

## 國產 火藥類의 種類에 따른 發破 振動值의 比較

林漢旭\* · 金雄秀\*\* · 李慶雲\*\*\*

### A Comparison of Blasting Vibration Level due to the Kind of Explosives Produced in Korea

Han-Uk Lim\* · Woong-Soo Kim\*\* · Kyoung-Woon Lee\*\*\*

#### Abstract

The blast-induced ground vibrations is one of the most important factors which is considered to design blasting patterns in urban excavation. To compare with vibration level of different explosives, peak particle velocity of each explosive was measured.

The results are summerized as follows.

1. Among the three kinds of explosives, the largest vibration was obtained from the gelatine dynamite, while the smallest was blasting of ammonium nitrate.
2. The vibration levels of ammonium nitrate and slurry explosive were smaller about 35%, 20% respectively than that of gelatine dynamite.

#### I. 序 論

各種 構造物의 大型化 및 生活 空間의 確保 등을 爲하여 都心地에서의 發破 作業이 增加되고 있다.

市街地에서 掘鑿 作業을 施行하는 경우 發破로 因한 地盤의 振動, 破碎 岩石의 飛散, 爆風 壓等으로 因하여 安全에 많은 注意를 要한다. 特히 地盤의 振動은 各種 施設物은 勿論 精密 機械類의 稼動 그리고 人體에 重大한 影響을 미치기 때문에 特別히 留意해야 할 事項이기도 하다.

따라서 發破 效率을 높이면서도 振動을 抑制하기 爲한 研究가 國內에서도 活發히 進行되고 있다.<sup>1, 2, 3)</sup>

一般의으로 發破로 因한 地盤 振動의 크기는 爆藥類의 種類에 따른 特性, 使用 爆藥量 即 遲發當 裝藥量, 起爆方法, 填塞(tamping)의 狀態와 裝填密度, 自由面의 數, 爆源과 測點間의 距離, 地質條件 等에 따라 다른 것으로 알려져 있고 있다. 이 가운데서도 國產 火藥類의 特性에 따른 振動值의 比較에 關한 研究는 아직 없는 것으로 보인다. 따라서 本 研究에서는 發破 條件을 一定하게 維持하면서 우리나라에서 生産 되는 火藥類 가운데 널리 쓰이는 제라틴 다이

\*江原大學校 工科大學 資源工學科 助教授

\*\*江原大學校 工科大學 資源工學科 教授

\*\*\*韓國動力資源研究所 責任研究員

\*Assistant Professor, Dep't of Resources Engineering, Kangweon National University

\*\*Professor, Dep't of Resources Engineering, Kangweon National University

\*\*\*Korea Institute of Energy Resources

나마이트, 초안 爆藥 및 含水爆藥(slurry)等 藥種을 變化시켰을때 發破 振動值의 差異를 比較함으로써 市街地 發破에 參考 資料를 提供코지 하는데 이 研究의 目的이 있다.

이를 爲하여 서울市에서 施工中인 地下鐵 3, 4號線 工區中 10個 地域에서 總 109回의 現場 測定을 實施하고 그 結果를 分析, 比較하였다.

## II. 測定方法

### 2. 1 發破振動值의 特性

火藥類가 岩盤中에서 爆發하게 되면 大端히 높은 壓力이 發生되는데 이 에너지中 一部가 彈性波로 變換되어 傳播된다.

이 彈性波는 大體로 立體波(body wave)와 表面波(surface wave)로 나누어지고 이를 더욱 細分하면 P波, S波, R波, L波 및 H波 等으로 分類된다.<sup>4)</sup>

그러나 振動을 測定하는 地點이 爆源으로부터 가까우면 이러한 모든 波는 各各 區分되지 않고 合成되어 複合波의 形態로 나타난다.

