

수치해석을 통한 진동감쇠식 맞춤형 암반의 감쇠비 산정

Estimation of Attenuation Relationship Compatible with Damping Ratio of Rock Mass from Numerical Simulation

김 낙 영¹ Kim Nag Young

류 재 하² Ryu, Jae-Ha

안 재 광³ Ahn, Jae-Kwang

박 두 희⁴ Park, Duhee

손 무 락⁵ Son, Murak

황 영 철⁶ Hwang, Young-Cheol

Abstract

The stability of the adjacent structures or slopes under blasting is typically evaluated using an empirical vibration attenuation curve or dynamic numerical analysis. To perform a dynamic analysis, it is necessary to determine the blast load and the damping ratio of rock mass. Various empirical methods have been proposed for the blast load. However, a study on representative values of damping ratio of a rock mass has not yet been performed. Therefore, the damping ratio was either ignored or selected without a clear basis in performing a blast analysis. Selection of the damping ratio for the rock mass is very difficult because the vibration propagation is influenced by the layout and properties of the rock joints. Besides, the vibration induced by blasting is propagated spherically, whereas plane waves are generated by an earthquake. Since the geometrical spreading causes additional attenuation, the damping ratio should be adjusted in the case of a 2D plane strain analysis. In this study, we proposed equivalent damping ratios for use in continuum 2D plane strain analyses. To this end, we performed 2D dynamic analyses for a wide range of rock stiffness and investigated the characteristics of blast vibration propagation. Based on numerical simulations, a correlation between the attenuation equation, shear wave velocity, and equivalent damping ratio of rock mass is presented. This novel approach is the first attempt to select the damping ratio from an attenuation relationship. The proposed chart is easy to be used and can be applied in practice.

요 지

발파에 대한 주변 구조물이나 사면의 안정성은 경험적 진동감쇠식 또는 발파진동 동적 수치해석을 통하여 평가한다. 동적해석을 수행하기 위해서는 발파하중과 지반 감쇠비의 산정이 필요하다. 발파하중에 대해서는 다양한 경험적 방법이 제시되었지만 암반의 감쇠비에 대한 연구는 제한적이며 해석 시 이를 무시하거나 명확한 근거 없이 가정하여

1 정회원, 한국도로공사 기술심사처 수석연구원 (Member, Research Director, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corp.)

2 비회원, 한국도로공사 도로교통연구원 기술심의팀 (General Manager, Expressway Design Evaluation Division Design Evaluation Team, Korea Expressway Corp.)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Engr., Hanyang Univ.)

4 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Env. Engineering, Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322 Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

5 정회원, 대구대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engr, Daegu Univ.)

6 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Engr., Sangji Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

해석에 적용하고 있다. 암반의 감쇠비는 절리의 영향을 크게 받으므로 이를 고려해서 산정해야 한다. 또한, 평면파로 가정할 수 있는 지진파와는 다르게 발파 시에는 구면파가 생성되며 이를 2차원 해석에서 모사하는 경우에는 이의 기하학적 확산을 고려하기 위하여 감쇠비를 조정해야 한다. 본 연구에서는 위의 두 가지 영향이 고려된 2차원 평면변형률 연속체 해석에 적용 가능한 암반의 등가감쇠비를 제안하였다. 이를 위하여 다양한 강성의 암반에 대한 2차원 동적해석을 수행하여 암반의 감쇠비에 따른 진동전파 특성을 분석하였으며 해석결과를 기반으로 진동감쇠식-전단파 속도-등가감쇠비와의 상관관계를 규명하였다. 제시된 상관관계는 경험적 진동감쇠식에 상응하는 감쇠비를 산정한 최초의 시도로 중요한 의미가 있으며 동시에 실무에도 쉽게 적용될 수 있는 유용한 방법이다.

Keywords : Blast induced vibration, Equivalent damping ratio, Attenuation curve, Dynamic analysis, Plane strain condition

1. 서론

발파진동해석을 수행하기 위해 필요한 대표적인 입력 변수는 발파하중과 지반의 동적 물성이다. 발파하중은 경험적 방법(Konya and Walter, 1991; Liu and Tidman, 1995; Persson et al., 1993) 또는 발파기록의 보정(Choi et al., 2004; Torano et al., 2006)을 통하여 산정된다. 지반 물성은 현장시험 및 실내실험을 통해 산정한다. 탄성계수(E)는 탄성과 탐사를 통해서 결정하며 프아송비(ν)는 실내시험을 수행하거나 경험적으로 제시된 값을 사용한다. 암반의 감쇠비는 해석 결과에 중요한 영향을 미치지만 이를 산정하는 방법은 명확하게 제시되지 않았다(Hao et al., 2001; Ma et al., 2011). 발파 해석을 위하여 암반의 감쇠비(ζ)를 정확하게 산정하는 것은 아래와 같은 이유로 어려우며 매우 큰 불확실성을 수반한다.

- 1) 암반에서의 경우, 암석에서 발생하는 재료 감쇠와 진동이 절리를 통과하며 발생하는 산란으로 인한 감쇠가 동시에 발생한다. 암석의 감쇠비는 잘 알려져 있으나 절리에 의한 진동감쇠는 절리의 방향, 간격, 역학적 특성 등에 영향을 받으므로 이를 예측하기 어렵다.
- 2) 발파진동의 경우, 지진파와는 다르게 평면파가 아니라 폭원(blast source)으로부터 방사형으로 퍼지는 구면파이기 때문에 기하학적 확산이 크게 발생하며 진동이 지진파에 비하여 급격하게 감소한다. 이를 정확하게 모사하기 위해서는 3차원 해석 또는 축대칭 조건을 적용한 2차원 해석을 수행해야 한다. 하지만 3차원 해석은 해석소요시간이 길

기 때문에 수행이 어려우며, 축대칭 조건을 적용한 2차원 해석으로는 주변 구조물을 모사하기 어렵다. 평면변형률 해석이 주변 구조물의 영향 평가를 위해서 가장 널리 사용되는 방법이지만 이를 적용하게 되면 축방향으로 변위가 구속되기 때문에 실제 발파보다 감쇠가 작게 발생한다(Ang and Valliappan, 1988). 따라서 해석 시 지반의 감쇠비는 해석 조건을 고려해서 실제보다 상향 적용해야 하지만 이에 대해서도 연구가 수행된 사례가 전무하다.

