

석회암 내 방사상 발파균열을 예측하기 위한 동적파괴과정 해석법의 입력물성 결정법에 관한 연구

김현수¹⁾, 강형민²⁾, 정상선³⁾, 김승곤³⁾, 조상호^{4)*}

Determining Parameters of Dynamic Fracture Process Analysis(DFPA) Code to Simulate Radial Tensile Cracks in Limestone Blast

Hyon-Soo Kim, Hyeong-Min Kang, Sang-Sun Jung, Seung-Kon Kim and Sang-Ho Cho

Abstract Recently, complaints or environmental problems caused by the noise and dust generated from crusher of the mine and quarry are emerging. Therefore mining facilities such as crushers and mills have been installed in an underground. In order to facilitate crusher equipments in the underground, excavation of large space is required and then the stability of the large space underground structure is an important issue. In this study, the blast experiments, which use a block of the limestone, are performed. Based on the blast experiments, the numerical model was prepared and simulated using dynamic fracture process analysis code(DFPA) with considering the rising time of applied borehole pressure and microscopic tensile strength variation. Comparing the non-dimensional crack length and no-dimensional tensile strength obtained from blast experiments and numerical analyses, the input parameters of DFPA code for predicting a radial tensile crack in limestone blasting were determined.

Key words Excavation damaged zone, Dynamic fracture process analysis (DFPA) code, Microscopic tension strength

초 록 최근 채석장 및 광산의 파쇄설비로부터 발생하는 소음 및 분진에 의한 민원과 환경적인 문제가 대두되고 있으며, 이러한 파쇄설비를 지하공동으로 옮기는 사례가 증가하고 있다. 파쇄설비 및 가공시설을 갱내에 설치하기 위해서는 넓은 공간의 굴착이 이루어져야 하고, 대형공동 주변압반의 안정성이 확보되어야 한다. 지하공동 주변압반의 안정성은 굴착 시공 시 발생하는 굴착손상영역과 밀접한 관계가 있어, 최종파단면을 형성시키는 최외곽 발파공에 대한 정밀한 설계가 필요하다. 본 연구에서는 석회석 지하광산에서 대형공동 및 영구갱도 굴착 시 발생 가능한 발파균열길이 및 손상영역을 예측하기 위한 수치해석기법을 제안하였다. 먼저 석회암블록에 대한 발파실험을 수행하고 발생된 인장균열수 및 길이를 분석하여, 동적파괴과정해석코드의 주요 입력변수인 평균 미시적 인장강도를 결정하였다.

핵심어 굴착손상영역, 동적파괴과정해석코드, 미시적 인장강도

1. 서 론

국내 석회석 지하광산은 파쇄과정 중에 발생하는 진동이나 소음으로 인한, 환경오염과 민원을 방지하기 위해서 파쇄설비들을 대형 지하공동에 설치하는 사례가 증가하고 있는 실정이다. 대형으로 지하공동을 굴착 하는 경우에는 주변압반의 안정성이 확보되어야 시설이나 인명에 대한 피해를 사전에 예방할 수

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 박사과정

²⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

⁴⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 부교수

* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2013년 12월 2일

심사 완료일 : 2013년 12월 18일

게재 승인일 : 2013년 12월 22일

있다. 주변암반의 안정성은 굴착손상영역과 밀접한 관계가 있어, 굴착을 위한 발파작업을 할 경우 최종파단면을 형성시키는 최외곽공에 대한 발파작업에서 주의가 요구된다. Fairhurst(1999)와 Stephansson(1999)은 발파나 TBM에 의한 경우에는 암반손상은 굴착손상영역(Excavation Damaged Zone)이라고 정의하고 있다. Sato 외(2000)는 굴착손상영역의 역학적 물성은 굴착 방법에 따라서 크게 변화된다고 설명하고 있으며, Malmgren 외 (2007)는 기계적인 굴착방법에 비하여 발파로 인한 지하공동 주변의 암반 손상영역에서 물성의 변화가 크다고 지적하고 있다.

본 연구에서는 석회석 지하광산에서 대형공동 및 영구경도 굴착 시 발생 가능한 발파균열길이 및 손상영역을 예측하기 위한 수치해석기법을 제안하였다. 먼저 실제 석회석 광산에서 가져온 석회암 블록에 대한 발파실험을 하였고 이때 석회암 블록에 발생된 인장균열의 수와 길이를 분석하였다. 이에 따른 총 인장균열길이에 대한 총 인장균열수를 장약공 반경으로 나누어 무차원 균열길이 계산하였고 인장강도를 수치해석법인 동적파괴과정해석법으로 얻어진 최대 접선방향 응력으로 나누어 무차원 강도값을 구하였고 무차원 균열길이와 무차원 강도를 이용하여 평균 미시 인장강도를 최종적으로 평가하는 방법을 제안하였다.