따라서 地表上에서 이 複合波를 測定하는 경우 그 進行 方向에 따라 그림 1과 같이 垂直方向(vertical)의 成分, 進行方向(radial) 및 進行 方向에 對한 接線方向(transverse)의 成分 등 3가지로 나눌 수 있다. 그렇지만 發破 振動에서

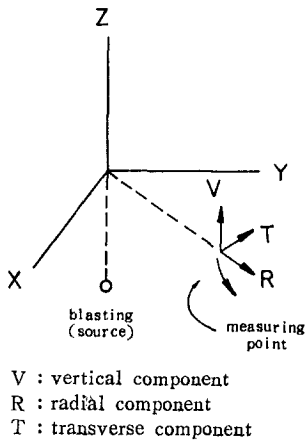


Fig. 1. The Measuring Directions of Ground Vibration

被害를 주는 規模를 생각할 때 本 研究에서는 이 3成分 中에서 가장 優勢한 方向만을 測定하여 이들 값을 對比하였다.

또한 發破에 依한 地盤振動은 보통 變位(displacement), 速度(particle velocity) 및 加速度(acceleration)의 3種類로 表示할 수 있는데 이들은 數學的 關係가 成立하기 때문에 서로 變換이 可能하다. 그렇지만 振動이 構造物에 미치는 被害의 尺度로서는 速度成分을 測定하는 것이 精密度가 높기 때문에 이를 基準으로 하여 振動 常數를 決定하였다.

### 2. 2 振動速度의 表示

發破時 地面의 運動方程式은

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dz}{dt} + \frac{k}{m}z = -\frac{d^2x}{dt^2} : (1)$$
로 表示할 수 있다.

이때  $z$  : motion of mass

$x$  : component of ground motion

$k$  : spring coefficient

$c$  : damping coefficient

angular frequency 는  $w_n = 2\pi f_n = \sqrt{k/m}$ , damping factor 는  $\xi = \frac{c}{2mw_n}$ 로 表示할 수 있으므로 이것을 (1)式에 代入하면 (2)式을 얻을 수 있고 이를 다시 整理하면 (3)式으로 表示할 수 있다.

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2\xi w_n \frac{dz}{dt} + w_n^2 z = -\frac{d^2x}{dt^2} : (2)$$

$$\ddot{z} + 2\xi w_n \dot{z} + w_n^2 z = -\ddot{x} : (3)$$

測定對象의 周波數를  $w_0$ 라 하면

$$w_n^2 z \cong -\ddot{x} : (4)$$

(4)式을 (3)式에 代入하면 (5)式을 얻는다.

$$\ddot{z} + 2\xi_0 w_0 \dot{z} + w_0^2 z = w_n^2 z : (5)$$

(5)式의 解를 求하면 (6) 및 (7)式이 된다.

$$z(t) = \frac{1}{w_0 \sqrt{1-\xi_0^2}} \int_0^t w_n^2 z(\tau) e^{-\xi_0 w_0 (t-\tau)} \cdot \sin w_0 \sqrt{1-\xi_0^2} (t-\tau) d\tau : (6)$$

$$\cong \left[ \frac{1}{w_0} \int_0^t w_n^2 z(\tau) e^{-\xi_0 w_0 (t-\tau)} \cdot \sin w_0 \sqrt{1-\xi_0^2} (t-\tau) d\tau \right]_{\max} : (7)$$

實際로 現場에서 測定値는 위에서 測定한  $z(t)$ 보다 velocity response spectrum( $v(t)$ )가 많이 사용됨으로 (8)式 또는 (9)式이 된다. (그림 2)

$$V(t) \approx w_0 z(t) : (8)$$

$$V(t) = \left[ \int_0^t w_a^2 z(\tau) e^{-\xi_0 w_0 (t-\tau)} \sin w_0 \sqrt{1-\xi_0^2} (t-\tau) d\tau \right]_{\max} : (9)$$

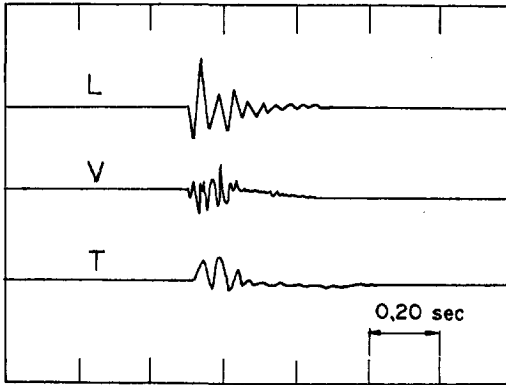


Fig. 2. Tracing of VS-1200 Blast Seismogram (actual size)

