

파쇄영역에 따른 발파진동 전파특성

안재광¹ · 박두희^{2*} · 박기천³ · 윤지남⁴

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 박사후 연구원

²정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수

³비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, (주)비엠에스이앤씨 대표이사

⁴정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, 포스코건설 인프라사업본부 부장

Propagation characteristics of blast-induced vibration to fractured zone

Jae-Kwang Ahn¹ · Duhee Park^{2*} · Ki-Chun Park³ · Ji Nam Yoon⁴

¹Post-Doc., Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

³Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, CEO, BMSENC Co. Ltd.

⁴Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Infra Division Sr. Manager, POSCO E&C

*Corresponding Author : Duhee Park, dpark@hanyang.ac.kr

Abstract

In evaluation of blast-induced vibration, peak particle velocity (PPV) is generally calculated by using attenuation relation curve. Calculated velocity is compared with the value in legal requirements or the standards to determine the stability. Attenuation relation curve varies depending on frequency of test blasting, geological structure of the site and blasting condition, so it is difficult to predict accurately using such an equation. Since PPV is response value from the ground, direct evaluation of the structure is impractical. Because of such a limit, engineers tend to use the commercial numerical analysis program in evaluating the stability of the structure more accurately. However, when simulate the explosion process using existing numerical analysis program, it's never easy to accurately simulate the complex conditions (fracture, crushing, cracks and plastic deformation) around blasting hole. For simulating such a process, the range for modelling will be limited due to the maximum node count and it requires extended calculation time as well. Thus, this study is intended to simulate the elastic energy after fractured zone only, instead of simulating the complex conditions of the rock that results from the blast, and the analysis of response characteristics of the velocity depending on shape and size of the fractured zone was conducted. As a result, difference in velocity and attenuation character were calculated depending on fractured zone around the blast source appeared. Propagation of vibration tended to spread spherically as it is distanced farther from the blast source.

Keywords: Blast vibration, Attenuation curve, Blast source, Fractured zone, Numerical analysis

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(6)959-972(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.6.959>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 11, 2017

Revised October 24, 2017

Accepted November 7, 2017



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

발파진동 안정성 평가는 일반적으로 발파 진동추정식을 통해 최대진동속도(PPV)를 산정하고 추정된 속도 값과 법규 혹은 기준에 제시된 허용 기준 값을 비교하여 안정성 여부를 판단한다. 현장 고유의 발파 진동추정식은 시험 발파의 횡수, 대상지반의 지질학적 구조와 발파 조건에 따라 달라지기 때문에 이 식을 통해 정확한 응답 값을 예측하는 것은 한계가 있다. 또한 최대진동속도는 지반에 예상되는 응답 값으로 구조물에 대한 직접적인 평가는 불가능하다. 이와 같은 한계점으로 인해 발파 진동에 대한 구조물의 정밀한 안정성을 평가할 경우 엔지니어들은 상용화된 수치해석 프로그램을 이용한다. 하지만 폭발로 인해 발생하는 발파공 주변 암반의 복합적인 상태변화(파쇄, 분쇄, 균열, 소성변형)를 기존 수치해석 프로그램으로 정확히 모델링 하기가 쉽지 않다. 만약 이러한 일련의 과정을 모사할 경우 절점 수의 제한으로 인해 모델링이 가능한 범위가 한정적이고 긴 연산시간이 소요된다. 따라서, 본 연구에서는 폭발로 발생하는 암반의 복합적 상태변화 과정을 모사하지 않고 파쇄영역 이후 탄성에너지 전파만을 모사하는 해석 방법에 대한 연구를 수행하였으며, 이때 파쇄영역의 형상 및 크기에 따른 속도의 응답특성을 분석하였다. 그 결과 폭원 주변에서는 설정되는 파쇄영역에 따라 계산된 속도의 크기 및 감쇠에 차이를 보였다. 전파되는 진동은 폭원으로부터 멀어질수록 구형으로 확산되는 것으로 나타났다.

주요어: 발파진동, 감쇠곡선, 폭원, 파쇄영역, 수치해석

1. 서론

발파로 발생하는 진동의 예측은 인근 구조물의 안정성 평가에 중요한 평가 지표이다. 발파진동은 최대진동속도로 평가하며, 대상지반의 시험발파 혹은 인근지역의 발파기록을 통해 선정된 발파 진동추정식을 통해 산정한다. 만약 시험발파 없이 대상구간의 발파진동을 예측하기 위해서는 인공신경망 기법(neural network method) 이나 수치해석을 수행할 수 있다. 인공신경망 기법의 경우, 기준에 다양한 사례별 방대한 양의 발파진동 계측기록이 요구되기 때문에 데이터 구축이 필요한 실정이다. 수치해석기법은 발파로 전파되는 진동 뿐만 아니라 인근 구조물의 응답특성을 분석할 수 있는 장점이 있어 시험 발파의 수행이 어렵거나 정밀한 검토가 요구되는 경우 사용되지만 폭발과 동시에 주변 암반을 파쇄시키며 응력파를 외곽으로 방사시키는 복합적이고 다양한 물리적 현상을 수치해석으로 완벽하게 모사하기는 쉽지 않다. 따라서, 발파 진동해석 시 복합적인 암반의 상태변화를 모사하지 않고 손상된 영역을 하나의 파쇄영역으로 가정한 해석이 수행된다. 이와 같은 해석은 발파공 주변의 파괴 모사를 생략하기 때문에 연산시간을 크게 단축할 수 있으며 폭발전용 해석프로그램이 아닌 상용화된 다양한 유한요소 혹은 차분해석으로 수행이 가능하다는 이점이 있다.

