



암반 경계표면의 진동속도 Vibration Velocity of Rock Mass Boundary Surface

김 일 중¹⁾(Kim Il-Joong)
김 영 석²⁾(Kim Yeong-Suk)



Abstracts

Impulsive vibration velocity is monitored at the surface and the boundary surface of rocks as various impulsive forces of horizontal and vertical directions were given to rocks which had difference in uniaxial compressive strength for investigate to the vibration velocity of rocks according to the impulsive direction and the monitoring site.

The vibration velocity of the boundary surface of rocks was about 2.9 times or much larger than that of the surface at the same scaled distance in the case of horizontal impulsive forces, and was above 4.2 times in the case of vertical impulsive forces.

The attenuation exponents of the vibration velocity equations in the surface and the boundary surface of rocks make a vast difference with the impulsive directions, but it makes little difference in the case of the same impulsive direction.

The ratio of vibration constants of the surface to the boundary surface of rocks is that square and cube root scaled equation is a range of 2.7~3.0 and 4.9~5.0 respectively in the case of horizontal impulsive forces, and is a range of 4.2~5.7 and 7.7~11.5 respectively in the case of vertical impulsive forces.

1. 서 언

최근 교통난 해소를 위한 지하철건설 및 도로 건설, 택지의 효율적인 이용을 위한 도심지의 재개발 및 대규모 택지조성 등 건설공사가 활발해지고 있다. 이러한 건설공사의 현장은 대부분 화약류를 사용한 발파작업을 실시해야하는 암반이 존재하게 되는데 발파작업으로 인한 지반진동,

폭풍압 및 소음, 파쇄암의 비산 등이 발파현장 주변에 피해를 주고 있다. 특히 지반진동은 발파현장 주변 구조물에 심각한 피해를 주고 민원발생의 주요원인이 되기도 한다. 이러한 발파공해에 대해 여러 가지 측면에서 연구가 진행되어 왔다. 발파진동속도는 폭원에서부터 거리가 증가함에 따라 감소되는 일반적인 특성을 가지고 있으나 단층, 절리 및 성층면 등과 같은 불연속면이 존재하는 암반은 일반적인 지반진동 속도의 특성과는 다르게 나타날 것이다.

1) 전북대학교 공업기술연구소 연구원
2) 전북대학교 공과대학 자원공학과 교수

따라서 본 논문에서는 암석의 종류와 충격방향 및 계측위치에 따라서 암반내의 진동속도가 어떻게 상이한가를 비교, 검토하기 위하여 일축압축강도가 다르고 비교적 신선 균질인 2종류의 암석을 선정하였으며 실제 발파작업시 천공방향과 지발당 장약량의 변화를 고려하여 수평과 수직방향의 크기가 다른 충격력을 가하면서 시료의 표면(surface)과 경계표면(boundary surface)면에서 진동속도를 계측하였다.

본 실험값은 충격에너지와 환산거리의 단위가 발파진동속도분석시와는 다르므로 정량적으로 이용하기에는 문제가 있으나 실험결과의 경향은 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 이론적 고찰

충격하중이란 순간적으로 하중이 극히 높은 유한치로 상승하였다가 급속히 감소되는 것으로서 작용시간은 아주 짧으며 화약류를 사용한 충격의 경우와 같이 생각할 수 있다. 어느 물체에 충격이 가해지면 물체내에는 응력파가 발생되는데 일반적으로 진행방향과 평행이고 신축변형을 일으키는 압축파와 진행방향과 직각이 되고 전단변형을 일으키는 전단파가 발생된다.

