

암석판재에서 발파공 부근 균열전파에 대한 폭원모델링

최병희^{1)*}, 강명수²⁾, 류창하¹⁾, 김재웅³⁾

Explosion Modelling for Crack Propagation near Blast holes in Rock Plate

Byung-Hee Choi, Myoung-Soo Kang, Chang-Ha Ryu, Jae-Woong Kim

Abstract Recently, as the demand for development and utilization of underground space is increasing worldwide, the blast damaged zone has become a major issue in constructing underground structures. In this study, numerical analyses were performed for modelling a small-scale blasting of rock plates using PFC3D and ANSYS LS-DYNA. In order to verify the analysis results, several test blasts were conducted. It is concluded from the study that the numerical modelling methods well simulate the crack propagation procedure near blast holes under given conditions.

Key words Explosion modelling, Blast damaged zone, PFC3D, ANSYS LS-DYNA

초 록 지하공간의 개발 또는 활용기술에 대한 수요가 전 세계적으로 급증함에 따라, 역학적 안정성과 활용 효율의 측면에서 발파굴착 시 발생하는 손상대 평가는 주요 관심사가 되고 있다. 본 연구에서는 PFC3D와 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 판재시료를 대상으로 발파 예정선 주위의 소규모 모형발파에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한, 해석 결과의 검증에 위하여 소규모 판재모형을 제작하여 발파실험을 수행하고 균열 전파양상을 비교 고찰하였다.

핵심어 폭원모델링, 발파손상대, 모형발파, PFC3D, ANSYS LS-DYNA

1. 서 론

최근 환경위해물질 차폐, CO₂ 지하저장, 지열 개발, 채광 등 지하공간의 개발 또는 활용기술에 대한 수요가 전 세계적으로 급증하는 추세이다. 지하공간의 개발을 위한 발파굴착 시 발파 예정선 주위로 발생하는 손상영역은 이완하중 발생, 낙반, 붕괴 및 과도한 변형의 원인이 되기 때문에 발파손상대를 평가하는 것은 모든 지하공동에서 중요한 문제이지만 특별히 암

축공기 저장공동이나 열, 폐기물 저장공동 등에서는 지압 외에도 공기압력과 열응력이 부가적으로 작용하므로 공동의 역학적 안정성 확보와 열효율의 측면에서 더욱 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 개별요소 코드(PFC3D)와 유한요소 해석 프로그램(ANSYS LS-DYNA)을 이용하여 판재시료 대상으로 소규모 모형발파를 실시하고 발파공 주변에서의 균열 전파 양상을 수치적으로 모사하는 폭원모델링을 수행하였다. 아울러, 해석결과를 검증하기 위하여 황등화강암 및 아크릴 판재모형을 제작하고, 이를 대상으로 발파실험을 수행함으로써 균열이 전파하는 양상을 비교 고찰하였다.

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 석사후연수자

³⁾ (유)동광

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2015년 3월 17일

심사 완료일 : 2015년 3월 23일

게재 승인일 : 2015년 3월 25일

2. 수치해석을 통한 폭원모델링

2.1 개요

폭약은 발파공 내에서 폭발하여 공벽면과 주위 암반에 강력한 폭발압력을 준다. 이때 장약된 화약의 성질과 폭발속도에 따라 급격한 화학반응이 일어나고, 일부는 고온의 가스로 전환되며, 이러한 화학적 반응은 폭발압과 가스압의 형태로 공벽면을 가압하게 된다. 이때 발생된 폭발압은 발파공의 파쇄 및 발파공 주변으로의 균열발생에 직접적인 영향을 미치고, 가스압은 발생한 균열의 확장 및 전파에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Donze et al., 1997). 이러한 효과를 실제 규모로 구현하여 결과를 분석하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 수치해석 기법을 활용한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

본 연구에서는 폭발하중의 함수로서 Jiang(1993)이 제안한 감쇠함수를 사용하여 폭원모델링을 수행하였으며, 발파효과의 분석을 위하여 발파 시뮬레이션에 많이 활용되는 PFC3D를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 아울러 유한요소 코드인 LS-DYNA도 병행 사용함으로써 결과가 서로 비교될 수 있도록 하였다.