Jeon et al. (2007)은 다수의 발파공이 한 조로 폭발하는 터널 발파의 파쇄영역을 최종 굴착 선으로 가정한 해석을 수행하였다. 터널 발파는 우선 심발발파로 자유면을 형성하고 이후 지면 시차를 두고 각 발파공의 폭약이 폭발하며 확장 굴착된다. 따라서 터널 발파의 최대 진동속도 및 전파되는 진동 특성은 최초 폭발되는 심발발파에 따라 달라진다. 하지만 이와 같은 고려 없이 최종 굴착선에 하중 크기만 보정된 단일공 발파하중을 직접 적용하였다. Chen et al. (2000)과 Deng et al. (2014)은 폭발과정을 AUTODYN (2009)으로 모사하여 발파 진동해석의 파쇄

영역에 적용할 하중을 계산하였으며, 발파 진동해석의 파쇄영역은 등가원형으로 고려하였다. 하지만 이때 설정된 원형 폭원은 전단파의 영향을 고려하지 못한다. Lu et al. (2011)는 터널 발파의 진동 시뮬레이션 시 심발발파를 통해 예상되는 파쇄영역을 육면체로 가정한 해석을 수행하였고, Sainoki and Mitri (2016)은 단층대에 따른 발파진동의 응력전파를 모사하기 위해 파쇄영역을 장전된 폭약의 고려 없이 발파공의 6배 크기로 확장한 원통형으로 가정하였다.

기존의 연구자들은 폭발에 따른 암반의 상태 변화를 정확히 파악하기 쉽지 않기 때문에 파쇄영역을 발파공이 확장된 구형 혹은 원통형 공동으로 가정하였다. 하지만, 하중이 입력되는 공동의 형상 및 크기에 따라 전파되는 응력파의 크기와 감쇠 특성이 달라지므로 수치해석시 전파특성을 고려한 파쇄영역을 설정이 무엇보다 중요하다 (Blair, 2014; Wu et al., 2004).

따라서, 본 연구에서는 탄성영역에서의 발파진동 수치해석을 수행하였으며 하중이 입력되는 공동(= 파쇄영역)을 기존에 사용되던 구형과 원통형으로 모델링 하였다. 이를 통해 두 파쇄영역에 따른 전파 특성과 응답 차이를 비교하였다.

2. 발파하중

발파공에 작용하는 최대 압력은 Atlas Powder co. (1987), Konya and Walter (1991), and Siskind (2000) 등이 제안한 경험적 방정식을 사용할 수 있지만, 이는 폭약의 폭발 시 발생하는 최대 압력(= 폭굉압)으로 실제 모든 에너지가 진동으로 전달되지 않는다. 진동으로 전달되는 에너지는 전체 에너지 중 5~50% 정도로 암반의 파쇄 및 분쇄에 사용되고 남은 탄성파이다(Choi et al., 2004). 따라서, 파쇄영역에서의 압력하중은 기존의 경험적으로 계산된 폭굉압을 그대로 적용할 수 없고 전달되는 에너지의 크기를 고려하여 보정해야 한다. 또한 이때 전달되는 진동의 감쇠는 일시적 충격하중 주기에 영향을 미치므로 하중-시간이력곡선의 결정이 중요하다.

일반적으로 상용화된 폭약의 경우 매우 짧은 상승시간을 가진다고 알려져 있으며 이는 지수함수의 곡선으로 표현할 수 있다(Blair, 2015). Starfield and Pugliese (1968), Duvall (1953), Jiang et al. (1995), Blair (2015) 등이 제안한 시간이력 함수를 통해 압력-시간 이력곡선을 산정하고, 이를 통해 실제 폭발압력을 모사할 수 있다. 발파 조건에 따라 적절한 모델을 사용해야 하며 압력곡선의 상승 및 감쇠 변형에 우수한 것으로 알려진 Blair (2015) 모델은 아래와 같이 표현된다.

$$P(t) = P_{\max} \left(\frac{e}{n} \right)^n \left[1 - \left\{ 1 + \frac{1000}{\sqrt{m}} \left(\frac{\beta t}{n} \right)^m \right\}^{-1} \right] (\beta t)^n \exp(-\beta t) \quad (1)$$

여기서, P_{\max} 는 최대 압력하중이며, e 는 지수함수(exponential)이다. β, n, m 는 곡선의 감쇠지수로서 β 는 지수함수의 꼬리부분 특성을 결정하고, m 은 상승곡선의 주기를 결정하며, n 은 전체 곡선의 주기를 결정한다. Fig. 1은

Blair (2015) 모델의 정규화된 하중 이력곡선을 도시하였으며 이때 m 에 따른 상승곡선의 변화를 보기 위해 n 과 β 를 각각 1과 2000으로 고정하였다.

