

손상제어시험에 의한 고심도 터널의 파괴모델링

천대성, 정용복, 박찬 (한국지질자원연구원)
전석원 (서울대학교)

1. 서론

암반구조물의 파괴는 초기응력의 크기, 무결암의 강도 그리고 단층이나 절리와 같이 암반 내에 존재하는 불연속면의 상태에 의해 좌우된다. 일반적으로 고심도에 건설되는 암반구조물의 경우 높은 현지응력과 터널의 굴착에 따른 유도응력으로 인하여 터널 경계면에서 스폐링(spalling)이나 슬래빙(slabbing)과 같은 취성파괴가 발생할 수 있다.

고심도에 건설된 캐나다 AECL의 시험터널에서 천정과 바닥부에서 약 0.43 ~ 0.52 m의 노치형태의 파괴영역이 발생하였으며, Hoek-Brown의 파괴기준식과 구성모델을 바탕으로 유한요소 프로그램인 Phase2에 의해 수치실험이 수행되었다. 그러나 그림 1에서와 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(cohesive weakening frictional strengthening)과 입자결합모델이 취성파괴영역을 해석하는 데 적합한 것으로 평가되었다.

본 보고에서는 점착력과 마찰강도가 소성변형률에 따라 달리 발현되는 CWFS 모델을 적용하기 위하여 재하-제하를 반복하여 암석의 손상정도와 손상에 따른 물성의 변화를 측정하는 손상제어시험을 수행하였다. 손상제어시험에서 얻은 입력물성을 이용하여 고심도 터널주변에서 발생하는 파괴양상을 모델링하였으며, 이를 전통적인 파괴기준에 의한 해석결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 CWFS 모델

현장에서 발생하는 불안정한 취성파괴가 재료의 최대강도 이후의 거동에 따른 결과로서 터널의 안정성 및 설계에 있어 중요한 요인이기 때문에 최대강도 이후의 거동을 고려해야 한다(Aglawe, 1999). 본 보고에서는 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. 그림 2는 수치모델링에서 사용된 파괴 이후의 거동을 나타내는 구성모델의 모식도이다.

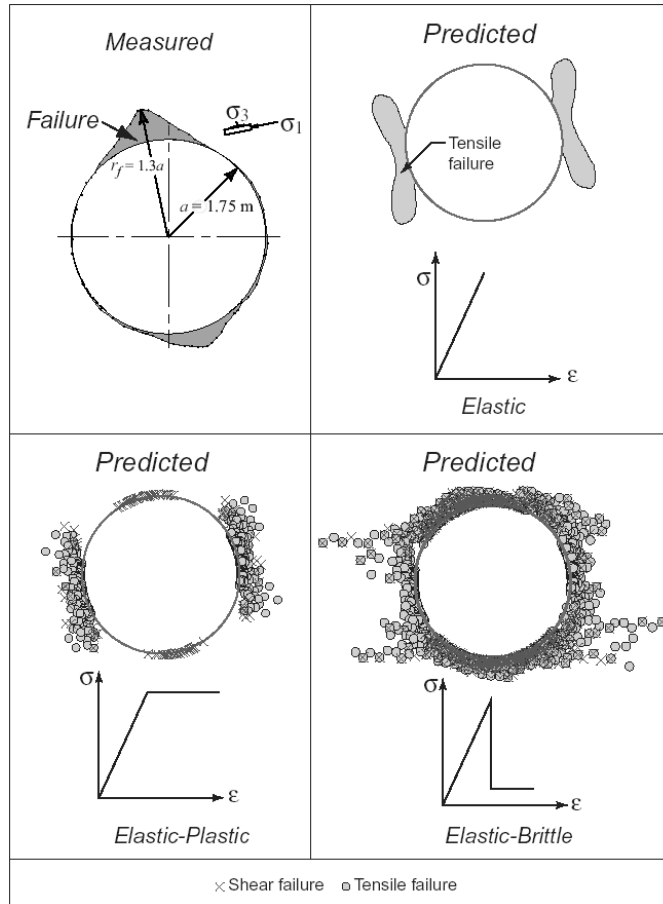
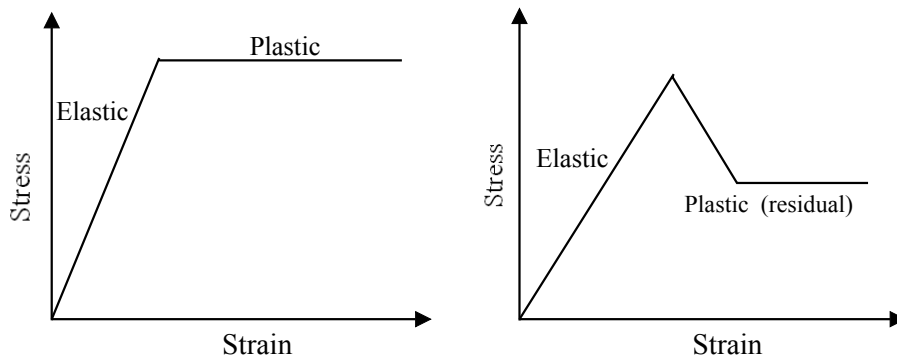