2.2 해석모델의 규격 결정

해석대상 모델의 규격을 결정하기 위하여 실내 충

격실험을 수행하였다. 먼저, 판재의 최초 크기를 폭 600mm, 너비 300mm, 두께 30mm로 설정하여 화강석 판재를 제작하였고, 저항선, 공간격, 공수를 변화시키면서 충격하중을 적용하는 실내실험을 실시하였다. 그 결과, 공수를 3공으로 했을 때 저항선 및 공간격이 20mm, 30mm, 40mm인 경우 저항선 방향으로 동적파괴가 발생하였으며, 저항선과 공간격이 증가할수록 전단파괴의 영역이 증가하는 것, 즉 자유면 효과가 거의 없는 것을 확인하였고, 이로부터 초기 설정한 판재의 규격을 본 연구에서의 대상모델의 크기로 결정하였다(그림 1).

2.3 재료 물성

대상 재료는 균질성 및 이방성 등을 고려하여 아크릴과 황등화강암으로 결정하였다. 황등화강암은 국내에서 석재로 사용되는 암석으로 전라북도 황등 지방에서 산출되는 중생대 주라기의 화강암으로서, 중조립질의 구성광물을 이루고 있다. 나머지 재료인 아크릴은 아크릴산, 메타크릴산 등의 에스테로부터의 중합체를 말하며, 무색투명하여 내부 균열의 전파양상을 관찰할 수 있으며, 암석과 같은 대표적인 취성재료로서 재료 물성은 기존 문헌을 참조하였다(표 1).

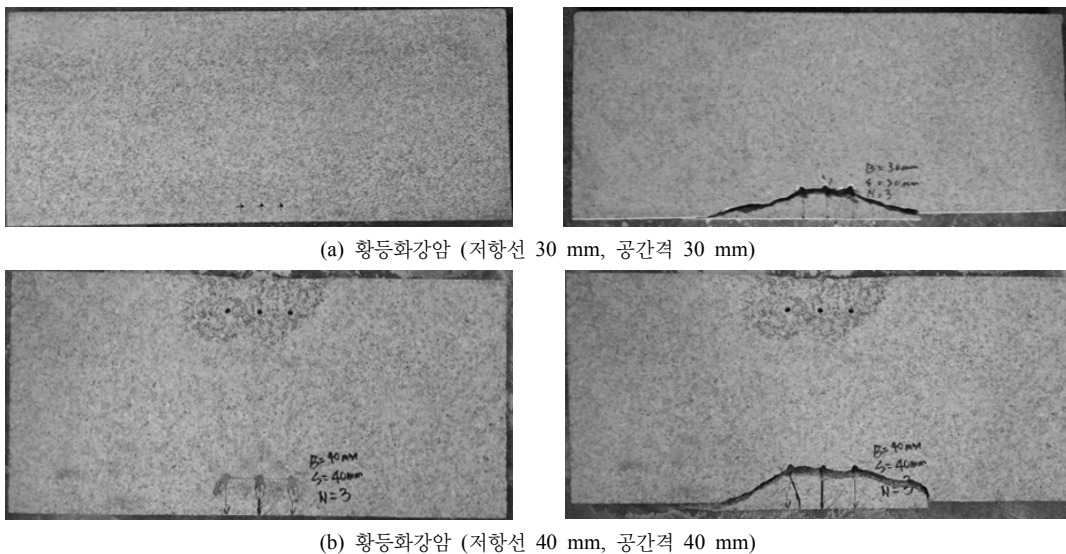


그림 1. 충격하중 실험결과(공수 3공).

표 1. 실내 실험을 통한 재료 물성(정주환, 2010)

	Hwang-deung granite	Acrylic block
bulk specific gravity	2.72	1.2
Apparent porosity (%)	0.49	-
P-wave velocity (m/s)	4550	2750
S-wave velocity (m/s)	2600	1400
Uniaxial compressive strength (MPa)	155	125
Young's modulus (GPa)	54	3.2
Poisson's ratio	0.29	0.4
Tensile strength (MPa)	14	67

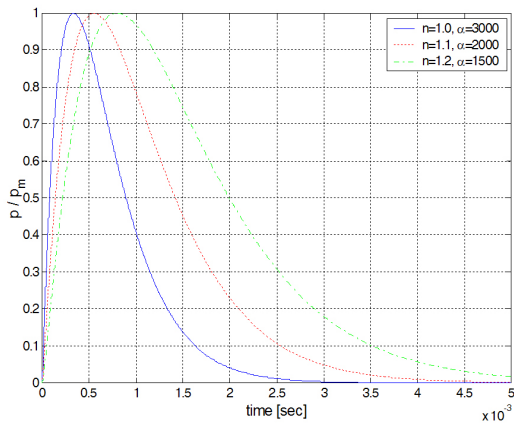


그림 2. 폭압함수의 감쇠관계.