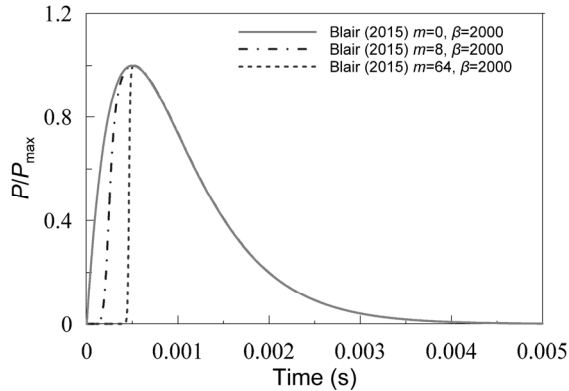


Fig. 1. Time histories of impulse loads

3. 감쇠특성

전파된 면적의 총 에너지는 항상 같기 때문에 단위면적을 통과하는 에너지 강도는 멀리 전파될수록 작아진다. 즉, 폭발 지점에서부터 전파되는 응력, 변위 그리고 속도의 진폭은 외곽으로 퍼질수록 그 크기가 감소한다. 이때 폭발 지점에서 방출되는 에너지의 형태에 따라 감쇠특성이 달라지며 아래와 같다.

$$A_R = A_r \left(\frac{r}{R} \right)^s \tag{2}$$

여기서, r 과 R 은 중심으로부터의 이격거리 이고 A_r 과 A_R 은 각각 r 과 R 에서의 진폭이다. s 는 방출되는 에너지의 형태에 따라 달라지는 기하학적 감쇠지수이며 구형 전파 시 1, 원통형 전파 시 0.5이다. 흙 또는 암반의 경우 완전한 탄성 매질이 아니며 절리, 파쇄, 입자 간의 공극 등이 포함되어 있다. 따라서 매질 재료에 따른 추가적인 감쇠가 발생하며 이는 전달되는 진동주파수에 따라 달라진다(Richert et al., 1970).

$$\alpha_m = \frac{2\pi f \xi}{c} \tag{3}$$

여기서, α_m 는 재료 감쇠지수이며, 전파되는 주파수(f)와 매질의 전파속도(c), 감쇠비(ξ)에 따라 달라진다. 전달되는 에너지는 응력과 형태로 전파되며 암반의 절리 및 파쇄 등을 통과하면서 굴절 및 산란되고 그 크기가 감소

한다(Hao et al., 2001). 이러한 진동효과를 정확하게 모사하기 위해서는 대상지반의 지질구조를 정확하게 모델링해야 하지만 쉽지 않기 때문에 감쇠비를 통해 간접적으로 모사할 수 있다. 앞서 설명된 기하학적 감쇠와 재료 감쇠를 모두 고려할 경우 아래와 같이 표현된다.

$$A_R = A_r \left(\frac{r}{R} \right)^s \exp(\alpha_m (R - r)) \quad (4)$$

일시적 충격하중에 대한 응답의 경우 반응성 진동이 폭발 지점 인근에서 발생하기 때문에 식 (4)는 근거리 진폭의 예측에 한계가 있다. 이때 반응성 진동이 발생하는 영역은 충격진동의 주기와 매질 물성에 따라 달라진다(Ahn and Park, 2017). Ahn and Park (2017)은 근거리의 감쇠특성을 고려한 감쇠곡선을 아래와 같이 제안하였다.

$$\log(PPV) = \log(A_{FF}) + \log(Residual) \quad (5)$$

여기서, A_{FF} 는 먼 거리(Far-field)의 속도 진폭이며 식 (4)로 계산할 수 있고, $Residual$ 은 반응성 진동에 대한 추가적인 속도 진폭이다. 구형 전파의 $Residual$ 은 아래와 같이 계산한다.

$$Residual = \left(\frac{70 \frac{R/r}{L_{NF}}}{70 \frac{R/r}{L_{NF}} + 1} \right) \left\{ 0.055 \left(\frac{R/r}{L_{NF}} \right)^{-1.55} + 1 \right\} \quad (6)$$

여기서, r 은 구형 파쇄영역의 반경이고, L_{NF} 는 A_{FF} 감쇠가 주로 전파되는 경계 지점이며 $1.5(\lambda/r)^{0.75}$ 로 계산한다. λ 는 파장으로 c/f 이다. 식 (6)을 통해 폭발로 인해 발생하는 전체 영역의 최대 진동속도(PPV)를 계산할 수 있다.

4. 수치해석

본 연구에서는 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D} (Itasca Consulting Group, 2011)를 사용하여 2차원 축대칭 조건의 동적해석을 수행하였다.

해석에 사용된 지반의 모델링을 Fig. 2에 도시하였다. 이때 암반은 균일하다 가정하였으며, 지반물성은 $c = 4,000$ m/s, $\nu = 0.25$, $\rho = 2500$ kg/m³을 적용하였다. 해석영역은 너비 400 m, 심도 40 m이며 발파 위치는 지표면으로부터 20 m 하부로 설정하였다. 요소의 크기(Δl)는 민감도 분석을 수행하여 0.05 m로 적용하였다. 하부 및 측면 경계조건으로는 Lysmer and Kuhlemeyer (1969)가 제안한 점성댐퍼를 적용하여 발파진동이 반사되지 않고 흡수하도록 하였다. 시간영역에서의 점성감쇠는 $[C]$ 를 통해 모사하며 Rayleigh 공식은 다음과 같다.

