

## 입자결합모형을 이용한 횡방향 변형률 제어 하에서의 암석의 일축 및 삼축압축시험의 수치적 모사 이창수<sup>1)</sup>, 권상기<sup>2)</sup>, 전석원<sup>1)\*</sup>

### Numerical Simulation of Radial Strain Controlled Uniaxial and Triaxial Compression Test of Rock Using Bonded Particle Model.

Changsoo Lee, Sangki Kwon, Seokwon Jeon

**Abstract** In this study, Class II behavior of rock failure process under uniaxial and biaxial compression has been numerically simulated using bonded particle model. Class II behavior of rock was simulated by radial strain controlled uniaxial and biaxial compression tests using a suggested method of ISRM. Micro-parameters used in the simulation were determined based on the laboratory uniaxial compression tests carried out at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. Class II behavior of Äspö rock was effectively simulated using newly proposed numerical technique in this study, and the results of numerical simulations show good similarity with the complete stress-strain curves for Class II behavior obtained from the laboratory tests.

**Key words** radial strain control, bonded particle model, clumped model, Äspö rock, parallel bond model, complete stress-strain curve.

**초 록** 본 연구에서는 Class II 거동에 대해 입자결합모형을 이용하여 수치해석적인 방법으로 살펴보았으며, 횡방향 변형률 제어 압축시험을 수치해석적으로 모사할 수 있는 방법을 제시하였다. 수치해석에서 사용된 미시 변수는 스웨덴 Äspö Hard Rock Laboratory에서 수행한 일축압축시험을 이용하여 결정하였다. 제시된 수치해석 기법을 이용해 Äspö 암석의 Class II 거동을 효과적으로 모사할 수 있었으며, 수치해석의 결과는 실험실 시험 결과와 잘 일치하였다.

**핵심어** 횡방향 변형률 제어, 입자결합모형, clumped model, Äspö 암석, 평행결합모형, 전과정 응력-변형률 곡선

#### 1. 서 론

암석역학 분야에서 암석의 파괴 후 거동에 대하여 지금까지 많은 연구가 이루어진 바 있다. 암석의 파괴 후 거동 특성과 파괴 메카니즘을 파악하기 위해, 강성이 큰 시험기를 이용한 압축시험이 수행되었으며, 이로 부터 전 과정 응력-변형률 곡선(complete stress-strain curve)을 포함하여 암석의 파괴 후 거동을 살펴볼 수 있게 되었다(Cook, 1965, Fairhurst and Hudson, 1999). 또한

Wawersik은 다양한 암석에 대해 전 과정 응력-변형률 곡선을 구하였으며, 일축압축하에서의 암석의 역학적인 거동을 응력-변형률 곡선으로부터 Class I, II로 구분 하였다(Wawersik, 1968, Wawersik and Brace, 1971). Fig. 1에서처럼 Class I 거동의 경우 축방향 변형률은 축 방향 응력이 최고치에 도달한 이후에도 증가를 보이는 반면, Class II 거동에서는 축방향 변형률이 단조로운 증가를 보이지 않는다.

Wawersik and Fairhurst(1970)는 파괴 후의 암석의 거동 특성을 파악하기 위해서는 암석이 급작스러운 파괴가 일어나지 않도록 제어할 필요가 있다고 보고하였다. Hudson 외(1971, 1972)은 이러한 암석의 갑작스런 파괴를 억제하고 완전한 Class II 거동을 살펴보기 위해 횡방향 변형률의 제어가 가능한 일축압축 장비를 이용

<sup>1)</sup> 서울대학교 에너지시스템공학부

<sup>2)</sup> 한국원자력연구원

\* 교신저자 : sjeon@snu.ac.kr

접수일 : 2011년 6월 8일

심사 완료일 : 2011년 6월 21일

게재 확정일 : 2011년 6월 24일

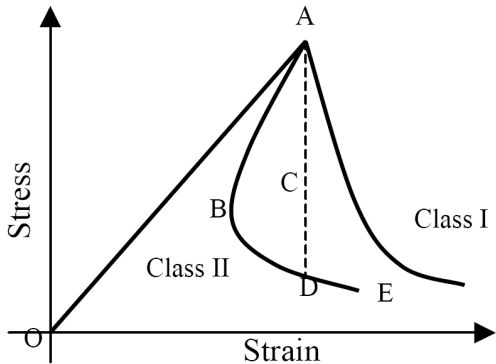


Fig. 1. Class I and Class II behavior of rock failure in uniaxial compression(Shimizu 외, 2010)