2.4 폭압 산정

폭원모델링에 필수적인 화약발파의 원리는 아직도 완벽하게 규명되지 않고 있으며, 이로 인해 여러 발파 현장에서는 작업상황에 따라 요구되는 요소들, 즉 파쇄도나 비산, 손상의 정도 등을 최적화하는 데 주로 경험적인 방법을 사용해 오고 있다(Persson et al., 1994). 하지만 근래에 들어서는 암석파괴에 대한 수치모델링을 통하여 파쇄도를 예측하는 등의 해석적 방법이 발파의 효율성 증대에 크게 기여하기도 하였다(Potyondy et al., 1996).

본 연구에서는 폭발하중의 함수로서는 Jiang(1993)이 제안한 감쇠함수를 사용하였으며, 이는 지수함수의 꼴로 다음 식과 같이 정의된다.

$$a(t) = t^n e^{-at} \quad (1)$$

식 (1)에서 지수 n 과 α 는 폭속과 관계있는 상수로써 고폭속의 폭약은 n 이 작고 α 가 크며, 저폭속의 폭약은 n 이 크고 α 가 작다. 따라서 고폭속의 폭약은 충격압이 급격하게 상승하고 급격하게 하강하는 뾰족한 펄스의 형태이고, 저폭속으로 갈수록 완만하게 상승 및 하강하여 상대적으로 넓은 폭의 펄스 형태가 된다(그림 2).

2.5 PFC3D를 이용한 개별요소 수치해석

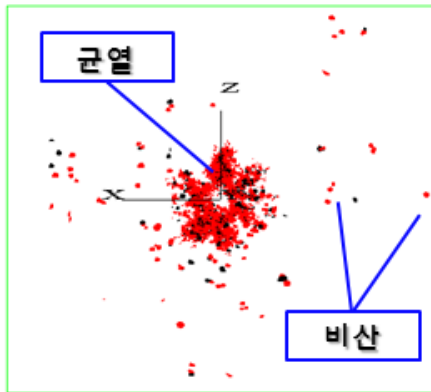
본 연구에서 사용된 PFC3D는 Cundall and Strack (1979)이 개별요소법(DEM)을 적용하여 구상입자(spherical particle)의 운동과 상호작용을 모사한 데에서 비롯된 상용의 해석 프로그램으로서 1995년에 개발된 PFC2D를 기반으로 하고 있다.

결정된 모델을 대상으로 해석하기에 앞서, 일반적인 판재발파의 실험 결과와 PFC3D를 이용한 개별요소 수치해석 결과를 비교하여 보았다. 그림 3(a)는 화강암 판재를 뇌관으로 발파했을 때 나타난 실험결과이며, 그림 3(b)는 이에 대한 해석 결과이다. 그림 3(a)에서 발파공 공구부에서만 파괴가 발생한 것은 뇌관이 발파공 속에 완전히 밀폐되지 않아 3호 뇌관이 갖고 있는 폭력이 암석에 다 전달되지 못했기 때문이다. 이 과정을 모사한 그림 3(b)의 PFC3D 해석결과에서는 발파공 주변에 별 모양으로 방사상의 인장균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림 3(b)의 모델링 결과에서 방사상 균열 주변에 흩어져 있는 점들은 비산으로 날아오르는 입자 요소들이다.

본 연구에서는 앞서 결정된 해석모델에 따라 길이 600mm, 너비 300mm, 두께 30mm의 화강암 판재를 대상으로 하여 사전 정의된 폭발하중을 적용하였을



(a) 화강석(600×600×30mm) 발파 결과



(b) PFC3D 모델링

그림 3. 뇌관발파 실험 및 PFC3D 모델링 결과 비교.

때 나타나는 파괴양상을 모사하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 모델을 구성하는 입자들은 저항선 방향에서 최대속도를 보이며 이동하고, 저항이 가장 큰 모서리 방향으로의 균열의 진전이 관찰되었다(그림 4).