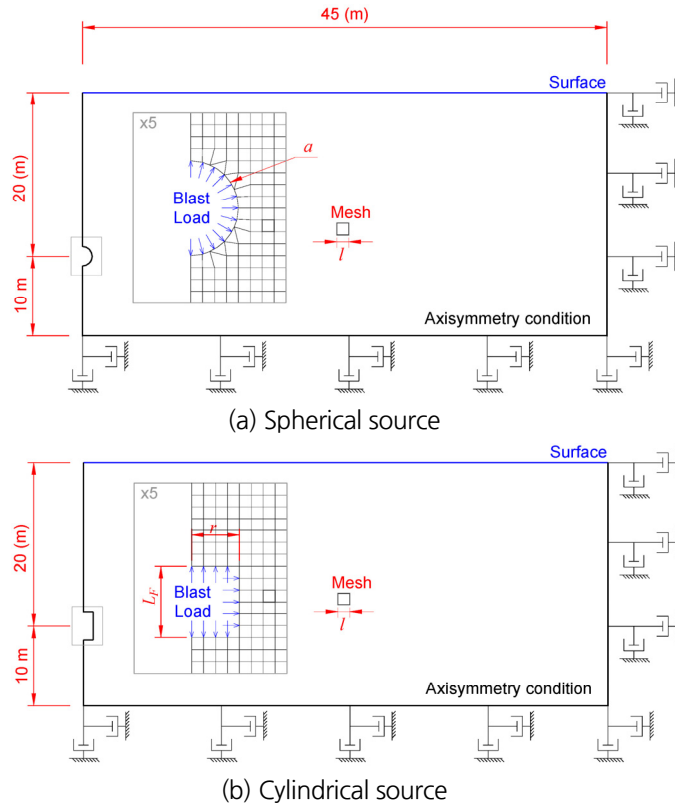


Fig. 2. Numerical modeling

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7)$$

여기서, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[M]$ 은 질량행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며 α 와 β 는 다음과 같이 계산되는 변수이다.

$$\alpha = 4\pi\xi \frac{f_m f_n}{f_m + f_n}$$

$$\beta = \frac{\xi}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n} \quad (8)$$

여기서, x 는 감쇠비, f_m 과 f_n 은 Rayleigh 공식의 주파수 의존성을 결정하는 주파수이다. 실제 지반의 감쇠는 진동 주파수의 영향을 받지 않으나 시간영역에서 수행되는 Rayleigh 공식은 진동 주파수의 영향을 받으므로 f_m 과 f_n 의 결정이 중요하다(Park et al., 2010). Rayleigh 감쇠식은 f_n 과 f_m 에서만 목표 감쇠비와 일치하기 때문에 수치적으로 큰 감쇠가 발생하지 않도록 f_n 은 발파하중의 탁월 주파수를 적용하고 f_m 은 발파진동 주파수가 크게 변하지 않

는 값을 설정한다(Ahn et al., 2014). 본 연구에서 f_n 는 $1/4t_r$, f_m 은 $20f_n$ 를 적용하였다. 여기서 t_r 은 폭원에서 계산된 속도의 초기 상승시간이다.

발파공에 장전되는 폭약(ex. 다이나마이트, 에멀전 등)은 직경이 작고 긴 원통형 모양이며 공을 중심으로 주변 암반을 파쇄시킨다. 이때 암반의 손상영역은 장약량과 장전방법에 따라 달라지며 손상영역 반경은 심도의 약 3배 정도 큰 것으로 알려져 있다(Haibo et al., 2011). Fig. 3는 단일공 발파 시 발생하는 파쇄영역과 이를 통해 가정되는 등가 공동의 모식도를 도시하였다. 본 연구에서는 손상 영역을 구와 원통형으로 단순화 하였으며 하중은 가정된 공동의 벽면에 수직방향으로 재하하였다. 발파하중은 Blair (2015) 모델을 사용하였으며, $P_{max} = 1 \text{ GPa}$, $\beta = 2000$, $n = 1$, $m = 0$ 을 적용하였다. 본 연구에서 수행된 해석사례는 Table 1에 정리하였다.

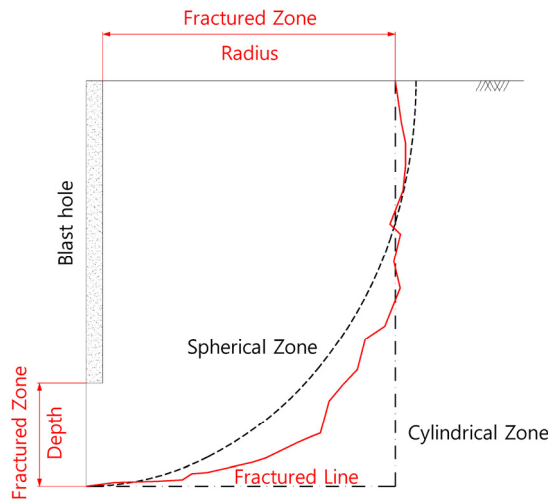


Fig. 3. Schematic illustration of concept of the equivalent cavities

Table 1. Case matrix

Fractured zone	a (m)	L_F (m)	Damping (%)
Spherical source	2	-	0, 5
Cylindrical source	2	2	
		4	
		6	

5. 해석결과

발파와 같은 충격파는 폭원 주변(near-field)과 먼 거리(far-field)에 따라 응답에 차이를 보이므로 두 영역에서의 입자운동을 파쇄영역 형상에 따라 비교하였다.