하여 Class II의 전 과정 응력-변형률 곡선을 구하였다. 이후, feedback 신호를 다양한 방법으로 획득하여 암석의 파괴 후 거동을 살펴보았다. Sano 외(1982)는 비탄성적인 체적변형률을 조절하였으며, Terada 외(1984)는 Acoustic emission을 이용하였다. 그리고 Okubo and Nishimatsu(1985)와 Okubo 외(1990)의 경우, 축방향 응력과 변형률의 선형 결합을 이용하여 서보 제어하는 방법을 제안하였다. 이러한 시험장비의 발전과 다양한 시험법들로 인해 암석의 파괴거동을 살펴보는 것이 가능해졌다. 하지만 Labuz and Biolzi(1991) 그리고 He 외(1990)은 암석시편의 국부적인 변형, 파괴, 그리고 스프링 같은 현상으로 인해 Class II 거동이 불안정해지기 때문에, 여전히 실내시험을 통해 완전한 응력-변형률 곡선을 구하는 것은 어렵다고 보고하였다.

암석의 파괴 메카니즘과 Class II의 거동을 살펴보는 또 다른 방법으로 수치해석 기법을 사용할 수 있다. Krajcinovic and Silva(1982)는 통계적인 손상 이론과 연속체 손상 이론을 조합하여 일축압축하에서의 Class II 거동을 살펴보았다. He 외(1990)은 Okubo 외(1985)가 제안한 응력과 변형률의 선형조합을 이용한 서보 제어 방법을 이용하여 5개의 다른 암종에 대해 일축 및 삼축압축시험을 수행하고, 스프링 모델을 이용하여 수치해석적으로 Class II 거동 특성을 파악하고자 하였다. 또한 Pan 외(2006)은 Elasto-Plastic Cellular Automaton (EPCA)을 이용하여, 다양한 입력변수들이 전 과정 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 살펴보았으며, 또한 응력-변형률 선형결합으로 하중을 제어하는 방법과 일정 변형률로 하중을 제어하는 방법을 서로 비교하여 전 과정 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 살펴보았다.

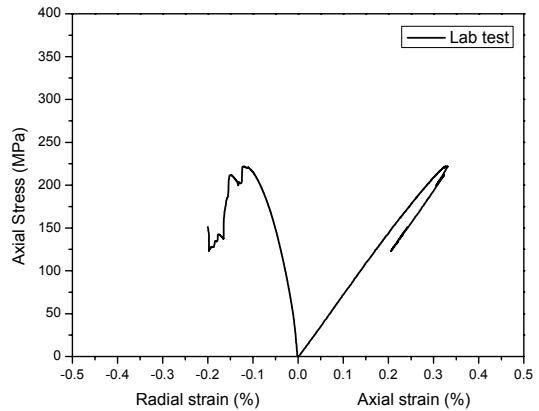


Fig. 2. Complete stress-strain curve obtained by using the radial strain controlled loading method(Staub 외, 2004)

또한 2004년부터 2007년까지 수행된 국제 공동연구 DECOVALEX(DEmonstration of COupled models and their VALidation against EXperiments)에서 수행된 연구결과를 정리한 Bäckström 외(2008)은 서로 다른 4개의 프로그램(EPCA 코드, PFC2D, FRACOD, 그리고 FEM 코드)에 대해 Class I, II 거동을 모사하고 서로 비교분석하였다. Bäckström 외(2008)의 보고에 따르면, 4가지 프로그램 모두 Class I의 거동 특성을 잘 예측하였다. 하지만 Class II 거동에 대한 각각의 결과를 살펴보면, EPCA 코드와 FRACOD는 Class II 거동을 어느 정도 모사하긴 하였지만, 신뢰하기는 어려운 것으로 나타났다. FEM code의 경우 간접적으로만 Class II의 거동을 보여 줄 수 있다고 보고하였다. 특히 PFC2D의 경우, Class II의 거동을 모사하기 힘든 것으로 보고하였다. 이에 본 연구에서는 기존의 PFC2D에서 수행할 수 없었던 문제점을 보완하기 위해 Visual Basic으로 횡방향 변형률 제어 압축시험 전체를 제어하는 프로그램을 개발하여, 현재 DECOVALEX 2011 Task B에서 수행 중인 Äspö diorite 암석의 Class II 거동 모사에 적용하고자 하였다.