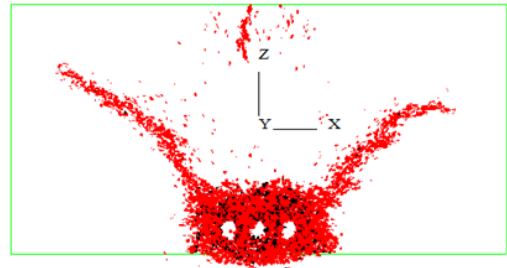
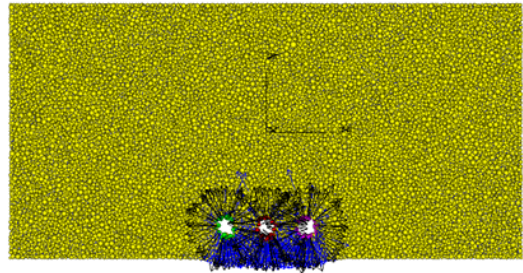
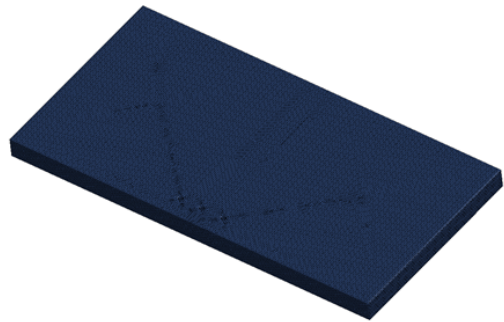


그림 4. PFC3D 해석에 의한 균열발생 양상.



2.6 LS-DYNA를 이용한 유한요소 수치해석

본 해석에서 사용된 LS-DYNA는 비선형 동역학 문제의 해석이 가능한 프로그램으로 재료간의 접촉, 충돌, 폭발과 같이 일반 유한요소해석 프로그램으로는 처리하기 어려운 비선형성 역학 문제의 해결에 사용된다(LS-DYNA, 2003). 모델 규격은 길이 600mm, 너비 300mm, 두께 30mm로 모델링 되었으며, 암석과 콘크리트에 주로 사용되는 Brittle damage material model(MAT_96)에 화강암 물성을 적용하였다. 모델은 비선형 유한요소로서 8절점 육면체 요소를 적용하였으며 요소크기는 3.5mm로 작성하였다. 또한 결과의 정확도를 높이기 위해 20μs의 해석시간간격을 적용하였으며, 발파압력을 고려하여 해석종료시간을 2ms로 설정하였다.

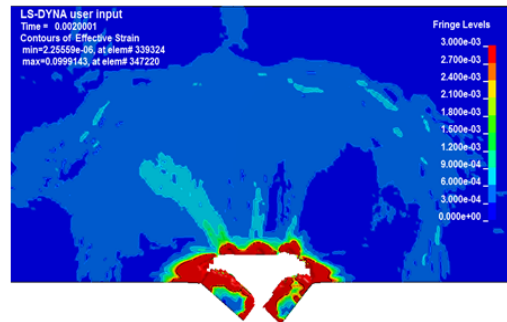


그림 5. LS-DYNA 해석에 따른 파쇄대 및 손상대.

저항선과 공간격의 비는 1:1.2로 각각 30mm, 36mm로 설계하였고, 공경은 9mm로 모델링 하였으며, 폭발하중의 함수로서 Jiang(1993)이 제안한 감쇠함수를 사용하여 작성된 발파압력을 공벽면에 적용하였다.

폭압에 따른 응력분포를 알아보기 위하여 유효변형률(effective strain)로 결과를 확인하였다. 해석결과 벤치발파와 같이 대부분이 저항선 방향으로 균열이 전파되며, 시료에서 저항이 큰 대각선 방향이 주응력 방향이 되어 이 방향으로의 변형이 관찰된다. 또한 발파공 주변에서 파괴 예정선을 벗어난 손상대가 관찰되고 있다(그림 5).

3. 모형발파 실험을 통한 검증 및 고찰

3.1 개요

관재모형 발파실험의 목적은 균질 및 이방성재질에서 뇌관의 폭발시 발생하는 손상대를 파악하고, 유한요소 수치해석의 결과와 비교 및 검증에 있다. 일반적으로 재료의 파괴거동은 변형률 속도에 현저한 영향을 받기 때문에 변형률 속도에 대한 고려가 요구된다.