Fig. 4와 5는 재료 감쇠비가 0%일 때 파쇄영역 주변에서 계산된 횡방향(longitudinal direction) 속도에 대한 수

직방향(vertical direction) 속도를 도사하였다. 이를 통해 계산된 진동의 입자운동을 분석하였다. 구형 파쇄영역의 경우 계산된 속도의 입자운동의 방향이 공동의 중심을 향하고 있으며 한 번의 펄스가 전달되는 것으로 나타났다. 이는 구형 파쇄영역에서는 압축파(P-wave)만 전파된다는 것을 의미한다. 반면 원통형 파쇄영역의 경우, 원통 중심선을 제외한 지점에서 입자운동의 방향성을 파악하기 쉽지 않은 것으로 나타났다. 이는 원통형 전파에서는 압축파 뿐만 아니라 추가적인 진동이 발생하는 것을 의미한다. 이때 추가적인 진동은 전단파(SV-wave)이며 파쇄영역 주변 응답에 영향을 미친다.

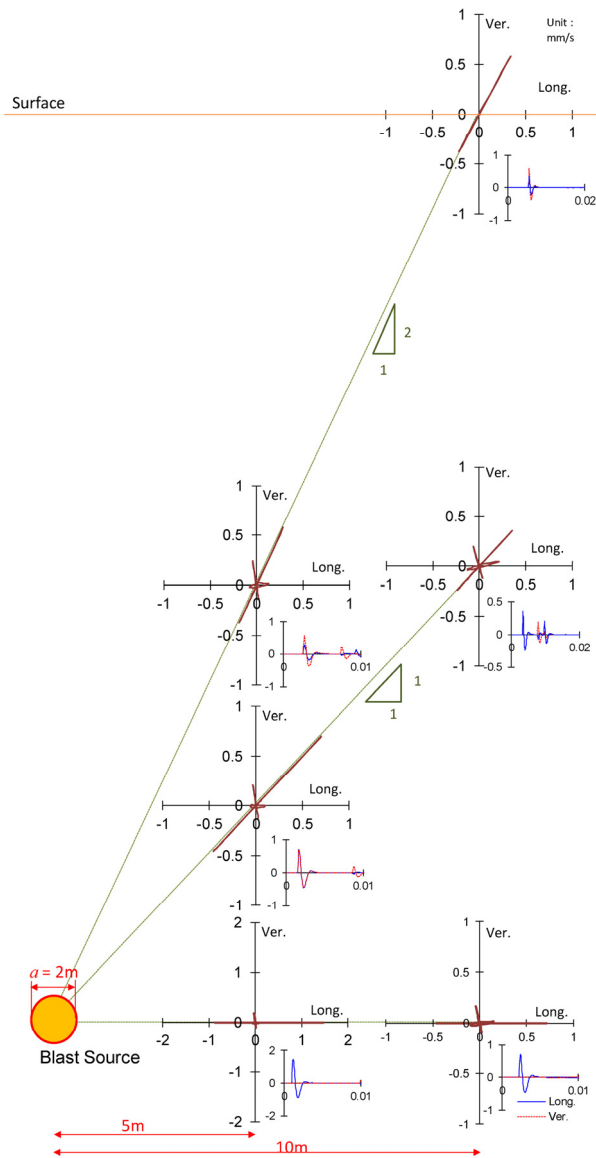


Fig. 4. Vertical versus longitudinal velocity time history at the selected location subjected to spherical source

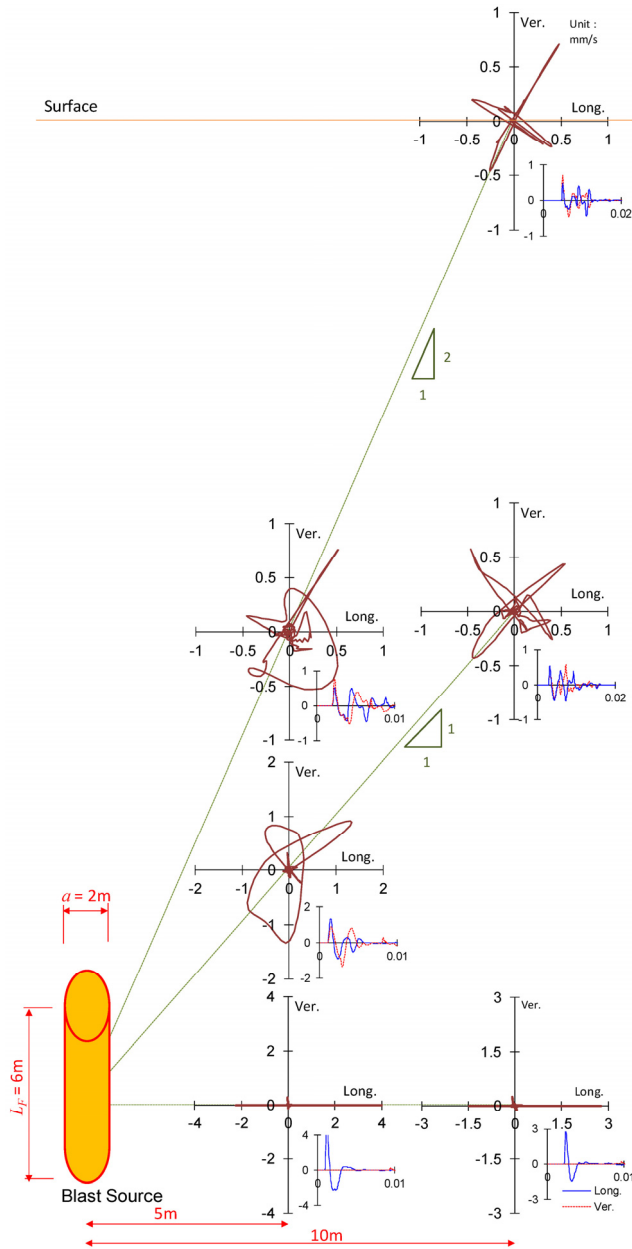


Fig. 5. Vertical versus longitudinal velocity time history at the selected location subjected to cylindrical source

