

# 發破振動의 許容限界에 關한 基礎研究

張 元 一

## A Basic Study on the Safe Blasting Limits

*Jang Won Yil*

### 〈目 次〉

- |                 |               |
|-----------------|---------------|
| I. 序 論          | IV. 發破振動의 傳播式 |
| II. 發破振動의 特性    | V. 測定 및 結果 考察 |
| III. 發破振動의 許容限界 | VI. 結 論       |

### Abstract

Blast rounds must be designed to minimize the chances of vibration damage where residences or other structures are in the blast vicinity.

As a result of many studies, it was found that levels of vibrations are strong functions of charge weights and shot-to-gage distances, with variables, such as geology and different rock types.

The general form of the regression equation for the propagation velocity is  $V=K(D/W^b)^n$ , where V is ground velocity in cm/sec, W is the charge weight in kg, and D is the distance from the blast in m.

The results of analysis of measured data as follows,  $V=172.5(D/W^{\frac{1}{2}})^{-1.769}$ ,  $V=34.43(D/W^{\frac{1}{2}})^{-1.725}$

### I. 序 論

最近 宅地造成, 工業地帶敷地造成, 道路工事, 地下鐵工事 等이 增加함에 따라 密集한 人家나 各種構造物의 隣接한 곳에서 發破作業을 遂行해야 하는 境遇가 종종 發生하며, 發破作業에 依한 地盤振動이 隣接構造物에 미치는 被害는 深刻한 公害問題를 떠나 被害與否에 對한 訴訟問題까지 惹起되고 있는 實情이다. 美國, 유럽, 日本 等 先進國의 境遇, 일찌기 發破振動에 對한 被害問題가 擡頭되어 持續的인 研究를 遂行하여 왔으며, 特히 美國의 境遇 U.S.B.M(美鑛務局)을 中心으로 産學

共同協力下에 10年餘에 걸친 長期研究 結果를 發表하였고, 유럽, 日本 等에서도 相當한 研究를 繼續 遂行하여 隣接構造物에 對한 被害限界値를 提案, 被害를 減少시키고 있다.

우리 나라에서는 아직 被害限界値에 對한 具體的인 提案이 없고 初期段階에 있으므로 本 論文에서는 發表된 發破振動의 許容限界値에 對하여 考察하고, 發破振動에 依한 被害限界値 設定을 위한 基礎作業으로서 實際로 石灰岩 地層에서 發破에 依한 振動速度를 測定하여 그 測定值로부터 裝藥量, 距離, 振動值와의 關係式(發破振動의 傳播式)을 求하여 發破振動의 傳播式에서 係數를 設定하고, 被害限界値에 對한 距離 및 最大裝藥量과의 關係를 求하였다.

## II. 發破振動의 特性

火藥의 爆發로 因하여 發破가 始作되면 火藥이 있는 周圍에는 強力한 壓縮應力이 發生하여 周邊物體에는 tangential stress를 隨伴한 매우 높은 壓力의 應力波가 傳播된다.

이러한 應力波의 到達에 따라 發生하는 地盤의 運動은 振幅과 週期를 갖는 振動으로 나타나며 이것을 發破振動이라 한다. 發破振動의 振幅과 週期는 火藥의 種類, 裝藥量 等 發破의 一般의 條件以外에 地盤의 性質, 波動의 傳播經路 等에 따라서 相異하게 나타난다.

發破에 따른 地震動은 自然地震動과 같이 彈性波 縱波, 橫波 및 地盤의 表面 表土層을 傳播하는 表面波로 되어 있다. 그러나, 發破振動과 自然地震動은 相異한 點이 많으며, 特히 發破振動의 震源이 地表의 가까운 곳에서 位置하여 發生하는 振動이기 때문에 振動의 周波數 및 振動의 繼續時間은 振動의 波形이 複雜한 地震波動과 다르며 <表 1>과 같이 比較할 수 있다.