서로 평면으로 연결된 두 종류의 매질중 외부충격을 직접받아 압축파가 진행중인 제1매질의 밀도 및 압축파의 전파속도를 ρ_1, C_1 이라 연결된 제2매질의 것을 ρ_2, C_2 라 하면 충격력을 받은 제1매질의 경계에서 입사응력 (σ_I)은 반사응력 (σ_R)과 투과응력 (σ_T)으로 분할되며 이들은 입자속도를 가지게 된다. 입사응력파의 입자속도를 V_I 라 하면 충격력을 받은 매질의 경계에서 반사응력파의 입자속도(V_R)과 투과응력파의 입자속도(V_T)는 다음과 같다.

$$\sigma_R = \sigma_I(\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1) / (\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1) \dots\dots(1)$$

$$\sigma_T = 2\sigma_I(\rho_2 C_2) / (\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1) \dots\dots(2)$$

$$V_R = V_I(\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2) / (\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2) \dots\dots(3)$$

$$V_T = 2V_I(\rho_1 C_1) / (\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2) \dots\dots(4)$$

자유단면을 갖는 암석과 같은 매질중을 압축파가 진행할 경우 암석의 자유단면과 접하고 있는 이중매질인 공기의 임피던스 ($\rho_2 C_2$)는 암석의 것에 비해 극히 작으므로 암석의 자유단면에서 반사파는 인장파로서 작용하고, 암석의 자유단면에서의 입자속도는 입사파의 입자속도에 2배가 된다.

3. 시료 및 물리적성질

본 실험에 사용한 시료는 비교적 균질인 대천오석(D.B.)과 천호산 석회암(C.L.)으로 Fig.1과 같이 가로×세로×높이가 105cm×42cm×21cm이다.

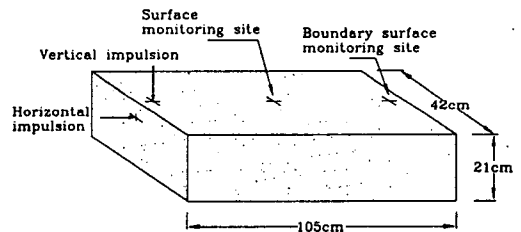


Fig.1 Schematic diagram of specimen used in test

이들 각각의 시료로부터 직경 38mm의 코아를 채취한 후 직경:높이의비가 1:2가 되도록 5개씩의 시험편을 제작하여 실험한 결과 대천오석과 천호산 석회암의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

4. 실험장치 및 방법

실험장치는 시료에 충격을 가하는 충격장치와 시료내에 전달된 진동속도를 측정하는 계측장치

로 대별된다. 충격장치는 시료에 수평방향의 충격을 가하기 위해 철구가 실에 메달려 좌우로 자유운동을 할 수 있도록하고, 시료에 수직방향의 충격을 가하기 위해 철구가 자유낙하 할 수 있도록 제작하였다.

진동속도 계측장치는 Canada InstanTel사에서 제작한 진동속도계측기로서 Minimate(model명 : DS-077)를 사용하였다.

0.0167, 0.0362 및 0.0669kgf의 철구를 사용하여 운동에너지가 0.005, 0.011 및 0.020kgf·m가 되도록 낙하 높이를 정하였다. 수평과 수직방향으로 시료에 충격을 가하면서 충격점으로부터 계측점의 중심이 50과 92cm인 거리에서 진동속도(true vector sum)를 계측하였으며, 계측자료는 시료마다 120개씩 총 240개를 이용하였다.

본 논문에서는 편의상 충격점으로부터 50cm되는 위치를 표면(surface), 92cm되는 거리를 경계 표면(boundary surface)이라 지칭하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 암석의 진동속도

수평방향으로 0.005, 0.011 및 0.020kgf·m의 충격력을 가했을 때 표면과 경계표면에서의 계측치를 각각 HS₁, HS₂, HS₃와 HB₁, HB₂, HB₃, 수직방향으로 충격력을 가했을 때는 각각 VS₁, VS₂, VS₃와 VB₁, VB₂, VB₃라 하였다. 계측한 진동속도는 Table 2 및 3과 같다.

Fig. 2, 3과 Fig. 6, 7은 대천 오석, Fig. 4, 5와 Fig. 8, 9는 천호산 석회암에 수평과 수직방향의 충격력을 가했을 경우 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내고 있다. 실선은 표면에서, 점선은 경계표면에서 계측한 진동속도를 회귀분석한 결과를 나타내고 있다. 암석의 종류에 따른 실선과 점선의 식은 다음과 같다.