그림 1. 관찰된 파괴영역과 Phase2에 의해 예측된 파괴영역(after Read & Martin, 1996)



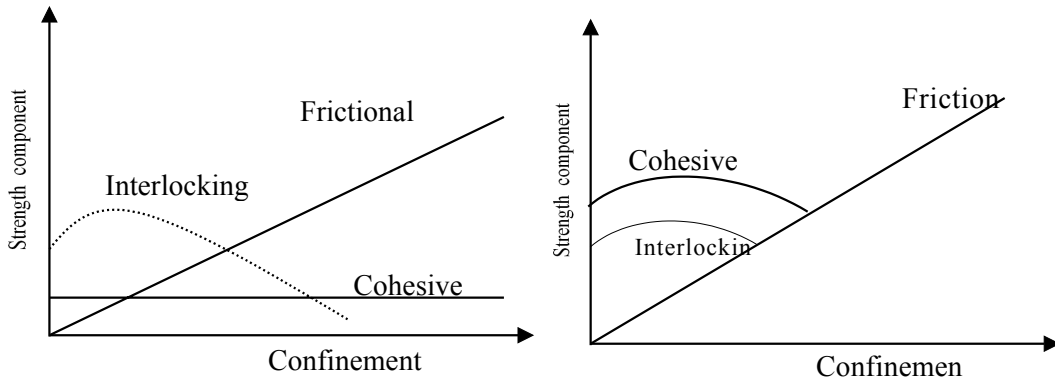
(a) 탄소성모델

(b) 변형률연화모델

그림 2. 수치모델링에 사용된 구성모델

Mohr-Coulomb 모델은 전단응력이 수직응력에 의해 결정되는 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 모델로서 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. 그림 3은 구속압에 따른 강도요소의 모식도를 나타내며, 재료에 따라 점착력과 상호결합강도의 형태는 서로 다른 형상을 갖는다고 보고하였다. 그림 4는 일축압축시험과 경암주변의 공동에서의 강도요소의 발현에 대한 개념도를 보여준다.



(a) 구속압에 따른 개별강도요소 (b) 강도요소와 전체강도사이의 관계
 그림 3 구속압에 따른 강도요소의 발현모식도(after Hajiabdolmajid, 2001)

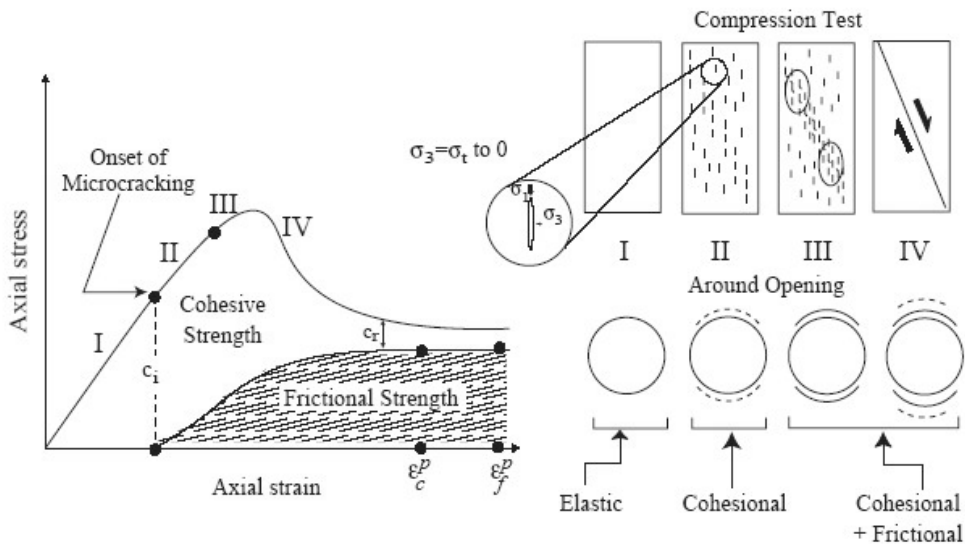


그림 4 일축압축시험과 경암주변의 원형공동에서의 강도요소의 발현모습
 (C_i : 최대 점착력 C_r : 잔류 점착력)(after Hajiabdolmajid, 2001)

Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델의 가장 큰 차이는 두 모델에서 적용된 가정에서 기인한다. Mohr-Coulomb 모델은 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.(2002)의 연구에 따르면 AECL의 Lac du Bonnet 화강암 시험터널에 대한 역해석 결과로부터 초기 파괴과정에서 마찰강도의 발현은 점착력이 잔류값으로 안정화되는 소성한계변형률(ϵ_c^p)보다 더 늦은 속도로 발현될 수 있음을 보고한 바 있다. 손상제어시험과 시험터널의 역해석 결과로부터 Lac du Bonnet 화강암에 대한 점착력의 소성한계변형률(ϵ_c^p)과 마찰강도의 소성한계변형률(ϵ_f^p)은 0.2 %와 0.5 %로 제시되었다. 그림 5는 Lac du Bonnet에서 사용된 CWFS 모델의 모식도를 보여준다.