이미 국내외에서 발파 진동 수치해석과 관련된 다양한 연구가 수행되었으나 위에 기술된 내용을 고려하여 암반의 감쇠비를 산정한 사례는 전무하다. Chen et al.(2000), Deng et al.(2014)은 유한요소 프로그램인 AUTODYN-2D를 사용하여 TNT폭약의 폭발과정을 모사하고 일정 거리 떨어진 지점에서의 속도를 개별요소해석 프로그램 UDEC (Itasca Consulting Group, 2004)의 폭발하중으로 사용하였다. 불연속체해석 시 전파 감쇠는 주로 암반 절리에서 발생한다고 가정하여 암석의 재료 감쇠는 고려되지 않았다. 하지만 위의 연구는 특정 절리 조건에 대한 해석을 수행하였으며 암반에 대한 대표 감쇠비는 산정되지 않았다. Torano et al.(2006)는 채석 벤치발파를 2차원 유한요소해석으로 모사하였다. 해석 시 감쇠는 Rayleigh 공식을 사용하였으며 α , β 를 각각 6.3, 0.05로 적용하였으나 감쇠비 산정 근거는 제시되지 않았다. Shin et al. (2011)은 2차원 평면변형률해석을 통해 굴착발파로 발생하는 진동이 인근 터널에 미치는 영향을 평가하였다. 이때 암반의 감쇠비는 작을 것으로 예측되어 5%를 사용하였지만 이의 근거 및 적정성에 대해서는 논의되지

않았다. Park et al.(2006), Jeon et al.(2007)는 발파진동이 인접한 주변 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유한차분 해석프로그램인 FLAC^{2D}(Itasca Consulting Group, 2011)을 이용한 평면변형률 동적해석을 수행하였지만 감쇠비를 적용하지 않았다.

본 연구에서는 최초로 부지 고유의 암반 감쇠비를 산정하는 방법론을 제시하였다. 제안된 방법에서 암반의 감쇠비는 시험발파로부터 획득된 진동감쇠식으로부터 추정한다. 추정된 암반감쇠비는 실제 3차원 전파 및 감쇠 특성을 2차원 평면변형률 해석 조건에서 모사할 수 있도록 보정된 등가감쇠비이다. 이를 위하여 일련의 2차원 평면변형률 조건이 적용된 동적 연속체 유한차분 해석을 수행하였으며 암반 강성의 영향을 반영하기 위하여 전파속도는 450~2,500m/s까지 다양하게 적용하였다. 해석 결과를 기반으로 실무에 쉽게 적용할 수 있는 경험적 진동감쇠식-등가감쇠비 상관관계를 제시하였다.

2. 진동 감쇠

발파진동은 에너지 발산에 따라 폭원에서 멀어질수록 진동속도가 감소한다. 진동속도가 감소하는 요인은 기하학적 발산(geometric spreading)과 재료감쇠(material damping)이다. 기하학적 에너지의 감쇠를 수학적으로 나타내면 아래와 같다

$$A_2 = A_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^m \quad (1)$$

여기서 A_1 과 A_2 는 각각 r_1 과 r_2 에서의 진동 속도이며 m 은 기하학적 발산계수이다. 진동의 감쇠는 진동 파형, 폭원 위치 및 형상에 영향을 받으며 이에 따른 기하학적 발산계수 m 은 Table 1에 정리하였다. 일반적으로 시추

공발파 및 터널 발파의 경우 지표 아래의 한 지점에서 폭발하며 진동은 구형으로 전파되며 이때 기하학적 발산계수는 1이다.

진동 전파 시 기하학적 발산 외에 재료에서도 에너지 손실이 발생한다. 한 주기의 변형에서 발생하는 에너지의 손실을 재료 감쇠라 하며 이를 고려한 에너지 감쇠는 아래와 같다.

$$A_2 = A_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^m e^{-\alpha(r_2-r_1)} \\ \alpha = \frac{2\pi f \zeta}{c} \quad (2)$$

여기서 α 는 재료 감쇠계수(m^{-1})이며 f 는 하중주파수, c 는 재료의 전파속도, ζ 는 감쇠비이다. 재료 감쇠계수는 암반보다 흙에서 더 큰 값을 가지며 에너지의 감쇠는 고주파수의 진동일수록 커진다. Kim and Lee(2000)는 1개의 시험발파 기록을 기반으로 경험적 α 값을 제시하였지만 이의 산정방법은 제안되지 않았다.

Hino(1956)는 압력 감쇠의 경험식을 아래와 같이 제시하였다.

$$P = P_m \left(\frac{R}{R_0} \right)^\beta \quad (3)$$

여기서 R 은 이격거리, R_0 는 발파공의 반경, P 는 R 지점에서의 압력, P_m 은 발파공의 최대 압력이다. β 는 압력 감쇠지수이며 Hino(1956)는 암반의 경우 -1.5를 적용하도록 제시하였다. Hino의 경험식의 압력 감쇠지수(β)는 진동 에너지가 전달될 때 전파면에서의 단위면적당 에너지의 감소를 의미하므로 이론적으로는 기하학적발산계수(m)와 같지만 재료 감쇠가 포함된 경험적 값이다. Liu and Tidman(1995)이 제시한 암종별 압력 감쇠지수는 Table 2와 같다. 하지만 Liu and Tidman(1995)의 압

Table 1. Geometric spreading coefficient for source and wave type (Kim and Lee, 2000)

| Source location | Source type | Wave type | m | Physical |
|-----------------|-------------|-----------|-----|--------------------------|
| Surface | Point | Body | 2.0 | Single footing Load |
| | | Surface | 0.5 | Single footing Load |
| | Line | Body | 1.0 | Traffic load |
| | | Surface | 0 | Traffic load |
| Underground | Point | Body | 1.0 | Spherical load (=point) |
| | Line | Body | 0.5 | Cylindrical load (=line) |

Table 2. Pressure decay coefficient for rock type (Liu and Tidman, 1995)

| Rock type | Wave type | β | Rock velocity (V_p , km/sec) |
|--------------|-----------|---------|---------------------------------|
| Limestone | Emulsion | -1.65 | 3.5 |
| | ANFO | -1.54 | |
| Granite | Emulsion | -1.48 | 4.82 |
| | ANFO | -1.39 | |
| Granodiorite | Emulsion | -1.24 | 5.6 |
| | ANFO | -1.32 | |
| Pyrite | Emulsion | -1.38 | 6.0 |
| | ANFO | -1.29 | |

Emulsion: $\rho = 1.18 \text{ g/cm}^3$, VOD = 4.3 km/sec. ANFO: $\rho = 0.9 \text{ g/cm}^3$, VOD = 3.5 km/sec.