1) 대천 오석

수평 충격력

$$V_S = 24.72(D/F^{1/2})^{-1.913}$$

$$V_S = 12.74(D/F^{1/3})^{-2.869}$$

$$V_B = 68.48(D/F^{1/2})^{-1.854}$$

$$V_B = 63.39(D/F^{1/3})^{-2.781}$$

수직 충격력

$$V_S = 58.93(D/F^{1/2})^{-2.305}$$

$$V_S = 26.51(D/F^{1/3})^{-3.457}$$

$$V_B = 333.94(D/F^{1/2})^{-2.220}$$

$$V_B = 304.42(D/F^{1/3})^{-3.330}$$

2) 천호산 석회암

수평 충격력

$$V_S = 16.14(D/F^{1/2})^{-1.736}$$

$$V_S = 8.85(D/F^{1/3})^{-2.604}$$

$$V_B = 47.46(D/F^{1/2})^{-1.740}$$

$$V_B = 44.13(D/F^{1/3})^{-2.610}$$

수직 충격력

$$V_S = 31.37(D/F^{1/2})^{-2.018}$$

$$V_S = 15.59(D/F^{1/3})^{-3.027}$$

$$V_B = 131.73(D/F^{1/2})^{-2.023}$$

$$V_B = 121.07(D/F^{1/3})^{-3.034}$$

여기서 D는 충격점과 계측점간의 거리(m), F는 운동에너지(kgf·m)이고 V_S는 표면, V_B는 경계표면의 진동속도를 나타내고 있다.

상기 식들은 모두 적합도를 나타내는 상관관계가 R > 0.99이다. 실험시 실제 충격력을 가한 점으로부터 암석의 경계표면까지의 거리와 충격력과의 관계인 자승근 환산거리 약 6.5, 8.8 및 13.0m/(kgf·m)^{1/2}, 삼승근 환산거리 약 3.4, 4.1 및 5.4m/(kgf·m)^{1/3}에서 각 암석의 충격방향과 계측위치에 따른 진동속도를 상기 식을 이용하여 Table 4에 나타냈다.

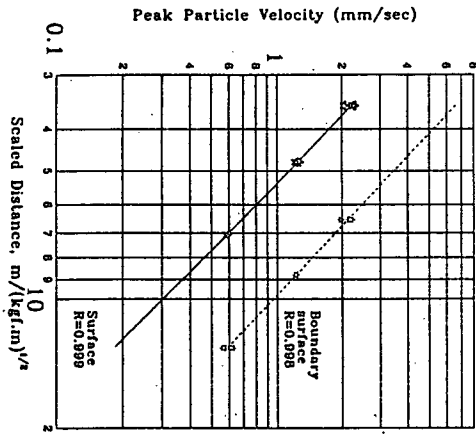


Fig. 2 Vibration velocity and square root scaled distance according to the monitoring site and the horizontal impulsive forces.(Dae-Cheon black stone)

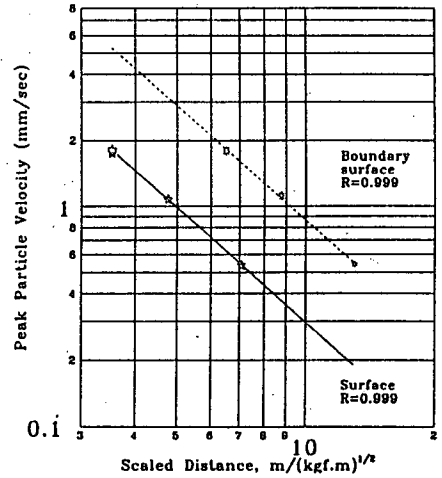


Fig. 4 Vibration velocity and square root scaled distance according to the monitoring site and the horizontal impulsive forces.(Cheon-Ho Mt. limestone)

