화약 · 발파, 대한화약발파공학회
제21권 제4호, 2003, pp. 37~42

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 21, No. 4 (2003) pp. 37~42
J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

발파원 모델링을 위한 수치해석적 고찰

백 승규[1], 류 창하[1]

A Study on the Numerical Modelling of Blast Source

Seung-Kyu Baek and Chang-Ha Ryu

ABSTRACT. The source of rock breakage by explosive blasting is the energy released from an explosive. It is transmitted to the surrounding rock mass causing various types of fracture of rock material. The reaction of explosives and the resulting action on the surrounding rock mass are completed in very short time, making it almost impossible to observe the processes occurring in the interior of the rock mass. In this study several input parameters are investigated by numerical modelling of blast source and dynamic response of rock mass. It is shown that damping coefficient and rising time are major parameters affecting dynamics response of rock mass.

Key words : numerical modelling, dynamic analysis, blast source, rising time, damping constant

초 록. 화약발파에 의한 암반의 파괴는 폭약의 열화학적 반응에 의해 생성되는 에너지가 주위 암반으로 전달되면서 발생한다. 폭약의 반응은 매우 짧은 시간에 격렬하게 이루어지므로 실험적 관찰이 용이하지 않을 뿐만 아니라, 암반을 대상으로 발파할 경우 암반의 불균질성, 이방성으로 인해 동일한 조건으로 실험을 하더라도 특성상 정량적 정성적으로 똑같은 상황을 반복적으로 재현하여 실험하는 것도 불가능하다. 따라서 폭약으로부터 발생하는 에너지와 암반으로의 전달과정은 암반 파괴의 에너지원으로서 매우 중요하면서도 명확히 파악되지 않은 부분이다. 본 논문에서는 수치해석적 방법으로 발파원과 암반의 거동을 모델링하여 발파원의 특성이 암반 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 주요 결과로는 발파원과 관련된 입력 자료로서 감쇠상수와 발파공벽에 가해지는 압력의 증가시간에 따라 암반의 동적 거동이 상이하게 나타났으며, 동적 거동을 결정짓는 두 입력 변수의 상호관계를 유도할 수 있었다.

핵심어 : 수치해석, 동적해석, 발파원, 증가시간, 감쇠상수

1. 서 론

화약발파에 의한 암반의 파괴는 폭약의 열화학적 반응에 의해 생성되는 에너지가 주위 암반으로 전달되면서 발생한다. 폭약의 반응은 매우 짧은 시간에 격렬하게 이루어지므로 실험적 관찰이 용이하지 않을 뿐만 아니라, 암반을 대상으로 발파할 경우 암반의 불균질성, 이방성으로 인해 동일한 조건으로 실험을 하더라도 특성상 정량적 정성적으로 똑같은 상황을 반복적으로 재현하여 실험하는 것도 불가능하다. 따라서 폭약으로부터 발생하는 에너지와 암반으로의 전달과정은 암반 파괴의 에너지원으로서 매우 중요하면서도 명확히 파악되지 않은 부분이다. 본 논문에서는 수치해석적 방법으로 발파원과 암반의 거동을 모델링하여 발파원의 특성이 암반 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 동적 수치해석을 위해 결정해야 할 입력 자료들은 크게 모델의 구성과 관련된 부분, 해석 대상 매질의 물성과 관련된 부분, 해석 기법과 관련된 부분으로 구분할 수 있다. 입력 변수 중 해석 결과에 크게 영향을 주는 것으로 예측되는 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수에 대한 입력 변수에 대한 분석을 실시하기 위하여 동일한 균열발생 길이일 경우 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수를 변화시키며 결과들을 고찰하였으며, 실제 발파 거동을 모사할 수 있는 적절한 조건과 값들을 제시하고자 하였다.