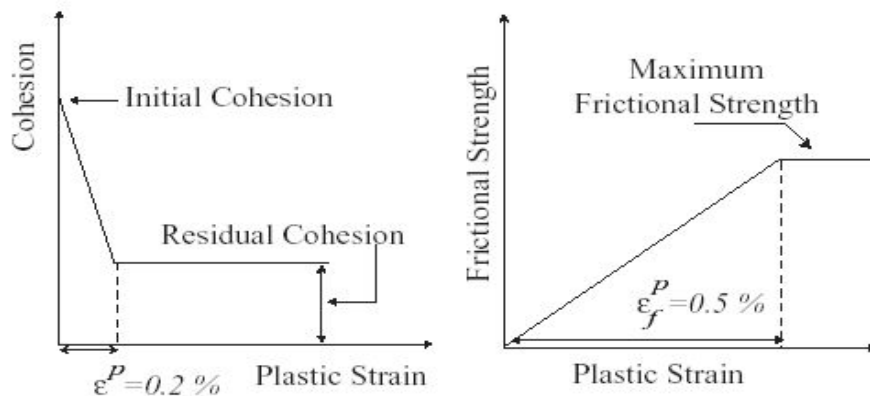


그림 5 CWFS 모델의 모식도(after Hajiabdolmajid, 2001)

2.2 손상제어시험

Mohr-Coulomb 모델에 사용되는 입력변수는 일축압축시험, 인장시험, 삼축압축시험으로부터 구한 결과를 Mohr 응력원에 도시하고 이를 선형회귀한 직선으로부터 결정된 점착력과 마찰각을 사용한다. 이에 반하여 CWFS 모델에 사용되는 입력변수는 Martin & 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 완전 응력-변형률 곡선(complete stress-strain curve)을 구하고, 이로부터 발생된 소성변형률에 따른 균열손상응력(crack damage stress, σ_{cd})과 최대강도를 결정한다. 일반적

으로 균열손상응력은 그림 6에서와 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 관련지을 수 있다.

재하-제하시험동안 손상증분(i), 즉 재하-제하반복은 영구적인 체적손상(permanent volumetric damage)을 발생시킨다. 발생한 체적손상은 손상파라미터(ω)에 의해 표현되며, 이는 축적된 영구적인 체적변형률(ϵ_v^p)에 의해 식 (2)과 같이 정의된다. 손상파라미터는 최대 강도 및 균열손상응력을 도시하는 데 유용하게 사용된다. 그림 7은 체적변형률에서 결정되는 체적손상과 균열손상응력을 도시한 것이다.

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

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

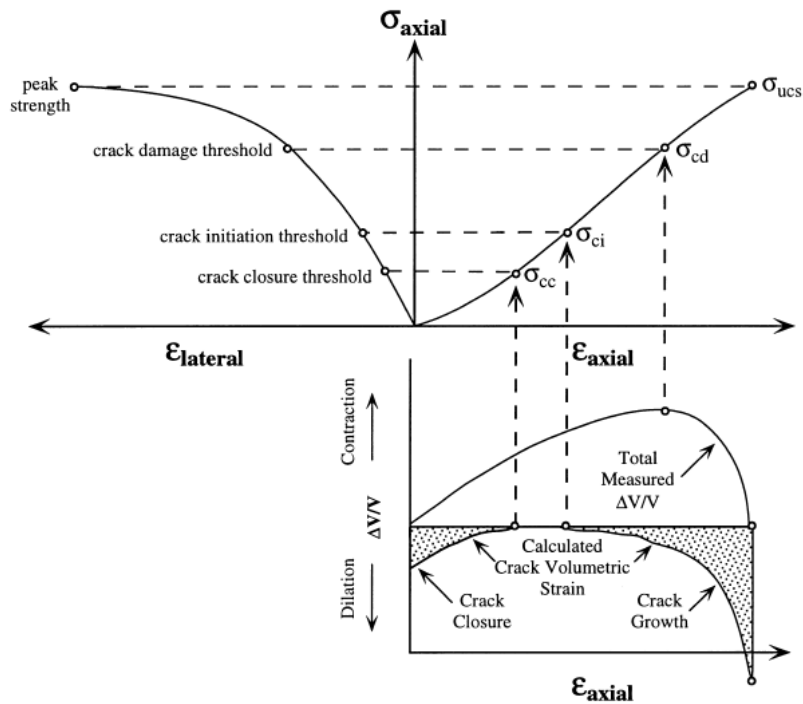


그림 6 일축압축시험에서 얻어지는 응력-변형률 곡선
(after Martin & Chandler, 1994))