Table 3. Relationship between blast coefficient and rock strength (Kim et al., 1994)

| Uniaxial strength (MPa) | K | n |
|-------------------------|-------|------|
| 35 | 286.2 | 2.11 |
| 88 | 37.5 | 1.94 |
| 119 | 21.27 | 1.41 |
| 138 | 47.4 | 1.3 |
| 145 | 132 | 1.4 |
| 145 | 12.6 | 1.13 |

력 감쇠지수는 무결 암석에 설치된 단일공에 대해 제시된 경험식으로 이를 암반에 적용할 수 없다.

Wiss(1981)는 지발당 최대 장약량과 이격거리의 함수로 경험적 진동감쇠식을 제시하였다. 이는 발파기록을 바탕으로 제시된 진동감쇠식이며 국내외에서 설계 및 기준으로 사용되고 있다. 진동감쇠식은 아래와 같다.

$$PPV = K(SD)^{-n} \quad (4)$$

여기서 K 와 n 은 대상지반의 발파계수이고 $SD(=R/W^{1/2})$ 는 환산거리이다. R 은 폭원으로부터의 이격거리, W 는 지발당 최대 장약량이다. K 와 n 은 단순회귀분석을 통해 계산되며 두 계수는 높은 상관관계를 가지고 있다(Yan et al., 2013). 대상지반의 감쇠지수 n 은 $\log(SD)-\log(PPV)$ 그래프상의 기울기이며 K 는 Y축의 절편이다.

Table 3은 서울시 지하철 공사 2~4호선 건설 시 측정된 발파 진동계측기록으로부터 도출된 발파계수이다. 대상 지반의 암반강도가 높아질수록 발파계수 K 와 n 은 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 단단한 암일수록 발파로 발생하는 속도감쇠가 연약한 암보다 적게 발생함을 의미하며 암 강도는 K , n 값에 영향을 주는 것으로 나타났다. Choi and Won(2010)은 발파계수 K 와 n 이 발

파조건보다 지반 및 암반조건에 더 민감하다고 보고하였다.

3. 수치해석

본 연구에서는 상용 유한차분해석 프로그램 FLAC^{2D} (Itasca Consulting Group, 2011)을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 해석영역의 크기는 가로 130m, 높이 60m이며 발파 위치는 심도 40m로 설정하였다(Fig. 1). 지반은 점탄성으로 가정하였으며 적용된 물성은 Table 4에 정리하였다.

폭발의 복합적 과정은 모사하지 않았으며 탄성진동 파만을 모사하였다. 해석 시 발파로 인하여 발생하는 파쇄영역을 반지름이 1m인 원으로 가정하였으며 이 영역 외부는 탄성영역이라고 가정하였다. 압력하중은 파쇄영역-탄성영역 경계면에 수직인 방향으로 재하 하였다. 터널발파진동의 탁월주파수의 범위가 50~100Hz로 알려졌다으므로(Dowding, 1996; Yang et al., 2003) 본 연구에서는 지속시간이 0.01초인 싸인 펄스 함수를 하중으로 적용하였다(Fig. 2).

시간영역에서의 점성감쇠는 $[C]$ 를 통해 모사하며 Rayleigh 공식은 다음과 같다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5)$$

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

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

$$\beta = \frac{\xi}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n} \quad (6)$$

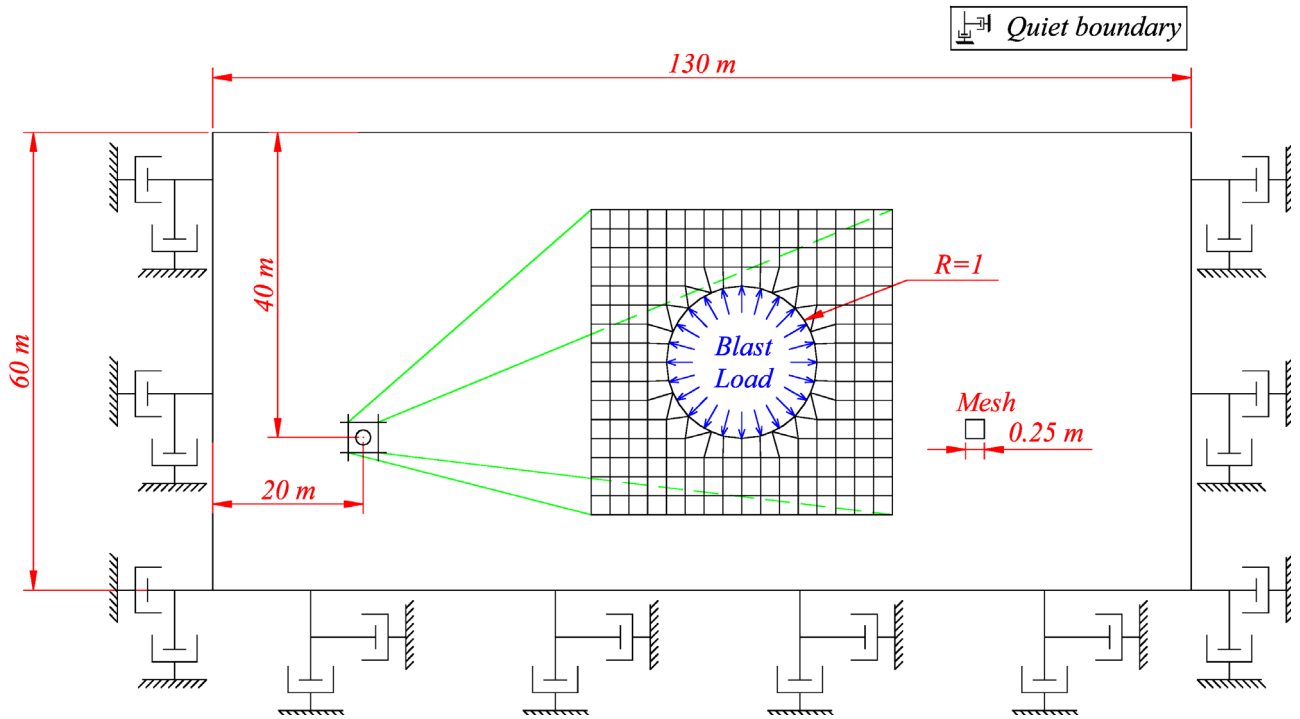


Fig. 1. Modeling

Table 4. Material properties

| Type | Shear velocity (m/sec) | Unit weight (kN/m ³) | Poisson ratio |
|----------------|------------------------|----------------------------------|---------------|
| Hard rock | 2500 | 25 | 0.25 |
| | 2000 | | |
| | 1500 | | |
| Soft rock | 1200 | 23 | 0.27 |
| | 1000 | | |
| | 800 | | |
| Weathered rock | 650 | 21 | 0.3 |
| | 500 | | |
| | 450 | | |

