

현장계측 진동파형을 이용한 발파 동해석에 관한 연구

최성웅¹⁾ · 김재동²⁾ · 선우춘³⁾

1. 서론

일반적으로 발파작업으로 인하여 발생하는 발파진동은 주변 암반 및 구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 발파 작업시 최대한 진동 발생을 억제하는 것이 매우 중요한 과제 중의 하나이다. 이러한 발파진동의 크기와 전파특성에 크게 영향을 미치는 주요 요인으로는 암반 내 불연속면의 상태, 암반 강도 등과 같은 지질특성, 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리 등을 들 수 있다.

암반내 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인하여 진동전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며, 같은 암반에서도 현장의 발파조건 등에 따라 전파특성이 달라지므로 경험적인 연구의 중요성이 부각되어 왔다.

그러나 최근 들어 컴퓨터의 급속한 발달과 다양한 해석용 프로그램들의 개발로 인하여 수치해석법에 의해 발파현상을 해석하고 그 결과를 예측하고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구 중에는 발파로 인한 암반내 응력과와 진동 전달에 관한 내용도 포함되어 있다¹⁻⁴⁾.

특히 Chen 등(1998, 2000)은 유한요소 프로그램인 AUTODYN-2D를 이용하여 연속체 암반에서의 폭발과정을 모사함으로써 주변 암반의 폭발이력을 진동속도 또는 압력의 형태로 구하였으며, AUTODYN-2D 해석결과로부터 얻어진 폭발이력을 UDEC 해석 모델에 적합한 입력파형으로 변환하여 사용한 바 있다.

하지만 발파현상이 폭발적인 동적 압력에 의해 짧은 시간동안 일어나는 특징이 있어^{6,7)}, 실제 발파에서 나타나는 순간적인 충격에 의한 변형 파괴거동 및 발파압력이 전파되어 가면서 발생하는 감쇠현상을 수치해석적으로 정확히 모사하는 것은 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 발파현상을 모사하기 위한 기존의 수치해석 모델링기법을 살펴봄으로써 그 문제점을 분석하고, 현장에서 직접 측정된 발파진동파형을 수치해석의 입력치로 활용하는 방법의 현장 적용을 통해 그 적정성을 살펴보고자 한다.

2. 발파 동해석방법

2.1 발파압력 이력곡선을 이용하는 기존의 방법

발파현상을 모사하기 위한 수치해석에서는 이러한 발파현상을 프로그램 내에서 정확히 모사할 수 없기 때문에 모델 경계면에 발파하중을 가하는 형태로 수행되는 것이 일반적이다. 이와 같이 입력 자료로 사용되는 발파하중은 이론적인 계산식 및 경험식에 의해 추정된

1) 강원대학교
2) 강원대학교
3) 한국지질자원연구원

압력값을 사용하고 있으며, 주로 단일공 발파를 기준으로 제안되고 있다. 시간에 따른 발파 압력곡선 또한 간단한 Sine 파의 형태를 띠는 것으로 간주하는 것이 일반적이며, 다수공을 사용하는 터널발파를 모사함에 있어도 굴착예정인 터널 주변장에 등가의 압력을 가하는 것으로 해석하는 것이 지금까지의 해석방법이었다.

폭약은 매우 짧은 시간에 급격한 열화학적 반응을 일으키는 물질로서, 이때 발생하는 높은 온도의 열과 소리, 빛, 압력이 공기 또는 매질에 전달되며 주변 물질을 파괴하는 특성을 가진다. 주변 물질을 파괴하는데 가장 큰 역할을 하는 것은 폭약의 열화학 반응시 발생하는 폭굉압력으로 알려져 있으며⁷⁾, 높은 압력을 가지는 충격파(응력파)의 형태로 나타난다.