2. 석회석 블록 발파실험

2.1 석회석 블록 물성측정 및 실험 방법

발파에 의한 석회석의 방사상 인장균열의 발생패턴을 분석하기 위하여 가로 1055mm, 세로 425mm, 높이 188mm의 석회석 블록을 제작하였다. 발파실험에 앞서 석회석 블록의 물성을 측정하기 위해 코어링 작업을 실시하여 기본 물성을 측정하였다. Table 1은 석회석 블록의 물성값을 보여주고 있다. 밀도는 2699.52kg/m³, 일축압축강도는 99MPa, 인장강도는 4.12MPa 이다. 그리고 탄성과 속도를 측정하여 P파와 S파를 이용하여 석회석 블록에 대한 동탄성계수 및 동포아송비를 측정하였다. 탄성과 속도 측정장비는 Tetronix사의 100MHz 주파수 대역을 갖는 Digital Oscilloscope와

Table 1. Mechanical properties of limestone

항 목	물 성 값
밀도	2699.52(kg/m ³)
P파의 탄성과 속도	5931.58(m/s)
S파의 탄성과 속도	3389.47(m/s)
영률 (E)	41.14(GPa)
포와송비 (ν)	0.17
압축강도	99(MPa)
인장강도	4.12(MPa)

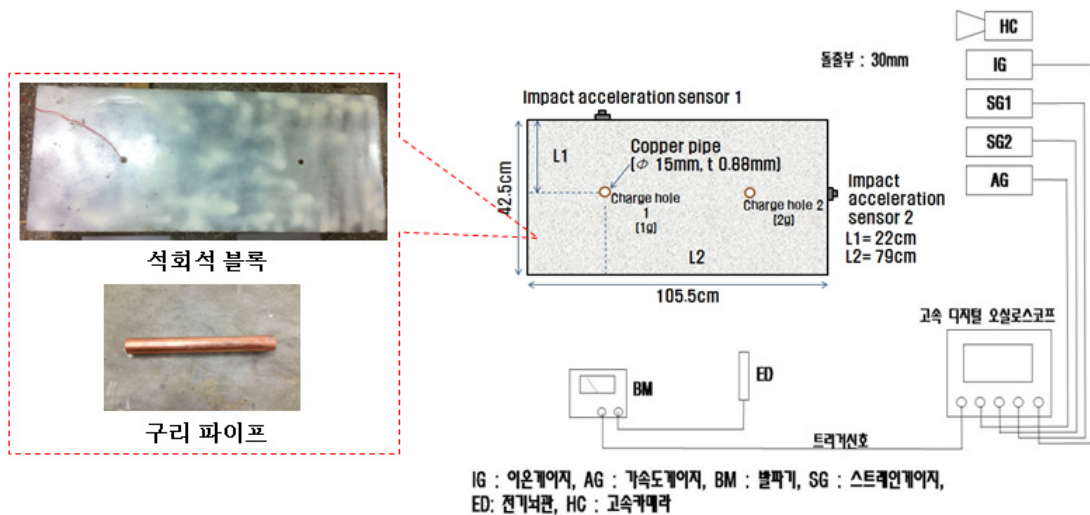


Fig. 1. Schematic diagram for model blast experiments of limestone block.

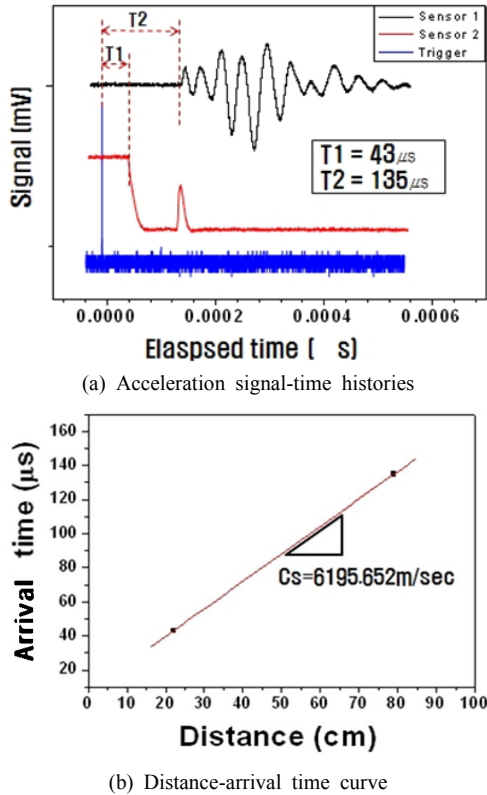


Fig. 2. Measurement of shock waves with impact accelerators.