## 2. 횡방향 변형률 제어 압축시험

Äspö Hard Rock Laboratory에서 사용된 가압장치는 MTS 815이며, ISRM Suggested Method(Brown, 1981)에 근거하여 시험을 수행하였다. 탄성계수와 포아송 비는 강도값의 0.01 % 지점과 50 % 지점의 기울기 값으로 구하였다(Staub 외, 2004). 수행된 횡방향 변형률 제어 일축압축시험의 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 살

펴 볼 수 있듯이, 시험 결과는 명확하게 Class II의 거동을 보이고 있다.

### 3. Clump 모델

Particle Flow Code 2D, PFC2D는 일축 및 이축압축 시험, Brazilian 시험, 그리고 절리면 전단시험과 같은 다양한 실내시험을 모사하는 것이 가능하기 때문에 암석의 역학적인 거동 특성을 파악하기 위한 많은 연구에 이용되어 왔다(이승우, 2006, 윤정석, 2007, 이희광, 2011). 하지만 Potyondy and Cundall(2004)이 지적했듯이 기존의 원형 입자의 집합체로 구성된 모델에서는 비현실적인 일축압축강도와 인장강도의 비가 나타나는 문제점이 있다. 또한 봉압의 증가에 따른 변형률 경화 현상의 부재로 인해 비현실적인 파괴포락선이 나타난다. 다시 말해, 암석의 내부마찰각과 점착력이 실제보다 다소 작은 값으로 나타나는 문제점이 있다는 것이다. 이러한 문제점은 복잡하고 비균질적 성질의 암석구조를 단순화한 원형입자의 집합체로 이상화하기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고 좀 더 현실적으로 암석의 거동 특성을 모사하고자 평행 결합모형(parallel-bond model)에 대해 Yoon 외(2011)이 사용한 particle clumping logic을 사용하였다.

### 4. 수치해석

#### 4.1 횡방향 변형률 제어

Äspö Hard Rock Laboratory에서 수행된 Äspö diorite에 대한 실험실 시험결과를 토대로 하여 수치해석적인 방법으로 Class II 거동을 모사하고자 하였다. Äspö Hard Rock Laboratory에서는, Class II의 거동을 파악하기 위해 횡방향 변형률을 제어하며 압축시험을 수행하였다. 수행된 횡방향 변형률 제어 압축시험을 수치해석적으로 수행하기 위해, 축방향 변형률과 횡방향 변형률을 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 네 지점에서 각 지점의 좌표를 이용하여 식 (1)과 (2)에 의해 구하였다. 또한 응력의 경우 Fig. 3에서 나타나 있는 상, 하부의 가압판에서 받는 힘의 평균값을 암석시편의 폭으로 나눈 값으로 정의하였다.

$$\text{Axial strain} : \epsilon_1 = \frac{(y_4^0 - y_3^0) - (y_4^t - y_3^t)}{(y_4^0 - y_3^0)} \quad (1)$$

$$\text{Radial strain} : \epsilon_2 = \frac{(x_2^0 - x_1^0) - (x_2^t - x_1^t)}{(x_2^0 - x_1^0)} \quad (2)$$

Shimizu 외(2010)이 제안한 방법과 마찬가지로 횡방

향 변형률 제어는 수치해석이 수행되는 동안 측정된 횡방향 변형률 속도를 목표치의 횡방향 변형률 속도와 비교하여, ±5% 이상의 차이가 나면 해석을 종료하고 이전 time-step에 해당되는 저장파일을 불러온다(Fig. 4(a)). 목표치보다 더 큰 횡방향 변형률 속도가 발생한 경우는 응력을 줄여주고, 목표치 보다 더 적은 횡방향 변형률 속도가 발생하였을 경우에는 응력을 증가시켜준다. 일반적으로 PFC2D에서는 가압판에 속도를 증가 또는 감소시키면서 암석시편에 응력을 증가하거나 감소시킨다. 따라서 불러온 저장파일에서의 가압판의 속도를 측정하고 속도를 1%씩 줄이거나 증가시키면서 Fig. 4(b)에서와 같이 만족하는 횡방향 변형률 속도가 될 때까지 가압판의 속도를 변화시키면서 반복적인 해석을 수행한다. 적절한 횡방향 변형률을 갖는 속도를 찾으면, 그 속도로 또 다시 5%의 오차로 벗어날 때까지 해석을 지속한다. Fig. 4(b)의 점선으로 나타나 있는 부분에서 이루어지는 일련의 작업은 PFC2D 프로그램에서 자체적으로 수행할 수 없기 때문에 횡방향 변형률 제어 압축 시험이 이루어 질 수 없다. 이에 본 연구에서는 횡방향 변형률 제어 압축시험 전체를 제어할 수 있는 Visual Basic 프로그램을 작성하여, 수치해석적인 방법으로 일