폭굉압력을 폭약 내부에서 직접 측정하는 것은 불가능하며, 여러 연구자들이 폭약의 화학적 평형방정식과 측정실험에 의한 경험적 수정항을 조합하여 폭굉압력을 계산하는 식들을 제안한 바 있으며, 이를 정리하면 Table 1 과 같다.

Table 1. Equations proposed by several researchers for calculation of detonation pressure

제안자 및 계산식	용어 및 사용단위
Johannson & Persson, 1973 $P_d = 2.1(0.36 + \rho_e)D_e^2$	P_d : detonation pressure (kbar) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (km/s)
Jones & Hino, 1974 $P_d = 0.000424D_e^2 \rho_e (1 - 0.543\rho_e + 0.193\rho_e^2)$	P_d : detonation pressure (g/cm ²) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (cm/s)
Atlas powder company, 1987 $P_d = 2.325 \times 10^{-7} \times \rho_e \times D_e^2$	P_d : detonation pressure (kbar) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (ft/s)
National Highway Institute (US), 1991 $P_d = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times \rho_e \times D_e^2}{1 + 0.8\rho_e}$	P_d : detonation pressure (kbar) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (ft/s)
Liu & Tidman, 1995 $P_d = 1.62 (\rho_e D_e^2) \left(\frac{\rho_r \times C}{\rho_e \times D_e} \right)^{0.25}$	P_d : detonation pressure (kbar) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (km/s) ρ_r : rock density (g/cm ³) C : sound velocity in rock (km/s)
International Society of Explosive Engineers, 2000 $P_d = 2.5 \times \rho_e \times D_e^2 \times 10^{-6}$	P_d : detonation pressure (kbar) ρ_e : explosive density (g/cm ³) D_e : detonation velocity (m/s)

Table 2. Calculated detonation pressure for the emulsion series explosives

폭굉압력식의 제안자	계산된 폭굉압력 (MPa)
Johannson & Persson, 1973	11,404
Jones & Hino, 1974	11,093
Atlas powder company, 1987	10,454
National Highway Institute (US), 1991	9,589
Liu & Tidman, 1995	7,135
International Society of Explosive Engineers, 2000	10,443

Table 2 는 제시된 계산식들을 사용하여 비중 1.2, 폭속 5,900m/sec의 국내산 에멀전 계열 폭약의 폭굉압력을 계산한 값들을 나타낸 것이다. 제시된 여러 식들을 사용하여 폭굉압력을 검토한 결과 그 차이가 10% 이내로 크지 않다.

다만 Liu & Tidman(1995)이 제안한 반경험식(semi-empirical equation)만이 다소 낮은 폭굉압력을 보여줄 뿐이다. 그 이유는 Liu & Tidman 제안식이 다른 식들과는 달리 암반의 비중 및 탄성과 속도에 따라 발파공에 작용하는 최대압력을 달리 계산할 수 있기 때문이다. 실제로 발파에 의해 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변하는 형태를 취하므로, 발파 동해석을 정확하게 모사하기 위해서는 동압력의 시간이력을 정확하게 반영하여야 한다. 터널발파에 사용되는 수많은 발파공들은 여러 개의 공들이 한 조를 이루어 동일 단차를 가지고 폭발된다. 하지만, 발파압력 추정식을 사용하는 동해석에서는 실제 터널발파에 사용되는 모든 발파공들을 개별적인 요소로 모델링하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 동시에 폭발되는 모든 발파공들이 존재하는 예상 굴착면을 하나의 발파면으로 가정하고, 그 압력이 굴착예정면의 터널단면에 작용하는 것으로 가정하여 등가의 발파압력인 P_B 를 구하여 사용하는 것이 일반적이다.