Fig. 6은 먼 거리인 지표면에서 계산된 입자운동의 방향을 입사각과 비교하였다. 이때 입자운동의 방향을 지표면에 도달한 각 방향별 최대 진동속도로 계산하였다. 그 결과, 구형과 원통형 모두 입자운동의 방향이 입사각과 유사한 것으로 나타났으며 이는 파쇄영역 주변의 응답특성과 다른 결과이다. 이에 대한 원인을 파악하기 위해 지표면에서 계산된 속도-시간 이력을 분석하였다(Fig. 7). 지표면에서 수평거리 15, 30, 40 m 지점에서의 입자 운동

시간이력을 Fig. 7에 도시하였다. 그 결과, 압축파와 전단파를 확실하게 구분되는 것으로 나타났다. 이때 초기에 생성된 펄스는 압축파로서 최대 진동속도는 구형 파쇄영역이 가장 작고 L_f/a 가 커질수록 증가하였다. 이는 하중이 입력되는 공동의 크기에 따른 영향으로 단위 면적당 적용되는 하중이 같을 때 파쇄영역 부피가 커질수록 방출되는 에너지가 증가하기 때문이다. 전단파의 경우 전파속도의 차이로 압축파보다 늦게 도달하며 이격거리가 멀

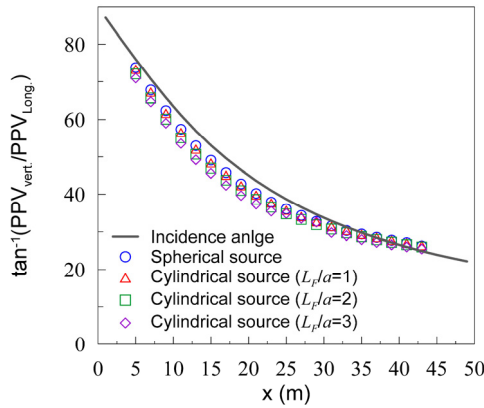


Fig. 6. Polarization angle for particle motion of blast induced vibration at surface

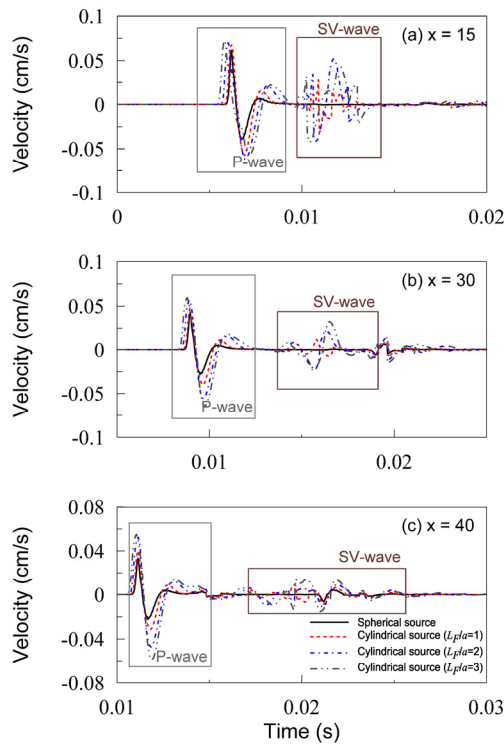


Fig. 7. Particle velocity time history at the selected location

어질수록 크게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 원통형 파쇄영역에서 생성되는 전단파는 공동 주변 응답에 영향을 주지만 멀어질수록 압축파보다 더 감소되어 그 영향이 크지 않다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 암반의 감쇠비를 5%로 가정하고 파쇄영역에 따른 최대 진동속도를 도시하였다. 이때 파쇄영역에서 방출되는 에너지 크기를 동일하게 적용하기 위하여 공동의 부피를 고려하여 하중 크기를 조절하였다. 적용된 최대하중(P_{max})은 Table 2에 정리하였다. 공동 주변의 전파특성은 파쇄영역의 형상에 따라 차이를 보이지만 진동이 멀리 전파될수록 구형과 원통형의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

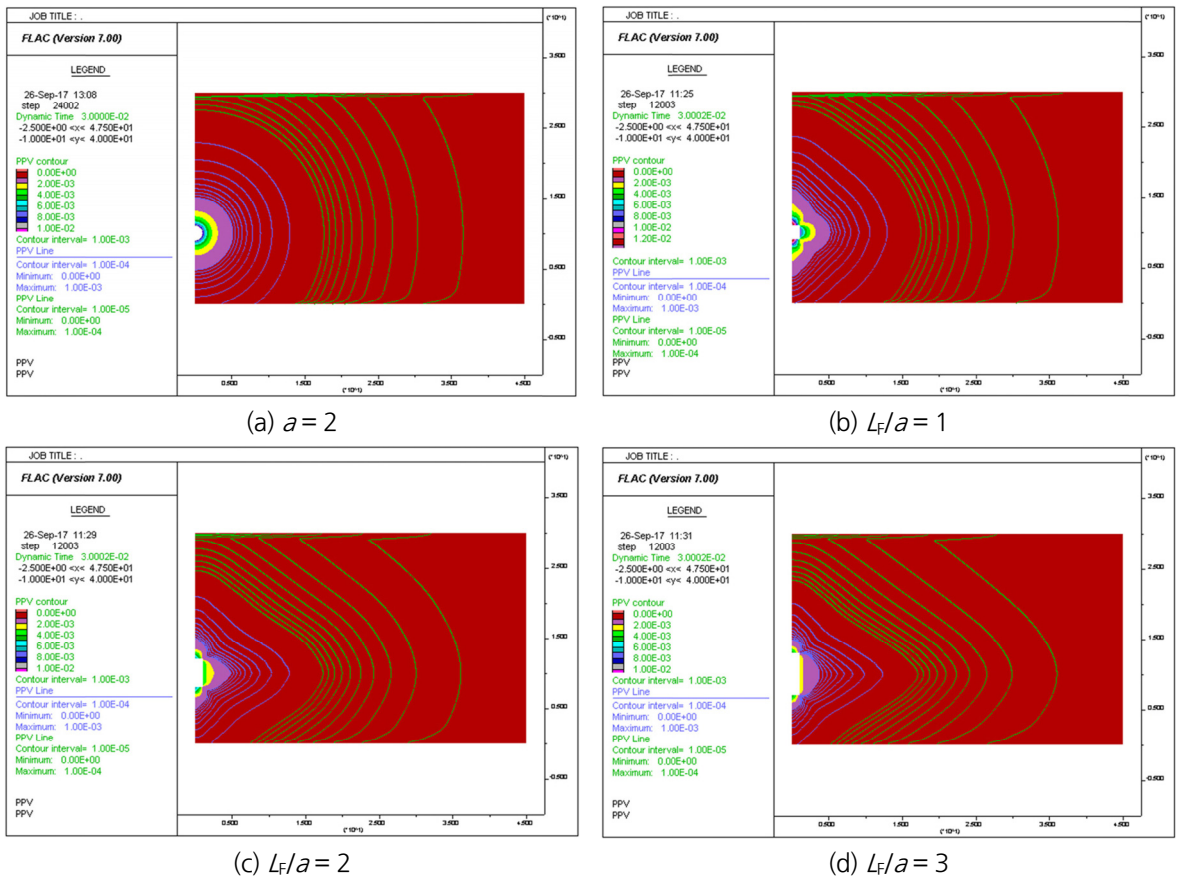


Fig. 8. PPV contours with $\zeta = 5\%$

Table 2. Load pressure at various sources

Fractured zone	a (m)	L_f (m)	Volume (m^3)	P_{max} (GPa)
Spherical source	2	-	4.19	1
Cylindrical source	2	2	6.28	1/1.5
		4	12.57	1/3
		6	18.85	1/4.5

Fig. 9는 수평거리가 5~40 m인 떨어진 지표면에서 계산된 PPV와 Ahn and Park (2017)의 감쇠곡선을 비교하였다. Ahn and Park (2017)의 감쇠곡선은 지반내부의 감쇠특성으로 지표면의 계산결과와 비교하기 위하여 Jiang et al. (1998)의 지표면 증폭 비를 곱하였다. 이때 해당 범위의 지표면 증폭비는 2를 적용하였다. 원통형 파쇄영역이 $L_F/a = 1$ 인 경우, 계산된 최대 진동속도는 구형의 진동보다 0.96~1.07배 차이로 크지 않았으며 감쇠특성도 유사한 것으로 나타났다. 반면, $L_F/a = 2$ 와 $L_F/a = 3$ 인 원통형 전파는 구형 전파보다 각각 평균 1.27, 1.41배 크게 계산되었으며 R/a 가 커질수록 그 차이는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 원통 직경에 대한 길이 비가 커질수록 구형 전파 보다 감쇠가 적게 발생하기 때문이다. 즉, 원통 파쇄영역에서 방사되는 에너지는 점차적으로 구형 전파로 변화 하지만 원통의 길이에 따라 감쇠 정도에 차이를 보인다.

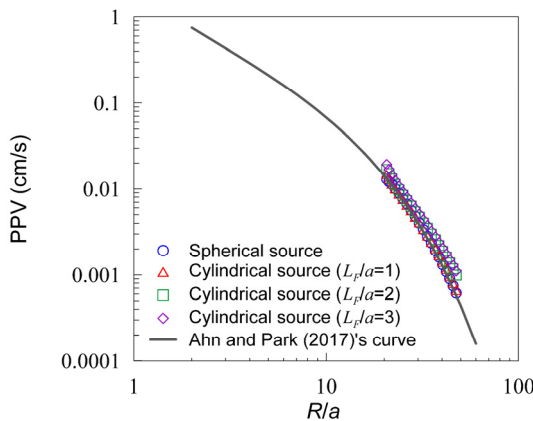


Fig. 9. PPV attenuation curve with $\zeta = 5\%$

6. 결론

본 논문에서는 발파진동 수치해석 시 설정되는 파쇄영역에 따른 전파특성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 파쇄영역에 따른 진동특성은 다음과 같다.

1. 원통형 파쇄영역에서는 구형과 달리 전단파가 발생함에 따라 경계 주변의 입자운동의 방향성을 파악하기 힘든 것으로 나타났다. 하지만 파쇄영역에서 멀어질수록 전단파가 압축파보다 크게 감쇠되어 먼 거리에서는 압축파가 주요한 것으로 나타났다. 즉, 폭원에서 멀리 위치한 구조물의 발파진동은 전달되는 압축파에 가장 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다.
2. 최대 진동속도의 감쇠특성은 파쇄영역의 형상에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이때 원통 직경에 대한 길이 비가 커질수록 지표면에서의 감쇠 기울기는 구형 전파보다 완만해 진다. 따라서 작은 폭발점에서 방사되는 에너지는 점차 구형으로 확산되지만 파쇄영역의 형상에 따라 감쇠 기울기는 달라진다.