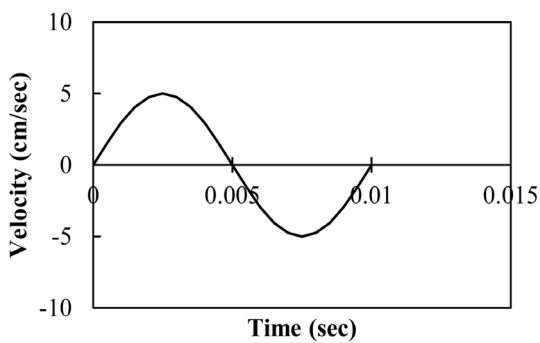


Fig. 2 Blast load

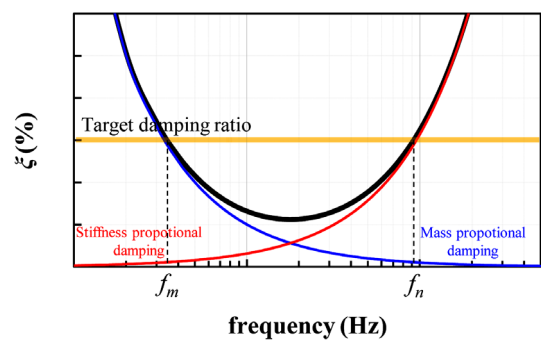


Fig. 3. Full rayleigh damping

여기서 ζ 는 감쇠비, f_m 과 f_n 은 Rayleigh 공식의 주파수의존성을 결정하는 주파수이다. Fig. 3은 Rayleigh 감쇠를 도시하였다. Rayleigh 감쇠는 f_n 과 f_m 에서만 목표 감

쇠비와 일치한다. f 가 f_m 보다 크고 f_n 보다 작은 범위($f_m < f < f_n$)에서는 목표 감쇠비보다 적게 적용되며, 이외의 주파수구간($f_m > f$, $f_n < f$)에서는 크게 적용된다. 실제

지반의 감쇠는 진동주파수의 영향을 받지 않으나 시간 영역에서 수행되는 Rayleigh 공식은 진동 주파수의 영향을 받으므로 f_m 과 f_n 의 결정이 중요하다(Park et al., 2010). 따라서, 수치적으로 큰 감쇠가 발생하지 않도록 f_n 은 발파하중의 탁월 주파수를 적용하고 f_m 은 발파진동 주파수가 크게 변하지 않는 값을 설정한다. 본 연구에서 f_n 는 발파하중의 탁월 주파수인 100Hz, f_m 은 50Hz(=1/2 f_n)를 적용하였다.

요소의 크기(Δl)는 지진파 전파를 정확하게 모사할 수 있도록 Kuhlemeyer and Lysmer(1973)가 제안한 최대 크기보다 작게 적용하였다.

$$\Delta l \leq \frac{V_p}{10f} \quad (7)$$

여기서 V_p 는 압축파 속도이며 f 는 입력하중의 최대주파수이다. 본 연구에서 적용한 하중 주파수를 고려하여 최대 요소 크기를 0.25m로 하였다. 하부 및 측면 경계조건으로는 Lysmer and Kuhlemeyer(1969)가 제안한 점성댐퍼를 적용하여 발파진동이 반사되지 않고 흡수하도록 하였다.

4. 해석결과

본 절에서는 발파진동의 해석결과를 분석하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 지반 물성과 감쇠비를 달리하여

해석을 수행하였으며 계산된 진동특성을 분석하였다.

4.1 진동성분

발파 원에서 전파되는 에너지 성분을 평가하기 위해 계산된 수평방향(X)와 수직방향(Y)방향의 속도를 Fig. 4에 도시하였다. 전파되는 진동은 발파 원에서 멀어질수록 전파방향이 수평에 가까워지므로 수직방향 속도는 감소하며 수평방향의 속도는 증가한다. 수평방향과 수직방향속 이력곡선은 Fig. 5에 도시하였다. 이력곡선의 경사는 폭원과 계산된 위치와의 경사와 일치하는 것으로 확인할 수 있으며 이는 폭원에 수직방향으로 전파되는 압축파 성분이 지배적인 것을 의미한다. 이 결과는 Kim and Lee(2000)이 수행한 시추공 발파의 계측기록과 유사하다.

4.2 지표면과 지중에서의 진동

Fig. 6에는 감쇠비가 5%인 연암($V_s=1,000\text{m/s}$)에서의 시간에 따른 최대진동속도 스냅샷(snapshot)을 도시하였다. 발파로 유발된 진동은 방사형으로 퍼져가며 폭원에서 멀어질수록 최대진동속도가 감소하는 경향을 보인다. 하지만 지표면에 도달한 진동의 크기는 지반 내부의 진동보다 크게 나타났다. 이는 진동이 지표면에 도달할 때 상향입사파(A_n)와 동일한 크기의 반사파(B_n)가 발생기 때문이다. 따라서 최대진동속도는 동일한 이격거

