 마찰강도는 점차적으로 감소하였다. 또한 점착력은 초기부분에 급격한 감소와 함께 잔류점착력에 도달하게 된다.
3. 전통적인 탄소성모델인 Mohor-Coulomb 모델로는 예측할 수 없었던 V-형태의 파괴형상을 CWFS 모델을 이용하여 예측할 수 있었다. 그러나 CWFS 모델에 의해 예측된 파괴영역은 동일한 응력조건에서 수행된 모형실험에 비해 과대평가하는 경향을 보였다.
4. 손상제어시험에서 구한 마찰각은 삼축압축시험에서 구한 마찰각에 비해 상대적으로 높은 값을 보이며, 손상제어시험에서는 점착력에 대한 소성한계변형률과 마찰강도에 대한 소성한계변형률이 같은 값을 가지게 되나 이론적인 측면이나 실제 현장에 대한 해석에 따르면, 마찰강도에 대한 소성한계변형률이 점착력에 비해 늦게 발생되어야 하는 점 등의 문제점이 있어 이를 보완할 수 있는 추가적인 연구가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 최영태, 이대혁, 이희석, 김진화, 이두화, 유광호, 박연준 (2006), "과지압으로 인한 암반의 점진적 취성파괴과정의 수치해석적 연구", 터널과 지하공간, Vol. 16, pp. 259-276.
2. Aglawe, J.P. (1999), Unstable and violent failure around underground openings in highly stressed ground, Ph.D. Dissertation, Queen's University at Kingston, Canada, 284p.
3. Cheon, D.S., Jeon, S., Park, C., Ryu, C. (2006), "An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 448-449.
4. Hajiabdolmajid, V. (2001), Mobilization of strength in brittle failure of rock, Ph.D. Dissertation, Queen's University, Canada, 268p.
5. Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P.K., Martin, C.D. (2002), "Modelling brittle failure of rock", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 39, pp. 731-741.
6. Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995), Support of underground excavations in hard rock, A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
7. Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Sharp, J., Steiner, W. (2000), "Underground works in hard rock tunneling and mining", Proceedings of GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 841-926.
8. Martin, C.D. (1993), The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground, Ph.D. Dissertation, University of Manitoba, Canada, 278p.
9. Lee, S.M., Park, B.S., Lee, S.W. (2004), "Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, 3B 24.
10. Martin, C.D., Chandler, N.A. (1994), "The progressive fracture of Lac du Bonnet granite", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 31, pp. 643-659.
11. Read, R.S., Martin, C.D. (1996), Technical summary of AECL's Mine-by Experiment Phase 1: Excavation response, AECL Report AECL-11311.



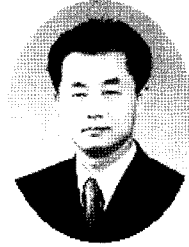
**천 대 성**

한국지질자원연구원  
지반안전연구부  
선임연구원  
E-mail: cds@kigam.re.kr



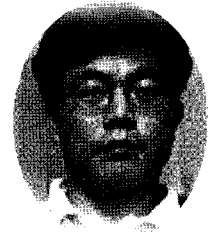
**정 용 복**

한국지질자원연구원  
지반안전연구부  
선임연구원  
E-mail: ybjung@kigam.re.kr



**박 찬**

한국지질자원연구원  
지반안전연구부  
선임연구원  
E-mail: chan@kigam.re.kr



**전 석 원**

서울대학교  
지구환경시스템공학부  
부교수  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr