

Chevron Bend 파괴인성 실험의 수치해석적 검증연구

정주환, 김원범, 하태욱, 양형식 (전남대학교)

1. 서 론

암석의 파괴는 미시적으로 암석 내부에 균열이 발생, 전파하는 파괴역학적 현상으로 규명할 수 있으며 굴착, 발파, 파쇄 등의 작업과정을 효율적으로 수행하기 위한 기초연구로서 암석파괴역학을 이용한 연구가 중요하게 대두되고 있다.

현재까지의 파괴역학에 대한 연구들을 살펴보면 암석 내 균열의 성장, 전파 과정의 특성 (Bieniawski, 1968, Cotterell, 1972, Ingraffea, 1977), 균열 형성의 기준의 재정립에 관한 문제 (Takahashi 등, 1987, Cleary, 1983), 파괴역학의 중요 물질 상수인 파괴 인성(fracture toughness)에 대한 시험편의 형상, 크기, 하중의 가압방법 등의 변수들이 미치는 영향(Hoagland 등, 1973, Atkinson, 1976, Schmidt, 1976, Halleck 등, 1980, Kobayashi 등, 1980, Otsuka 등, 1982, Barker, 1983, Ouchterlony 등, 1983, Noh 등, 1986), 파괴인성에 대한 이방성, 수분, 온도, 압력 등의 영향(Henry 등, 1977, Schmidt, 1977, Atkinson, 1979, Kenner 등, 1982, Barton, 1982) 등의 기초 연구에서부터 석유, 가스 및 기타 광물의 채굴이나 수압파쇄법, 지열 이용, 암석의 동적 파쇄, 조절발파에 대한 적용 등 응용분야에 대한 연구에까지 이르고 있다.

특히, 파괴역학에서 가장 중요한 요소라 할 수 있는 파괴 인성의 측정을 위한 표준적인 시험법의 기준안이 1988년 국제암반역학회의 시험법 표준화를 위한 연구위원회에서 발표되어 이에 대한 검증 연구가 활발히 이루어지고 있다.

그러나 국내 연구는 대개 외국에서 제안된 여러 가지 시험방법을 대상으로 시험조건 및 영향변수의 기준을 규정하고 검증하기 위해 실험이 주를 이루고 있는 실정이며 수치해석의 적용사례는 도입단계라고 할 수 있다.

본 연구에서는 국제암반역학회에서 제안하고 있는 Chevron Bend 파괴인성 실험을 유한차분법과 개별요소법을 적용한 수치해석으로 계산하고 이를 비교 검토하여 각 해석법에 대한 적용 가능성을 평가해 보았다.

2. 셰브론 노치 굴곡시험법(CB)

ISRM에 의해 제안된 Chevron Bend 파괴인성 측정법은 암반을 완전탄성체로 가정하여 최대하중만을 고려한 Level I 시험법과 비선형 보정과정을 포함하는 Level II 시험법이 있으며 시험조건 차이

가 있으나 시험편은 동일한 CB 시험편을 사용한다.

Level I 시험은 하중속도 $0.25 \text{ MPa}\sqrt{m}/\text{sec}$ 이상의 일정속도로 재하하여 가압 후 10초 이내에 파괴되도록 하는 방법이며 파괴시의 최대하중으로부터 파괴인성을 계산한다.

$$K_{CB} = \frac{A_{\min} F_{\max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

$$A_{\min} = \left[1.835 + \frac{7.15a_0}{D} + 9.85 \left(\frac{a_0}{D} \right)^2 \right] \frac{S}{D} \quad (2)$$

이고 F_{\max} 는 최대하중, D 는 시험편의 직경, a_0 는 초기 인공 균열의 길이, S 는 지지점 간의 거리이다.

Level II 시험은 CMOD(개구변위)의 속도가 $0.006 K_{CB}/(E/D) \sqrt{m}/\text{sec}$ 이상으로 일정하게 유지하면서 4회 이상 재하와 제하를 반복하며 최종변위는 최대하중 때의 변위보다 1.5배 정도에 달할 때까지 계속한다. 비선형 보정의 원리는 재하와 제하의 기울기의 평균을 히스테리시스 곡선의 교점에서 취하고 이것과 하중변위 곡선의 교점들로부터 구한 비선형도 P 를 이용하여 시험의 정당성을 검증하고 파괴인성을 보장한다.

비선형 보정 파괴인성은 $F > 0.95F_{\max}$ 일 때

$$K_{CB}^c = \sqrt{\frac{(1+P)}{(1-P)}} K_{CB} \quad (3)$$

이고 $F < 0.95F_{\max}$ 이면

$$K_{CB}^c = \sqrt{\frac{(1+P)}{(1-P)}} \frac{F_c}{F_{\max}} K_{CB} \quad (4)$$

이다. F 는 보정에 사용되는 최고하중점 부근의 평균하중이다.

본 연구에서는 Level I 시험법을 적용하였으며 식(1)을 이용하여 파괴인성 값을 계산하였다. 그림 1은 CB 시험장치의 모식도를 나타내고, ISRM에서 제안하는 표준규격은 표 1과 같다.

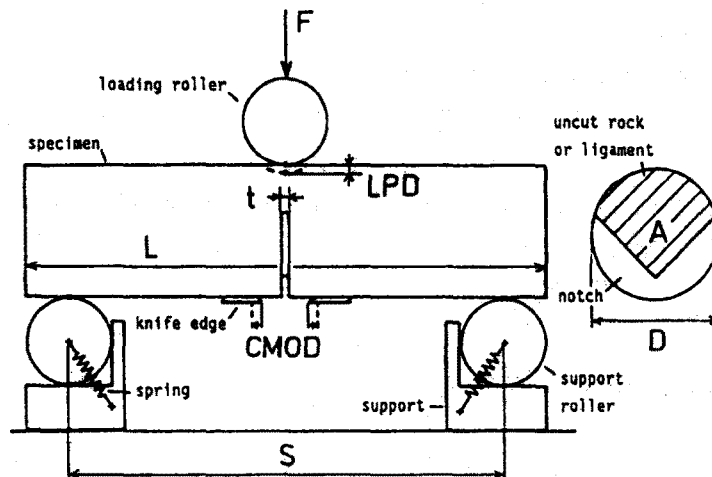


그림 1. CB 시험장치 모식도

표 1. Chevron Bend Test 표준규격(ISRM Suggested Methods) 및 시편크기.

Geometry parameter	Value	Tolerance	Modeling Size
Specimen diameter	D	$>10 \times \text{grain size}$	54.0mm
Specimen length, L	$4D$	$>3.5D$	216.0mm
Support span, S	$3.33D$	$\pm 0.02D$	180.0mm
Subtended chevron angle, θ	90.0°	$\pm 1.0^\circ$	90.0°
Chevron V tip position, a_0	$0.15D$	$\pm 0.10D$	8.1mm
Notch width, t	$<1.0\text{mm}$	$<0.03D$	1.0mm

3. 수치해석 모델링

김 등(1992)이 수행한 연구내용을 바탕으로 물성을 산정하고 연속체 해석과 불연속체 해석을 수행하였다. 표 2는 충청북도 제천의 석재용 중립질 화강암의 기본적인 물리적 성질을 측정하여 정리한 것이다.

표 2. Physical properties of Jechon granite(김, 1992)

Bulk density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	Uniaxial Compression Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	internal Friction Angle (degree)
2.677	2.714	143.0 ± 7.0	9.1 ± 2.1	15.0	57.83	0.26	55.0

3.1 연속체 해석

연속체 해석을 위해 2차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D를 이용하였다. 해석에 사용된 모델은 실제 시편을 2차원으로 단순화 시킨 그림 2과 같으며, 모델 사이즈는 표 1과 같다. 또한 균열전파 양상을 파악하기 위해서 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

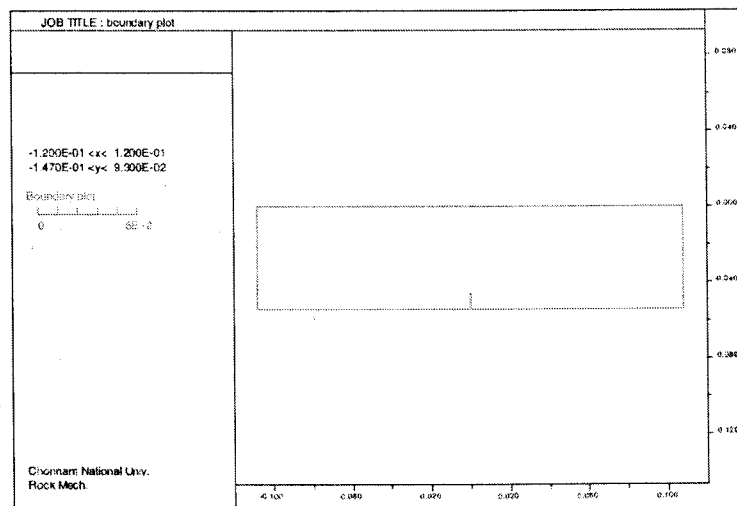


그림 2. FLAC2D 해석 모델

경계조건은 실제 실험에서의 지지점에 해당하는 절점에 y방향 변위를 구속 시켰으며, 하중 재하점에 해당하는 절점에 초당 3KN씩 하중을 증가시켰다.

그림 3은 수치해석 결과로서 하중 증가에 따른 균열전파 양상을 나타낸 것이다. 재하 5.25초 후 21KN의 하중에서 Tip 부분부터 인장균열이 발생하기 시작하였고, 이후 인장균열은 하중 재하점 방향으로 진행하여 9.75초 후 38.8KN의 하중에서 시료는 파괴되었다.

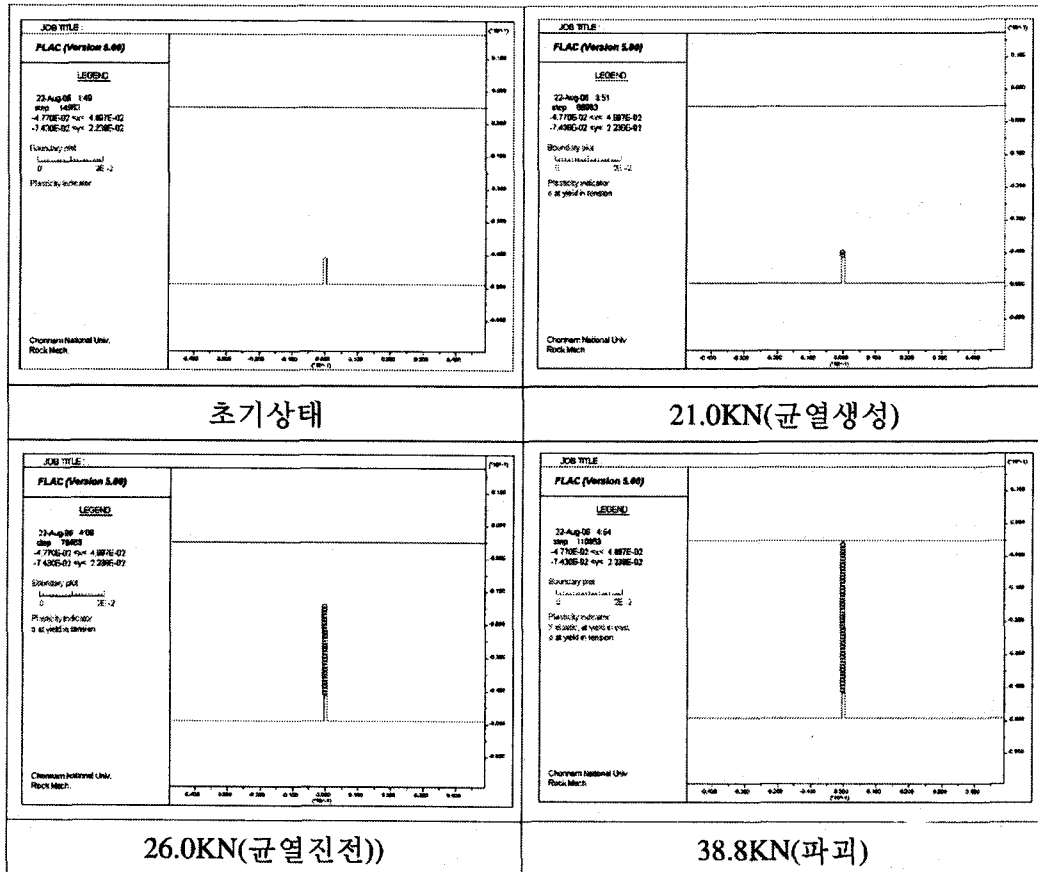


그림 3. 하중증가에 따른 균열 성장 모습(FLAC2D)

3.2 불연속체 해석

불연속체 해석을 위해 2차원 개별요소해석 프로그램인 PFC2D를 이용하였다. 본 해석에 앞서 시편의 거시적인 물성과 입자의 미시적인 물성을 일치시키기 위해 수치실험을 통해 물성보정을 실시하였다. 수치시험 과정에서는 PFC로 만든 수치시료의 거동이 모사코자 하는 물리시료의 거동과 일치할 때까지 PFC의 입력변수들, 즉 입자수준의 미시적 성질들을 변화시키면서 해석을 반복하고 얻은 입력변수들을 적용하여 해석을 수행한다. 표 3은 수치시험을 통하여 얻어진 제천화강암의 입자물성을 나타낸 것이며, 표 4는 실제실험과 수치시험을 통한 역학적 물성의 차이를 나타내고 있다. 또한, 본 해석에서는 contact bond model을 사용하였다.

표 3. 입자 물성(제천화강암)

Input Parameters	value
density[kg/m ³]	2677
kn[N/m]	2.0E11
ks[N/m]	4.4E10
friction[]	0.5
n_bond[N]	2.0E7
s_bond[N]	1.0E8

표 4. 실제실험과 수치시험을 통한 역학적 물성의 차이

Item	Experiment	PFC model
Young's modulus(GPa)	57.8	57.5
Compressive strength(MPa)	143.0±7.0	145.0
Poisson's ratio	0.26	0.25

PFC2D 해석 역시 FLAC2D 해석과 같은 크기의 모델을 적용하였고, 그림 4는 해석을 위한 초기 모델을 나타낸 것으로 실제 실험의 지지점 역할을 하는 ball은 변위 및 회전을 구속시킨 뒤 재하점 역할을 하는 ball에 하중을 가하면서 해석을 하였다.

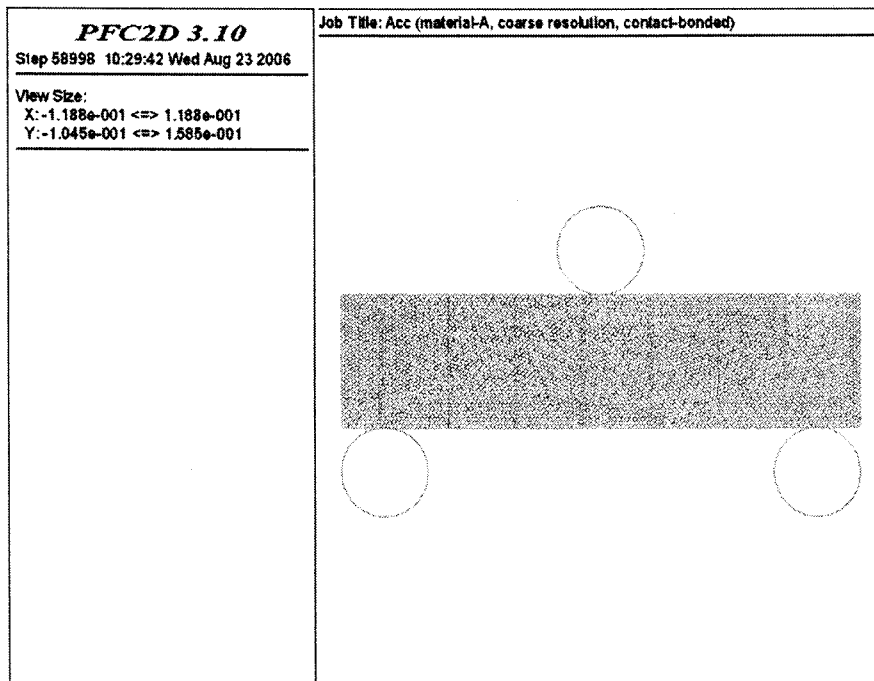


그림 4. PFC2D 해석모델

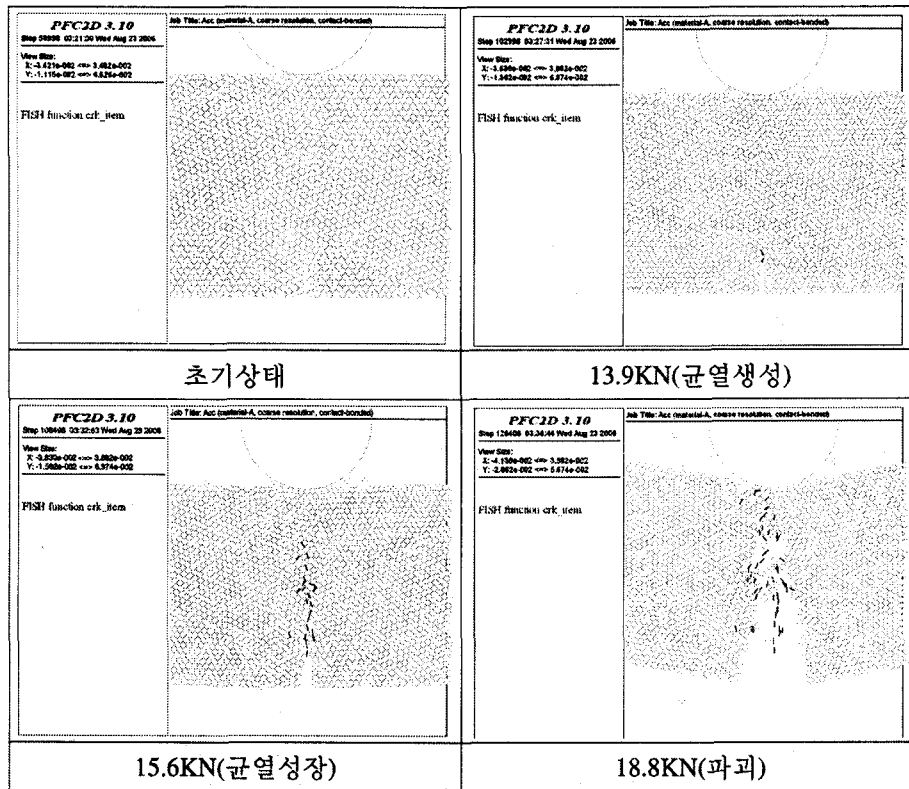


그림 5. 하중 증가에 따른 균열성장 모습(PFC2D)

그림. 5는 PFC 해석 결과로서 하중 증가에 따른 균열전파 양상을 나타낸 것이다. FLAC 해석결과와 비슷한 양상으로 재하 4.5초 후 13.9KN의 하중에서 tip 부분부터 인장균열이 발생하기 시작하였고, 이후 인장균열은 하중 재하점 방향으로 진행하여 6.5초 후 18.8KN의 하중에서 시료는 파괴되었다.

3.3 결과분석

실제 실험결과와 연속체해석(FLAC2D)법 및 불연속체해석(PFC2D)를 통해 Chevron Bend Test를 비교해본 결과 모두 시편의 tip 부분에서 인장균열이 발생하여 성장한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 표 5와 같이 실제 실험값과 수치해석을 통한 파괴인성 값은 많은 10배 이상의 많은 차이난다는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 시편에서의 tip은 3차원 arc형태로 성형이 되지만 2차원으로 해석을 할 경우는 이를 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 Chevron Bend Test에 대한 2차원 해석은 3차원 해석을 통한 검증이 필요하다고 판단된다.

표 5. Chevron Bend Test 결과

	D(mm)	Amin(mm)	Notch Degree	Span(mm)	Fmax (KN)	$K_{CB} (MPa\sqrt{m})$
Experiment	56.0	8.95	89.9	186.5	2.26	1.83
FLAC 2D	54.0	10.43	90.0	180.0	38.80	32.25
PFC 2D	54.0	10.43	90.0	180.0	18.80	15.60

4. 결 론

본 연구에서는 국제암반역학회에서 제안하고 있는 Chevron Bend 파괴인성실험을 연속체해석법과 불연속체해석을 통하여 계산하고 이를 비교 검토하여 각 해석법의 적용 가능성을 평가해 보았다. 연속체해석법과 불연속체해석법 모두 하중이 증가하면서 tip 부분에 인장균열이 발생하였고, 하중 재하점 방향으로 균열이 발전하여 시편의 파괴되었다. 하지만 수치해석을 통한 파괴인성 값은 실제 실험을 통한 파괴인성 값에 비해 매우 큰 값이 계산되었고, 이는 3차원 형상으로 존재하는 tip을 2차원 해석에서 반영하지 못하기 때문이라고 판단된다. 따라서 Chevron Bend 파괴인성실험의 2차원 해석은 3차원 해석과 병행해야 하며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널 시공 기술개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

■ 참고문헌 ■

1. 김재동, 백승규, 1992, 암석의 파괴인성 측정에서 나타나는 CB 시험편의 치수효과에 관하여, 한국암반 공학회 Vol.2, pp. 251-264
2. 양형식, 장명환, 2002, 암석파괴이론, 전남대학교 출판부, 242-260
3. 이희근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, 319-330
4. 장수호, 이정인, 배규진, 이석원, 2002, 암석의 파괴인성 측정방법에 관한 고찰, 한국암반공학회 시험 분화위원회 기술세미나, 48-57
5. 장수호, 이정인, 1999, 인장, 전단 및 혼합모드에서 디스크 시험편을 이용한 암석의 파괴인성 측정에 관한 연구, 한국암반공학회 Vol.9, pp. 315-327
6. Ouchterlony F., 1988, ISRM suggested methods, Suggested method for determining the fracture toughness of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol.22, pp. 71-96