1) 한국지질자원연구원

집수일 : 2003년 12월 10일

2. 해석 조건

3차원 유한요소 해석 프로그램으로 이미 탄성 및 탄소성, 동하중 해석이 있어 세계적으로 결과의 적합성이 검증되어있는 ANSYS program package (Swanson Analysis System Inc., revision 5.3)는 암석과 같은 탄소성 취성재료의 파쇄와 균열을 나타내어줄 수 있는 특징이 있을 뿐만 아니라 동적인 해석도 가능하므로 본 연구에서 수행하고자하는 발파시 발생되는 공벽 주변의 파쇄영역과 균열 전파를 적절히 모사하기에 적합하다고 판단하였다.

해석은 한변의 길이가 45 cm인 정방형 시멘트 모르타르 블록에 공경 15 mm, 공깊이 30 cm로 천공된 발파공에 PETN을 이용하여 발파를 하였을 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 발파에 대한 해석이므로 동적 해석을 실시하였으며, 입력 물성 값은 실험을 통하여 구해진 동적 물성값을 입력값으로 하는 것이 타당하지만 발파 현상과 같은 조건을 재현하는 것이 매우 어려우므로 실험실 물성값으로부터 추정식을 사용하여 입력값을 결정하였다.

콘크리트의 경우 동적 인장강도와 동적 압축강도는 실험실 실험 물성 값에 비하여 약 10 %정도 높다고 알려져 있으므로[2), 4)], 콘크리트의 동적인 물성 값 추정을 인용하여 모르타르의 동적 물성값을 계산하였다.

Table 1은 동적인 물성값을 계산한 예로서 시멘트 모르타르의 실험실 물성값과 추정식에 의해 계산된 동적 물성값을 정리한 것이다.

Table 1. Static and dynamic properties of cement mortar.

Property	Static	Dynamic
Young's modulus	2.1 ± 0.2 GPa	
Poisson's ratio	0.167 ± 0.02	
Tensile strength	1.5 ± 0.2 MPa	1.65 MPa
Uniaxial compressive strength	11.5 ± 0.5 MPa	12.65 MPa
Density	1,945 ± 15 kg/m^3	

폭약은 매우 짧은 시간에 급격한 열화학 반응을 일으키는 물질로서, 이때 발생되는 높은 온도의 열과 소리, 빛, 압력이 공기 또는 매질에 전달되며 주변 물질을 파괴하는 특성을 가진다. 주변 물질을 파괴 하는데 가장 큰 역할을 하는 것은 폭약의 열화학반응 시 발생되는 폭굉압력으로 알려져 있으며[6)], 높은 압력을 가지는 충격파(응력파)의 형태로 나타난다. 폭굉압력을 폭약 내부에서 직접 계측하는 것은 불가능하며, 여러 연구자들이 폭약의 화학적 평형방정식과 간접 계측 실험에 의한 경험적 수정 항을 조합하여 폭굉압력을 계산하는 식들을 제시하였다.

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 국제화약학회(ISEE, International Society of Explosives Engineers)에서 제시한 식 (1)로 폭굉압력을 계산하였다. 또한 폭약과 발파공 벽면의 밀착정도(디커플링, decoupling)에 따라 발파공 벽면에 작용하는 폭굉압력의 크기가 변한다고 알려져 있으며[1), 6)], 디커플링에 따라 변하는 폭굉압력의 크기를 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다. 공 벽면에 작용하는 발파압력의 크기를 식 (1)과 식 (2)로 계산하여 입력 자료로 사용하였다.

$$P_d = 2.5\,\rho_e\,D_e^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$P_B = P_d \times \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad (2)$$

여기서, P_d: 폭굉압력 (kbar)

P_B: 디커플링 폭굉압력 (kbar)

d_c: 약경

d_h: 공경

발파공 벽면에 작용하는 발파압력은 PETN의 값들(폭속: 8000 m/sec, 비중: 1.75, 약경: 8 mm)을 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 계산하였으며, 장약량 1 g일 경우 계산된 값은 46 MPa이다. 모델은 원형공의 해석이므로 모델의 대칭성을 이용하여 45 cm 정방형 블록의 1/4인 22.5×22.5×45 cm로 구성하였다. 모델의 전체 요소수는 11495개이고, 절점수

는 2488개이며, 8절점 삼각뿔 요소를 사용하였다. Fig. 1은 시멘트 모르타르 블록에 대한 수치해석을 실시하기 위하여 구성한 유한요소 모델을 나타낸 것이다.