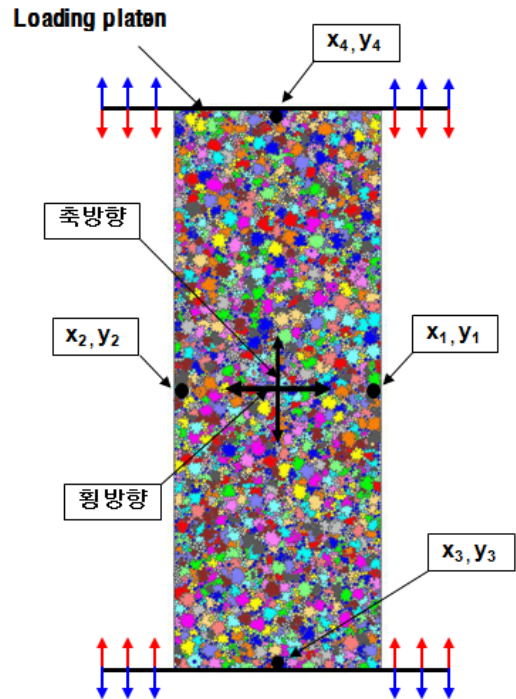
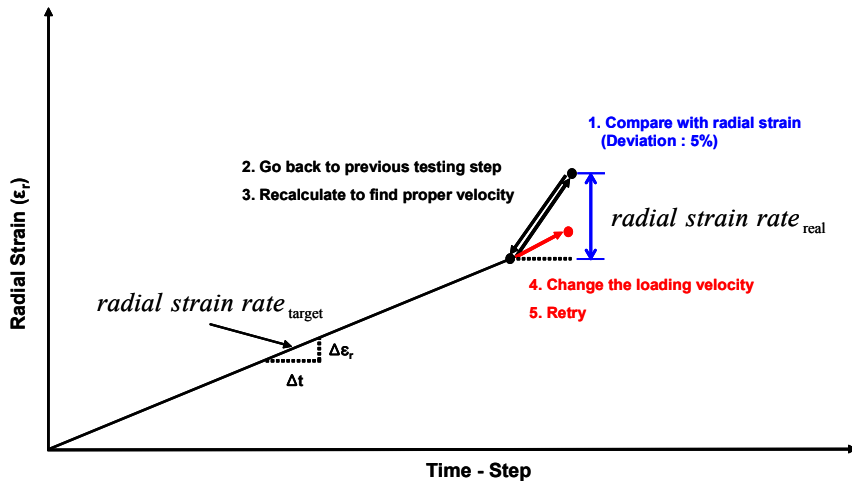
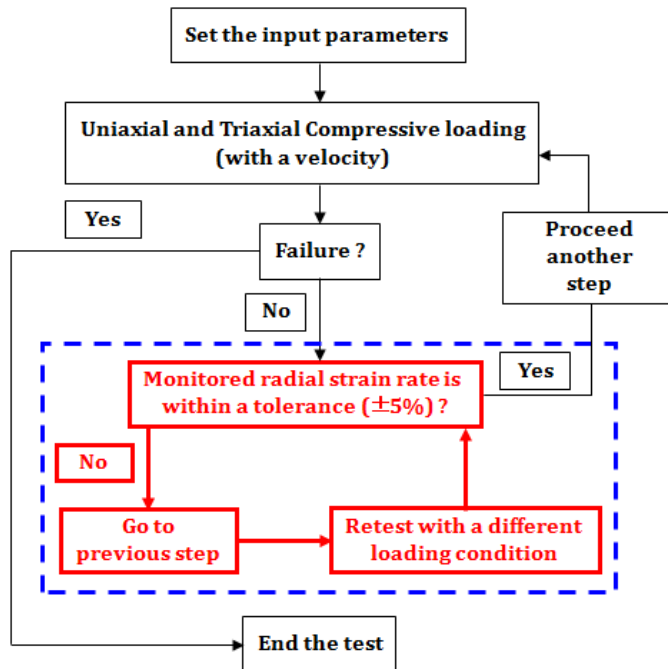


Fig. 3. Loading condition for the numerical analysis



(a) Procedure for obtaining a constant radial strain



(b) Algorithm to control simulation process

Fig. 4. Simulation procedure for radial strain controlled uniaxial and biaxial compression test

축 및 이축압축시험을 수행하였다. 본 연구에서는 수치 해석을 2차원으로 해석하였으므로 삼축압축시험이 아닌 이축압축시험으로 표기하기로 한다.