발파압력을 사용한 추정식들은 폭약에 의한 폭발상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하는 것이 대부분이므로, 실제 폭발압력보다 높은 압력을 가지는 것으로 계산된다. 하지만 폭발로부터 발생하는 모든 에너지가 발파진동의 전달에 사용되는 것이 아니므로, 발파압력을 적절하게 감소시켜야 한다. 즉, 발생에너지의 대부분이 암석의 파쇄 및 균열발생에 사용되고, 구조물의 안정성에 영향을 미치는 발파진동의 발생 및 전달에 사용되는 에너지는 작은 부분을 차지한다. 여러 연구자에 의하여 지금까지 밝혀진 바로는 폭발 에너지 중 탄성파의 전달에 사용되는 폭발에너지는 진동을 전달하는 암중 및 사용된 화약의 종류에 따라 다르지만 대체적으로 5~50%의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 사실로부터 실제 진동전달에 사용되는 폭발에너지를 정확히 추정하는 것은 거의 불가능하고, 발파압력의 지속시간 또한 폭약의 장전상태, 전색조건 및 암반조건 등에 따라 달라지는데 이를 단순한 Sine 함수형태로 가정하여 해석하는 것은 다소 무리가 있다고 볼 수 있다.

결론적으로, 발파압력 추정식들을 사용하는 동해석은 가장 중요한 입력자료인 발파하중의 산정에 있어서 많은 문제점을 가지게 된다. 즉, 발파압력의 크기, 형태 및 지속시간을 정확하게 산정할 수 없다는 것이다.

2.2 현장에서 계측된 진동파형을 이용한 해석방법

이론식 및 경험식으로부터 구한 발파압력을 사용하는 방법은 동해석에서 매우 중요한 입력자료인 실제 발파압력 및 지속시간을 정확히 추정하기 어렵고, 발파로 인한 지반진동을 제대로 모사할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

이런 문제점을 해결하기 위하여, 본 해석에서는 현장에서 기반암에 대하여 시추공 발파를 실시하고, 발파지점으로부터 일정 간격으로 측정된 발파진동파형을 근거로 추정된 발파지점의 진동파형을 이용하였다. 이와 같이 발파진동파형을 수치해석의 입력자료로 이용하는 것이 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더 정확하게 반영하게 된다. 그 이유는 구조물의 안정성을 평가하는 기준은 주로 지반의 진동속도를 근거로 하고 있으며, 입력자료인 발파진동파형은 발파진동이 전달되는 지반의 특성을 반영한 진동파형을 실제로 모사할 수 있기 때문이다.

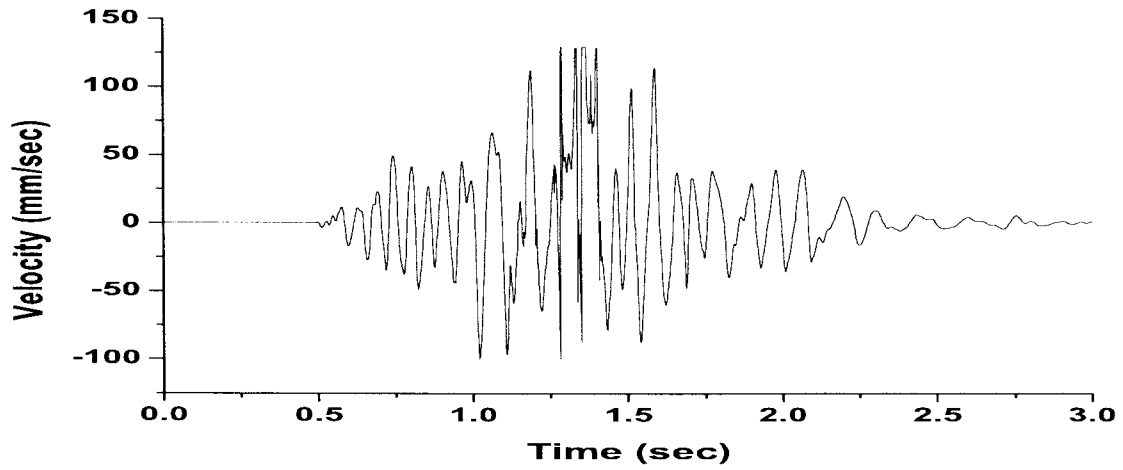
발파 동해석에 사용될 진동파형을 구하기 위하여 다음과 같은 계산과정을 실시하였다.

