

## 【論 文】

# 發破振動 低減方法에 關한 研究

A study on the control of vibration caused by a blasting

昔 哲 基  
C. G. Suk

## 要 旨

發破時 振動을 相互 干涉으로 低減시키기 위해서 最高 適合한 起爆時間差를 振動波形의 相關函數로 利用해서 決定하는 方法을 研究하였다.

그래서, 이 方法을 Cement Block 供試體를 利用해서 小規模發破 實驗에 適用하고, 振動低減效果를 檢討하였다.

그 結果, 이 方法을 利用한 雷管列狀 發破에 있어서 振動變位 速度를 最大值로 比較하면 觀測位置에서 가장 가까운 發破孔單獨으로 起爆했을 때 보다 작고, 5孔을 重複시켜 最大가 되는 條件인 경우의 約 1/5로 低減되는 것을 確認하였다.

## ABSTRACT

We developed a method to control vibration from some blasting points. This method uses a correlation of vibration waves to decide the most effective delay time to control vibration by interfering vibration waves with each other.

We applied this method to the small blasting using mortar blocks and examined the effect on controlling vibration. As the result of the examinations, the maximum vibration velocity by this method caused by five

detonators blasting in row of five holes became smaller than that by a detonator blasting in the nearest hole from the measuring point. And the velocity was about one fifth of that of maximum condition in which vibration waves caused by the five detonators arrived at the same time to the measuring point.

## 1. 序 論

發破作業은 鐵山과 土木分野에서 매우 重要的技術로서, 오래전부터 利用되어 왔다. 最近에는 都心部의 構造物 解體에도 適用되었고, 建設部門에서 그 應用性이 認識되기 시작하였다.