#### 4.2 입력변수 산정

PFC2D에서는 해석 모델을 구성하는 입자와 벽면에

관련된 미시변수를 이용하여 거시물성을 재현한다. 그러나 탄성계수, 포아송 비 그리고 일축압축강도와 같은 다양한 거시물성을 동시에 재현할 수 있도록 미시변수를 설정하는 과정은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 이창수 외(2010)가 제시한 평행결합모델에서의 11개 미시변수와 거시물성(탄성계수, 일축압축강도, 그리고

포아송 비)간의 상관관계(Table 1)를 토대로 시행착오법을 이용하여 미시변수를 선정하였다. 그리고 Clumping의 직경은 Yoon 외(2011)가 사용한 2 mm로 하였으며, 선정된 미시변수는 Table 2와 같다. 암석시편의 크기와 밀도는 실내시험의 결과(Staub 외, 2004)를 반영하여 결정하였다.

**4.3 수치해석 결과**

일반적으로 암석은 압축시험을 수행하는 동안 균열이 닫힌 후 탄성변형을 보이게 되나 응력이 증가하여 탄성

한계를 초과하면, 암석내부에 약한 광물입자에서 새로운 균열들이 생성되기 시작하며 이 지점의 응력이 균열개시 응력(crack initiation stress)으로 정의된다. 그리고 응력이 점차 증가하면서 횡방향의 변형률이 급격히 증가하여 체적변형률 곡선의 기울기 부호가 바뀌는 응력수준을 균열손상응력(crack damage stress)이라고 한다(장보안 외, 2010). 균열손상응력 수준 이상의 응력상태에서는 불안정한 균열들이 성장하여 응력이 더 이상 증가하지 않아도 균열은 계속 성장하여 파괴에 이르게 된다.

본 연구에서 수행한 수치해석에서의 균열개시응력은

**Table 1.** Relationship between micro-parameters and macro-properties

Micro-parameter	Young's modulus	Uniaxial compressive strength	Poisson's ratio
Ball radius (mm)	반비례	반비례	비례
Ball to ball contact modulus (GPa)	비례	-	비례
Ball stiffness ratio (-)	-	-	비례
Ball friction coefficient (-)	-	-	반비례
Ball density (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-
Parallel-bond modulus (GPa)	비례	반비례	반비례
Parallel-bond stiffness ratio (-)	반비례	-	비례
Parallel-bond normal strength, mean (MPa)	-	비례	-
Parallel-bond normal strength, std. dev (MPa)	-	-	-
Parallel-bond shear strength, mean (MPa)	-	비례	-
Parallel-bond shear strength, std. dev (MPa)	-	-	-

- : 큰 상관관계가 없음

**Table 2.** Input Parameters

Test	Uniaxial compression test	Biaxial compression test
Hole	KQ0064G01	KQ0064G01
Depth	6.26	5.44
Confining Pressure (MPa)	0.0	1.0
Diameter (mm)	50.85	50.70
Length/Diameter (-)	2.72	2.74
Ball radius (mm)	0.5	0.5
Ball to ball contact modulus (GPa)	42.1	44.5
Ball stiffness ratio (-)	2.0	2.0
Ball friction coefficient (-)	0.7	0.7
Ball density (kg/m <sup>3</sup> )	2741	2716
Parallel-bond modulus (GPa)	17.7	20.5
Parallel-bond stiffness ratio (-)	2.0	2.0
Parallel-bond normal strength, mean (MPa)	75.0	75.0
Parallel-bond normal strength, std. dev (MPa)	15.0	15.0
Parallel-bond shear strength, mean (MPa)	160.0	160.0
Parallel-bond shear strength, std. dev (MPa)	32.0	32.0

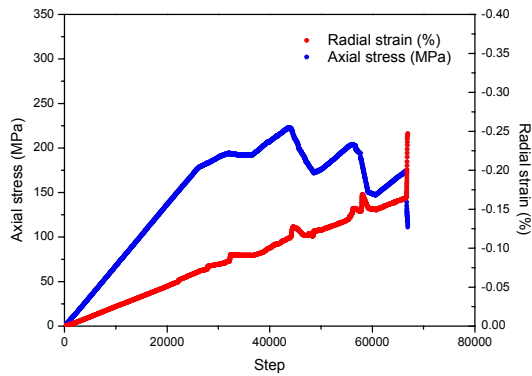
**Table 3.** Results of laboratory tests and numerical simulations