펄스 제너레이터 및 송수신기(탄성파측정장비)로 이루어져 있다. Digital Oscilloscope는 초당 1GS의 샘플링 개수를 획득할 수 있다. 석회석 블록의 P파의 탄성파속도는 5931.58m/s, S파는 3389.47m/s로 측정되었으며 P파와 S파를 이용하여 구한 동탄성계수는 41.14GPa, 동포아송비는 0.14로 측정되었다.

석회석 블록의 발파 실험방법은 석회석 블록을 반으로 나누어 각각의 영역의 중앙부분에 직경 15mm의 드릴을 사용하여 2개의 장약공을 깊이 120mm로 천공하였다. 그리고 천공한 장약공에 수치해석결과와 비교하기 위하여 폭발가스 영향을 배제하고 충격에너지에 의한 균열발생 및 전파길이를 평가하기 위한 목적으로 직경 15mm, 두께 0.88mm의 구리 파이프를 장약공 벽면에 장착하였다. Fig. 1에서와 같이 가속도 게이지는 장약공 1로부터 22cm, 장약공 2로부터 79cm 이격된 자유면에 부착하여 충격 가속도를 측정하였다. 그리고 장약공의 전색장은 40mm, 기폭제로

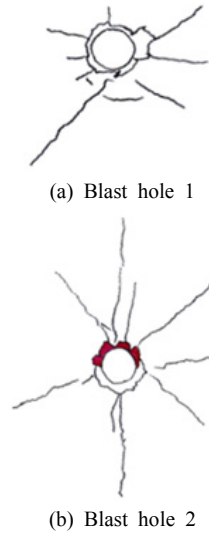


Fig. 3. Resultant fracture patterns from the model blast experiments.

전기뇌관을 사용하였으며, 장약량은 장약공 1에서는 1g, 장약공 2에서는 2g를 적용하였다. 그리고 장약이 완료된 후 전색제로 모래를 사용하였다. 석회석 블록에서의 충격가속도를 측정하기 위해 가속도 게이지를 사용하였다. 장약공 1에서 79cm 떨어진 곳에 가속도 게이지를 부착하여 얻어진 결과를 fig. 2에 나타내었다. fig. 2(a)를 분석한 결과는 fig. 2(b)에서 보여주는 바와 같이 경과시간과 이격거리의 관계로 나타내었다. 이때 충격파 전파속도(Cs)는 6195.65m/s 이었다.

2.2 석회석 블록 발파실험 결과

Fig. 3(a)와 fig. 3(b)는 석회석 블록 발파실험에서 실제 발생된 균열 형태를 그렸다. 균열길이(Lc)와 균열 수(Nc)를 측정하여 두 상수를 곱한 총 균열길이를 계산하였다. 여기서, 총 균열길이라는 무차원 균열길이를 구하기 어려워서 장약공 반경(a)으로 총 균열길이를 나누어 무차원 균열길이를 계산하였다.

장약공 1에서의 발파실험 후 발파균열 수는 8개, 총 균열 길이의 합은 192mm이고 무차원 균열길이는 204이다. 장약공 2의 발파실험 후 발파균열 수는 9개, 총 균열길이의 합은 357mm이고 무차원 균열길이는 428이다.

3. 석회석 블록의 동적파괴과정 해석

3.1 해석모델 및 해석조건

동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)은 Newmark- β 법과 비선형 파괴역학을 기초로 하여 개발된 동적 유한 요소해석코드로서 인장 균열의 발생, 성장, 결합 등은 요소경계면의 파괴로서 취급하며(Fig. 4), 요소 경계면의 응력은 그 응력 경계면을 포함하는 요소들의 응력의 평균값을 계산하고 이 평균값과 요소 경계면의 인장강도의 비(국소위험율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다(조상호 외, 2004). 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 암석 파괴는 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석 파괴를 고려하기 위해서는 암석을 조직으로부터 모델화할 필요가 있으나, 정밀한 수치