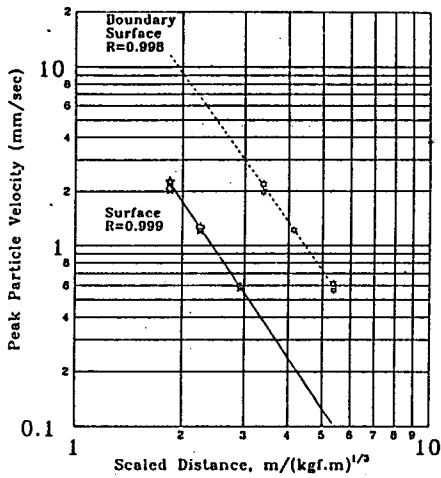


Fig. 3 Vibration velocity and cube root scaled distance according to the monitoring site and the horizontal impulsive forces. (Dae-Cheon black stone)

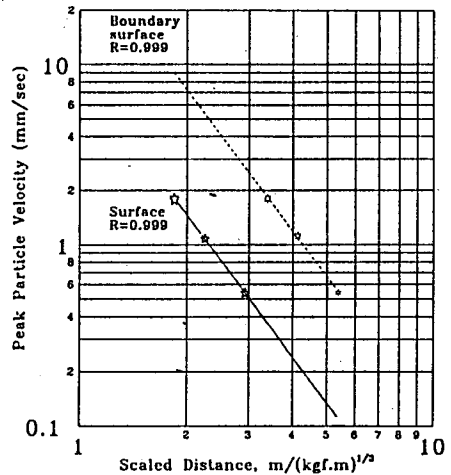


Fig. 5 Vibration velocity and cube root scaled distance according to the monitoring site and the horizontal impulsive forces.(Cheon-Ho Mt. limestone)

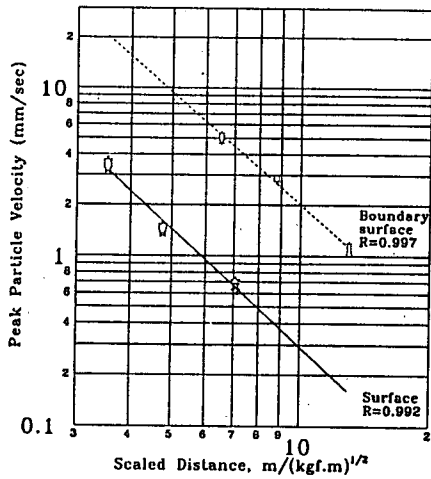


Fig. 6 Vibration velocity and square root scaled distance according to the monitoring site and the vertical impulsive forces. (Dae-Cheon black stone)

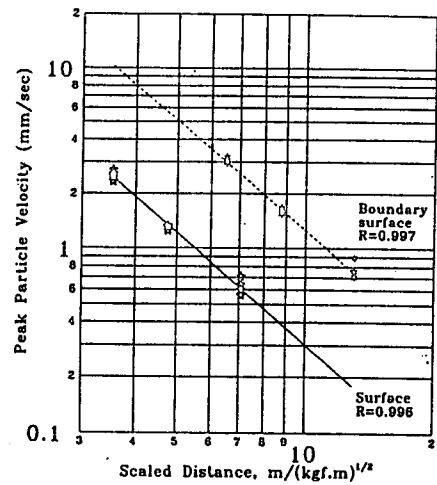


Fig. 8 Vibration velocity and square root scaled distance according to the monitoring site and the vertical impulsive forces. (Cheon-Ho Mt. limestone)

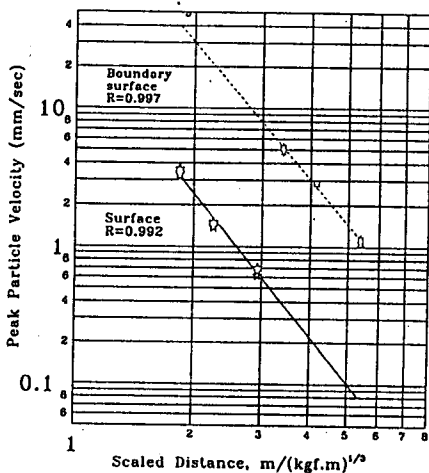


Fig. 7 Vibration velocity and cube root scaled distance according to the monitoring site and the vertical impulsive forces. (Dae-Cheon black stone)