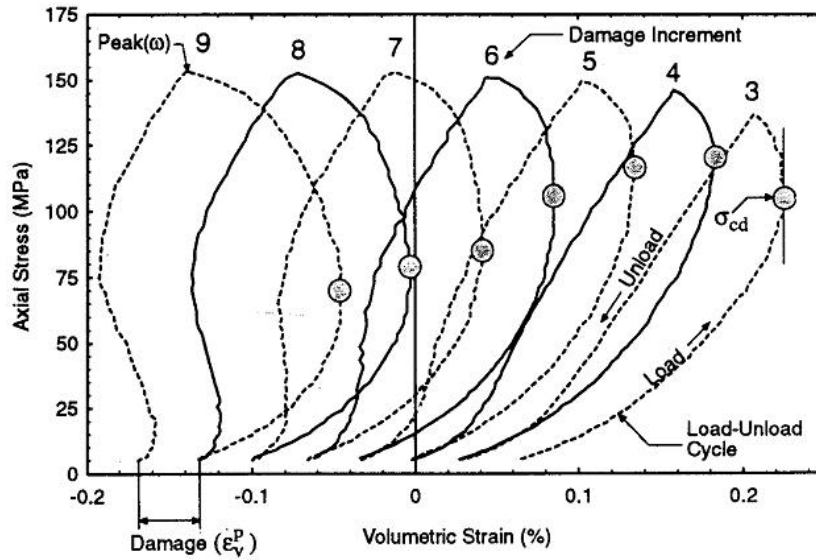


그림 7 손상증분에서 영구변형률로 정의되는 손상모식도

3. 손상제어시험에 의한 입력변수 산정

파괴모델링에 사용된 입력변수는 모형실험체의 재료인 시멘트 모르타르의 물성을 사용하였다. Mohr-Coulomb 모델에 사용되는 입력변수는 ISRM에서 제안한 실내 시험법에 따라 구하였으며, 시멘트 모르타르의 물리적, 역학적 특성은 표 1에 제시하였다. CWFS 모델의 입력변수는 손상제어시험을 통하여 결정하였다. 손상제어시험에 의해 수행된 결과는 다음과 같다.

표 1. 실험재료의 역학적, 물리적 특성

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

시험은 변위제어조건에서 재하와 제하를 15 ~ 20회 반복하여 수행하였다. 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 제하시기를 결정한다. 제하는 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 반복 수행한다.

그림 8과 그림 9는 손상제어시험으로부터 구해진 응력-변형률 곡선의 모습을 보여준다. 암반의 손상을 나타내는 지수인 손상파라미터(ω)는 재하-제하의 증분에서 발생하는 영구적인 체적변형률로 정의된다. 그림 7에서 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, 시험의 초기단계에서 급격하게 감소하고, 시료에 손상이 축적됨에 따라 일정한 잔류값으로 안정화된다(그림 10). 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).