Properties	Uniaxial compression test (KQ0064G01 - 6.26)		Biaxial compression test (KQ0064G01 - 5.44)	
	Laboratory test	Numerical simulation	Laboratory test	Numerical simulation
Young's Modulus (GPa)	73.6	71.9	79.1	78.2
Compressive Strength (MPa)	222.1	223.0	243.5	248.4
Poisson's ratio (-)	0.27	0.27	0.26	0.26
Crack initiation stress (MPa)	89.2	82.4	97.6	108.0
Crack damage stress (MPa)	189.2	185.0	229.5	248.4

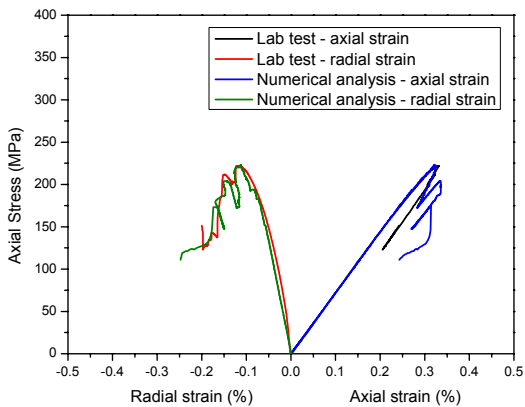
균열이 발생하기 시작한 시점의 축방향 응력으로 정의하였고, 균열손상응력은 Martin and Chandler(1994)가 체적변형률을 이용하여 측정한 방법을 이용하여 체적 변형률의 기울기가 양(+)에서 음(-)으로 바뀌는 지점에

서의 응력수준으로 정의하였다.

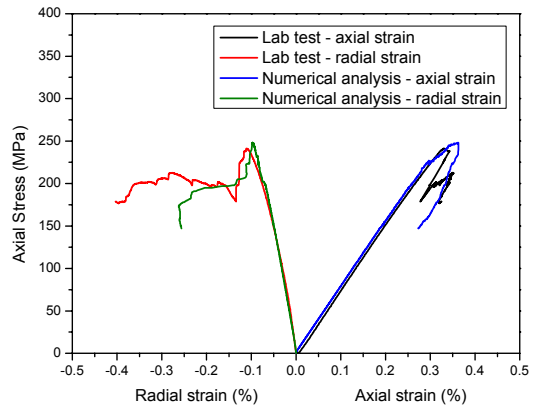
수치해석 결과와 실험실 시험의 결과를 비교하여 나타내면 Table 3과 같다. Fig. 5는 일축압축시험을 수행하는 동안의 횡방향 변형률을 step에 따라 도시한 그림이다. Fig. 5에서는 peak strength 지점을 지나 암석이 완전히 파괴가 이루어지는 시점 직전까지 오차범위 안에서 횡방향 변형률이 잘 제어되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 6은 실험실 시험결과와 PFC2D를 이용하여 수행한 수치해석결과로 나타난 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이고, Fig. 7은 축방향 변형률에 대한 체적 변형률을 나타낸 것이다. 특히 Fig. 6에서는 축방향 응력이 최고치에 도달한 이후에 단조로운 증가를 보이지 않는 Class II 거동이 실내시험 뿐만 아니라 수치해석의 결과에서도 잘 나타나고 있다. Fig. 8은 횡방향 변형률 제어 일축 및 이축압축시험 후의 균열 분포를 나타내고 있다. Fig. 8에서 검은색은 인장 균열을 나타내고 있으며, 붉은색은 전단 균열을 의미한다.