### 2. 3 振動測定機

發破振動 測定機로는 美國 Sprengnether Instrument Co 製品인 VS-1200을 주로 사용하였고 以外에도 日本 Rion社 製品인 VM-12B와 스웨덴의 VME-nitro Consultant社의 Model F를 補助器로 사용하였는데 이들 振動 測定機의 感應 周波數 領域은 5~200Hz로 典型的인 發破 振動 測定機이다.

VS-1200 振動機는 發破振動에서 變位成分, 速度 및 加速度 成分을 選擇하여 잡을 수 있고 또 이 選擇한 各 成分에 對해서도 垂直, 進行 및 接線 方向의 成分을 同時에 記錄할 수 있게 되어있다.

振動感應器(transducer)는 무게가 8.8kg이고 18×18×18cm의 크기로서 測定時 地面위에 平行으로 놓게 되어있다.

한편 VM-12B는 計測器와 25.6×15×12.2cm 크기에 2.6kg인 振動感應器로 이루어져 있는데 速度成分, 加速度成分 그리고 人體 感覺 補整

을 해준 加速度 成分인 振動레벨(vibration level)을 選擇의 所以로 잡을 수 있고 記錄은 別途의 LR-04 記錄計로 連結하여 使用할 수도 있다. 그러나 이 計器의 振動 周波數 領域은 5~90Hz로써 좁은 缺點이 있다. 一般的으로 發破 振動은 大部分 5~200Hz 사이에 分布되어 있기 때문에 萬一 周波數 領域이 이 計器의 限界를 넘게 되면 그 補整이 무척 까다롭고 不確實하게 된다. 따라서 이 計器는 周波數가 90Hz 以內인 때만 그 振動値를 參考로 하였다.

VME-Model F는 VS-1200과 거의 비슷하고 内部裝置도 大同小異하며 周波數 領域도 5~200Hz로써 發破振動 測定에 適合하다. 특히 이 計器는 필요할 때 디지털로 바로 그 값을 읽을 수 있는 利點이 있는 反面에 振動을 記錄할 수 있는 範圍가 VS-1200보다 다소 작은 것이 使用上 隘路點이었다.

### 2. 4 測定方法 및 資料의 處理

裝藥量과 距離를 多樣하게 變化시키면서 한 場所에서 反復 測定하여 裝藥指數와 減衰指數를 統計의 所以로 處理하였다. 即 距離와 火藥의 種類를 變化시키면서 다이ना마이트, 含水爆藥 硝安爆藥 等を 번갈아 爆發시켜 必要한 資料를 얻었는데 홍은동, 미아리, 서울驛앞, 三角地 등에서 이러한 試驗을 하였다.

또한 火藥의 威力 및 振動値를 比較하기爲한 2 自由面 發破에 依한 標準發破를 並行하기도 하였다.

또한 振動의 傳播式은 그동안 Crandell(1949), Edwards and Langefors(1958), Dvorak(1962), Attewell et als(1965), Duvall(1968), Nichols(1971), Stagg(1980) U.S.B.M 그리고 日本의 伊藤, 吉川 등 여러 學者들의 研究 結果<sup>1), 5), 7), 8)</sup>, 地盤振動의 速度 成分을 表示하는 方法이 조금씩 다르기 때문에 아직 理論的 展開가 完全하다고 보기 어렵지만 現在까지의 研究 結果를 綜合하면 다음과 같은 實驗式으로 表示할 수 있다.<sup>5), 6), 7)</sup>

$$V=K(D/W^b)^n : (10)$$

여기서 n : 減衰指數

b : 裝藥指數

K : 自由面の 狀態, 火藥의 種類, 岩質 等에 따른 常數

D : 爆源으로부터의 距離, m

W : 遲發當 裝藥量, kg

V : 振動速度, cm/sec

裝藥指數 b에 對하여 日本 吉川 等은 實驗의 으로 1/2을 提案하였고 이를 root scaling 이라 한다. 한편 U.S.B.M 에서는 1/3로써 이를 cube root scaling 이라 하여 次元解析의 理論을 根據로 하고 있다.