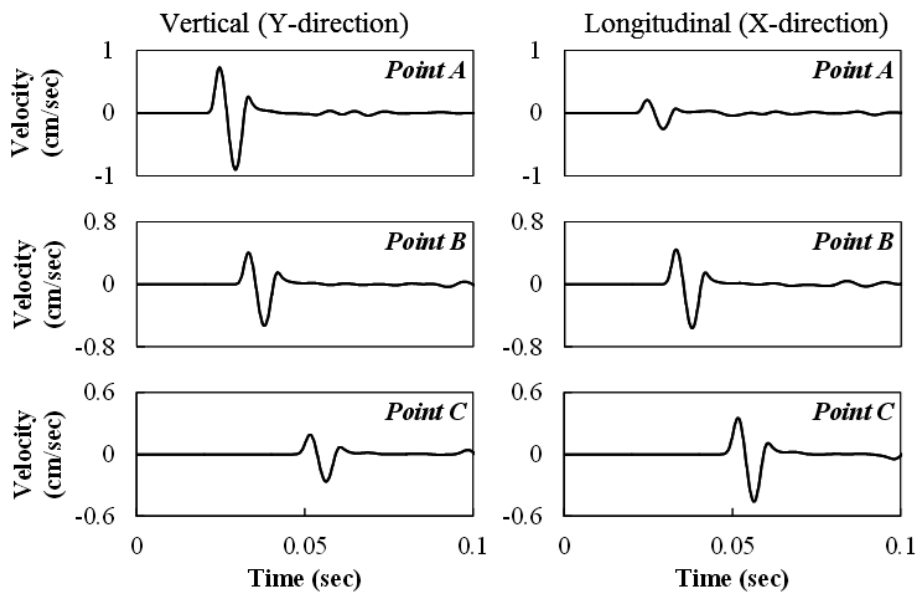


Fig. 4. Particle velocity time domain

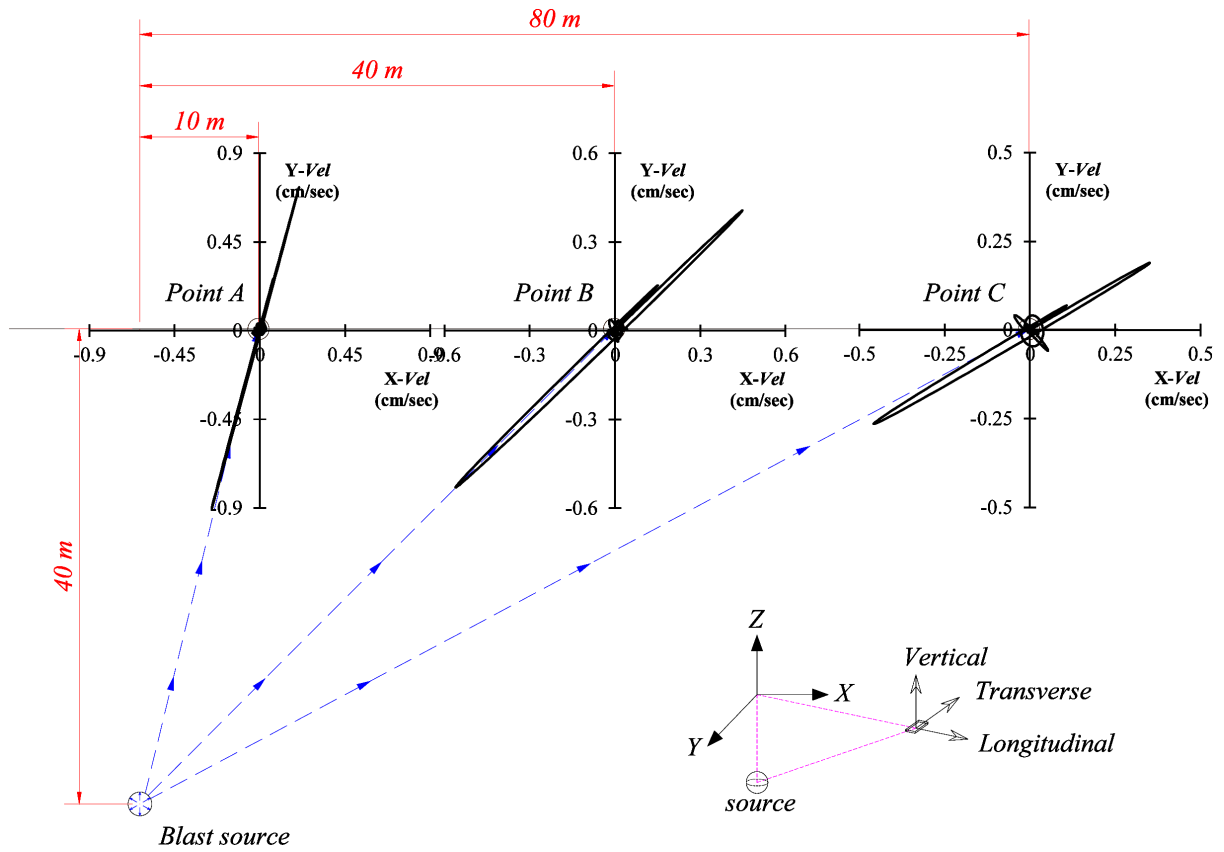


Fig. 5. Particle motion of underground blasting

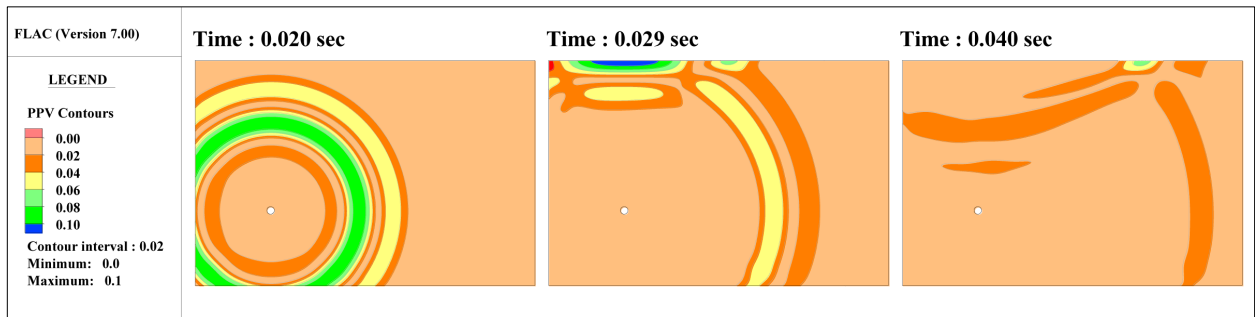


Fig. 6. Propagation of blast vibration

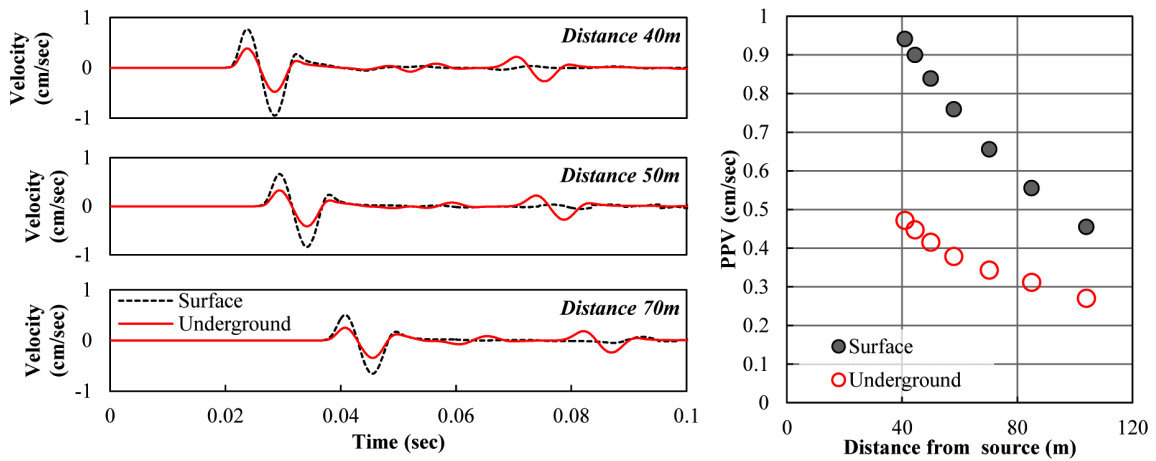


Fig. 7. Comparison of calculated velocity between surface and underground

리라 할지라도 지반 내부 보다 지표면에서 더 크다. Fig. 7는 지반 내부와 지표면에서의 이격거리에 따른 진동속도를 도시하였다. 지반 내부에서의 진동은 입사파와 반사파의 영향을 받으며 이때 반사파의 크기는 입사파보다 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 지중으로 전파되는 진동은 지표면과 다르므로 지표면 계측기록으로 도출된 진동감쇠식을 지중에 적용하는 것은 적절하지 않은 것을 확인할 수 있다.

4.3 전단파속도의 영향

Fig. 8은 감쇠비가 각각 1%와 5%인 연암($V_s=1,000\text{m/s}$)의 최대진동속도 감소율을 도시하였다. 최대진동속도