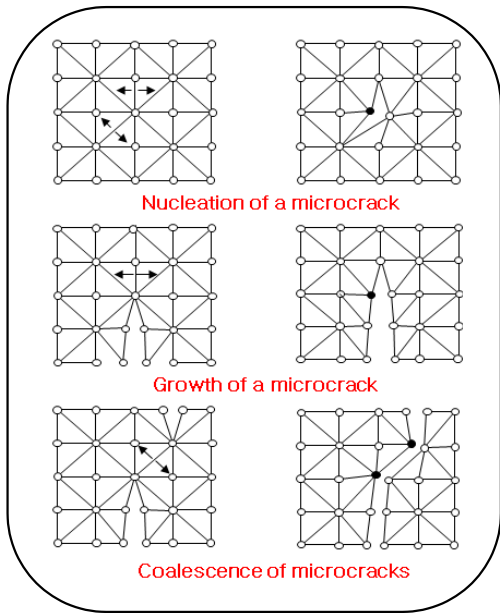


Fig. 4. Remeshing algorithms to simulate crack generation and growth.

해석은 어렵다. 그러나 암석의 미시구조는 근사적으로는 어느 미시적 크기인 요소의 집합체로 모델화할 수 있다. 특히 암석의 미시구조는 극히 불균질하지만 이것은 강도와 탄성계수의 불균일성으로 묘사할 수 있다. 단, 파괴의 과정해석에서는 강도 불균일성의 영향에 비해서 탄성계수의 불균일성의 영향이 적으므로 강도만을 불균일성으로 가정한다. 균열 선단 과정 영역을 유한한 강도를 가진 균열면으로 가정하여 취급하면 과정영역의 역학특성은 균열면의 개구변위와 결합력의 관계, 즉 인장연화곡선으로써 표현이 가능하다. 본 해석에 균열은 분리된 두 개의 경계면으로 취급되기 때문에 균열면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉압에 상응하는 절점력을 작용시켜 균열의 개구 변위가 영으로 되도록 반복 계산한다. 본 해석은 원리상 요소분할이 해석결과에 영향을 미치므로 그 영향을 배제하기 위해 가능한 한 요소를 적게 세분화할 필요가 있다. 그 요소의 세분화에 의해 계산용량 및 계산시간이 증가하게 되는데 계산용량을 줄이기 위해 전체강성 방정식의 행렬에서 0이 아닌 성분만을 일차원 배열로 저장시키는 전처리법을 ICCG법(공역균배법)에 적용시켜 연립방정식을 고속으로 계산함으로써 계산용량과 계산시간을 크게 감소시켰다.

본 연구에서는 석회석 블록 발파 동적파괴과정 해석에서는 Model 1, 2, 3의 3가지 모델로 구분하여 해석을 하였다. Table 2는 석회암블록의 해석조건으로 Model 1의 경우에는 압축강도(S_c)는 100MPa, 인장강도(S_t)는 5MPa, Model 2의 경우에는 압축강도(S_c)는 127MPa, 인장강도(S_t)는 7.3MPa, Model 3의 경우에는 압축강도(S_c)는 150MPa, 인장강도(S_t)는 10MPa를 적용하였다.

그리고 하중상승 시간에 따른 조건은 fig. 5에서처

Table 2. Analysis conditions

항 목	인장강도(MPa)	압축강도(MPa)	하중상승시간(μs)	공내최대압력(MPa)	탄성파속도(m/s)	밀도(kg/m^3)
Model 1	5	87	10, 50, 100	100	3453	2860
Model 2	7.3	127				
Model 3	10	174				

림 최대압력은 100MPa으로 하고, 하중 상승시간은 10 μ s, 50 μ s, 100 μ s으로 상승시간을 3가지로 나누어 적용하여 해석을 하였다.