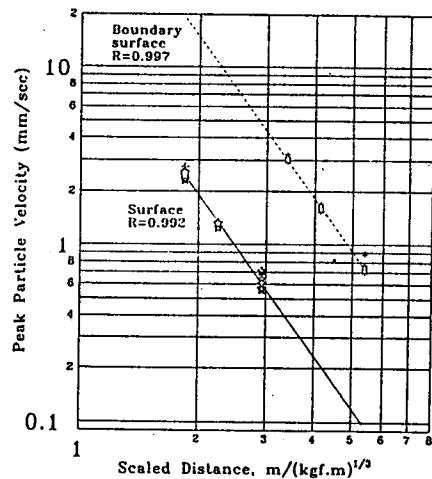


Fig. 9 Vibration velocity and cube root scaled distance according to the monitoring site and the vertical impulsive forces. (Cheon-Ho Mt. limestone)

Table 4에서 보는 바와 같이 무한한 암반이라면 동일한 환산거리에서 표면(surface)의 진동속도 수준이어야 하나 한정된 암반이므로 경계(boundary) 표면상에서의 진동속도는 표면상의 것보다 높게 나타나고 있다. 즉, 대천 오석과 천호산 석회암에 수평 충격력을 가했을 때, 자승근 환산식에서 표면의 진동속도에 대한 경계표면의 진동속도비는 약 3.1~3.2와 2.90, 삼승근 환산식에서는 약 5.5~5.8과 4.9~5.0이고, 수직 충격력을 가했을 때 자승근 환산식에서는 약 6.7~7.0과 4.2, 삼승근 환산식에서는 약 13.4~14.2와 7.6~7.7 정도이다.

따라서 한정된 암반상의 경계표면에서의 진동속도는 무한한 암반상의 동일한 환산거리에서의 진동속도보다 높고, 수평 충격력에 의한 진동속도는 수직 충격력에 의한 것보다 낮다. 경계표면에서의 진동속도는 암석의 일축압축강도와 충격방향 및 환산식의 종류에 따라 다른 경향을 나타내고 있다.

5.2 진동속도식의 감쇠지수와 진동상수

암석의 종류와 충격방향에 따른 계측위치별 진동속도식의 진동상수(K)와 감쇠지수(N)은 Table 5와 같다.

1) 감쇠지수

Fig.10은 충격방향에 따라 표면상의 감쇠지수(N_s)에 대한 경계부분의 것(N_b)의 비(N_r)를 나타내고 있는 것으로서 대천 오석과 천호산 석회암의 경우 수평 충격력에 의한 자승근과 삼승근 환산식의 감쇠지수비는 각각 약 0.969와 1.002, 수평 충격력의 경우는 각각 약 0.963과 1.003으로서 감쇠지수비는 충격 방향이나 환산식의 종류에 따라 거의 유사한 경향을 나타내고 암석의 종류에 따라서는 약간의 차이가 있으나 약 0.96~1.00범위로 간주할 수 있다.

Fig.11은 동일한 충격방향에서 표면과 경계표면에 대한 진동속도식의 감쇠지수의 차이($Nd1$)와 동일한 위치에서 충격방향에 따른 진동속도

식의 감쇠지수의 차이($Nd2$)를 각각 나타낸 것으로서 수평 충격력을 받은 대천 오석과 천호산 석회암의 표면의 감쇠지수와 경계표면의 것의 차이($Nd1$)는 자승근 환산식의 경우 0.059와 0.004, 삼승근 환산식의 경우는 0.088과 0.006이고, 수직 충격력을 받은 경우는 각각 0.085와 0.005, 0.127과 0.007이다. 또 수평 충격력에 의한 대천 오석과 천호산 석회암의 표면에서의 감쇠지수와 수직 충격력에 의한 것의 차이($Nd2$)는 자승근 환산식의 경우 0.392와 0.282, 삼승근 환산식의 경우는 0.588과 0.423이고, 경계표면에서의 것의 차이는 각각 0.366과 0.283, 0.549와 0.424이다.

따라서 충격방향과 환산식에 따라 표면이나 경계표면의 감쇠지수 값의 차이는 크지만 동일한 충격방향에서 표면상의 감쇠지수와 경계표면상의 것과의 차이는 미미하다.