의 감쇠는 파쇄영역을 중심으로 반경 방향으로 발생하며 지반 감쇠비에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 또한 파쇄영역 주변의 속도 감쇠는 감쇠비에 따라 큰 차이를 보이지 않으나 이격거리가 커질수록 증가한다. 이는 큰 영역의 해석에서 지반 감쇠비 결정의 중요성을 보여준다. 감쇠비에 따른 전파 특징을 분석하고자 한 지점에서의 속도시간이력 및 주파수 영향을 Fig. 9에 도시하였다. 계산된 지점은 파쇄영역 중심에서 수평으로 40m 이격된 위치의 지표면이며 감쇠비가 커질수록 속도의 진폭이 작아지는 것으로 나타났지만 주파수의 특징에는 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지반 감쇠비는 발파진동 추정 시 산정되는 속도 크기에만 영향을 미친다.

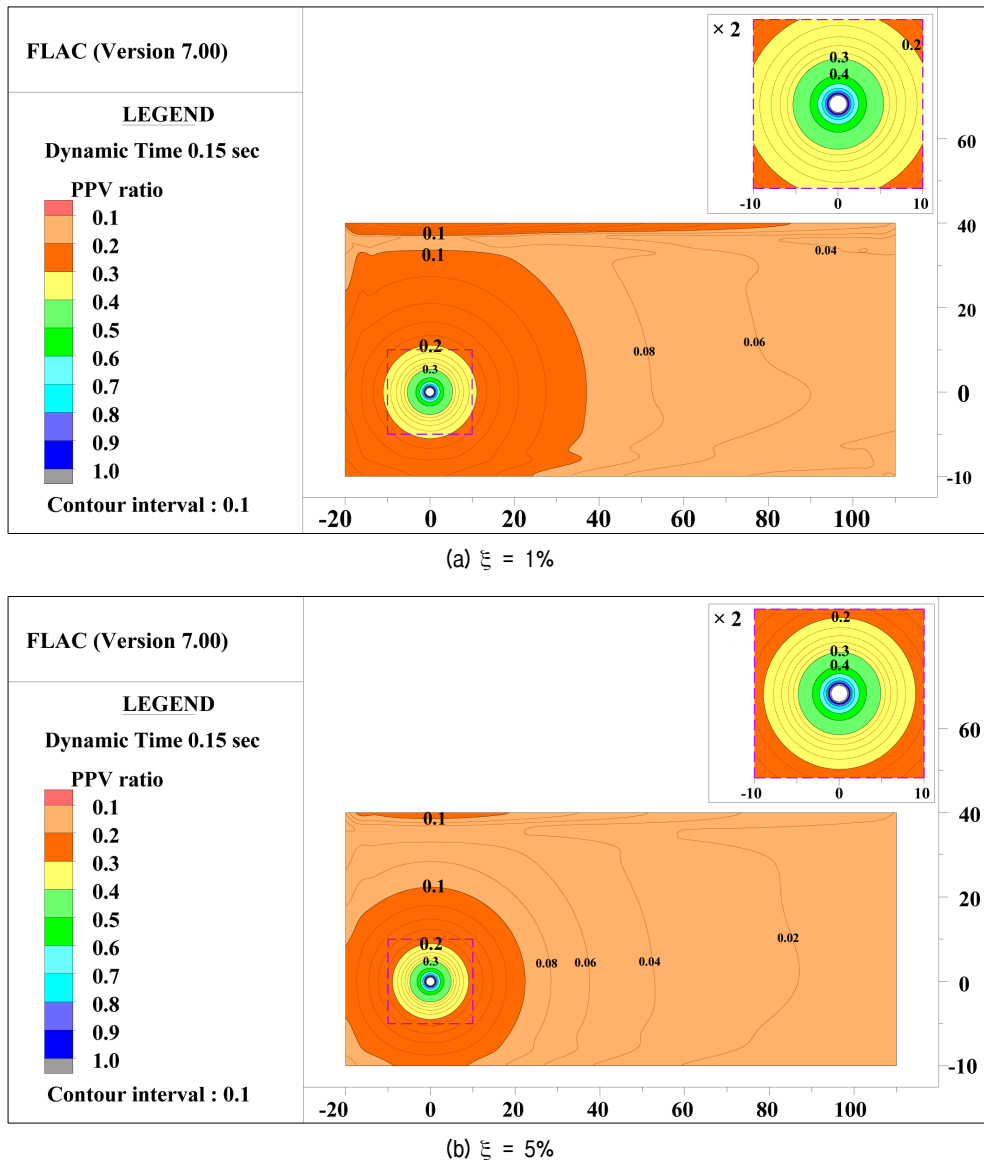


Fig. 8. Comparison of PPV ratio between 1% and 5%

Fig. 10은 압 강성에 따른 영향을 비교하기 위하여 풍화암의 전단파 속도가 각각 $V_s=450, 500, 600\text{m/s}$ 일 때의 이격거리에 따른 최대진동속도를 도시하였다. 감쇠비가 1%(Fig. 10a)인 경우 전단파 속도에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났으나, 5%(Fig. 10b)일 때는 전단파속도가 낮을수록 크게 감쇠되는 경향을 보였다. 결과적으로, 암반의 강성이 속도 감쇠에 영향을 주지만 감쇠비에 비해서는 영향이 작은 것을 의미한다.