실제 발파작업시 발파지점으로부터 2m 이격된 지점에서의 발파진동을 정량적으로 추정하기 위하여 시험발파에서 구해진 현지반의 발파진동 추정식을 이용하여 보정하였다. 즉, 시험발파를 통해 폭원으로부터 30m 떨어진 지점에서의 진동을 실제 측정하는 한편, 발파진동 추정식으로부터 30m 떨어진 지점의 진동속도를 계산함으로써 실제측정값과 추정값의 비율을 구하였다. 이 비율을 이용하여 발파진동 추정식으로부터 계산된 2m 지점에서의 진동속도를 보정하였다. 발파지점이 아닌 2m 이격된 지점의 값을 구한 이유는 발파로 인한 주변 암반의 소성영역 발생을 고려하여 순수히 진동파 전달에만 에너지가 소모되는 탄성구간으로 여겨지는 지점이기 때문이다.

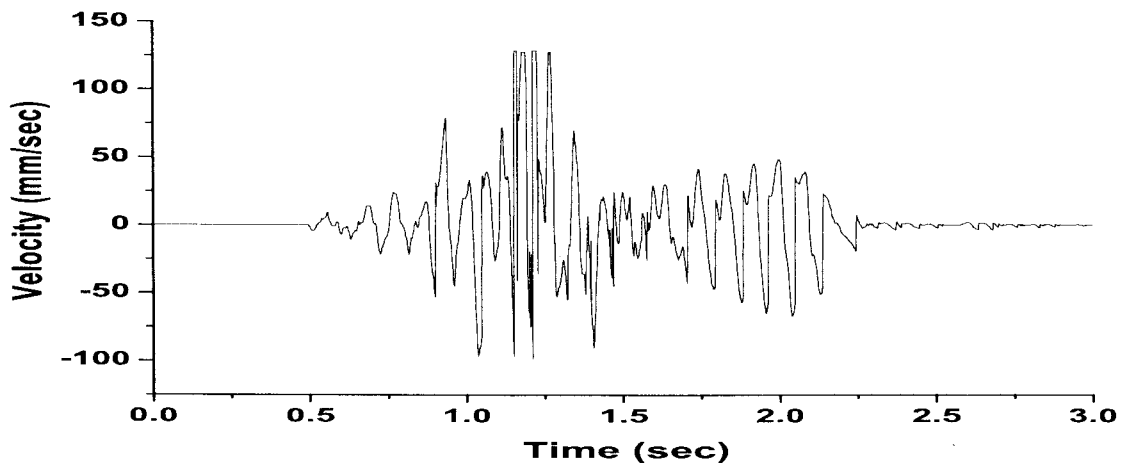
Fig. 1은 현장 시험발파 (최대 지발당 장약량: 100kg)로부터 구해진, 폭원으로부터 30m 떨어진 지점에서의 실측된 입자속도 파형을 도시한 것이다.

최대 폭굉압은 Liu & Tidman(1995)의 제안식에 따라 계산하였으며, 오름시간(rise time) 및 지속시간(duration)은 0.00006초 및 0.0006초로 가정하여(Fig. 2 참조) 주변 암반내 발생되는 발파진동을 살펴보았다. 해석결과는 Fig. 3에 나타나 있다.