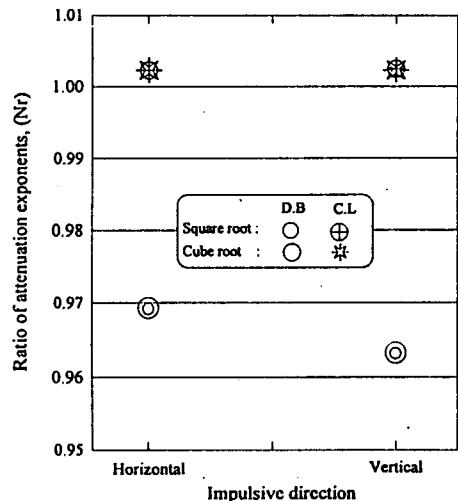


Fig. 10 Ratio of attenuation exponents of the vibration equations according to the impulsive and the monitoring site in rocks

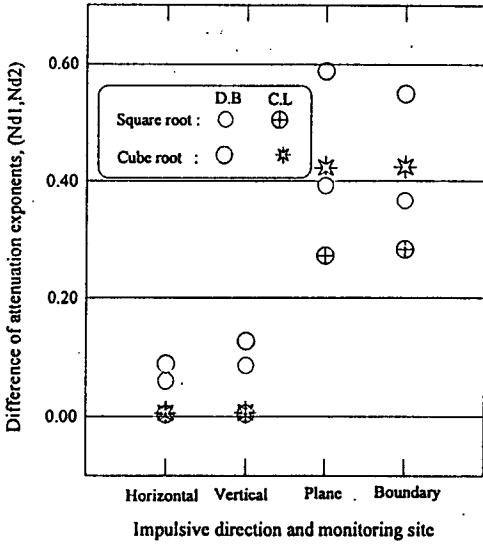


Fig. 11 Difference of attenuation exponents of the vibration equations according to the impulsive and the monitoring site in rocks.

2) 진동상수

Fig.12는 충격방향에 따른 표면상의 진동상수 (K_s)에 대한 경계표면의 것(K_B)의 비(K_r)를 나타내고 있는 것으로서 대천 오석과 천호산 석회암의 수평 충격력에 의한 자승근과 삼승근 환산식의 표면의 진동상수에 대한 경계표면의 것의 비는 각각 2.77과 4.98, 2.94와 4.99이고, 수직 충격력의 경우는 각각 5.67과 11.48, 4.20과 7.77이다. 전체적으로 수직 충격력에 의한 진동상수비가 수평 충격력에 의한 것보다 큰 값을 나타내고 있으며, 환산식의 종류에 의해서도 다른 경향을 나타내고 있다.

따라서 표면의 진동상수에 대한 경계표면의 것의 비는 수평 충격력의 경우에 자승근과 삼승근 환산식은 각각 2.7~3.0와 4.9~5.0의 범위이고, 수직 충격력의 경우에는 각각 4.2~5.7과 7.7~11.5범위이다.

즉, 동일한 충격방향과 환산식에서 표면과 경계표면의 진동속도의 차이는 진동상수에 의해 결정하여도 큰 오차는 없을 것으로 판단된다.

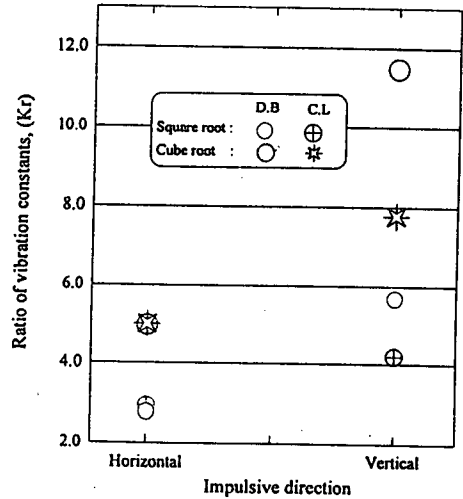


Fig. 12 Ratio of vibration constants of the vibration equations according to the impulsive direction and the monitoring site in rocks