3. 원통형 파쇄영역의 직경에 대한 길이 비(L_F/a)가 1인 경우 전파 특성이 구형과 유사해지는 것으로 나타났다. 따라서 예상되는 파쇄영역의 L_F/a 가 1에 가까울 경우 구형 전파의 감쇠식을 통해 폭발 에너지 및 이격거리에 따른 발파진동 속도의 예측이 가능하다.
4. 본 연구에서는 단일공 발파로 가정된 파쇄영역을 분석하였지만, 이는 다수의 발파공의 파쇄영역 설정에도 사용될 수 있으리라 판단된다. 예를 들어 터널 발파의 경우 심발발파에서 다수의 발파공이 밀집된 공간에 동시에 폭발하기 때문에 단일공 발파보다 큰 에너지를 유발되고 각각의 발파공에서 발생한 진동이 중첩되어 긴 주기의 진동이 생성될 것이다. 이와 같은 폭발 특성을 고려하여 단순화된 하나의 파쇄영역 설정하고 이에 적합한 발파하중을 적용한다면 신뢰도 있는 발파 진동해석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난관리지원기술개발사업의 연구비 지원(2017-MPSS31-002)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ahn, J.K., Park, D.H. (2017), "Prediction of near-field wave attenuation due to a spherical blast source", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, No.11, pp. 3085-3099.
2. Ahn, J.K., Park, D.H., Shin, Y.W., Park, I.J. (2014), "Generation of blast load time series under tunnelling", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 1, pp. 51-61.
3. AUTODYN, A. (2009), "Interactive non-linear dynamic analysis software, version 12, user's manual", SAS IP Inc.
4. Blair, D.P. (2014), "Blast vibration dependence on charge length, velocity of detonation and layered media", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 65, pp. 29-39.
5. Blair, D.P. (2015), "Wall control blasting. Rock fragmentation by blasting", Australia in Proceedings 11th International Symposium on Rock Fragementation by Blasting, pp. 13-26
6. Chen, S.G., Cai, J.G., Zhao, J., Zhou, Y.X. (2000), "Discrete element modelling of an underground explosion in a jointed rock mass", *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 59-78.
7. Choi, S.O., Park, E.S., Sunwoo, C., Chung, S.K. (2004), "A study on the blasting dynamic analysis using the measurement vibration waveform", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 14, No. 2, pp. 108-120.
8. Company, A.P. (1987), *Explosives and rock blasting*, Dallas.
9. Deng, X.F., Zhu, J.B., Chen, S.G., Zhao, Z.Y., Zhou, Y.X., Zhao, J. (2014), "Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 43, pp. 88-100.
10. Duvall, W.I. (1953), "Strain-wave shapes in rock near explosions", *Geophysics*, Vol. 18, No. 2, pp. 310-323.
11. Haibo, L., Xiang, X., Jianchun, L., Jian, Z., Bo, L., Yaqun, L. (2011), "Rock damage control in bedrock

- blasting excavation for a nuclear power plant”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 2, pp. 210-218.
12. Hao, H., Wu, Y., Ma, G., Zhou, Y. (2001), “Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock mass”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 85-98.
 13. Itasca Consulting Group, I. (2011), *Fast Lagrange Analysis of Continua*, Version 7.0.
 14. Jeon, S.S., Kim, D.S., Jang, Y.W. (2007), “Stability assessment of concrete lining and rock bolt of the adjacent tunnel by blast-induced vibration”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 10, pp. 33-45.
 15. Jiang, J., Baird, G., Blair, D. (1998), “Polarization and amplitude attributes of reflected plane and spherical waves”, *Geophysical Journal International*, Vol. 132, No. 3, pp. 577-583.
 16. Jiang, J., Blair, D.P., Baird, G.R. (1995), “Dynamic response of an elastic and viscoelastic full-space to a spherical source”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 19, No. 3, pp. 181-193.
 17. Konya, C.J., Walter, E.J. (1991), *Rock blasting and control overbreak*, National Highway Institute, pp. 5.
 18. Lu, W., Yang, J., Chen, M., Zhou, C. (2011), “An equivalent method for blasting vibration simulation”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 9, pp. 2050-2062.
 19. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. (1969), “Finite dynamic model for infinite media”, *Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE*, Vol. 95, pp. 859-878.
 20. Park, D.H., Shin, J.H., Yun, S.U. (2010), “Seismic analysis of tunnel in transverse direction part II: Evaluation of seismic tunnel response via dynamic analysis”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 6, pp. 71-85.
 21. Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. (1970), “Vibrations of soils and foundations”, pp. 414.
 22. Sainoki, A., Mitri, H.S. (2016), “Dynamic modelling of fault slip induced by stress waves due to stope production blasts”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 165-181.
 23. Siskind, D.E. (2000), “Vibration from blasting, international society of explosives engineers”, Cleveland, OH, USA.
 24. Starfield, A.M., Pugliese, J.M. (1968), “Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts: Elsevier*, Vol. 5, No. 1, pp. 65-77.
 25. Wu, C., Lu, Y., Hao, H. (2004), “Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 28, No. 1, pp. 93-109.