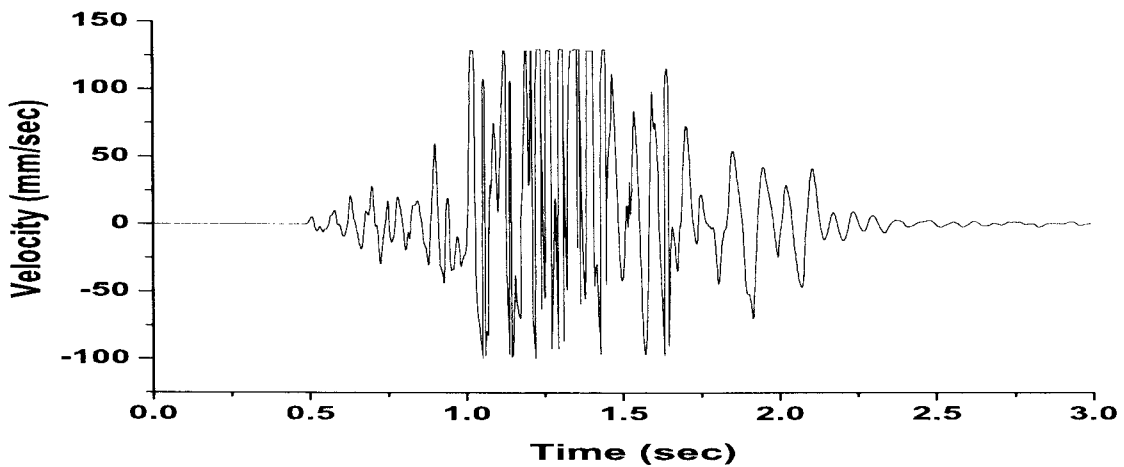
이를 정리하여 나타내면, Table 3에서 보는 바와 같이 폭원의 입력형태로 진동속도파형을 사용한 경우가 파형의 형태 뿐만 아니라 진동속도에 있어서도 발파압력곡선을 사용한 경우에 비하여 합리적인 것으로 보여진다.



(a) Longitudinal component



(b) Vertical component



(c) Transverse component

Fig. 1. Measured vibration waveform patterns obtained from the test blasting

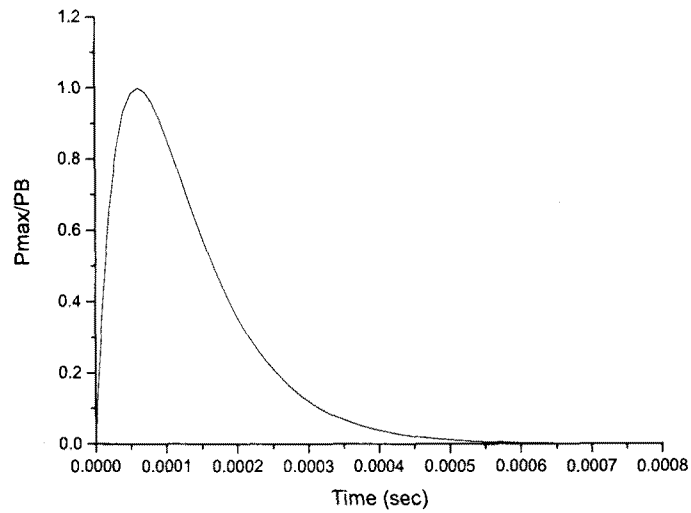


Fig. 2. Time history curve for the dynamic pressure acting on a borehole wall at the moment of blasting

