

시추공 진동 탐사를 이용한 발파 진동의 수치해석적 분석

이수곤

서울시립대학교 토목공학과

김웅태

서울시립대학교 토목공학과

임대규

대영발파엔지니어링 대표

1. 서 론

최근 들어 사회 간접 시설에 대한 국가 및 공기관에서의 턴키(Turn-Key ; 일괄수주계약) 발주가 급증하고 있으며, 발파시 예상되는 진동 수준을 검토하기 위하여, 조사 및 설계 단계에서 진동 감쇠식을 산출하게 된다. 이와 같은 과정에서 터널 및 사면 발파시 발생되는 진동을 예측하기 위하여 시추공 진동탐사 기법을 적용하고 있으며, 발생 진동 수준 및 환경 오염도를 예측하기 위하여 수치해석 기법을 통하여 주요 지장물별 예상 진동 수준을 분석하고 있다.

시추공 진동 탐사의 경우, 최근 분산 장악 기법을 적용하여 실험자의 의도에 따른 적정 지역에 장악을 실시하여 발파할 수 있으므로 보다 정확한 진동 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있다. 또한 컴퓨터의 급속한 발달과 수치해석 프로그램의 급속한 발달을 통해 발파 진동에 대한 수치해석적 접근이 증가하고 있다. 그러나, 수치해석시 가장 중요한 입력 상수 중 하나인 대수감쇠값(ξ)이 토질내에서 적용되는 값을 그대로 입력하는 경우가 많이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 시추공 진동 탐사에서 획득한 진동값을 수치해석을 실시하여 현장 암반에 적합한 대수감쇠값을 획득하여 현장내 정확한 예상 진동 수준을 분석하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1. 발파 폭광압력 추정식

화약류 발파시 발생되는 폭광압력은 제안 학자에 따라 차이는 발생하고 있으나, 그 추정식은 아래와 같이 나타나고 있다.

표 1. Calculation of detonation pressure

제안자	추정식
Johannson & Persson	$P_d = 2.1(0.36 + \rho_e) D_e^2$
Atlas powder company	$P_d = 2.325 \times 10^{-7} \times \rho_e \times D_e^2$
National Highway Institute(NHI)	$P_d = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times \rho_e \times D_e^2}{1 + 0.8 \rho_e}$
Liu & Tidman	$P_d = 1.62 \times \rho_e \times D_e^2 \left(\frac{\rho_r \times C}{\rho_e \times D_e} \right)^{0.25}$
International Society of Explosive Engineers	$P_d = 2.5 \times 10^{-6} \times \rho_e \times D_e^2$

2.2. 진동 감쇠 이론 검토

본 연구에 있어 진동 감쇠를 나타내는 Damping 계수 산출은 Rayleigh Damping을 도입하였다. 이 이론의 Damping Matrix C는 Mass Matrix M과 Stiff Matrix K로 나타낼 수 있다.

$$C = \alpha M + \beta K$$

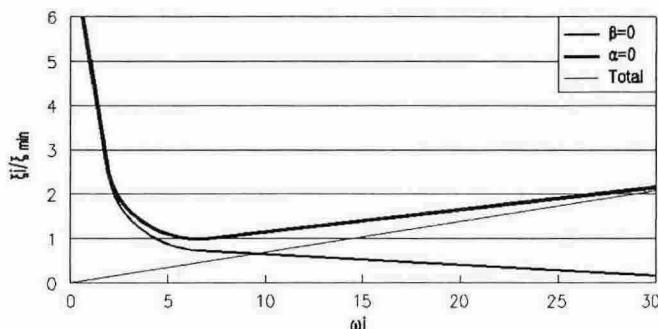
여기서, α : 질량비 레댐핑계수 (Mass-proportional Damping Constant)

β : 강성비 레댐핑계수 (Stiffness-proportional Damping Constant)

일반적으로 다중모드계에서 ξ_i (Critical Damping Ratio ; 대수감쇠값)는 ω_i (Angular Frequency of the System)의 항으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i f_i \quad \xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right)$$

여기서, ξ_i 를 ξ_{\min} 으로 정규화시킨 다음, ω_i 와 연계시켜 그래프로 나타내면 다음과 같다



위의 그래프에서 ξ_{\min} , ω_{\min} , α , β 와의 관계를 도출하면 다음과 같다.

$$\xi_{\min} = \sqrt{\alpha \cdot \beta}, \quad \omega_{\min} = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\beta} \right)}$$

$$\alpha = \xi_{\min} \cdot \omega_{\min}, \quad \beta = \frac{\xi_{\min}}{\omega_{\min}}$$

그러나, 일반적으로 국내에서 수치해석시 ξ_i 에 대한 값은 대체로 토질에서 획득한 값을 토대로 5%를 적용하고 있다.

3. 본 론

3.1. 실험 과정

실험은 시추공 2개소에서 5단 분산 장약을 실시하여 적용하였으며, 발파 진동 계측을 위하여 총 7대의 발파 진동 계측기를 설치하였다. 설치 간격은 지형 조건등을 고려하여 10~20m의 등간격으로 설치하였다.

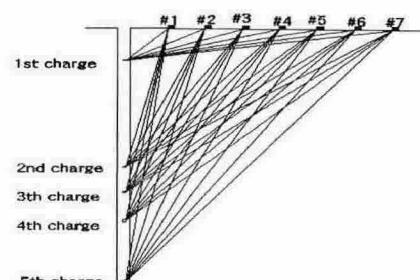


그림 1. Figure of Charge in borehole

3.2. 실험 결과

분산장약(Deck-Charge) 공법을 적용하여 발파를 실시하여 각 시추공별 진동 파형을 획득하였다. 시추공 A-1의 경우, 3회 발파의 파형이 계측되지 아니하였으며, A-2의 경우, 모든 발파에 대하여 파형이 계측되었다. 이와 같이 획득한 진동 DATA는 ASCII 파일로 변환한 후 각 발파 시간대별로 진동값을 획득하였다.

3.3. 실험 결과 분석

발파 진동은 회귀 분석 이론에 근거하여 회귀 분석을 실시하여 현장에 적합한 진동 감쇠식을 선정하였다.

표 2. Regression Result of PPV

구 분		A-1	A-2
분석 Graph			
진 동 감쇠식	자 승 근	$V_{95\%} = 4652 \left(\frac{D}{2\sqrt{W}} \right)^{-2.141}$	$V_{95\%} = 639.398 \left(\frac{D}{2\sqrt{W}} \right)^{-1.854}$
	삼 승 근	$V_{95\%} = 7323 \left(\frac{D}{2\sqrt{W}} \right)^{-2.320}$	$V_{95\%} = 891.352 \left(\frac{D}{2\sqrt{W}} \right)^{-1.849}$

3.4. 수치해석 실시

수치해석은 A-1공과 A-2공으로 구분하여 실시하였으며, 대수감쇠비를 3 ~ 12% 사이의 값을 주어 현장 암반내 적합한 대수감쇠비를 산출하였다.

표 3. The numerical modelling of borehole

구 분		시추공 A- 1 단면	시추공 A- 2 단면
진동 분포도			
예상 파형			
적용 대수감쇠비		5%	10%
진동수준	실 측 값	0.259cm/sec	0.043cm/sec
	수치 해석	0.276cm/sec	0.044cm/sec

위에서 획득한 각 시추공별 대수 감쇠비를 근거로 분석 적용 단면별 해석을 실시하였다.

표 4. The output of numerical modelling

구 분	시추공 A- 1 적용 단면	시추공 A- 2 적용 단면
진동 분포도		
예상 과정		
예상진동	회귀분석	0.870 cm/sec
	수치해석	0.728 cm/sec
적용 결과	수치해석 결과와 회귀분석 결과가 8%내외의 차이가 나타남.	

4. 결 론

1. 발파 설계시 인접 주요 구조물에 대한 진동 수준을 예측하기 위하여 시추공 진동 탐사 기법을 이용하여 회귀 분석 결과를 적용하는 경우와 수치해석 기법을 이용하여 분석하는 기법으로 예측을 하고 있다.
2. 일반적으로 수치해석 단계에서 암반내 대수 감쇠비는 토사에서의 대수 감쇠비의 평균값(5%)을 적용하여 적용하고 있다. 그러나 암반의 경우, 토사와 상이하므로 이와는 달리 적용하여야 한다.
3. 이에 따라 Visual Fea를 이용하여 암반내 고유주파수를 분석하였으며, 시추공 진동 탐사시 계측된 진동 DATA를 토대로 분석 구간내 암반의 대수감쇠비(ξ)를 산출하였다. 산출된 대수감쇠비는 시추공 A-1의 경우, 5%, A-2의 경우, 10%로 상이한 결과값이 나타났다.
4. 시추공 진동탐사 결과를 토대로 2개소에 대하여 진동 감쇠식을 산정하였으며, 개별 1개의 Modeling을 통하여 발생 진동 수준을 예측하였다.
5. 2개소의 Modeling에서의 시험발파 결과의 진동 감쇠식 적용과 수치해석 적용 결과를 분석한 결과, 2개의 예측 수준의 상호 오차는 8%내외로 나타나고 있다.
6. 이에 따라 수치해석을 통하여 발파 진동 전달 양상을 분석할 경우, 현장 실측 DATA를 이용하여 현장내 적합한 대수감쇠비를 선정하여야 할 것으로 분석되었다.

참고문헌

- 임성식, 양형식, 2003, 시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구, 대한화약발파공학회 제21권 2호. 2003, 15~19.
- 최성웅, 박의섭, 선우준, 정소결, 2004, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구, 한국암반공학회지 Vol. 14, No.2, 108~120.
- 양형식, 두준기, 조상호, 김원범, 2003, 다단 장약에 의한 터널진동제어 발파의 수치해석, 한국암반공학회지, Vol. 13, No. 5, 403~411.