發破工業은 機械的工法보다 經濟性, 安全性,

\* 工學碩士論文 (株) Korea Kacoh 社長

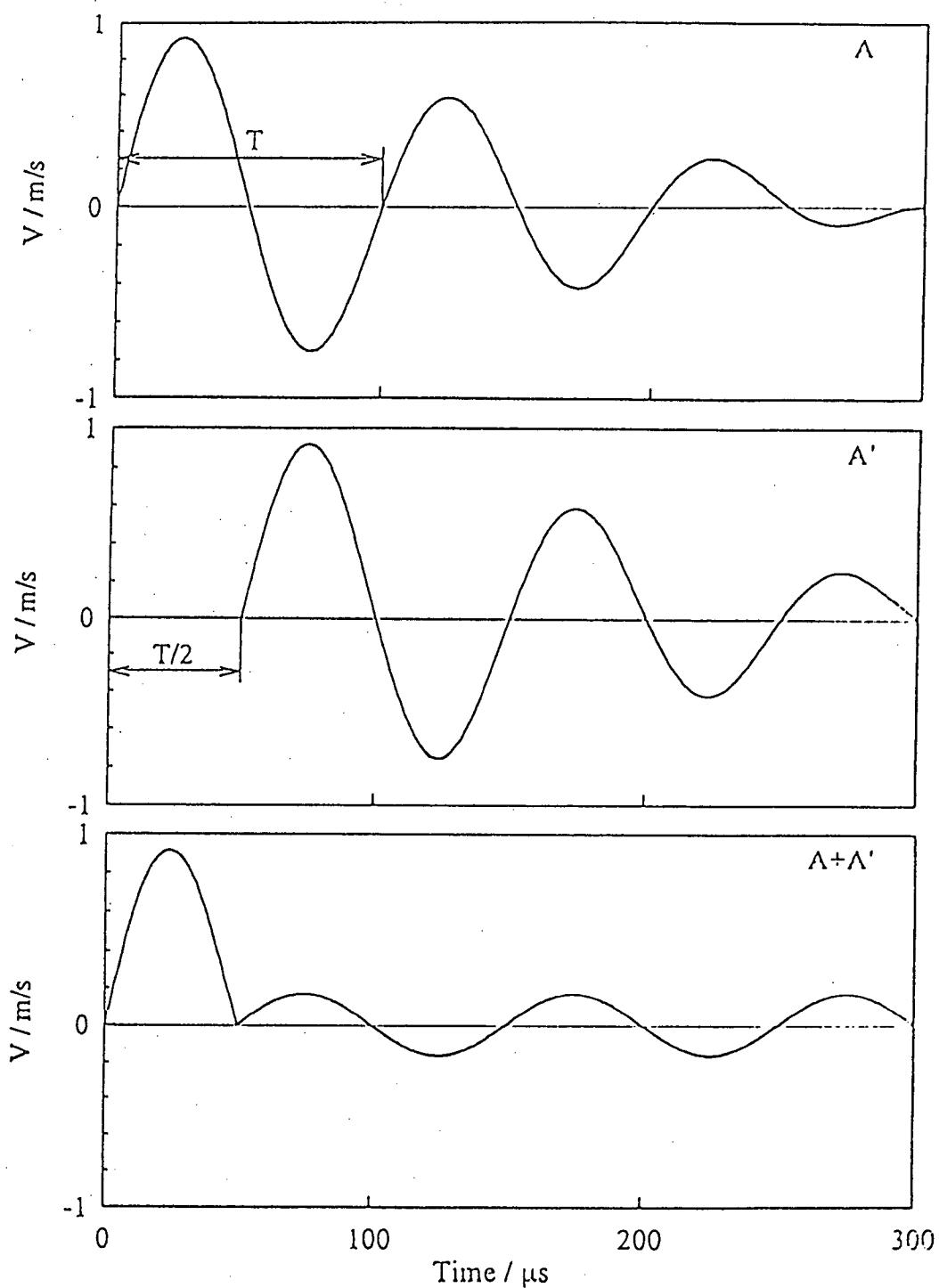


Fig. 1 An idea to control vibration

효율성 등이 유리한 공법으로 잘 알려져 있다.