<表 1> 發破에 依한 地震動과 自然地震動

	發 破 振 動	自 然 地 震 動
震 源 深 度	地表 또는 地表附近	地下 10km 以上
振 動 的 周 波 數	數 10~數 100Hz	1Hz 程度
振 動 繼 續 時 間	0.1sec 以內	10sec 以上
振 動 波 形	單 純	複 雜

普通 發破振動의 最大振幅 表示에는 變位, 速度, 加速度의 3種類가 있지만, 自然地震에서는 加速度 振幅으로 表示되는 것을 氣象震度階로서 定하여 震害의 程度를 表示하는 尺度로 삼고 있으나 發破振動의 境遇 周波數가 地震動보다 훨씬 크므로 損傷의 程度를 表示하는 基準으로 加速度를 表示하는 것은 不適當하다.

즉 同一한 加速度值에서 周波數의 大小에 따라 震害의 程度가 相異하기 때문이다.

發破振動과 같이 短周期의 波가 岩盤層을 傳播할 때 裝藥量, 距離, 振動值의 關係式은 一般의 式으로 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$A=C \cdot \frac{W^{\beta}}{r^{\alpha}}$$

여기서, A; 振動值, r; 距離, W; 裝藥量, C; 係數

係數 C는 火藥의 種類, 岩質, 地盤의 狀態, 自由面의 狀態 等에 依해 決定되는 값이다.

上記 關係式에 對해 提案된 實驗式의 係數를 보던<sup>5,6)</sup>

畑中の 境遇  $C=400k, \alpha=2, \beta=2/3(15 < r < 250m)$

$C=5.2k, \alpha=1.2, \beta=2/3(250 < r < 1,500m)$

表層이 없는 狀態;  $k=1.0$

表層이 薄한 狀態;  $k=2.5$

表層이 厚한 狀態;  $k=7.5$

伊藤一郎의 境遇  $\alpha=2, \beta=2/3$

제라틴 dinamite 使用時  $C=2.5\sim 10.0$

黑色火藥 使用時  $C=0.15\sim 0.21$

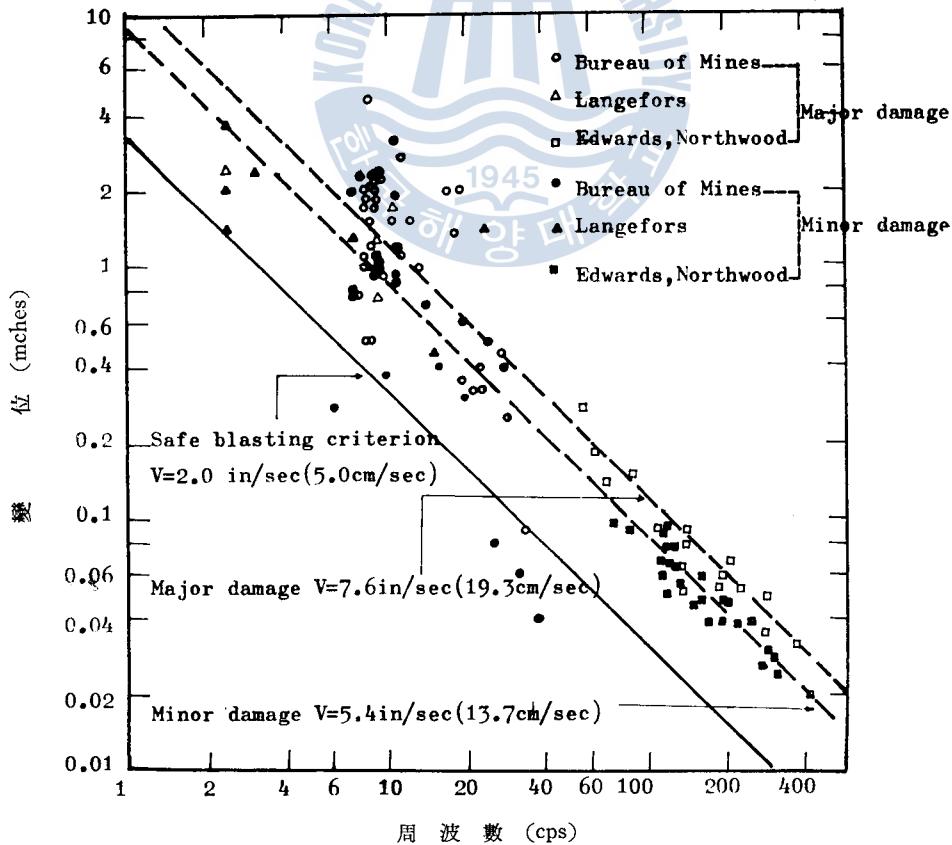
鈴木의 境遇  $\beta=2/3, 粘土質 \alpha=2.5\sim 3.0$