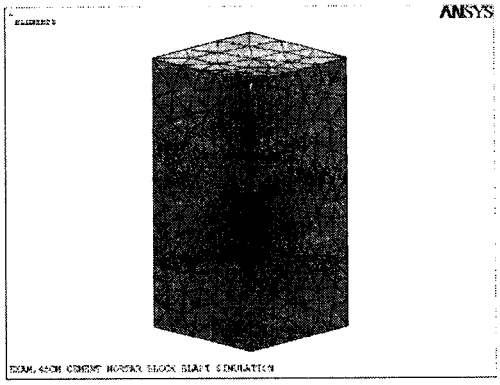


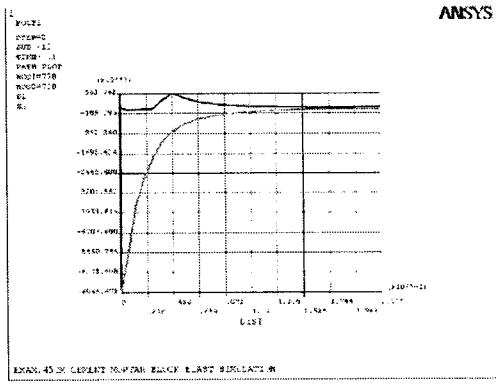
Fig. 1. A finite element model of cement mortar block for 3D elasto-plastic dynamic analysis.

3. 해석결과 및 고찰

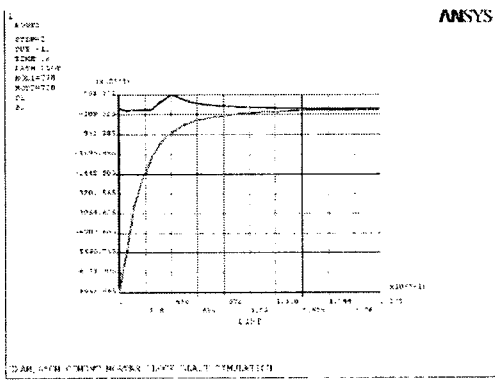
최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수는 함께 변화시키며 균열 발생 범위가 약 50 mm인 경우에 상응하는 시간과 상수값를 구하고자 하였다. 증가시간과 감쇠상수 중 감쇠상수는 물질의 감쇠정도를 나타내는 0-1까지 범위의 값으로, 0일 경우 감쇠가 일어나지 않는 것이고, 1일 경우 완전 감쇠가 일어나는 것이다. 감쇠상수의 범위가 0-1사이로 한정되어 있으므로 감쇠상수 값을 일정하게 변화 시키며 증가시간을 구하였다. 모르타르의 감쇠상수가 포함되었다고 판단되는 범위인 0.01-0.20까지는 0.01씩 증가시켰으며, 이후 0.20-0.90까지는 0.05씩 증가시키며 해석을 실시하였다. 동일한 해석과정을 반복하여 실시하며 균열 발생 범위가 약 50 mm인 경우의 증가시간들을 구하였다.

총 60여회의 해석을 실시하여 발생된 균열 범위가 50 mm인 실험 결과와 근사하는 경우들을 분석한 결과 34회의 경우가 이에 해당하였다.

Fig. 2는 균열 발생 범위가 약 50 mm인 경우에 대한 해석 결과를 나타낸 것으로 34회의 결과 중 감쇠상수가 0.01과 0.90이었던 경우로서 공 벽면으로부터 바깥쪽 경계면까지의 주응력들의 분포를 나타낸 것이다. 해석 결과 균열 발생 범위는 51 mm이었으며, 파쇄는 발생하지 않았다.



(a) Results for damping constant, 0.01 and rising time, 0.005 sec



(b) Results for damping constant, 0.90 and rising time, 0.45 sec.

Fig. 2. Principal stress distribution along radial direction for cement mortar block.