그러나, 法令에 따라서 火薬類의 利用이 制限

되어 있고, 火薬類에 대한 危險한 認識과 騒音,

振動, 飛石 等에 대한 거부감 때문에 社會的으로

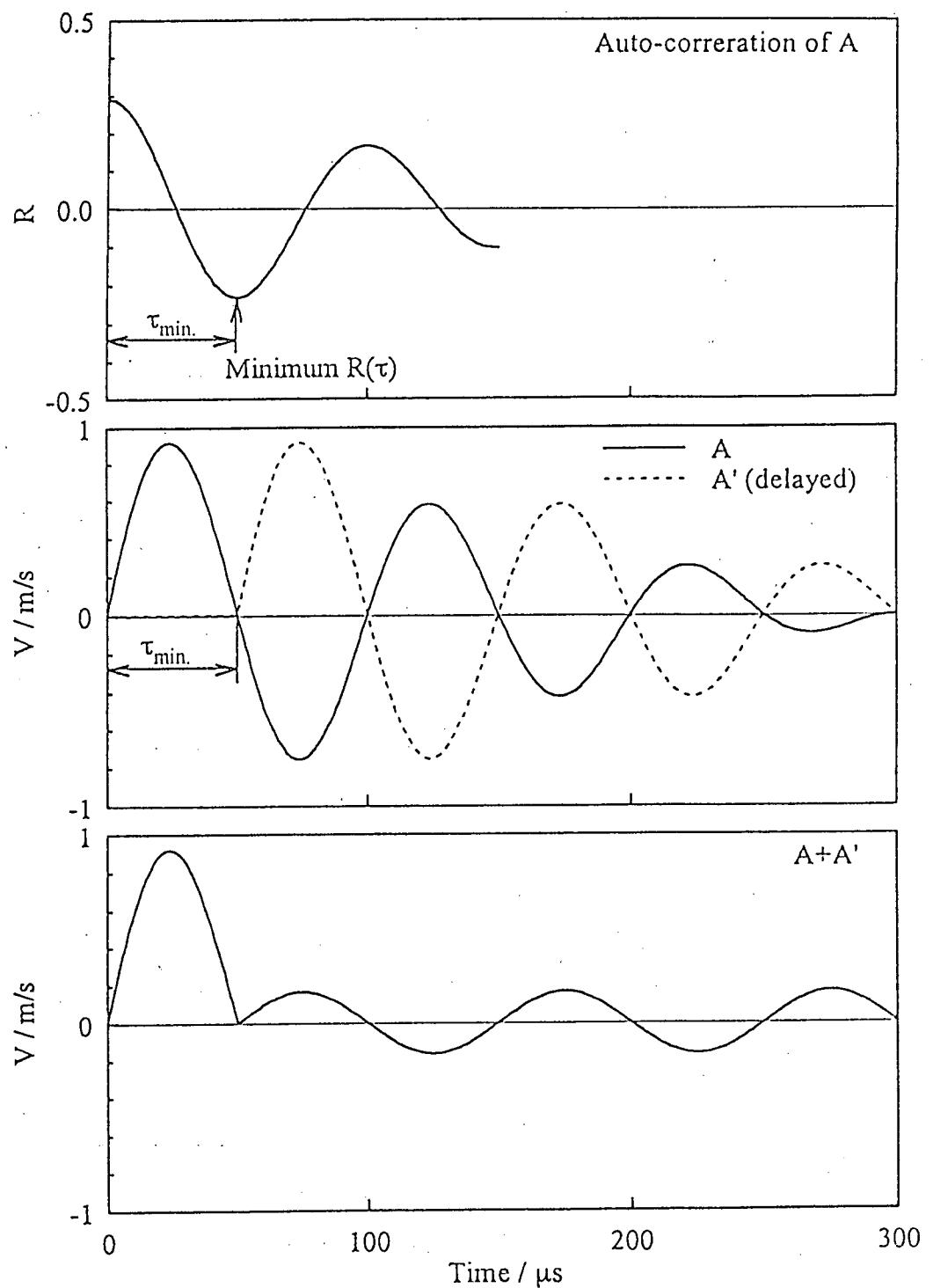


Fig. 2 How to decide the effective delay time

받아들이기 어려운 情緒이므로 效率的인 利用이 되지 못하고 있다.

本 研究는 發破作業을 社會의으로 받아들이기 쉽고, 公共의 安全을 確保하고 效率的으로 利用하기 위해서, 解決해야 할 問題點 중 한가지인 發破振動을 低減시키는 것을 目的으로 한다.

從來의 發破作業은, 單發雷管을 가지고 單發發破에 의한 振動의 에너지를 時間의으로 分散시키는 振動低減方法이 利用되어 왔다.

그러나, 그 單發間隔의 起爆 時間差는 經驗의 으로 決定되었고, 發破位置의 狀態, 振動의 傳波 距離와 傳波經路의 狀態에 따라서는 振動低減에 適合한 時間差로 되어 있지 않은 것을 알 수 있다.

本 研究는, 複數의 振動源에서 振動을 積極的으로 重複시켜 相互干渉을 통하여 低減하는 것을 基本 概念으로 하고, 그러기 위해서 最高 適合한 起爆時間差를 振動波形의 相關函數를 利用해서 理論的으로 決定하는 方法을 研究하였다.

## 2. 振動 實驗

### 2-1. 振動 低減 理論

本 研究에 있어서 發破振動 低減方法의 基本 概念은 以下 Fig. 1과 같다.

예를 들면, Fig. 1에 나타내는 것과 같이 一定한 周期로 減退하는 三角函數에서 나타내는 三角波形을 假定한다.

이 振動에 半周期만큼 늦게同一 振動을 重複시키면 相互干渉해서 약하게 合成된다. 時間差가 없을 때와 比較해서 最初의 最高振幅이 半으로 되고, 그外의 部分에서도 振動이 低減된다. 그러나 實際의 振動波形은 複雜해서 適正한 時間差를 決定하는 것은 容易하지 않다. 그래서 本 研究는, 相關函數를 利用해서, 振動低減方法의 最高 適合한 時間差를 決定하는 方法을 考案하였다.

相關函數에는 自己相關函數와 相互相關函數가 있고, 各各 다음과 같은 式으로 定義된다. 어느 時間差에 있어서 自己自身 즉, 다른 波와의 相關程度를 時間差의 函数로서 나타낸다.

自己相關函數(Auto-correlation)

$$R_{xx}(\tau)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \text{INT}_0^T x(t)x(t+\tau)dt \dots\dots (1)$$

相互相關函數(Cross-correlation)

$$R_{xy}(\tau)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \text{INT}_0^T x(t)y(t+\tau)dt \dots\dots (2)$$

여기서, R은 相關函數, T는 相關을 求할 區間, x, y는 振動波形, t는 時間,  $\tau$ 는 時間差를 나타낸다.

그리고, 가장 相關이 높게되는 時間差에서 그들의 波를 重複시키면 相互干渉하고, 약하게 合成되는 效果를 期待할 수 있다.

Fig. 2는 앞에서 假定한 振動波形의 自己相關函數와 起爆時間差의 決定方法을 나타낸다.

### 2-2. 供試體 및 實驗 裝置

實驗은 Cement Block 供試體에 1孔부터 5孔을 穿孔해서, 各各의 孔에 雷管을 장진해 起爆하였을 때에 供試體 表面에서 計測된 振動變位速度低減을 目的으로 하였다.

實驗은, 資源環境技術綜合研究所 内의 爆發 實驗場에서 實施하였다.

供試體는 몰탈로 製作한 가로 700mm, 세로 700m, 높이 900mm의 직육각형체이다. 一側面 中央의 세로 方向에 列狀에 150mm間隔으로 孔 徑 80mm, 깊이 220mm의 孔을 穿孔하였다. 孔 徑은 雷管이 무리없이 投入되는 크기이, 깊이는 雷管을 裝填했을 때에 雷管 中央까지의 깊이가 200mm 되도록 決定하였다. 各孔에는 편의上 上部에서 1番孔부터 5番孔까지 番號를 附與하였다. 各孔에서의 距離와 振動 傳波時間은 最小 2乘根法으로 解析해서 求한 振動의 傳波速度

는 約 3,360m/sec이었다.

各 孔에는, 日本 火薬(株) 製品의 精密 雷管을 1EA씩 전색을 하지 않고 裝填하고, 日本 火薬(株) 製品의 精密起爆器로 起爆하였다. 精密雷管의 添裝藥은 Pentrite로 藥量은 0.7g이었다. 精密起爆器는 5개의 起爆 回路를 가지고, 이 起爆 system에 의해서 각 챤넬 1 $\mu$ s單位로 1 $\mu$ s부터 9,999,999 $\mu$ s까지 起爆 時間 制御가 可能하다는 것이 確認되었다.

振動의 變位速度는 Poly tec社 製品의 laser 振動計 OFV. 300을 利用해서 測定하였다. 實驗에서는, 穿孔한 側面과 近接한 側面 上部에서 350mm, 穿孔面에서 200mm의 位置에 反射板을 付着하고, laser 振動計의 laser-wave를 垂直으로 照射해서 反射光의 Doppler 效果를 利用해서 非接觸으로 振動의 變位速度를 測定하였다.