岩質  $\alpha=2.0$

安全率을 크게 할 境遇  $C=5\sim 10$

普通의 境遇  $C=2.5\sim 5$

等 여러 實驗式을 보던 距離 및 裝藥量에서  $\alpha$  및  $\beta$ 의 값은 平均的으로  $\alpha=2, \beta=2/3$ 을 取하는 實驗式이 大部分으로, 發破振動의 振動値는 爆源으로부터의 距離와 裝藥量에 密接한 關係를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 發破振動이 構造物에 미치는 影響

### Ⅲ. 發破振動的 許容限界

〈그림 1〉은 發破에 依한 振動과 그 振動으로 因한 構造物의 影響에 關하여 發表된 結果를 綜合한 그림이다.

發破振動에 依해 構造物에 被害가 發生하기 始作할 때, 振動値는 測定場所 및 測定時期가 相異하지만 그 被害限界値는 〈그림 1〉에 表示된 바와 같이 major damage(심한 龜裂이 發生하는 程度), minor damage(약간의 龜裂이 發生하는 程度) 등으로 表示할 수 있으며, 構造物에 미치는 被害는 振動의 크기를 變位로써 表示하면 周波數와 密接한 關係가 있으며, 周波數가 클 때 낮은 變位에서도 被害가 發生할 可能性이 높다는 것을 알 수 있다.

또한 實驗報告書에 依하면, U. Langefors<sup>8)</sup>는 周波數가 數 10~數 100Hz 振動에서 損傷의 程度는 振動速度에 比例한다는 一連의 實驗報告를 하고 있으며, 村松, 藤井, 金井 等에<sup>6)</sup> 依하면 構造物의 破損은 速度振幅과 密接하다고 報告하고 있어 發破振動의 規制基準을 速度振幅으로 取扱하는 것이 適當하다는 생각이 一般的이다.

Crandell, Edwards 等에 依하면 發破에 依한 地盤振動의 크기를 變位速度로 表示하면 周波數에 關係없이 被害程度는 速度의 一定値로 나타낼 수 있어 發破振動에 依한 被害程度는 普通 地盤의 振動速度로서 表示하는 것이 合理的이다.

被害의 程度를 變位速度로 表示하면 〈表 2〉와 같이 나타낼 수 있다.

〈表 2〉에 依하면 發破로 因하여 隣接構造物에 미치는 被害許容限界値는 平均的으로 5.0cm/sec 内外로 나타남을 알 수 있다.

發破振動이 地上構造物에 미치는 被害與否에 對하여 U. S. B. M에서는 振動速度 5.0cm/sec를 그 基準으로 提案하고 있으며, Sweden에서는 7.0cm/sec를 基準으로 하고, Australia에서는 2.0cm/sec 獨逸은 1~4cm/sec를 許容基準으로 하고 있다.

日常生活生活과 密接한 一般家屋에 對한 被害程度를 地盤의 彈性波 傳播速度를 3,000m/sec로 假定하여(岩石의 平均的인 彈性波 傳播速度; Limestone 2,500~6,000 m/sec, Sandstone 1,400~4,000 m/sec, Quartzite 5,000~6,000 m/sec, shale 1,400~3,000 m/sec) 表示하면 〈表 3〉과 같이 나타낼 수 있다.

그러나, 實際發破作業에 있어서의 發破振動에 依한 被害許容限界値는 岩盤의 性質 等 諸般條件을 包含한 安全率을 最大한 考慮, 設定하여야 隣接構造物의 被害를 防止할 수 있는 安全한 發破作業을 遂行할 수 있을 것이다.

### Ⅳ. 發破振動的 傳播式

發破振動의 傳播式은 理論的으로 完全히 展開가 되어 있지 않는 狀態지만, 發破에 依한 地盤振動의 크기는 測點으로부터 發破點까지의 距離와 裝藥量間에 깊은 函數關係가 있음이 많은 研究結果에서 밝혀졌다.