대부분 수행되어온 정적 하중에 대한 파괴거동과는 달리 폭발하중과 같은 높은 변형률 속도에서의 취성 재료 파괴 거동은 정확하게 예측하기가 힘들다는 한계를 안고 있다. 하지만 이 한계는 충격 실험과 같이 높은 변형률 속도의 실험에 고속 카메라 촬영 기법을 도입함으로써 다소 해결되었다(Erlich and Shockey, 1983). 본 연구에서는 관재모형 발파실험과 동시에 고속카메라 촬영 기법을 활용하여 동적 파괴거동을 관찰하였다.

3.2 모형발파 실험

모형발파 실험에 사용된 재료는 균질성 및 이방성 등을 고려하여 아크릴과 화강암으로 결정하였으며, 크기는 화강암의 경우 길이 600mm, 너비 300mm, 두께 30mm이고, 아크릴의 경우 길이와 너비는 화강암과 같고 두께만 20mm였다. 공수는 벤치발파 내지 의

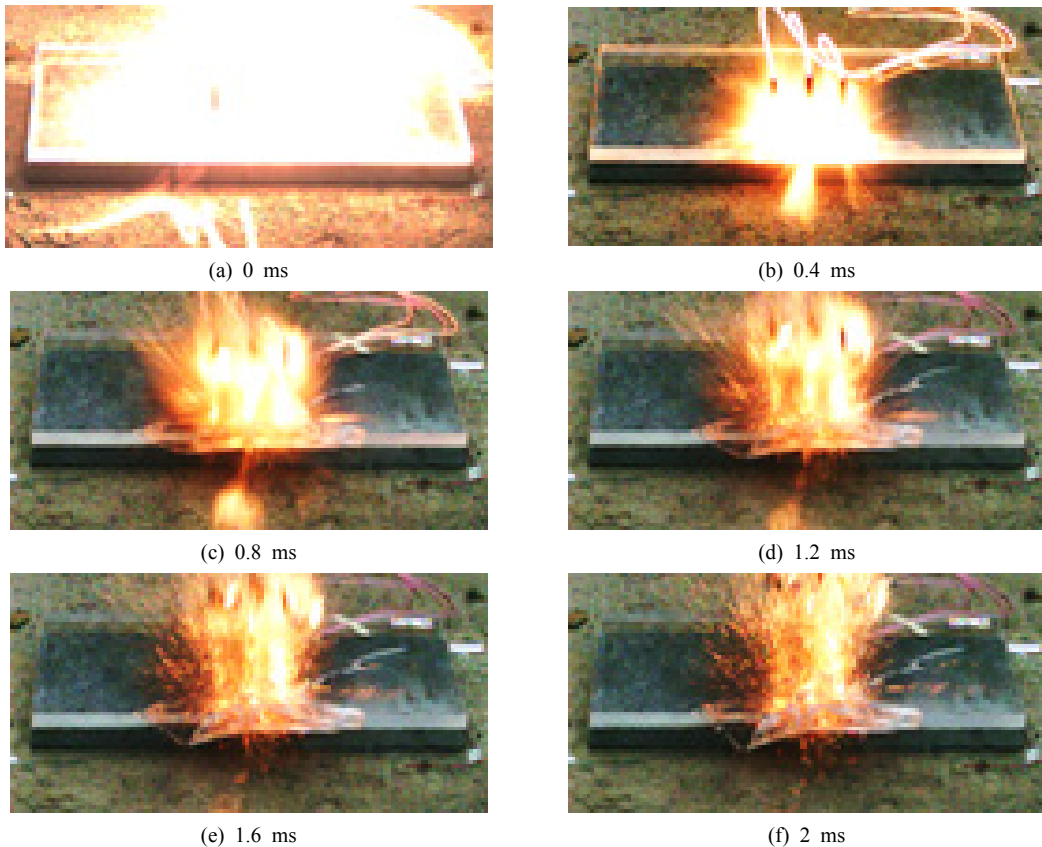


그림 6. 아크릴 시료 고속카메라 촬영 화상(고속카메라 속도 2,500frame/s).

곽공을 염두에 두고 3공으로 고정하였다. 저항선과 공간격에 따른 균열패턴을 확인하기 위하여 저항선과 공간격의 비는 수치해석 모델과 동일한 1 : 1.2로 설정하였고, 저항선은 20mm, 30mm, 40mm로 변화시켰으며, 이에 따른 공간격은 각각 24mm, 36mm, 48mm로 변화시켰다. 실험에 사용된 뇌관은 첨장약이 0.16g인 3호 뇌관을 사용하였으며, 뇌관의 첨장약이 시료의 중심에 위치하도록 아크릴과 화강암의 공깊이는 각각 15mm, 20mm로 하였다.