Fig. 6은 Case 6의 해석결과로서 최대 주응력 분포와 균열 전파 양상을 나타낸다. 동적파괴과정 해석 시작 후 20 μ s에서 균열이 시작하여 80 μ s에서 균열이 방사상으로 전파하고 있으며, 160 μ s에서 균열이 상하좌우로 진행을 하였다. 그리고 320 μ s에서 상·하쪽 균열이 자유면에 도달하였다. Fig. 7은 하중상승 시간에 따른 Model 별 최종파괴패턴을 나타내고 있다. Fig. 7의 Case 1의 경우 인장강도는 5MPa이고 가압속도가

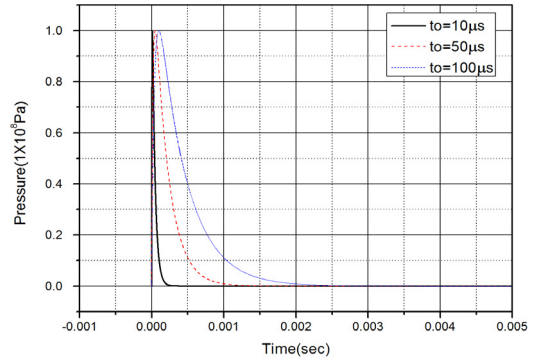


Fig. 5. Borehole pressure-time histories.

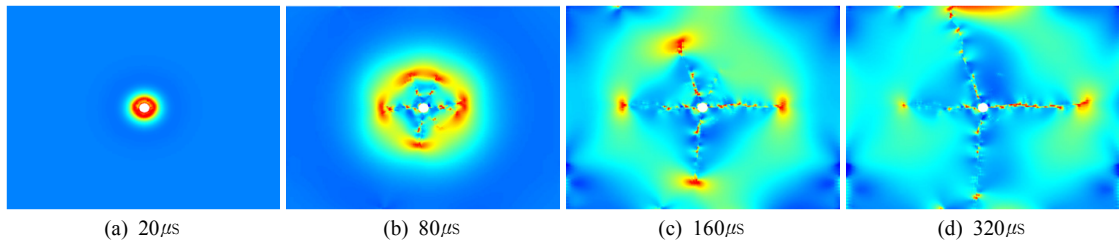


Fig. 6. Maximum principal stress distributions and crack propagations for Case 6.

가압속도(MPa/ μ s)	인장강도(MPa)		
	5	7.3	10
10			
	Case 1	Case 4	Case 7
2			
	Case 2	Case 5	Case 8
1			
	Case 3	Case 6	Case 9

Fig. 7. Numerical resultant fracture patterns.

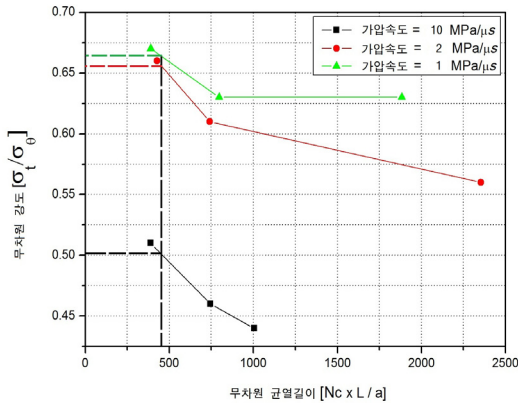


Fig. 8. Relationship between non-dimensional strength and non-dimensional crack length.

10MPa/μs일 때의 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 균열은 공벽을 중심으로 방사상으로 9개의 균열이 발생되었고 최대 균열길이는 58mm이었다. Case 2의 경우 인장강도는 5MPa이고 가압속도가 2MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은 8개가 발생되었고 최대 균열길이는 98mm이었다. Case 3의 경우 인장강도는 5MPa이고 가압속도가 1MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은 10개가 발생되었고 최대 균열길이는 104mm이었다. Case 4의 경우 인장강도는 7.3MPa이고 가압속도가 10MPa/μs일 때의 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 균열은 공벽을 중심으로 방사상으로 13개의 균열이 발생되었고 최대 균열길이는 38.5mm이었다. Case 5의 경우 인장강도는 7.3MPa이고 가압속도가 2MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은 5개가 발생되었고 최대 균열길이는 81mm이었다. Case 6의 경우 인장강도는 7.3MPa이고 가압속도가 1MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은 5개가 발생되었고 최대 균열길이는 98mm 이었다. Case 7의 경우 인장강도는 10MPa이고 가압속도가 10MPa/μs일 때의 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 균열은 공벽을 중심으로 방사상으로 11개의 균열이 발생되었고 최대 균열길이는 32mm이었다. Case 8의 경우 인장강도는 10MPa이고 가압속도가 2MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은

4개가 발생되었고 최대 균열길이는 65mm이었다. Case 9의 경우 인장강도는 10MPa이고 가압속도가 1MPa/μs일 때 최종 균열 패턴을 나타내며 이때의 탁월 균열은 4개 발생, 균열은 3개가 발생되었고 최대 균열길이는 81mm이었다. 하중상승 시간이 증가할수록 탁월균열이 발생되었고 방사선 인장균열의 수는 감소되었지만 균열의 길이는 증가하였다. 인장압축강도가 증가할수록 균열의 길이와 균열의 수는 감소하였다.