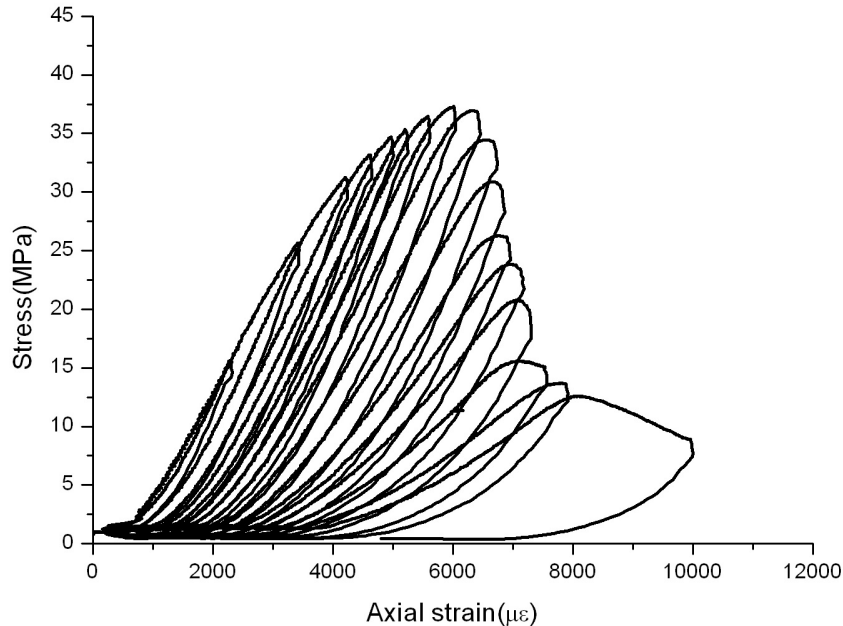


그림 8. 반복 재하-제하에 따른 응력-변형률 곡선

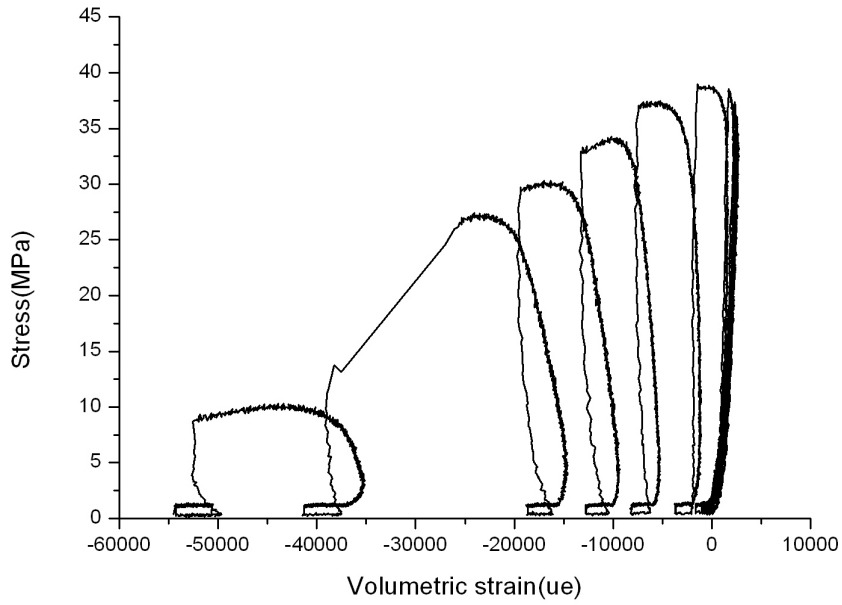


그림 9. 손상제어시험에서 구한 응력-체적변형률 곡선

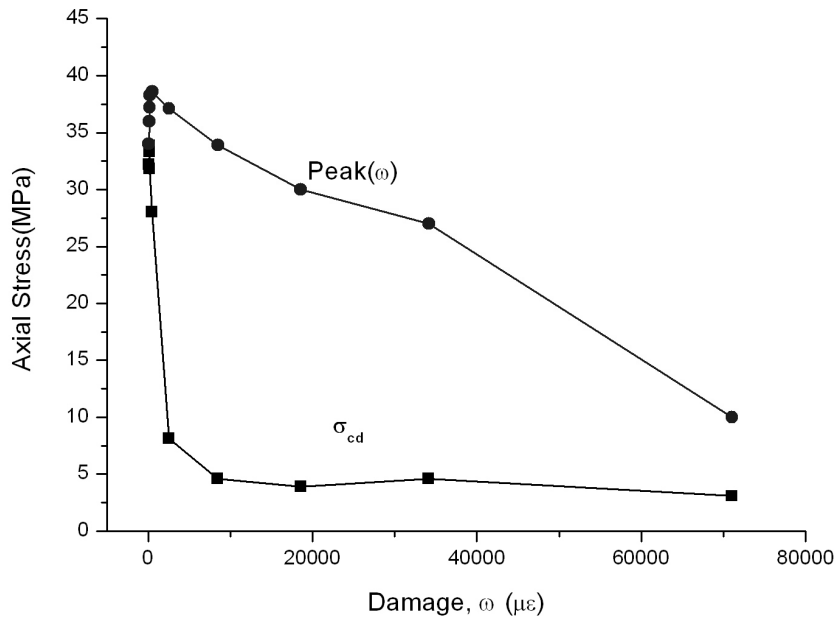


그림 10. 손상함수로 표현되는 최대강도와 균열손상응력

점착력과 마찰강도가 동시에 발생되지 않고, 점착력이 발생한 후 마찰강도가 발생된다는 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.

$$S = 2\sigma_{cd} \quad (3)$$

$$\sigma_1 = 2S_0 \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

$$\phi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cd}}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

표 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(ω_{max})와 일축압축강도로 정규화하고, 정규화된 손상파라미터에 대해 식 (3)과 (5)로부터 구해진 점착력과 마찰각을 도시하면 그림 11과 같이 표현된다. 그림 11로부터 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 보고하였다. 손상제어시험에서 마찰강도가 잔류마찰각으로 도달하기 위해서는 많은 횟수의 반복시험이 요구된다. 그러나 본 연구에서 사용된 시멘트 모르타르의 경우 Lac du Bonnet 화강암과 달리 손상제어시험동안 많은 양의 변형률이 발생하였으며, 이로 인해 시험수행동안 횡방향 변위변환계(circumferential extensometer)의 한계를 초과하여 더 이상의 반복시험을 수행하지 못하여 잔류마찰각으로 수렴되는 것을 관찰할 수는 없었다.

표 2. 소성변형률에 따른 점착력과 마찰각의 변화

Plastic strain ($\mu\epsilon$)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
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
2,562	40.5	65.4
8,447	23.0	74.5
18,571	19.5	75.2
34,159	23.0	70.7
71,016	15.4	55.9