〈表 2〉 發破振動的 크기와 被害

變位 速度 (cm/sec)	25.0	大規模 龜裂發生					
	20.0	龜裂發生	大規模 龜裂發生	被害		被害	大規模 龜裂發生
	15.0	微細龜裂 灰壁分離	龜裂發生		被害		輕被害 微細龜裂
	10.0	注意	微細龜裂	注意		注意	注意
	5.0	安全 岩盤彈性波 速度 v=3,000m/sec	安全 彈性波速度 v=3,000m/sec	安全		安全	安全
				注意 安全			安全
							被害發生 可能性 安全
		Langefors	Crandell	Koheler	Edwars	Bumines	鈴木

〈表 3〉 發破振動으로 因한 一般家屋의 被害

V (mm/sec)	V/C (μ/sec)	一般家屋의 被害狀況
30	10	龜裂이 發生하지 않음.
50	17	確實한 龜裂의 微候는 없음.
70	25	分別할 수 없을 程度의 龜裂
100	33	微細한 龜裂發生 (許容限界值)
150	50	龜裂 發生
225	75	大規模 龜裂 發生
300	100	岩盤에 龜裂 發生

C; 岩盤의 彈性波 傳播速度

U. S. B. M의 最近 10年餘間의 發破振動에 關한 長期研究結果를 基礎로 現在까지의 研究結果를 綜合하면, 發破振動으로 因한 構造物의 被害와 가장 直接的인 關聯이 있는 最大振動速度를 다음 式으로 表示할 수 있다.

$$V=k(D/W^b)^n \quad (1)$$

여기서,  $n$ ; 減衰指數

$b$ ; Scaling 指數

$k$ ; 自由面 狀態, 火藥種類, 岩質 等에 따른 常數

$D$ ; 爆源으로부터의 距離(m)

$W$ ; 裝藥量(kg)

$V$ ; 振動速度(cm/sec)

(1)式에서  $b$ 는 Scaling 指數로써 U. S. B. M은  $b$ 값에 對해 1/2(root scaling), 1/3(cube root scaling)을 提案하였다.

(1)式의 양변에  $\log$ 를 取하면

$$\log V=A+B\log D+C\log W \quad (2)$$

$$A=\log K, B=n, C=-bn$$

(2)式은 root scaling과 cube root scaling의 境遇

$$\log V=A+B\left(\log D-\frac{1}{2}\log W\right)$$

$$\log V=A+B\left(\log D-\frac{1}{3}\log W\right) \quad (3)$$

로 表示되며 (2)式의 特別한 形態로써  $\log$ - $\log$ 座標에서 直線으로 表示된다.

(2)式은 다시 (4)式으로 表示할 수 있다.

$$Y_i=A+B X_{i_1}+C X_{i_2}+\varepsilon_i \quad (4)$$

$X_{i_1}, X_{i_2}$ ; 두 獨立變數  $\log D, \log W$ 의  $i$ 번째 測定值

$Y_i$ ;  $X_{i_1}, X_{i_2}$ 에 對한  $\log V$ 의 測定值,  $\varepsilon_i$ ; error term

## V. 測定 및 結果考察

火藥의 爆發에 依한 어느 一點에서 發破振動은 波의 進行方向과 垂直인 成分(Vertical component), 爆源을 向하는 成分(Radial component), 두 成分과 直角을 이루는 成分(Transverse component)으로 分解할 수 있으며, 實驗結果에 依하면 vertical 成分이 가장 크게 나타나는 傾向이 있으므로 本 論文에서는 速度成分이 가장 큰 Vertical 方向의 振動值를 測定하였다.

測定位置附近의 地質構造는 下部豊村石灰岩層으로써 構成岩石은 粗粒 및 塊狀石灰岩으로 되어 있다.

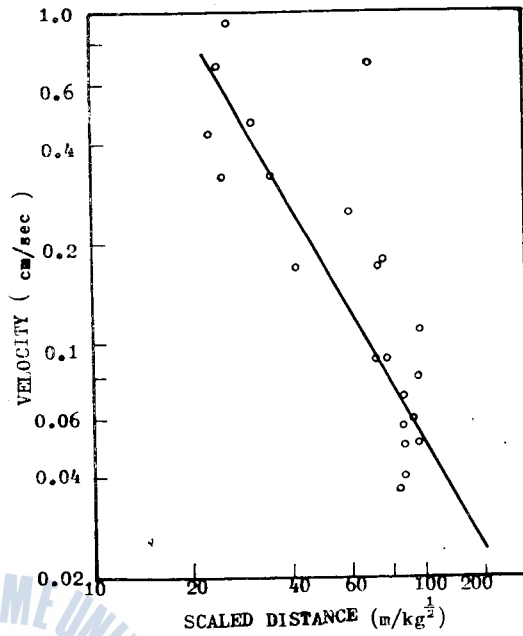
또한, 發破地點과 測定地點 사이에는 垂直正斷層이 지나가고 있으며, 石灰岩 地盤에서 測定된 振動速度와 裝藥量, 距離와의 關係를 求하기 위하여 <表 4>와 같이 測定值를 整理, 計算하였다.

〈그림 2, 3〉은 root scaling과 cube root scaling에 의한 最大振動速度와 Scaled Distance( $D/W^b$ )와의 關係를 log-log 座標에 表示한 그림이다. 構造物에 被害를 주지 않는 最大裝藥量을 決定하는 問題는 地盤振動의 크기를 裝藥量, 距離, 岩盤, 岩質 및 地質條件等 傳播媒質의 函數關係로써 豫測하는 作業이 優先的이므로, 測定值로 부터 地盤振動을 豫測할 수 있는 裝藥量, 爆源으로부터의 距離 및 振動의 크기와 關係式을 偏差를 가진 data分布로부터 最小自乘法에 의한 統計的 處理로서 求하였다. root scaling과 cube root scaling方法으로 計算된 發破振動의 傳播式은 다음과 같다.

$$V = 34.43(D/W^*)^{-1.725}$$

$$V = 172.5(D/W^{\frac{1}{2}})^{-1.769}$$

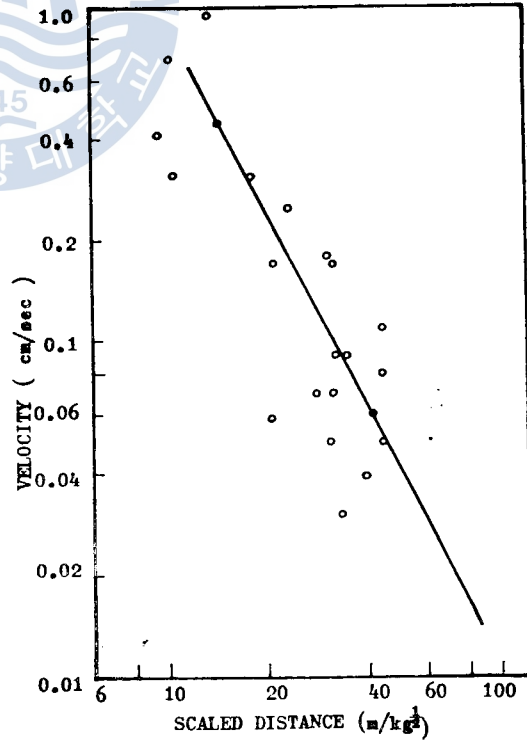
〈表 2, 3〉에서 一般住居構造物에 對한 振動速度



〈그림 2〉 最大振動速度와 S. D의 關係

〈表 4〉 發破 振動 測定值

No.	Charge (kg)	Distance (m)	Velocity (cm/sec)	Scaled Distance	
				(root)	(cube root)
1	200	137	0.43	6.5	23.4
2	120	116	0.70	10.6	23.5
3	70	124	0.45	14.8	30.1
4	50	95	0.95	13.4	25.8
5	50	150	0.17	21.2	40.7
6	50	128	0.32	18.1	34.7
7	225	426	0.07	28.4	70.0
8	175	139	0.32	10.5	24.9
9	250	379	0.25	24.0	60.2
10	150	379	0.17	30.9	71.3
11	165	393	0.17	30.6	71.7
12	150	384	0.09	31.4	72.3
13	120	388	0.09	35.4	78.7
14	120	440	0.04	40.2	89.2
15	110	443	0.06	42.2	92.5
16	100	445	0.08	44.5	95.9
17	100	448	0.05	44.8	96.5
18	100	453	0.11	45.3	97.6
19	472	679	0.05	31.3	87.2
20	425	652	0.07	31.6	86.7
21	284	576	0.04	34.2	87.6
22	426	425	0.03	20.6	56.6



〈그림 3〉 最大振動速度와 S. D의 關係



의 被害限界值를 平均的으로 5.0cm/sec로 생각하면 距離(D)와 最大裝藥量(W)와의 關係는  $D > 3.06(W^{\frac{1}{3}})$ ,  $D > 7.40(W^{\frac{1}{3}})$ 으로 計算될 수 있다.

一般的으로 振動速度의 vertical, radial, transverse 세 成分의 位相이 중첩될 可能性은 稀薄하지만 세 成分의 位相이 同時에 일어나는 境遇를 假定하여 實際 許容限界值에 對한 合力速度는 最大振動速度 vertical成分의  $\sqrt{3}$ 배로 하여 計算하는 것이 安全할 것이다.

그러므로 上記 計算條件을 合力速度 및 一般的인 構造物 耐振限界值의 安全率을 2로 考慮할 境遇 cube root scaling 方法으로 算出된 條件은 U. S. B. M.이 提案한 構造物의 耐振限界值에 對한 計算값  $D/W^{\frac{1}{3}} > 17$  및 獨逸의  $D/W^{\frac{1}{3}} > 20$ 과 거의 一致됨을 보여준다.

끝으로 앞으로의 研究課題로서, 發破에 依한 現場에서의 發破振動值 測定은 火藥의 使用, 現場의 諸般條件 等 어려움이 많지만, 우리 나라 地質構造의 半以上을 차지하는 花崗岩 및 花崗片麻岩層에 對한 많은 試수의 測定과 豐足한 資料에 依한 適合度 算出로부터, scaling指數의 決定 等 持續的인 研究가 遂行되어야 安全한 發破作業을 위한 被害許容限界值가 提案될 수 있을 것으로 思料된다.

#### IV. 結 論

發破에 依한 應力波의 到達에 따라 發生하는 發破振動의 크기를 變位速度로 表示하면 周波數에 關係없이 被害程度를 速度의 一定值로 나타낼 수 있다.

一般的인 發破振動의 振動速度(V), 爆源으로부터의 距離(D) 및 裝藥量(W)과의 關係式은  $V = K(D/W^{\frac{1}{3}})^n$ 으로 表示된다.

發破振動의 크기를 傳播媒質의 函數關係로서 豫測하기 위한 裝藥量, 距離, 振動速度와의 關係式은, 石灰岩 地盤에서 測定한 vertical 方向의 振動速度로서 計算한 結果  $V = 34.43(D/W^{\frac{1}{3}})^{-1.725}$ ,  $V = 172.5(D/W^{\frac{1}{3}})^{-1.769}$ 로 表示할 수 있다.

構造物의 被害限界值를 5.0cm/sec로 볼 境遇 距離와 最大裝藥量과의 關係는  $D > 3.06W^{\frac{1}{3}}$ ,  $D > 7.40W^{\frac{1}{3}}$ 과 같이 算出되며 合力速度 및 安全率을 考慮할 境遇 上記 條件은 外國의 提案된 耐振限界值와 거의 一致됨을 보여준다.

#### 參 考 文 獻

1. Ambraseys, N.N., and Hendron, A.J.; Dynamic behavior of rock masses, Rock mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, pp.203-236, (1968).
2. Duvall, W.I.; Design criteria for portable seismographs, U.S.B.M., RI 5708, (1961).
3. Langefors, U., and B. Kihlstrom; Rock blasting, John Wiley and Sons, Inc., New York, (1963).
4. Nicholls, H.R., Johnson, C.F., and Duvall, W.I.; Blasting Vibrations and their effects on structures, U.S.B. M., Buletin 656, (1971).
5. Siskind, D.E.; Ground and air vibration from blasting, SME Mining Engineering Hand book, Vol.1. (1973).
6. 伊藤一郎, 發破の安全對策と公害問題, 山海堂, pp317~353, (1976).