본 연구에 사용된 초고속 카메라 촬영 시스템은 Phantom사의 Miro eX2로서 640pixels × 480pixels의 최대해상도에서 최대 1,240fps의 촬영수를 갖으며, 최소 노출이 10 μ s인 연속기록이 가능한 고속 촬영 장비이다. 렌즈는 Tamron사의 화각거리 24-70mm, 밝기 F가 2.0인 고성능 렌즈를 사용하여 128pixels × 64pixels의 해상도에서 초당 2,500fps의 촬영수를 조건으로 실험을 수행하였다(그림 6).

실험 결과, 아크릴과 황등화강암 모두에서 최소저항선 방향으로 전단균열이 발생하였으며, 공 내부의 폭발압력으로 인하여 공 주변에 손상대가 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 아크릴의 경우 주응력 방향인

대각선 방향으로 균열이 전파되는 양상이 관찰되었으나, 황등화강암의 경우에는 저항선 B가 30mm, 공간격 S가 36mm인 실험에서 대각선 방향으로 균열이 수직방향으로 진행된 것을 볼 수 있었다. 이는 주응력 방향으로 균열이 전파되다가 인장응력의 영향으로 수직방향의 인장균열이 발생된 것으로 사료된다(그림 7).

3.3 검증 및 고찰

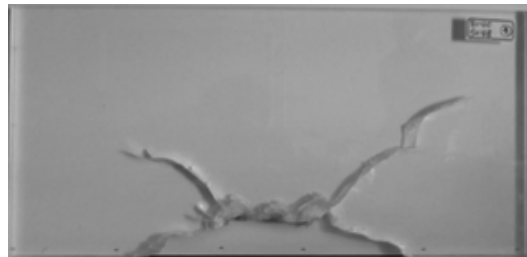
손상대 평가를 위한 폭원모델링 기법의 검증을 위하여 앞서 수행된 수치해석 결과와 모형발파 실험의 결과를 비교하였다. 그 결과 PFC3D에 의한 해석결과는 실제 아크릴 모형발파의 결과와 유사한 균열양상을 보였으며, 주응력 방향의 균열이 비교적 잘 묘사되었다. LS-DYNA 모델의 경우 발파공 주변의 전단 및 인장균열과 손상영역은 비교적 잘 묘사되었으나, 주응력 방향에서의 균열의 경우는 유한요소해석의 한계로 인해 뚜렷한 결과를 보기는 어려웠다(그림 8, 그림 9).

4. 결 언

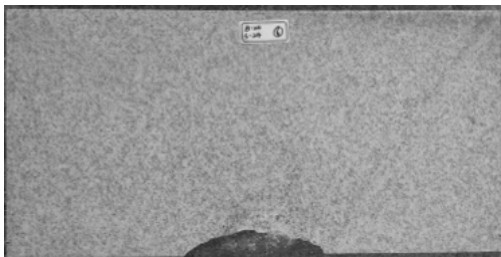
해석결과에 대한 검증은 수치해석 툴을 활용한 폭



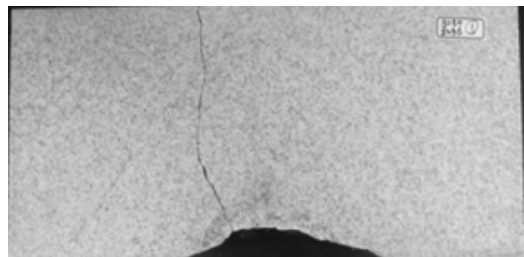
(a) 아크릴
(저항선 20 mm, 공간격 24 mm, 공수 3)



(b) 아크릴
(저항선 40 mm, 공간격 48 mm, 공수 3)



(c) 황등화강암
(저항선 20 mm, 공간격 24 mm, 공수 3)



(d) 황등화강암
(저항선 30 mm, 공간격 36 mm, 공수 3)

그림 7. 모형 발파 실험 결과.