cube root scaling 은 軍事基地를 爲한 設計工程過程에서 實施한 核 및 高性能 爆發 試驗에서 成功的으로 使用되고 있다. 그러나 本 實驗에서는 여러가지 어려움 때문에 任意의 距離와 裝藥量에 對한 振動值를 測定하고 重回歸分析 (multiple regression analysis)에 依해 一般式을 誘導하였다. 그리고 root scaling 과 cubic root scaling 에 對한 回歸線을 求하여 回歸線에 對한 適合度가 좋은 쪽을 擇하여 比較하고 檢討하였다.

### Ⅲ. 測定 結果 및 解析

試驗火藥別, 岩石 強度別로 測定한 振動速度에 따른 振動式中 代表的인 몇가지 例를들면 그림 3과 같다.

그림에서 터널 發破는 1自由面 發破를, 바닥 發破란 2自由面 發破를 意味한다.

測定值를 處理한 結果 換算距離(scaled distance  $D/W^b$ )에 依한 裝藥指數는 cubic root 가 가장 偏差가 적은 回歸曲線式에 近接하였다.

本 實驗에서 實施한 現場의 一般發破, 標準發破, 試驗發破의 測定 結果를 比較하여 各 火藥類間의 補整率을 求하였다. 例를들면 한 地域에서 2가지 火藥에 對한 發破振動式이

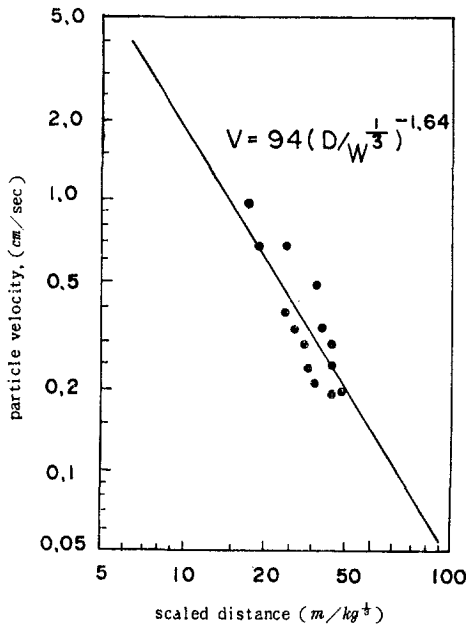
$$\left. \begin{aligned} V_{se} &= K_1(S, D)^{n_1} \\ V_{dy} &= K_2(S, D)^{n_2} \end{aligned} \right\} : (11)$$

여기서  $V_{se}$  : 含水爆藥의 振動值

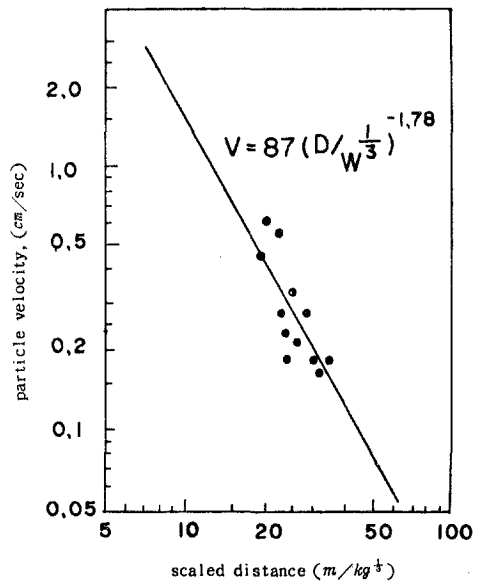
$V_{dy}$  : dynamite 의 振動值

$S, D$  :  $D/W^{1/3}$

와 같다면 한 地域에서의 減衰指數는 同一하므로 各 火藥의 (S, D)만 같으면 된다. 그러므로



(3. a)