4.4 진동감쇠식에 상응하는 등가감쇠비

진동감쇠식에서 발파계수 K 는 폭발하중의 크기에 영향을 받으며 감쇠지수(n)는 대상지반의 감쇠특성을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 진동감쇠특성만을 고려하여 등가감쇠비를 도출하고자 감쇠비는 1~10%까지 적용하였으며 이때 지반의 물성은 Table 4에 정리하였

다. 감쇠지수는 단순회귀분석을 통하여 산정하였으며 이때 적용된 속도는 지표면에서 계산된 값이다. 지반 감쇠비에 따른 감쇠지수의 결과는 Fig. 11에 도시하였다. 암반 강성이 작아질수록 진동 감쇠의 영향이 커지는 것으로 나타났다. 따라서, 감쇠지수가 동일하더라도 암반의 종류에 따라 다른 등가 감쇠비를 적용해야 한다. 암반 강성에 따라 계산된 감쇠지수의 결과를 바탕으로 제안한 ‘등가감쇠비-감쇠지수’ 차트를 Fig. 11b에 도시하였다. 이를 통해 대상지반의 전단파 속도와 감쇠지수(n) 정보만 제공되면 2차원 연속체 평면변형률 조건의 등가 감쇠비를 손쉽게 결정할 수 있는 매우 유용한 차트이다.