4. 평균 미시 인장강도 평가 및 고찰

석회석 블록 동적파괴과정 해석결과로부터 미시적 인장강도를 평가하기 위해서 무차원 균열길이(총 균열길이 × 균열수/장약공 반경)를 이용하여 무차원 강도(평균 미시인장강도/최대 접선방향 응력값)로부터 미시인장강도(σ_t)를 평가하는 방법을 제안하였다. 여기서 미시적 인장강도는 암석의 미세한 불균질성을 고려한 수치해석 입력변수로써 역해석적 방법에 의하여 구할 필요가 있다. Fig. 7의 해석조건별 균열패턴 으로부터 분석된 균열길이와 균열수를 이용하여 무차원 균열길이를 평가하였으며, 무차원강도와 관계를 fig. 8에 나타내었다.

기폭 후 석회석 블록표면의 균열 분석으로부터 평가된 무차원 균열길이를 fig. 8에 나타내는 다이어그램에 대입적용하여 석회석블록의 미시적 인장강도(σ_t)를 추정할 수 있다. 다시 말하면, 장약공 2에 대한 t석회석 블록 발파 실험에 얻은 무차원 균열길이는 428이며, 이를 fig. 8에 적용하면, 가압속도가 10MPa/μs인 경우의 무차원 강도는 0.51, 가압속도가 2MPa/μs일 경우에는 0.66, 가압속도가 1MPa/μs인 경우에는 0.67로 평가된다. 이 무차원 강도에 사용하는 폭약종류 및 장약조건을 고려한 공벽 내 작용압력을 적용하면, 석회암 내 발파균열을 예측할 수 있는 입력자료를 구할 수 있게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 석회석 지하광산에서 대형공동 및 영구공동 굴착 시 발생 가능한 발파균열길이 및 손상영역을 보다 정밀하게 예측하기 위한 수치해석 입력자료 결정법을 제안하였다. 먼저 석회암 블록에 대한

발파실험을 수행하여 장약량별 발생한 방사상 인장균열의 수와 길이를 분석하였다. 장약량이 1g인 장약공 주변의 방사상 인장균열 수는 8개, 균열 길이의 합은 192mm였으며, 이때 무차원 균열길이는 204이었다. 장약량이 2g인 장약공 주변의 방사상 인장균열의 수는 9개, 균열길이의 합은 357mm이었으며, 이때 무차원 균열길이는 428이었다. 실험결과를 바탕으로 수치해석입력변수를 구하기 위하여 역해석적인 방법을 택하였다. 먼저 실험발파 모델을 바탕으로 동적파괴과정 해석모델을 작성하고, 공내 작용압력 조건과 미시인장강도를 변화시키며 발파균열발생 시뮬레이션을 수행하였다. 발파실험결과의 분석방법과 동일하게 수치해석결과로부터 무차원균열길이와 무차원강도를 획득하여 석회석의 미시인장강도를 평가할 수 있는 다이어그램을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(2011201030040)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

1. 조상호, 양형식, 가네꼬 카즈히코, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭초시오차가 암반파괴 과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 14, No. 2, pp. 121-132.
2. Fairhurst, C., 1999, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, American Rock Mechanics Association. pp. 1-44.
3. Malmgren L., D. Saiang, J. Töyrä, and A. Bodare, 2007, The excavation disturbed zone(EDZ) at Kiirunavaara mine. Eng. Geol. Vol. 61, pp. 1-15.
4. Sato, T., Kikuchi, T., and Sugihara, K., 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine. Central Japen. Eng. Geol., Vol. 56, pp. 97-108.
5. Stephansson, O., 1999, Rock mechanics and rock engineering of spent nuclear fuel and radioactive waste repositories in Sweden, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories. America Rock Mechanics Association. pp. 205-227.



김 현 수

전북대학교 자원·에너지공학과
박사과정

Tel: 063-270-2358
E-mail: khs1221@paran.com



강 형 민

전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: khs1221@paran.com



정 상 선

전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: khs1221@paran.com



김 승 곤

전북대학교 자원·에너지공학과
교수

Tel: 063-270-2364
E-mail: skrim@jbnu.ac.kr



조 상 호

전북대학교 자원·에너지공학과
부교수

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr