

수치해석을 이용한 발파진동의 예측연구

조상호¹⁾ 양형식²⁾ 류창하³⁾

1. 서론

발파하중에 의해 발생된 진동은 주변 구조물이나 인체에 영향을 미쳐 환경문제가 발생된다. 발파에 의한 굴착시공 전 설계단계에서 수치해석으로 지반진동을 예측하여 공사 전에 적절한 진동감쇠공법 및 대책을 적용하여 환경문제를 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 발파하중에 의한 지반의 진동속도를 예측하기 위해서 수치해석결과와 계측결과를 비교 분석하여 현장 발파조건에 맞는 수치해석의 입력변수를 결정하여 시험발파결과와 비교하였다.

2. 수치해석

발파하중에 의한 지반진동의 전달 특성 및 지반의 응답특성을 연구하기 위해서 유한차분법 프로그램인 FLAC를 사용하였다. 경계조건으로서 비반사경계(quiet boundary)를 사용하였으며 탄성모델을 적용하였다. 감쇠특성으로서 Rayleigh감쇠가 적용되었으며 지반의 감쇠율과 진동수가 적용되었다. 충격하중은 반정현파 충격하중과 유사한 파형으로서 압력이 갑작스레 증가하다 최대치에서 비교적 서서히 감소하는 형태의 하중이력을 이용하였다. 적용된 하중함수는 다음과 같다.¹⁾(Fig. 1)

$$p = p_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad \alpha = n\omega/\sqrt{2}, \quad \beta = m\omega/\sqrt{2} \quad (1)$$

여기 n , m 은 충격파의 형태와 관련된 변수로서 거리에 따라서 결정된다.(Table. 1) w 는 원고유진동수로서 탄성파속도 C_p 와 등가공반경(equivalent borehole radius) a 에 의해서 결정되며 다음과 같다.

$$w = \frac{2\sqrt{2}C_p}{3a} \quad (2)$$

하중함수의 증가시간 t_R 은 다음식으로 결정하였다.

$$t_R = \frac{\sqrt{2} \ln(n/m)}{(n-m)w} \quad (3)$$

수치해석 모델로서 상부경계는 자유면(free surface)으로 하였으며 좌우측과 하단 경계는 quiet boundary로 지정하였다. 발파하중의 입력지점은 모델의 좌측상단으로서 화살표로 표시되어 있으며 수직천공이 일렬로 배열된 발파공을 측면에서 자른 형태이다. 이 모델을 사용하여 진동속도를 계산하였으며 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 수치해석의 입력변수에 따른 응답수준을 평가하기 위해서 감쇠율, 진동수, 등가공반경, 등가장약장, 하중압력을 변화시키며 해석을 수행하였다. 수치해석방법은 위의 입력변수 중 하나만 변화시키고 나머지 입력변수는 고정하여 해석을 하였다. 기본입력값으로서 감쇠율은 0.05, 진동수는 20Hz, 등가공반경은 0.15m, 등가장약장은 1m, 하중압력은 2000MPa이다. 여기 감쇠율 0.05는 거리감쇠지수 1.6에 해당한다.

1) C.T.Recycling(주)

2) 전남대학교 자원공학과 교수

3) 자원연구소 자원개발연구부 책임연구원

3. 발파진동감쇠식

계측한 진동데이터의 수는 211개로서 환산거리 진동예측식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V = 2754 \left(\frac{D}{W} \right)^{-1.836}, \quad r = -0.92 \quad (4)$$

분석에 적용하기 위해 진동예측식(Holmberg and Person)식을 사용하여 다음과 같은 진동 감쇠식으로 나타내었다.(Table. 2)

$$V_{\max} = K D^{-n} \quad (5)$$

여기서 n 은 거리 D 에 따른 감쇠지수이며 외국의 경우 1.3~1.6으로 알려져 있다.³⁾

4. 분석 및 결과

입력변수에 따른 수치해석의 응답

감쇠율은 지반 내를 통과하는 전달파에 크게 영향을 미치는 요소로서 동적 해석에서는 상당히 중요하며, 진동속도의 수준에 반비례한다.(Fig. 3) 거리감쇠지수 n 와 감쇠율 β 과의 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$n = -1.28 + 6.17 \beta, \quad r = -0.99 \quad (6)$$

이식은 현장의 진동감쇠특성을 수치해석에 입력하기 위해서 사용된다.

입력진동수에 따른 진동속도의 변화를 알아보기 위해서 진동수를 5, 10, 15, 20, 25 로 증가시키며 수치해석을 하였으며 그 결과 진동수준은 진동수가 증가됨에 따라서 서서히 증가됨을 볼 수 있다. 등가공반경 a 의 크기에 따른 진동의 수준을 알아보기 위해서 5cm 씩 증가시키며 해석을 하였다. 그 결과 등가공반경이 증가함에 따라서 진동수준이 증가하는 경향을 나타내었다. 등가장약장 즉 하중압력의 적용길이에 따른 진동수준의 변화를 알기 위해서 적용길이를 1, 2, 3, 4, 5 m로 증가시키며 해석을 수행하였다. 진동속도는 등가장약장이 길어짐에 따라 증가되었으며 거리가 멀어짐에 따라 현저한 감쇠가 일어났다. 하중압력은 수치해석의 응답수준에 가장 큰 영향을 주는 요소로서 하중압력의 증가에 따라서 진동수준은 증가됨을 볼 수 있다.

진동감쇠식을 이용한 수치해석 입력변수결정

수치해석결과와 진동감쇠식의 변수해석결과로서 등가공반경과 하중압력이 장약량과 상관성이 있어 수치해석 입력변수를 등가공반경과 하중압력으로 선정하였다.

등가공반경(equivalent radius) a 와 장약량 W 의 관계는 Fig. 4에 나타내었으며 이 관계를 식으로 나타내었다.

$$a = -0.07 + 0.27 W, \quad r = 0.99 \quad (7)$$

하중압력과 장약량의 관계는 Fig. 5와 같으며 하중압력 P 를 장약량 W 와 거리 D 의 관계로 나타내었다.

$$P(\text{MPa}) = 1756 + 2238W - 18D - 13WD, \quad r = 0.99 \quad (8)$$

이 식의 적용 가능한 범위는 20 ~ 70 m로 제한한다.

입력변수를 이용한 진동속도의 예측 및 검토

수치해석입력변수를 검토하기 위한 현장데이터는 광주 제2순환도로공사 구간 소태현장에서 획득하였다. 사용폭약은 에멀전폭약(Newmite 5000)으로서 약경은 $\phi 50\text{mm}$, 길이는 400mm 이다. 지발당 장약량은 2.5 kg 로서 수직천공의 벤치발파이다. 현장 진동감쇠식은 다음과 같으며 Fig. 6에 표시하였다.

$$V_{\max} = 3783 D^{-1.67}, r = 0.96 \quad (9)$$

수치해석을 위한 모델은 $100 \times 50\text{m}$ 의 규모로서 좌우측 경계는 비반사경계(quiet boundary)로 하였으며 물성은 Table 1의 값을 사용하였다. 수치해석에는 등가공반경식(7)과 하중압력식(8)을 적용하였으며, 현장의 지반감쇠특성을 입력하기 위해서 감쇠율식(6)을 적용하여 1.67을 입력하였다. 하중압력식의 경우 거리를 60m 로 고정하여 해석을 하였다. 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 살펴보면 하중압력식을 적용하여 계산된 진동데이터는 현장진동속도에 비해서 60m 안쪽에서는 낮고 바깥쪽에서는 높은 경향을 나타내었다. 등가공반경식을 적용한 계산진동데이터는 비교적 현장진동속도와 일치하는 경향을 나타내었다.

5. 결론

발파진동에 의한 피해가 예상되는 지역의 지반진동을 시험발파를 하지 않고 수치해석으로서 진동속도를 예측하기 위한 입력변수를 결정하였다.

- 가. 입력변수의 변화에 따른 응답수준을 알아보기 위해서 감쇠율, 진동수, 등가공반경, 등가장약장, 하중압력을 변화시키며 해석을 수행하였다. 그 결과 감쇠율은 진동수준에 반비례, 진동수는 비례, 등가공반경은 비례, 등가장약장은 비례, 하중압력에도 비례하는 경향을 보였다. 지반감쇠특성을 입력하기 위해 감쇠율식을 제안하였다.
- 나. 발파하중을 적용하기 위해 하중압력식과 등가공반경식을 작성하였으며, 이식들을 적용하여 계산한 결과와 현장 계측치를 비교한 결과 등가공반경식을 적용한 경우가 현장 계측치에 유사하였다.

참고문헌

- 1) Duvall W. I, 1953, Strain-wave shapes in rock near explosions, Geophysics 0016-8033 v.18, n.2, pp. 310-323
- 2) Persson P. A, Holmberg. R, Lee. J, 1994, Rock blasting and explosive engineering, CRC Press, pp. 244~246
- 3) Valliappan. S, and Ang. K. K, 1988, Finite element analysis of vibrations Induced by propagation waves generated by tunnel blasting, Rock Mechanics and Rock Engineering, 01-03 v.21, n.1, pp. 53~78

Table 1. Input parameters required by model

Parameters		Values
n	감쇠상수	$0.038 e^{1.53/r}$
m	감쇠상수	$0.165 e^{0.67/r}$
c	중파속도, m/s	5500
ρ_r	암반밀도, g/cm^3	2.6
ν	포아송비	0.28
E	영률, GPa	80

Table. 2 Blast vibration constants for various distance.

장약량, kg	2	4	6	8	10
K	5011	8839	11928	14465	16569
n	1.83	1.82	1.79	1.78	1.76

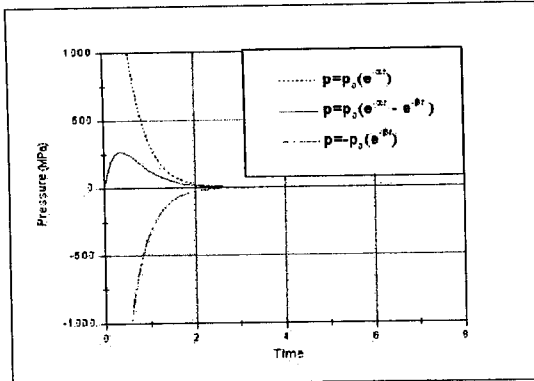


Fig. 1 Pressure / time curve for explosive detonation.

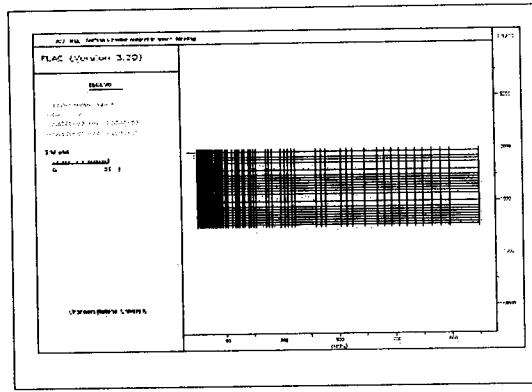


Fig. 2 Finite difference model and loading points of pressure pulse

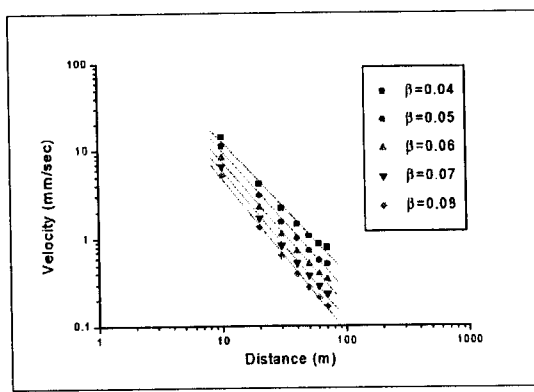


Fig. 3 Relationship between vibration and distance at various damping ratio

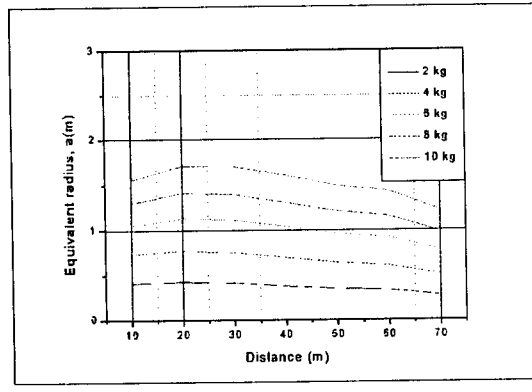


Fig. 4 Input equivalent radius correspond to charge weight

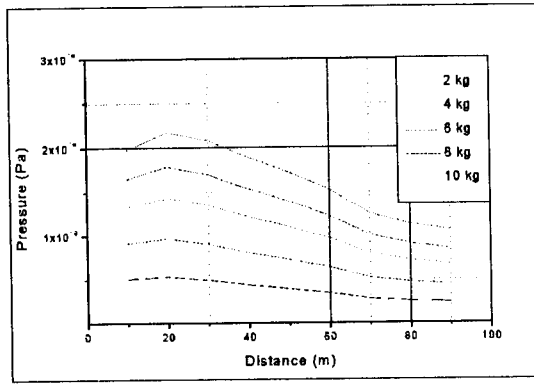


Fig. 5 Input pressure correspond to charge weight

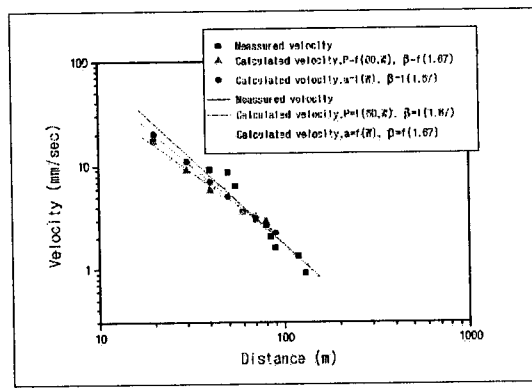


Fig. 6 Comparison of the numerical and experimental peak particle velocities