5. 결론

본 논문에서는 2차원 평면변형률 조건의 동적 연속체 해석을 수행하여 발파진동 전파 및 감쇠 특성을 분석하

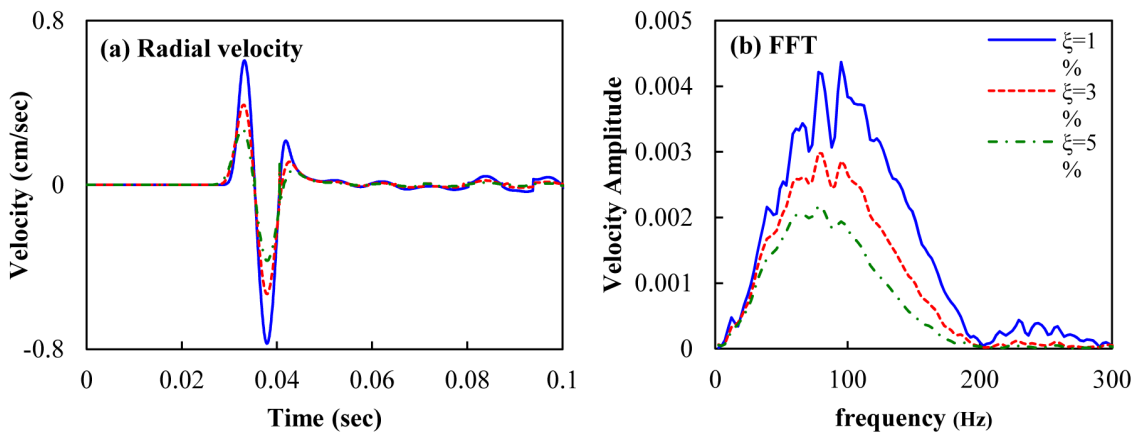


Fig. 9. Radiation velocity at Point B

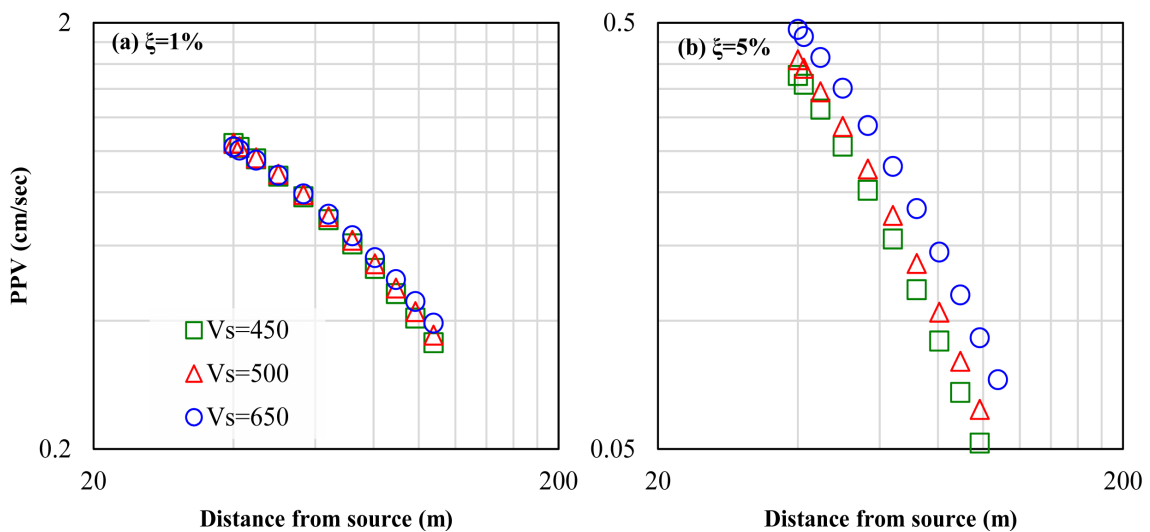


Fig. 10. Attenuation of material dynamic properties

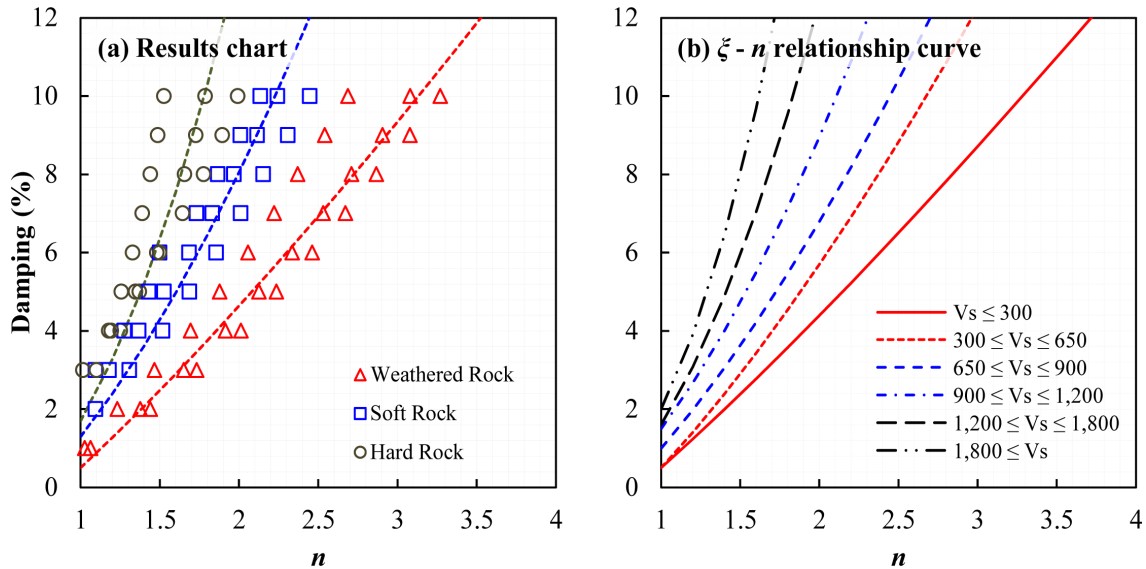


Fig. 11. Relationship of Equivalent damping ratio and attenuation coefficient

였으며 진동감쇠식에 상응하는 등가감쇠비를 제시하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 2차원 평면변형률 조건에서 발파영역을 원으로 모델링할 경우 실제 구면파의 전파와는 기하학적 확산이 다르므로 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 이를 고려한 등가감쇠비를 제시하였다.
- (2) 지중에서의 발파진동은 지표면에 비하여 작은 것으로 계산되었다. 따라서, 지하 및 지중 구조물의 진동 영향 평가 시 지표면 측정기록을 통해 도출된 진동 감쇠식을 사용하는 것은 매우 보수적이다.
- (3) 발파진동의 감쇠는 암반의 강성과 감쇠비의 영향을 모두 받는 것으로 나타났다. 감쇠비의 영향이 암반의 강성에 비하여 큰 영향을 미치지 않지만 암반의 강성도 해석 시 고려해야 하는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서는 목표 진동감쇠식에 상응하는 등가감쇠비를 산정할 수 있는 감쇠지수-전단파속도-등가감쇠비 상관관계를 제시하였다. 제시된 상관관계는 2차원 평면변형률 연속체 해석에 적용 가능하도록 해석조건에 대한 추가적인 보정이 적용되었다. 제시된 상관관계는 최초로 부지 고유의 특성이 고려된 감쇠비 산정방법으로 추후 설계 시 널리 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국도로공사에서 발주된 “KTX 경부선

하부 터널발파 공사에 따른 도로 손상영향 검토 및 DB 구축 용역”의 과제 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ang, K. and Valliappan, S. (1988), “Pseudo-plane Strain Analysis of Wave Propagation Problems Arising from Detonations of Explosives in Cylindrical Boreholes”, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol.12, No.3, pp.301-322.
2. Chen, S., Cai, J., Zhao, J., and Zhou, Y. (2000), “Discrete Element Modelling of an Underground Explosion in a Jointed Rock Mass”, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol.18, No.2, pp.59-78.
3. Choi, H. B. and Won, W. H. (2010), “Comparative Study on the Characteristics of Ground Vibrations Produced from Borehole Test Using Electronic and Electric Detonators”, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol.28, No.2, pp.37-49.
4. Choi, S. O., Park, E. S., Sunwoo, C., and 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.
5. Deng, X. F., Zhu, J. B., Chen, S. G., Zhao, Z. Y., Zhou, Y. X., and Zhou, X. Y. (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.
6. Dowding, C. (1996), *Construction vibrations*, Prentice Hall, pp. 41-60.
7. Hao, H., Wu, Y., Ma, G., and 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.
8. Hino, K. (1956), *Fragmentation of Rock through Blasting and Shock Wave; Theory of Blasting*, Quarterly of the Colorado School of Mines.

9. Itasca (2004), UDEC: *Universal Distinct Element Code, User*, Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.
10. Itasca (2011), FLAC: *Fast Lagrange Analysis of Continua, Version 7.0*, Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.
11. Jeon, S. S., Kim, D. S., and 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.
12. Kim, D. S. and Lee, J. S. (2000), "Propagation and Attenuation Characteristics of Various Ground Vibrations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.19, No.2, pp.115-126.
13. Kim, S. I., Jeong, S. S., and Cho, H. Y. (1994), "The Reliability of Blast Vibration Equation", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.14, No.3, pp.573-582.
14. Konya, C. J. and Walter, E. J. (1991), *Rock blasting and overbreak control*, National Highway Institute, pp.5.
15. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol. 99, Tech Rpt.
16. Liu, Q. and Tidman, P. (1995), "Estimation of the Dynamic Pressure around a Fully Loaded Blast Hole": Retrieved from Canmet Mrl Experimental Mine.
17. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. (1969), "Finite Element Model for Infinite Media", *Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE*, Vol. 95, pp.859-877.
18. Ma, G., Li, J., and Zhao, J. (2011), "Three-phase Medium Model for Filled Rock Joint and Interaction with Stress Waves", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol.35, No.1, pp.97-110.
19. Park, D. H., Cho, Y. G., and Jeon, S. W. (2006), "A Case Study on the Blasting Analysis of Slope Using Monitored Vibration Waveform", *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol.24, No.2, pp.41-50.
20. Park, D., Shin, J. H., and 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, pp.71-85.
21. Persson, P. A., Holmberg, R., and Lee, J. (1993), *Rock blasting and explosives engineering*, CRC press.
22. Shin, J. H., Moon, H. G., and Chae, S. E. (2011), "Effect of Blast-induced Vibration on Existing Tunnels in Soft Rocks", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.26, No.1, pp.51-61.
23. Torano, J., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J. M., and Casal, M. D. (2006), "FEM Models Including Randomness and Its Application to the Blasting Vibrations Prediction", *Computers and Geotechnics*, Vol.33, No.1, pp.15-28.
24. Wiss, J. (1981), "Construction Vibrations: State-of-the-art", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.107, No.2, pp.167-181.
25. Yan, W. M., Tham, L. G., and Yuen, K. V. (2013), "Reliability of Empirical Relation on the Attenuation of Blast-induced Vibrations", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.59, pp.160-165.
26. Yang, H. S., Lim, S. S., and Kim, W. B. (2003), "Tunnel Blasting Design with Equation Obtained from Borehole and Crater Blasting", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp.327-333.

Received : March 11th, 2015

Revised : April 10th, 2015

Accepted : April 13th, 2015