laser 振動計에서의 信號는 Hewlett ·

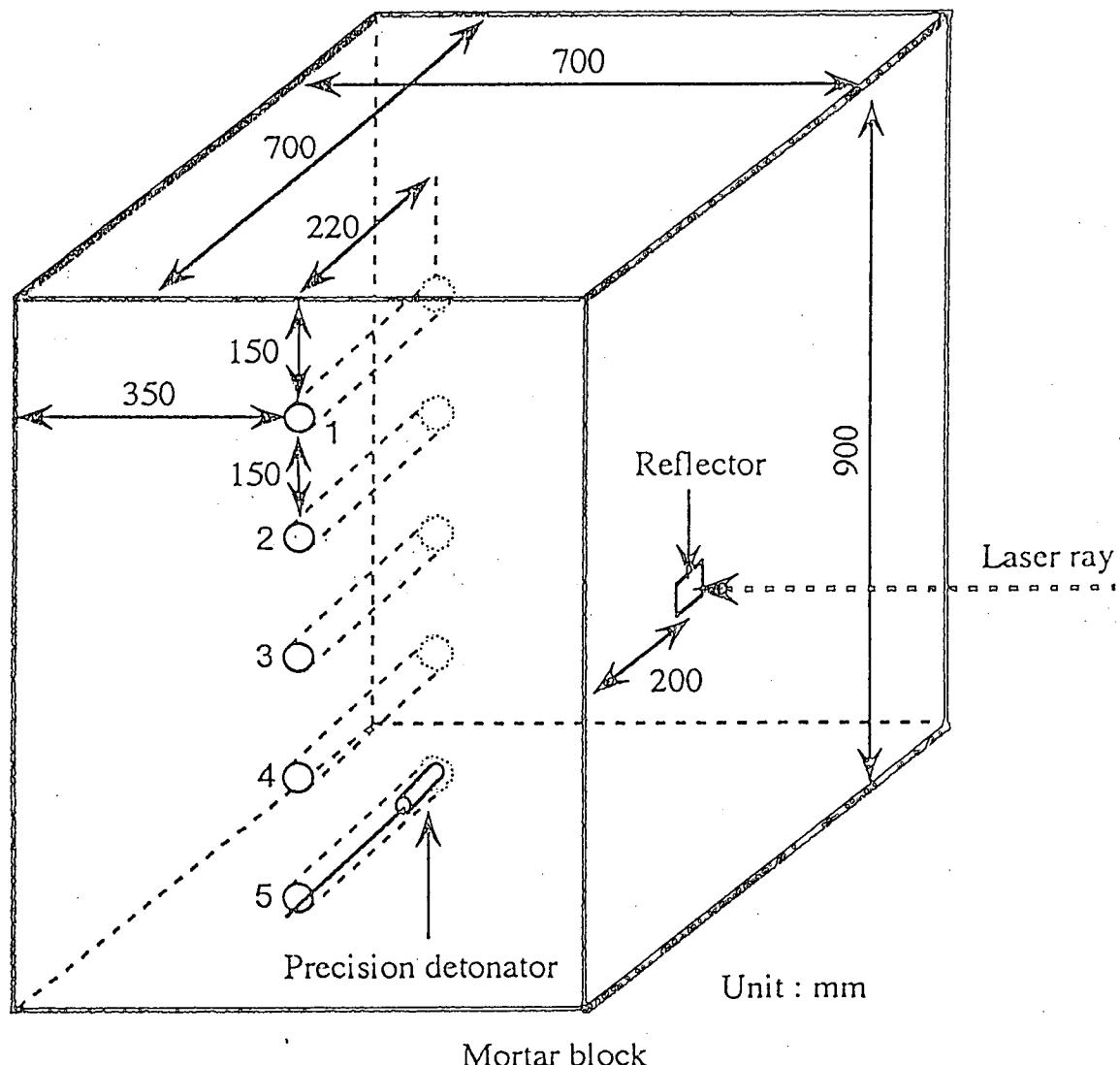


Fig. 3 Experimental set-up for blasting of mortar block

Packard社 製品의 X線 oscillo-scope HP 54504A를 利用하여 Sampling 間隔  $0.4\mu\text{s}$ 로 A/D 變換해서 記錄하고, Apple社 製品의 personal computer Macintosh Centris 650에서 Microsoft社 製品의 소프트웨어 Excel Ver. 4.0을 이용해서 解析하였다.

供試體의 概略圖를 Fig. 3에 나타낸다.

## 2-3. 計測 및 計算

最初에 1番孔, 2番孔, 3番孔을 單獨으로 雷管起爆했을 경우, 振動을 測定하였다.

1番孔과 5番孔, 2番孔과 4番孔은 各各 條件이 같다고 假定해서, 4番孔과 5番孔은 測定을 하지 않았다. 또 各各의 起爆位置에서 測定 position까지의 距離와 起爆에서 測定 position에 振動이 到達할 때까지의 時間과 供試體의 振動 傳波速度를 求하였다.

다음에 1番孔 및 2番孔 振動波形의 自己相關函數를 各各 計算하고, 1番孔-5番孔(1-5라고 明記, 이하 同一), 2番孔-4番孔(2-4)順序로 各各起爆할 때의 最適時間差를 決定하였다. 또 이 時間差로서 4孔을 起爆했을 경우의 振動을 測定하였다.

다음에 1-5와 2-4의 振動波形의 相互相關函數를 計算하고, 1番孔-5番孔-2番孔-4番孔(1-5-

2-4)의 順序대로 起爆할 때 最適時間差를 決定하였다. 또 이 時間差로서 4孔을 起爆했을 경우의 振動을 測定하였다.

最後에는 1-5-2-4와 3番孔의 振動波形의 相互相關函數를 計算하고, 1番孔-5番孔-2番孔-4番孔-3番孔(1-5-2-4-3)順序로 起爆했을 때의 最適時間差를 決定하였다. 또 計算한 時間差에서 5孔을 起爆했을 경우의 振動을 測定하였다.

複數孔의 경우 起爆順序는 最初에 到達하는 最大振幅을 算出하기 위해서 遠距離에서 振幅이 작은 振動에 近距離에서 振幅이 큰 振動을 各各重複되도록 하였다.

또 比較하기 위해서 5孔 全部로부터 振動이 同時に 測定位置에 到達하도록 하는 時間差에서 起爆한 경우(이하 最適 條件으로 記述) 振動을 測定하였다.

## 3. 實驗結果와 考察

### 3-1. 單獨起爆의 振動波形

1番孔(= 5番孔), 2番孔(= 4番孔), 3番孔을 各各 單獨으로 起爆한 경우의 振動波形을 Fig. 4에 나타낸다. 起爆 position에서 測定 position까지의 距離增加에 따른 振幅이 減少하고 그外는 같은

Table. 1 Analysis of vibration wave caused by a detonator

No. of hole	D/mm	D'/mm	Td/ $\mu\text{s}$	Vmax./m/s	T/ $\mu\text{s}$	Vd/m/s	VMLS/m/s
1(=5)	300	461.0	134.8	0.435	45.2	3,420	
2(=4)	150	380.8	110.4	0.712	46.8	3,449	
3	0	350.0	102.0	0.902	44.8	3,431	3,363

D : Distance from the center of blasting point

D' : Distance from the measuring point

Td : Time from blasting to arriving the vibration wave

V<sub>max.</sub> : Maximum vibration velocity

T : Period of the first vibration wave

V<sub>d</sub> : Velocity of vibration wave ; V<sub>d</sub> = D'/T<sub>d</sub>

V<sub>MLS</sub> : Velocity of vibration wave calculated by the method of least square

· 波形이었다. 振動의 振幅, 周期, 傳波速度等의 解析結果를 Table. 1에 나타낸다.

### 3-2. 2孔 起爆의 振動 波形

1番孔(=5番孔) 및 2番孔(=4番孔)의 自己相關函數의 計算 結果, 振動波形의 重複되는 狀態, 단순히 振幅의 合에 의한 1-5 및 2-4의 2孔 起

爆 Simulation 結果와 測定된 波動 波形을 각各 Fig. 5, Fig. 6에 나타낸다.

自己相關函數에 따른 起爆의 最適時間差는 각各  $20.8\mu s$ ,  $21.2\mu s$ 에서 振動波形 Sampling 間隔을 考慮하면 같다고 볼 수 있다. 이것은 각各의 單獨波形이 같은 것이 原因이 된다.

어떠한 경우도 Simulation 結果와 實驗測定

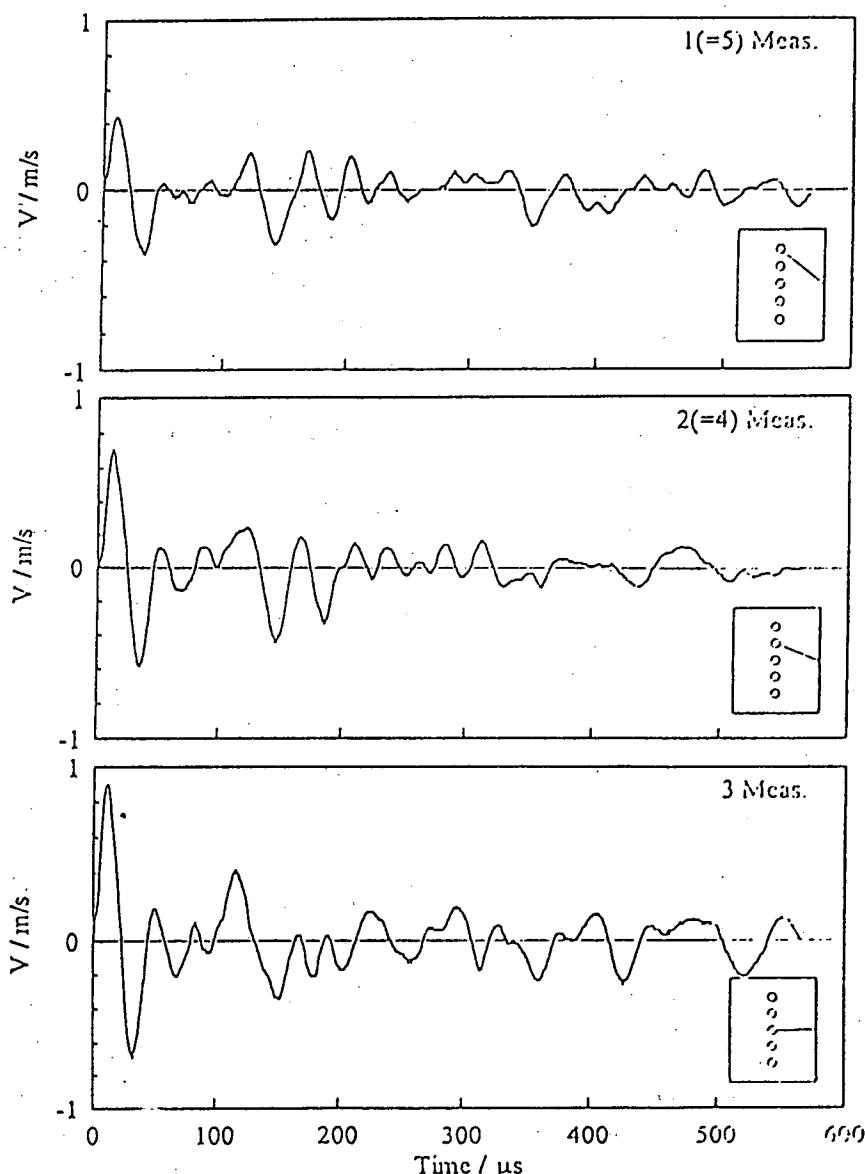


Fig. 4 Vibration waves caused by a detonator 1, 2, 3, 4 and  
5 : Number of hole Meas. : Measured data