(3. b)

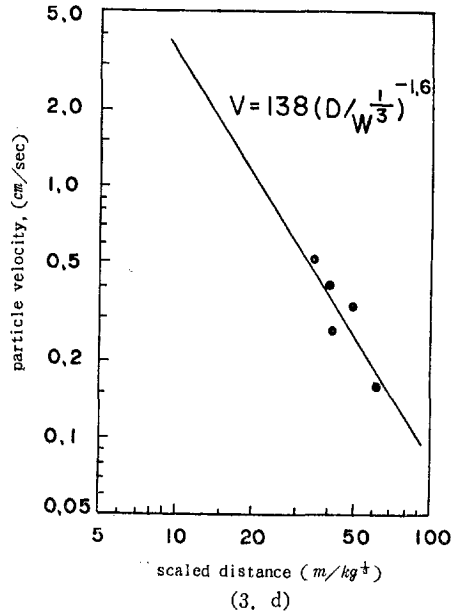
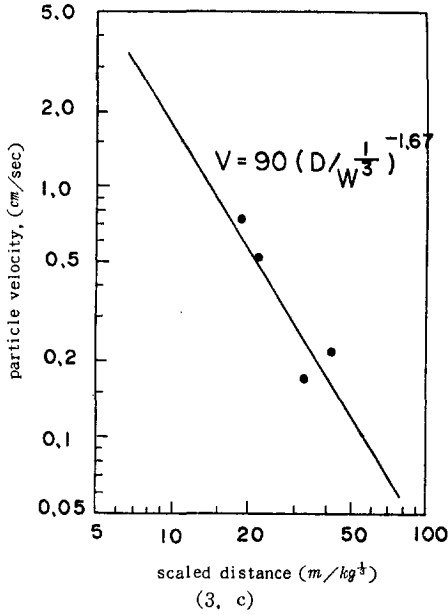


Fig. 3. Scaled Distance vs Blasting Vibration

同一한 (S, D)에서 두 식을 서로 나누면 식(12)가 되므로 各 火藥의 振動效果의 比較는 發破 振動 常數 K의 比較值가 된다.

$$\frac{V_{sr}}{V_{dy}} = \frac{K_1}{K_2} : (12)$$

試驗發破나 標準發破를 한 경우 距離 및 裝藥量이 달라지면 이를 同一한 藥量 및 距離에 있을때의 振動값 즉 換算距離를 同一하게 하여 比較를 하였는데 이를 要約하면 表 1과 같다.

<表 1> 火藥種類別 發破振動效果 比較

使用 火藥	發 破 區 分	適用 振 動 式	發 破 振 動 常 數	測 定 地 域
舍 水 爆 藥 硝 安 爆 藥	2自由面階段發破, 標準發破 "	58(S, D) <sup>-1.7</sup> 47(S, D) <sup>-1.7</sup>	$\frac{K_a \cdot e}{K_s \cdot e} = \frac{47}{58} = 0.81$	a工區
舍 水 爆 藥 硝 安 爆 藥	" "	24(S, D) <sup>-1.5</sup> 17(S, D) <sup>-1.5</sup>	$\frac{K_a \cdot e}{K_s \cdot e} = \frac{17}{24} = 0.71$	b工區
다이 나 마 이 트 舍 水 爆 藥	" "	99(S, D) <sup>-1.72</sup> 76(S, D) <sup>-1.72</sup>	$\frac{K_s \cdot e}{K_{dy}} = \frac{76}{99} = 0.78$	c工區
다이 나 마 이 트 舍 水 爆 藥	바 닷 試 驗 發 破 "	138(S, D) <sup>-1.63</sup> 107(S, D) <sup>-1.63</sup>	$\frac{K_s \cdot e}{K_{dy}} = \frac{107}{138} = 0.76$	d工區
다이 나 마 이 트 舍 水 爆 藥 硝 安 爆 藥	2自由面階段發破, 標準發破 " "	48, 8(S, D) <sup>-1.5</sup> 25, 6(S, D) <sup>-1.5</sup> 19, 6(S, D) <sup>-1.5</sup>	$\frac{K_s \cdot e}{K_{dy}} = \frac{25.6}{48.8} = 0.25$ $\frac{K_a \cdot e}{K_s \cdot e} = \frac{19.6}{25.6} = 0.77$	e工區
다이 나 마 이 트 舍 水 爆 藥	바 닷 試 驗 發 破 "	87(S, D) <sup>-1.5</sup> 64(S, D) <sup>-1.5</sup>	$\frac{K_s \cdot e}{K_{dy}} = \frac{64}{87} = 0.74$	f工區