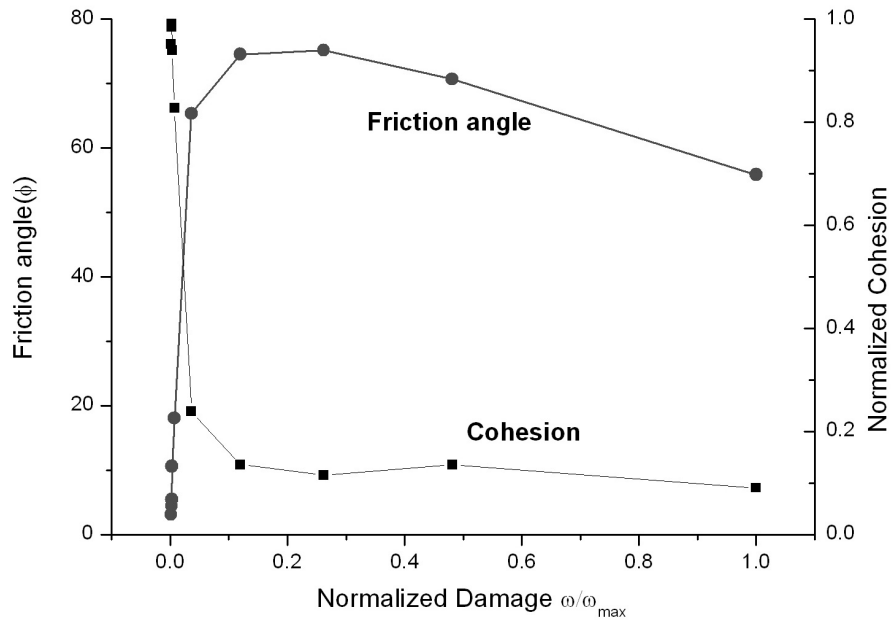


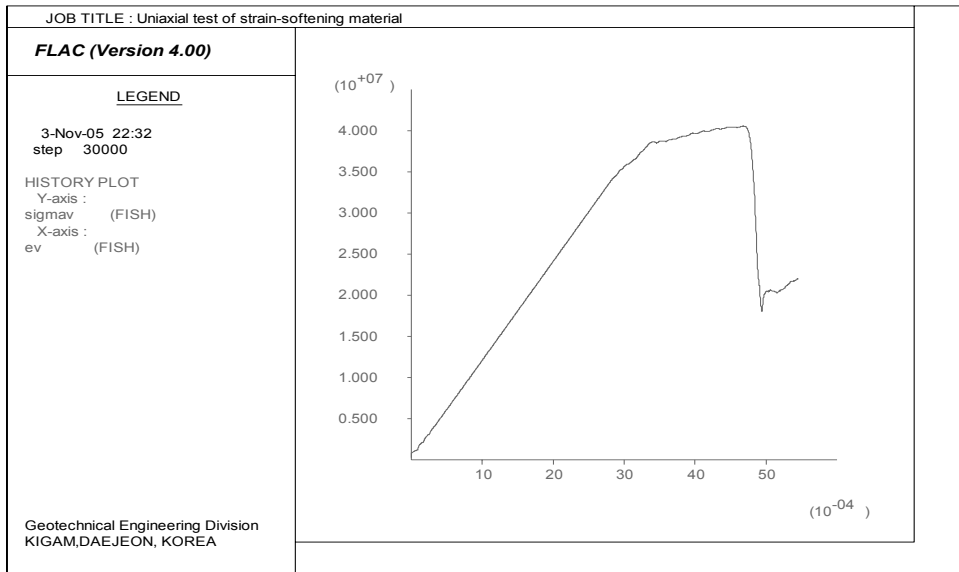
그림 11. 정규화된 손상함수로 표현된 점착력과 마찰각의 변화

4. 고심도 터널의 파괴 모델링

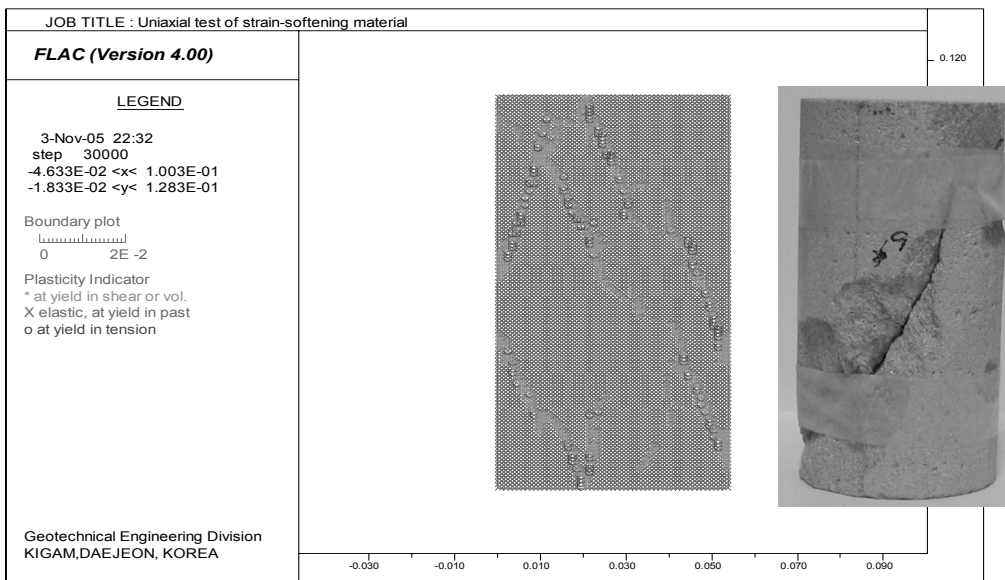
4.1 CWFS 모델의 적용성 검토

CWFS 모델을 이용하여 고심도 터널의 파괴특성을 분석하기에 앞서 CWFS 모델의 적용성을 알아보려고 일축압축시험을 모사하였다. CWFS 모델의 입력변수는 손상제어시험에 의해 구해진 소성변형률에 따른 점착력과 마찰각으로 표현되며, FLAC의 입력방법 중 하나인 table을 이용하여 구현하였다. 일축압축시험의 모사는 FLAC^{2D}에 의해 수행되었다.