해석결과 유사한 균열발생 범위를 가져오는 동적 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수는 상호 연관되어 있는 것으로 나타났다. 구해진 34회의 경우에 대한 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수의 관계는 Fig. 3과 같이 선형적으로 나타났으며, 이로부터 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수의 선형적인 관계에 대한 식 (3)을 유도하였다.

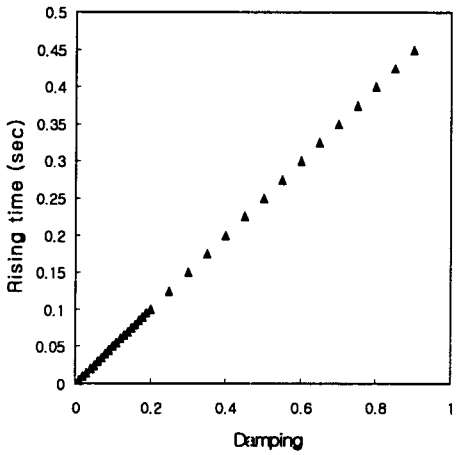


Fig. 3. Relationship between rising time and damping constant showing similar results for mortar block.

$$T_{peak} = 0.5\,D \qquad (3)$$

여기서, T_{peak}: 최대압력까지의 증가시간

D: 감쇠상수

균열 발생 범위가 51 mm로 나타났던 34회의 모든 경우들에 대하여 주응력 분포를 비교하기 위하여 임의 절점들을 선택하였으며, Fig. 4는 모델내 임의 절점들의 위치를 나타낸 것으로, 그림상의 숫자는 각 절점의 번호들이다.

각 절점에서 주응력들을 비교한 결과 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었으며, Fig. 5는 감쇠상수에 대한 주응력들을 그래프로 비교한 것으로 34회의 평균 주응력과 가장 큰 차이를 보인 337번 절점의 경우를 예로 나타낸 것이다.

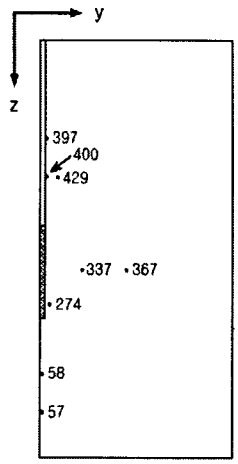


Fig. 4. Location nodes selected for comparison of stress distribution.

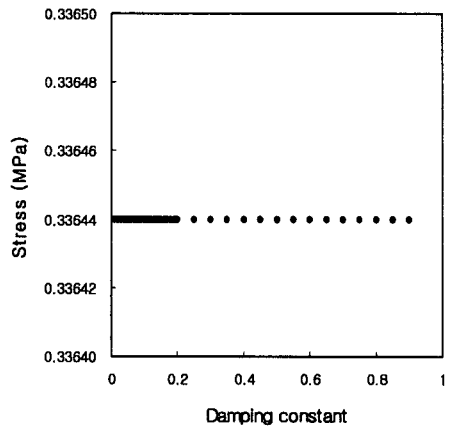
Fig. 5(a)는 최대주응력이고, Fig. 5(b)는 최소주응력이다. 34회의 평균 주응력에 대한 주응력의 편차가 최대 약 0.2 %로 나타났으나 그래프 상에서는 구분이 어려우며, 이외의 절점들에서도 차이가 나타나지 않았다. 또한 균열 발생 범위는 0.1 mm 단위까지 비교하여 보았을 때 34회 모두 발파공 중심으로부터 공벽 방향으로 51.0 mm로 나타났다.

이러한 결과에서 유추하여 볼 때 실제 물질의 감쇠상수와 최대압력까지의 증가시간은 각각 특정한 값을 가지지만 0-1사이에 있는 임의값을 감쇠상수로 결정하고, 식 (3)으로 최대압력까지의 증가시간을 계산하여 두 값을 결정한 후 수치해석을 실시하여도 발파공벽 주변의 균열 발생 모사가 가능할 것으로 판단된다.