위 表에서 다이나마이트에 대한 含水爆藥의 振動效果 比率( $\frac{K_{se}}{K_{dy}}$ )은 0.78, 0.76, 0.52, 0.74 로써 平均値는 0.70이다.

또 含水爆藥에 對한 硝安爆藥의 振動 比率  $\frac{K_{ae}}{K_{se}}$  은 0.81, 0.71, 0.77로써 平均 0.70이다.

이와 같은 方法으로 求한 다이나마이트에 對한 硝安爆藥의 振動比  $\frac{K_{ae}}{K_{dy}}$  는 0.65가 된다.

#### IV. 結 論

火藥類를 使用하여 岩石發破를 할 때 일어나는 地盤의 振動은 市街地에서와 같이 主要 施設物이 密集된 곳에서는 特別히 留意해야 할 事項中的 하나이다.

이와 같은 地盤振動의 크기는 使用하는 火藥類의 種類, 使用量, 發破方法, 地質條件 等 여러가지 要因에 依해 다르지만 本 研究에서는 火藥類의 種類別 振動에 미치는 特性에 對하여 檢討하였다. 即 國內에서 生産되는 火藥類中 一般的으로 널리 쓰이는 제라틴 다이나마이트, 硝安爆藥, 含水爆藥 等 藥種에 따른 地盤振動值의 크기를 比較한 結果, 主要한 內容은 다음과 같다.

1. 振動 速度의 크기는 硝安爆藥, 含水爆藥, 제라틴 다이나마이트의 順序이다.

2. 含水爆藥은 제라틴 다이나마이트에 比하여 그 振動速度가 約 80% 程度이다.

3. 硝安爆藥은 含水爆藥에 比하여 그 振動效果가 約 80%이고 제라틴 爆藥에 比해 約 65% 程度이다.

#### 謝 辭

本 研究 遂行에 協助해준 韓國動力資源研究所의 金旻圭, 申僂淳 研究員에게 謝意를 드린다.

#### 參 考 文 獻

1. 金雄秀, 李慶雲, 林漢旭, 徐栢洙., ; 都心地 發破에 서의 地盤振動測定에 關한 研究 : 江原大學校 産業 技術研究所報, Vol. 3, No.1, pp.17-26, (1983)
2. 柳暢夏, 李正仁., ; 發破作業에 依한 地盤振動이 地上構造物에 미치는 影響에 關한 研究 : 大韓鑛山 學會誌. Vol. 16, No.1, pp. 41-50, (1979)
3. 李慶雲, 金旻圭, 申僂淳., ; 火藥, 岩石強度 및 發破 類型이 發破振動에 미치는 影響 : 大韓鑛山學會誌, Vol.21, No.4, pp. 334-339, (1984)
4. Duvall, W. I., et al., ; Avoiding Damage by Air Blasts and Ground Vibrations from Blasting ; Surface Mining. AIME, pp. 398-412. (1968)
5. Bollinger, G. A., ; Blast Vibration Analysis; Feffer & Simons, Inc., pp. 132. (1976)
6. Nicholls, H. R., et al., ; Blasting Vibrations and their Effects on Structures ; U. S. B. M., 656. (1971)
7. Stagg, N. S., and A. J. Engler., ; Measurement of Blast-Induced Ground Vibrations and Seismograph Calibration ; U. S. B. M., RI 8506, 63pp.
8. 畑中元弘., ; 發破による地盤および建物の振動 : 第2回 岩の力學國內シンポジウム講演集, 143 pp. (1967)