그림 12는 CWFS 모델에 의해 모사된 일축압축시험의 응력-변형률 곡선과 파괴양상을 나타낸다. 일축압축시험의 응력-변형률 곡선과 비교하여 파괴양상이 다소 상이한 점은 있으나, 시험결과에서 관찰된 것과 같이 최대강도 이후의 변형률연화현상을 잘 표현해 주고 있는 것으로 나타나 구성모델에 따른 파괴특성의 변화를 분석하는 데 적용 가능한 것으로 판단된다.



(a) 응력-변형률 곡선



(b) 파괴모습

그림 12 CWFS 모델을 이용한 일축압축시험 모델링

4.2 구성모델에 따른 파괴특성

구성모델에 따라 발생하는 고심도 터널의 파괴특성을 비교하기 위하여 진삼축압축조건에서 수행된 모형실험결과를 이용하였다. 모형실험은 손상제어시험에서 수행된 것과 동일한 시멘트 모르타르를 사용하였다. 그림 13과 그림 14는 모형실험에서 관찰된 원형터널 주변의 파괴모습을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 최대응력인 S_V ($S_V > S_{H2} > S_{H1}$)와 평행한 방향에서 스폐링현상이 관찰되었으며, V-형태의 노치형상을 보였다.

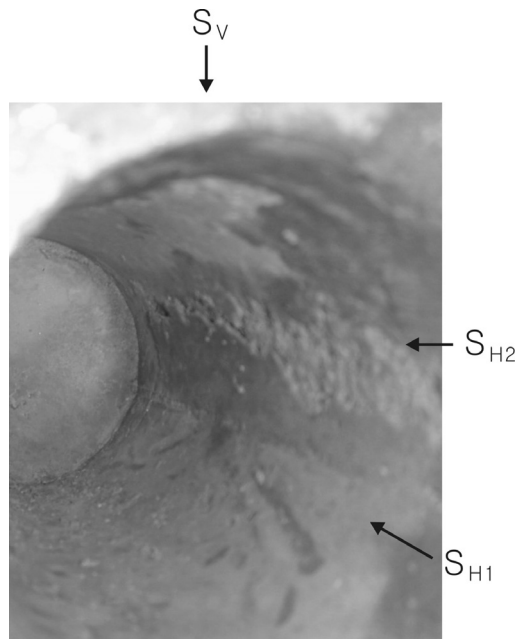


그림 13. 모형실험에서 관찰된 원형터널 주변의 파괴모습

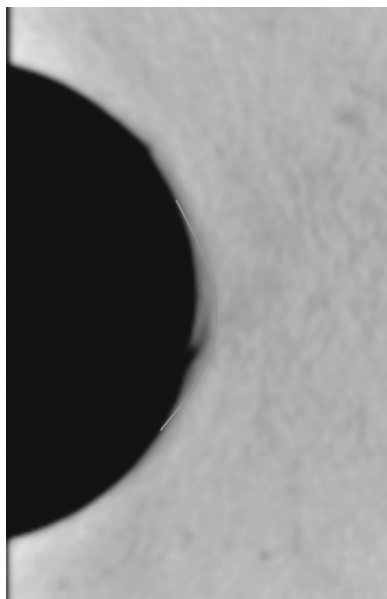
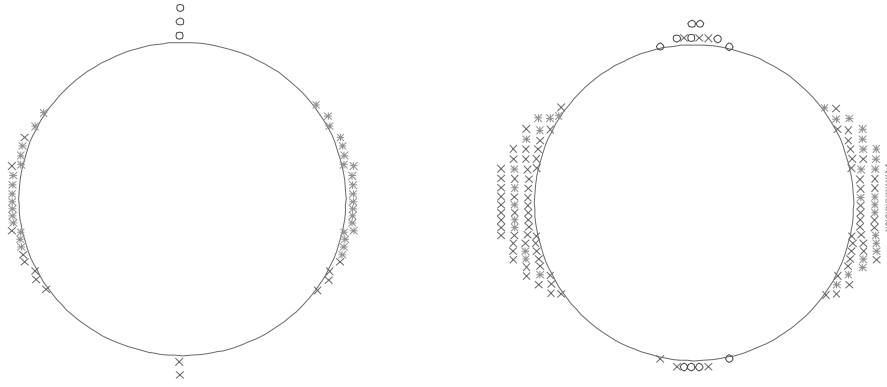