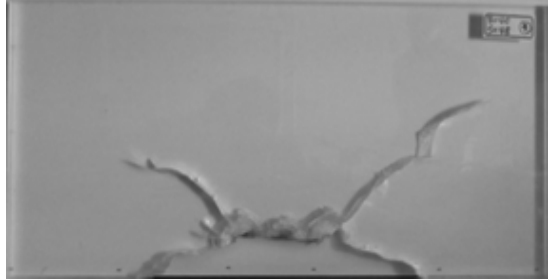
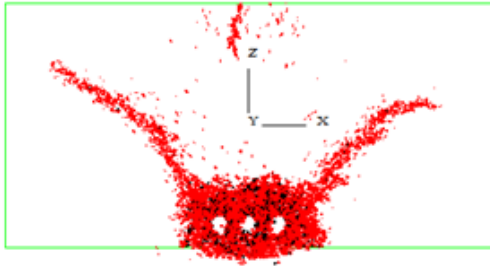


그림 8. PFC3D로 모사된 해석결과(왼쪽)와 모형실험 결과(오른쪽).

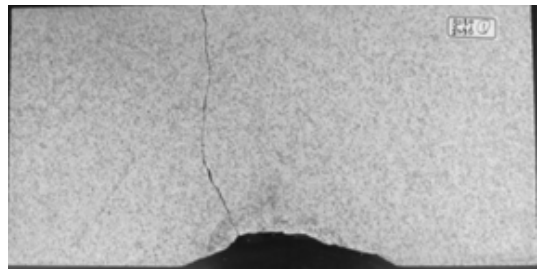
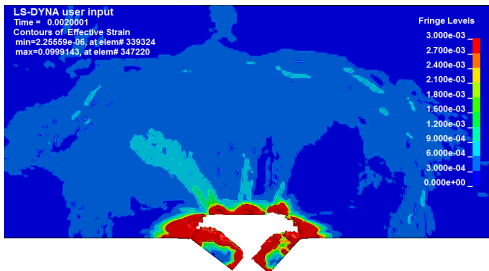


그림 9. LS-DYNA로 모사된 해석결과(왼쪽)와 모형실험 결과(오른쪽).

원모델링에 있어 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 개별요소 코드인 PFC3D와 유한요소 수치해석 프로그램인 ANSYS LS-DYNA를 사용하여 화강암과 아크릴 판재시료에 대한 발파를 모델링하고, 그 과정을 실제 모형발파 실험을 통해 검증하여 보았다. 그 결과 개별요소 코드인 PFC3D의 해석 결과는 아크릴 시료의 모형발파 실험결과와 잘 일치하지만 암석의 경우에는 입력물성에 대한 고찰과 함께 추가적인 해석과 실험이 필요한 것으로 나타났다. 또한 유한요소 코드인 LS-DYNA의 경우에는 응력의 변화양상과 파괴양상은 관찰이 되지만 판재내부에서의 균열진전은 확인하기 어려웠다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발(과제코드 GP2015-010)’의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정주환, 2010, 탄성파속도 측정법을 이용한 암반손상 대 평가, 공학박사 학위논문, 전남대학교 대학원.
2. Cundall P.A. and O.D.L. Strack, 1979, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29, pp. 47-65.
3. Donze F.V., J. Bouchez and S.A. Magnier, 1997, Modeling fractures in rock blasting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* Vol. 34, No. 8, pp. 1154-1163.
4. Erlich D. C. and M. W. Shockley, 1983, Dynamic flow curve of 4340 steel as determined by the symmetric rod impact test, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 129-332.
5. Jiang J., 1993, Vibration due to a buried explosive source, Ph.D. thesis, Western Australian School of Mines.
6. LS-DYNA keyword user's manual version 970, 2003, Livermore Software Technology Corporation.
7. Persson P.A., P. Holmberg and J. Lee, 1994, *Rock blasting and explosives Engineering*, CRC press, pp. 540.
8. Potyondy D.O. and P.A. Cundall, 1996, Modeling of shock and gas-driven fractures induced by a blast using bonded assemblies of spherical particles, *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, Rotterdam, pp. 55-61.



최 병 희

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr



강 명 수

한국지질자원연구원
지구환경연구본부
석사후연수자

Tel: 042-868-3904
E-mail: kcms2000@kigam.re.kr



류 창 하

한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3236
E-mail: cryu@kigam.re.kr



김 재 응

(유)동광 기획관리부장

Tel: 063-453-1884
E-mail: novoct1@hanmail.net