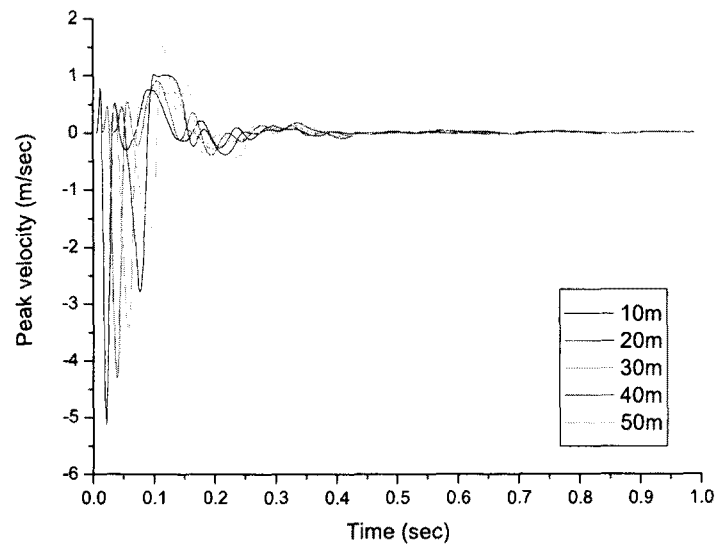


Fig. 3. Time history curves for blasting vibration

Table 3. Vibration velocities(mm/s) distribution at each locations according to the different input wave types

측정위치	10m	20m	30m	40m	50m
입력파형					
발파압력곡선	5122.8	4312.4	3415.5	2787.7	1787.5
진동속도파형	1437.9	1094.3	997.8	802.2	616.9

3. 결론

지금까지의 지반 동하중 해석은 대개 발파하중을 입력자료로 이용해 왔다. 이는 발파현상을 수치해석적으로 정확히 모사하기가 쉽지 않기 때문이며, 따라서 모델 경계면에 발파하중을 가하는 형태로 수행되어 왔기 때문이다.

이와 같이 입력 자료로 사용되는 발파하중은 이론적인 계산식 및 경험식에 의해 추정된 압력값을 사용하고 있으며, 주로 단일공 발파를 기준으로 제안되어 왔다. 시간에 따른 발파 압력곡선 역시 간단한 Sine 파의 형태를 띠는 것으로 간주하는 것이 일반적이며, 다수공을 사용하는 터널 발파를 모사함에 있어도 굴착예정인 터널 주변장에 등가의 압력을 가하는 것으로 해석하는 것이 지금까지의 해석방법이었다.

하지만 발파작업으로 인해 발생하는 발파진동이 주변 암반 및 구조물에 심각한 영향을 미치는 요인으로 부각됨에 따라 지반 내 발파진동을 보다 정확히 규명하고 이를 수치해석에 반영할 필요가 있게 되었다. 특히 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 주요 요인으로 암반 내 불연속면의 상태, 암반 강도 등과 같은 지질 특성, 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리 등으로 요약할 수 있음에 따라 실제 해석이 수행될 지반에서의 지반진동특성을 실험적으로 규명하고 이를 구조물 안정해석에 그대로 반영할 수 있다면 보다 정밀한 안전진단이 가능할 것이다.

따라서 본 연구에서는 발파현상을 모사하기 위한 기존의 수치해석 모델링기법의 문제점을 분석하고, 현장에서 직접 측정된 발파진동파형을 수치해석의 입력자료로 활용하는 방법의 현장 적용을 통해 그 적정성을 살펴보았다.

참고문헌

1. Chapman, T.C., Rose, T.A. and Smith, P.D., 1995, Blast wave simulation using AUTODYN2D a parametric study, International Journal of Impact Engineering, Vol.16, pp.777-787.
2. Chen, S.G. and Zhao, J., 1998, A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol.35, pp.93-99.
3. Chen, S.G., Cai, J.G., Zhao, J. and Zhou, Y.X., 2000, Discrete element modelling of an underground explosion in an jointed rock mass, Geotechnical and Geological Engineering, Vol.18, pp.59-78.
4. Jiang, J.J., Blair, D.P. and Baird, G.R., 1993, Surface vibrations due to a buried explosive source, Proceeding of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp.89-96.
5. Digby, P.J., 1983, Computer simulation of blast-induced vibration, fracture and fragmentation process in brittle rocks, Proceeding of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp.393-406.
6. Atlas power company, 1987, Explosives and rock blasting, Atlas power company, 662p.
7. Persson, P.A., Holmberg, P. and Lee, J., 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC press, 540p.
8. Liu, Q. and Tidman, P., 1995, Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole, Technical Report MRL 95-014, CANMET/MRL, 15p.