**Fig. 5.** Axial stress and radial strain during the uniaxial compression test



(a) Uniaxial compression test



(b) Biaxial compression test

**Fig. 6.** Axial stress vs. axial strain

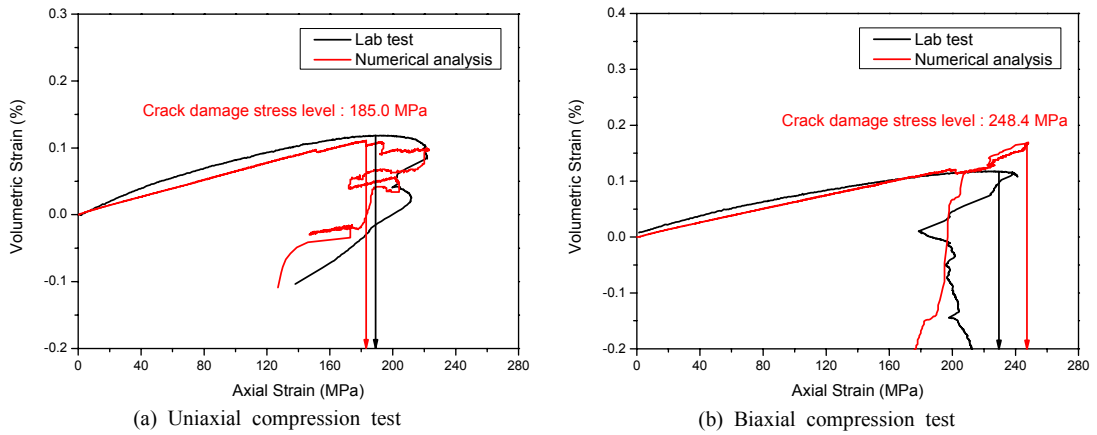


Fig. 7. Volumetric strain vs. axial strain

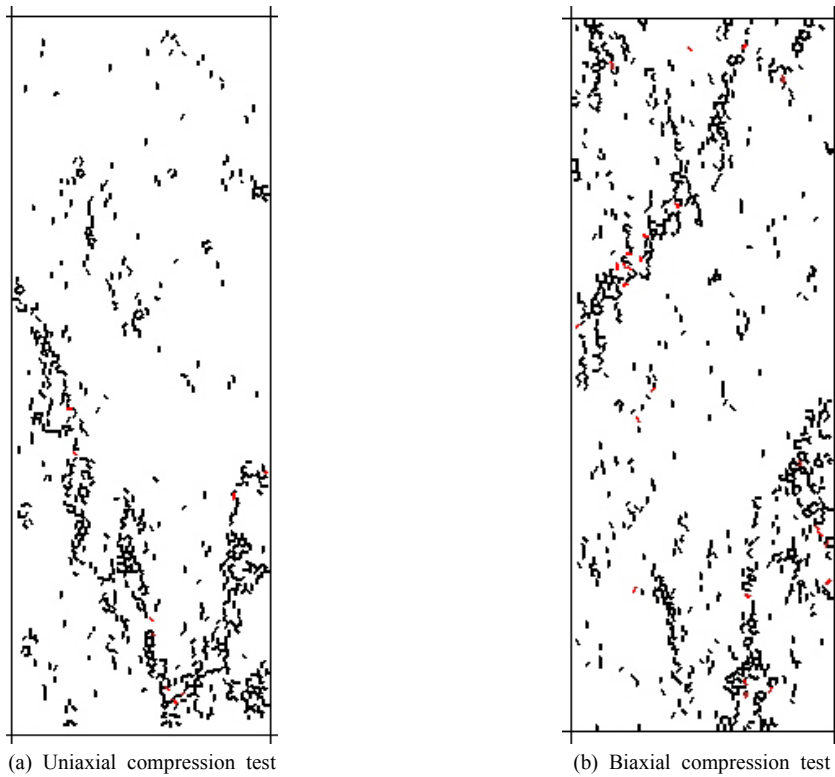


Fig. 8. Crack distributions of uniaxial and biaxial test after failure in the clumped particle assembly

### 5. 결론

본 연구에서는 암석의 파괴 후 거동, 즉 Class II 거동을 수치해석적인 방법으로 모사하기 위해 PFD2D를 이용하였다. 기존의 PFD2D 자체에서는 횡방향 변형률을 제어하면서 수치해석을 수행하는 것이 매우 어려웠기

때문에 본 연구에서는 Visual Basic을 이용하여 수치해석상에서 횡방향 변형률 제어가 가능하도록 하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 검증하고자, 현재 국제공동연구인 DECOVALEX 프로젝트에서 수행하고 있는 Äspö Pillar Stability Experiment의 한 부분으로 수행된 횡방향 변형률 제어 일축압축시험과 삼축