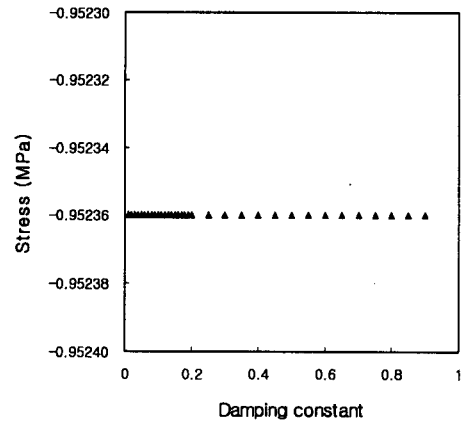
발파에 대한 수치해석을 실시하기 위하여 실제 감쇠상수에 대한 자료들을 근거로 증가시간과 감쇠상수 값을 유도된 관계식을 이용하여 결정하기로 하였다.

모르타르의 경우 동적 수치해석 입력 자료인 최대압력까지의 증가시간과 감쇠상수를 결정하기 위하여 먼저 콘크리트의 감쇠상수를 참조하였다. 콘크리트의 감쇠상수는 0.02로 알려져 있으므로[3), 5)] 이를 식 (3)에 대입함으로써 감쇠상수는 0.02, 최대

압력까지의 증가시간은 0.01 sec로 결정할 수 있었다.



(a) maximum principal stress



(b) minimum principal stress

Fig. 5. Principal stresses and damping constants at node no.337 for cement mortar block.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 연구결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 발파공 벽면에 작용하는 발파압력의 크기는 국제화약학회에서 제시한 식과 디커플링 발파압력 계산식을 이용하여 결정하였으며, 동적 물성값은 추정식을 사용하여 계산하였다. 암반의 거동에 대한 영향은 균열 발생 길이로 비교하였다.

2) 수치해석 결과, 균열 발생범위로 고찰한 암반의 동적 거동은 압력의 증가시간과 감쇠상수에 따라 상호 연관되어 나타났다. 유사한 암반거동을 가져오는 증가시간과 감쇠상수의 관계식은 다음과 같이 유도되었다.

$$T_{peak} = 0.5\,D$$

최대압력까지의 증가시간은 폭약조건과 발파공이 천공된 암반상태 및 디커플링 등의 조건에 따라 특정한 값을 가지며, 감쇠상수 역시 재료 고유의 물성으로서 물성 값을 가진다. 그러나 해석상에서는 0에서 1사이에 있는 임의 값을 감쇠상수로 결정하고 유도된 관계식으로 최대압력까지의 증가시간을 계산하여 두 값을 결정한 후 수치해석을 실시하여도 발파공벽 주변의 균열 발생 모사가 가능함을 의미한다.

3) 모르타르 모델에 대한 발파의 경우 실제 감쇠상수에 대한 자료들을 근거로 증가시간과 감쇠상수 값을 상기 유도식을 이용하여 계산하면 감쇠상수 0.02, 증가시간 0.00375 sec으로 나타났다.

실제의 물리적 현상이나 재료가 갖는 고유한 물성을 고려한다면 유일한 값들이 존재할 것이다. 따라서 본 연구에서 유도한 식으로부터 계산되는 여러 조합의 입력자료들은 수치해석적 모델링에서는 의미가 있을 수 있으나 물리적으로는 어떠한 의미를 갖는지 또 다른 문제를 내포하고 있다.

참 고 문 헌

1. Atlas powder company, 1987, Explosives and rock blasting, Atlas powder company, 662p.
2. Ballatore, E. and Bocca, P., 1997, Variations the mechanical properties of concrete subjected to low cyclic loads, Cement and Concrete Research, Vol.27, pp.453-462.
3. Chopra, A.K., 1995, Dynamics of structures, Prentice hill, pp.409-417.
4. Olivares, F.H., Barluenga, G., Bollati, M. and Witoszek, B., 2002, Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.1987-1996.
5. Orak, S., 2000, Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.171-174.
6. Persson, P.A., Holmberg, P. and Lee, J., 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC press, 540p.