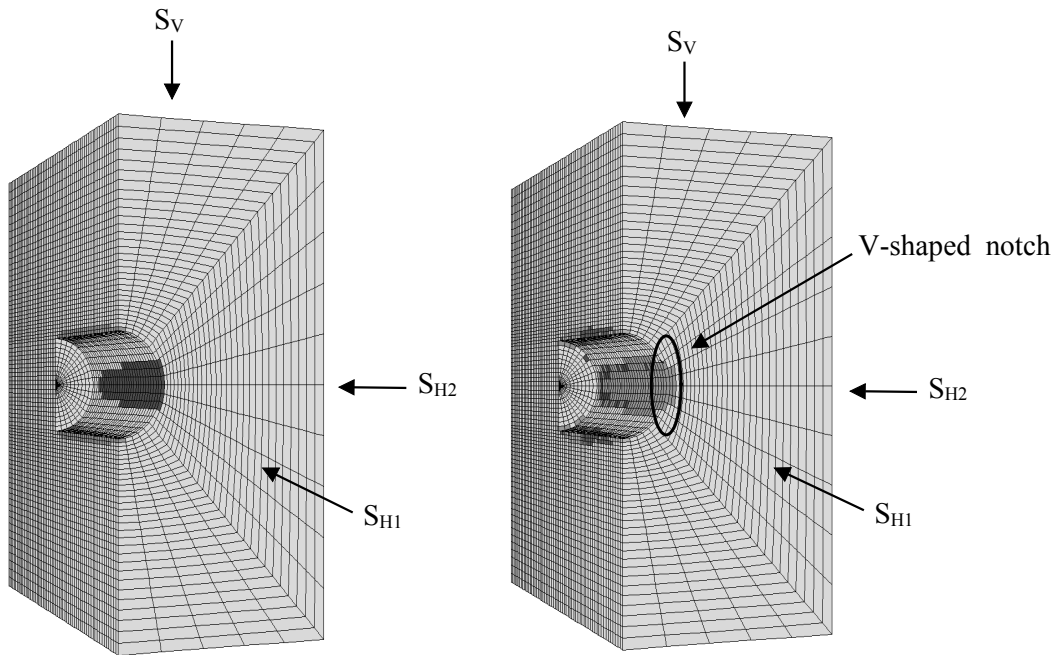
그림 14. 원형터널 주변의 CT 이미지

그림 15와 그림 16은 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 모사하였으나, Mohr-Coulomb 모델에 의한 수치실험의 경우 경계면에서의 파괴만을 모사하였다. 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 모델은 파괴초기에 점착력요소만 발현하여 동일한 응력조건에서 CWFS 모델의 경우 상대적으로 낮은 파괴기준이 적용되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 구성모델에 따른 차이는 파괴범위에 비해 파괴심도에서 더욱 뚜렷하게 발생하였다.



(a) Mohr-Coulomb 모델 (b) CWFS 모델
 그림 15 구성모델에 따른 원형터널의 2차원 파괴모델링



(a) Mohr-Coulomb 모델 (b) CWFS 모델
 그림 16 구성모델에 따른 원형터널의 3차원 파괴모델링

위의 결과로부터 취성암석에서 나타나는 변형률연화현상을 모사하고 V-형태의 파괴형상을 모사할 수 있는 CWFS 모델이 Mohr-Coulomb 모델에 비해 취성파괴현상을 예측하는데 적합한 것으로 판단된다.

그러나 Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델을 이용한 수치모델링에서 예측된 파괴영역은 동일한 응력조건에서 수행된 모형실험에 비해 과대평가하는 경향을 보였다. 이는 FLAC^{3D}의 경우 원형공동의 곡률에 따른 크기효과가 존재하지 않으나 실제 현장이나 실내 모형실험의 경우에는 곡률에 따른 크기효과가 존재하기 때문으로 해석된다. 기존 연구에 따르면 곡률이 증가함에 따라 공벽에서 파괴를 위해 요구되는 최대접선응력은 감소한다고 보고하였다. 특히 모형실험과 같이 작은 원형공동을 사용하는 경우 원형공동의 곡률에 따라 공벽에서 파괴를 위해 요구되는 최대접선응력은 재료의 일축압축강도보다 2배 이상 클 수 있음이 보고된 바 있다(Martin et al., 1994).

5. 결론

고심도 터널에서 발생할 수 있는 취성파괴를 평가하기 위하여 Mohr-Coulomb 모델과 CWFS 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다. 특히, CWFS 모델의 입력자료를 산정하기 위하여 재하-제하를 반복하는 손상제어시험을 수행하여 손상정도에 따라 물성의 변화를 모델링에 반영할 수 있었다.

CWFS 모델을 적용하기에 앞서 일축압축시험을 통해 그 적용성을 검토한 결과, 응력-변형률곡선의 양상이 약간 상이한 점은 있으나 일축압축시험에서 관찰된 것과 같이 최대강도 이후의 변형률연화현상을 잘 표현해주며, 유사한 파괴양상을 모사할 수 있었다. 전통적인 탄소성모델인 Mohor-Coulomb 모델로는 예측할 수 없었던 터널의 V-형태의 파괴형상을 CWFS 모델을 이용하여 예측할 수 있었다. 그러나 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 발현되어야 하는 점 등의 문제점이 있어 이를 보완할 수 있는 추가적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. Aglawe, J.P., 1999, Unstable and violent failure around underground openings in highly stressed ground, Ph.D. Dissertation, Queen's University at Kingdom, Canada.
2. Hajiabdolmajid, V., 2001, Mobilization of strength in brittle failure of rock, Ph.D Dissertation, Queen's University, Canada.
3. 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

4. Martin, C.D., 1993, The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground, Ph.D., University of Manitoba
5. Martin, C.D., Chandler, N.A., 1994, The progressive failure of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol 31, pp.643-659.
6. Read, R.S., Martin, C.D., 1996, Technical summary of AECL's Mine-by Experiment Phase 1:Excavation response, AECL Report AECL-11311.