압축시험에 적용하였다. 수치해석 결과, SKB의 실험실 시험 결과와 유사한 경향을 보였다. 특히, 수치해석으로부터 얻은 응력-변형률 곡선에서는 암석의 파괴 후 Class II 거동 특성이 비교적 잘 묘사되었다. 국내 화강암뿐만 아니라 다양한 암석에 대한 Class II 거동 특성을 파악하고자 할 때, 본 연구에서 구축된 프로그램을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환인 공학적 방벽 성능실증기술개발 과제(53324-11)로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 윤정석, 2007, 입자결합 모델링에 의한 암석의 유도전단 파괴에서의 수리-역학적 상호작용, 서울대학교 박사학위 논문.
- 이승우, 2006, 무결합 재료의 크기에 따른 강도와 탄성계수의 변화에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- 이창수, 전석원, 권상기, 2010, Clumped particle model을 이용한 암석의 역학적 거동 특성 평가, 한국지구시스템공학회 추계학술발표회 논문집, 269-271.
- 이희광, 2011, 단축압축하중 하에서 평행하지 않은 균열의 전파와 결합에 관한 실험적 및 수치해석적 연구, 서울대학교 박사학위논문.
- 장보안, 지 훈, 장현식, 2010, 황동화강암을 이용한 암석의 손상기준 결정방법 연구, 지질공학, 제 20권 1호, 89-100.
- Bäckström, A., J. Antikainen, T. Backer, X.T. Feng, L. Jing, A. Kobayasi, T. Koyama, P. Pan, M. Rinne, B. Shen and J.A. Hudson, 2008, Numerical modelling of uniaxial compressive failure of granite with and without saline porewater, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45.7, 1109-1117.
- Brown, E.T., 1981, Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested method. Oxford; Pergamon.
- Cook, N.G.W., 1965, The failure of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2.4, 389-403.
- Fairhurst, C.E. and J.A. Hudson, 1999, Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36.3, 279-289.
- He, C., S. Okubo and Y. Nishimatsu, 1990, A study on the Class II behavior of rock, *Rock Mech. Min. Sci.* 23.4, 261-273.
- Hudson, J.A., E.T. Brown and C. Fairhurst, 1971, Optimizing the control of rock failure in servo-controlled laboratory test. *Rock Mech.* 3.4, 217-224.
- Hudson, J.A., S.L. Crouch and C. Fairhurst, 1972, Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure, *Eng. Geol.* 6.3, 155-189.
- Krajcinovic, D. and M. Silva, 1982, Statistical aspects of the continuous damage theory, *Int. J. Solid. Struct.* 18.7, 551-562.
- Labuz, J.F. and L. Biolzi, 1991, Class I vs. Class II stability: a demonstration of size effect, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 28.2-3, 199-205.
- Martin, C.D. and N.D. Chandler, 1994, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31, 643-659.
- Okubo, S. and Y. Nishimatsu, 1985, Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 22.5, 323-330.
- Okubo, S., Y. Nishimatsu and C. He, 1990, Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and triaxial compression tests - an application of a proposed new control method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 27.6, 559-562.
- Pan, P.Z., X.T. Feng and J.A. Hudson, 2006, Numerical simulation of Class I and Class II uniaxial compression curves using an elasto-plastic cellular automaton and a linear combination of stress and strain as the control method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43.7, 1109-1117.
- Potyondy, D.O. and P.A. Cundall, 2004, A bonded-particle model for rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41.8, 1329-1364.
- Sano, O., M. Terada and S. Ehara, 1982, A study of the time-dependent microfracturing of Oshima granite, *Tectonophysics* 84.2-4, 343-362.
- Shimizu, H., T. Koyama, T. Ishida, M. Chijimatsu, T. Fujita and S. Nakama, 2010, Distinct element analysis for Class II behavior of rocks under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 47.2, 323-333.
- Staub, I., J.C. Anderson and B. Magnor, 2004, Äspö pillar stability experiment, geology and mechanical properties of the rock mass in TASQ, SKB report R-04-01, Stockholm; 81-84.
- Terada, M., T. Yanagidani and S. Ehara, 1984, AE rate controlled compression test of rocks. Proceedings of the third conference on acoustic emission microseismic activity in geologic structures and materials, Clausthal: Trans-Tech; 159-171.
- Wawersik, W.R., 1968, Detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests, Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis.
- Wawersik, W.R. and C. Fairhurst, 1970, A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 7.5, 561-575.
- Wawersik, W.R. and W.F. Brace, 1971, Post-failure behavior of a granite and diabase. *Rock Mech.* 3.2, 61-85.
- Yoon, J.S., S. Jeon, A. Zang and O. Stephansson, 2011, Bonded particle model simulation of laboratory rock tests for granite using particle clumping and contact unbonding, 2<sup>nd</sup> International FLAC/DEM Symposium, Melbourne, Australia, 467-474.



---

**이 창 수**



2004년 서울대학교 공과대학 지구환경  
시스템공학부 공학사  
2007년 서울대학교 공과대학 에너지시  
스템공학부 박사수료

Tel: 02-880-9304  
E-mail: cslee@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스  
템공학부 석박사 통합과정

**전 석 원**



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1991년 University of California at  
Berkeley 토목공학과 공학석사  
1996년 University of Arizona 지질자원  
공학과 공학박사

Tel: 02-880-8807  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스  
템공학부 교수

---

**권 상 기**



1987년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
1996년 University of Missouri-Rolla,  
Mining Eng. 공학박사

Tel: 042-868-8914  
E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr  
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물  
기술개발부 책임연구원

---