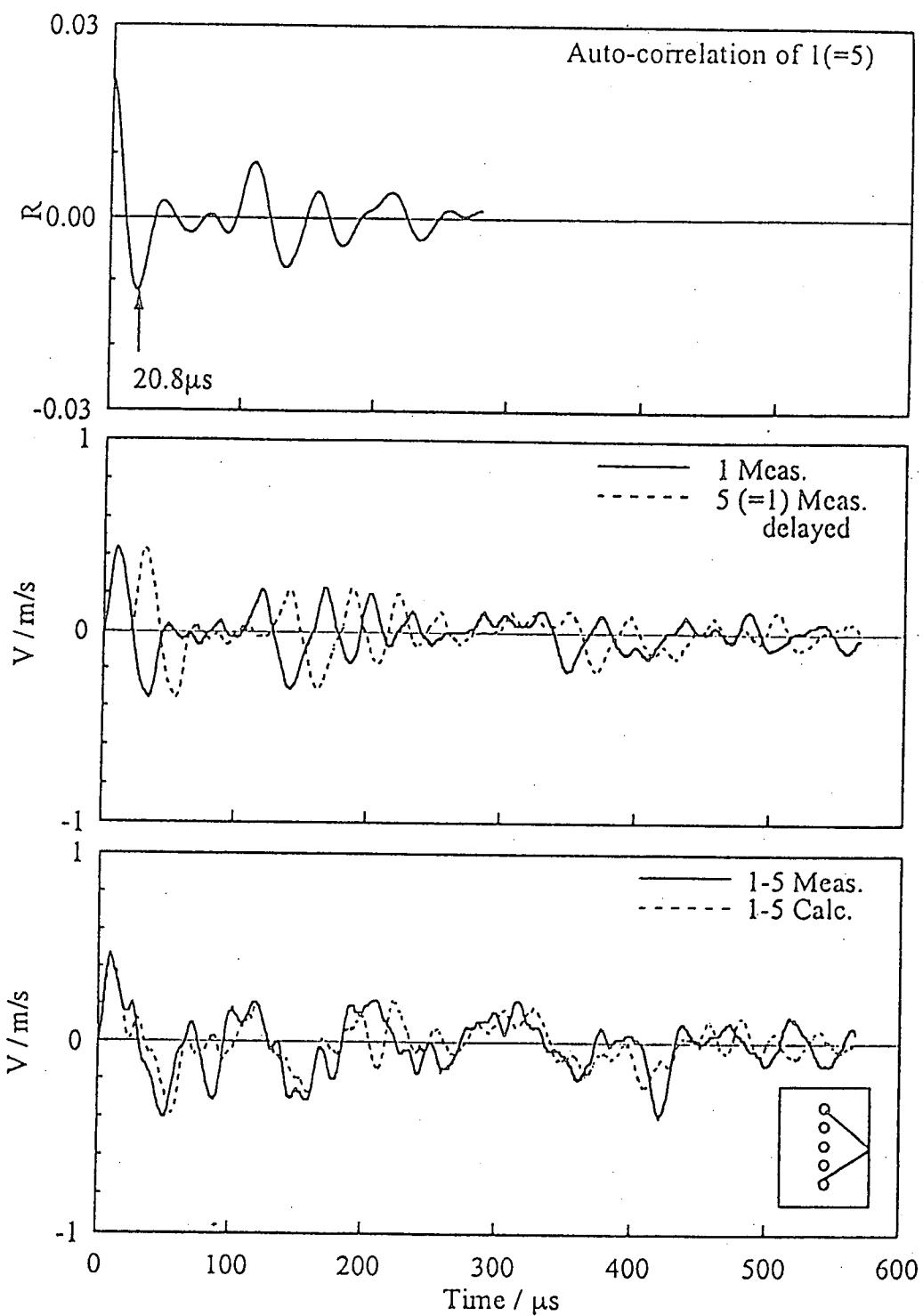


Fig. 5 Vibration wave caused by two detonators  
Calc. : Calculated data

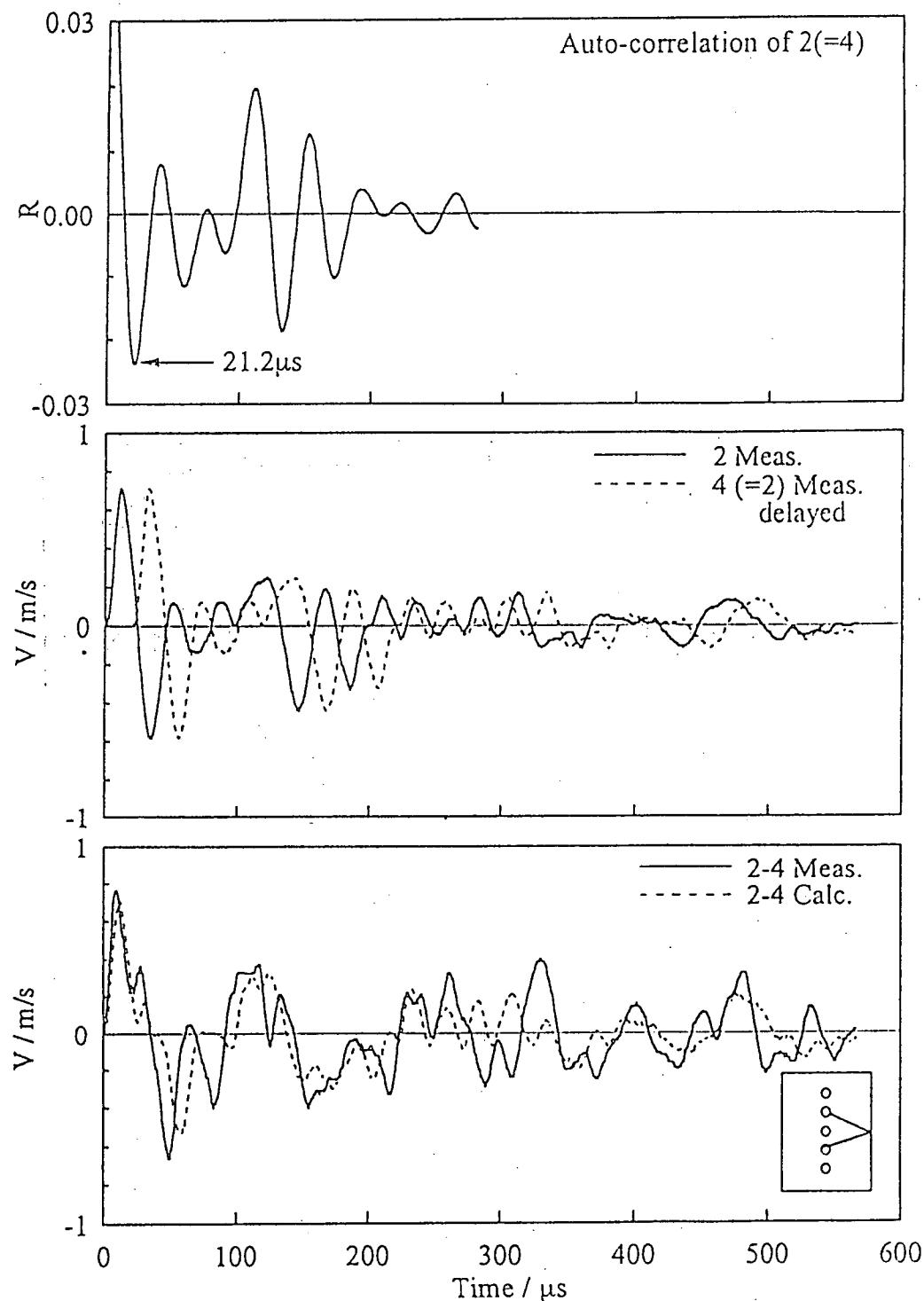


Fig. 6 Vibration wave caused by two detonators

된 波動波形은 양호하게一致하고, 본 Model에 있어서 단순한 振幅의 和에 의한 Simulation 方法이 可能하다는 것을 나타내었다.

### 3-3. 4孔起爆의 振動波形

1-5, 2-4의 振動波形에 의한 相互相關函數의

計算 結果, 振動波形을 重複시키는 狀態, 1-5-2-4, 4孔起爆의 Simulation 結果 및 測定된 振動波形을 Fig. 7에 나타낸다.

이 相互相關函數에 있어서 負의 相關이 매우 높게 되는 것은  $146.8 \mu\text{s}$ 지만, 振動을 시간적으로 分散되지 않게 干涉시키기 위해서 1番孔과 2

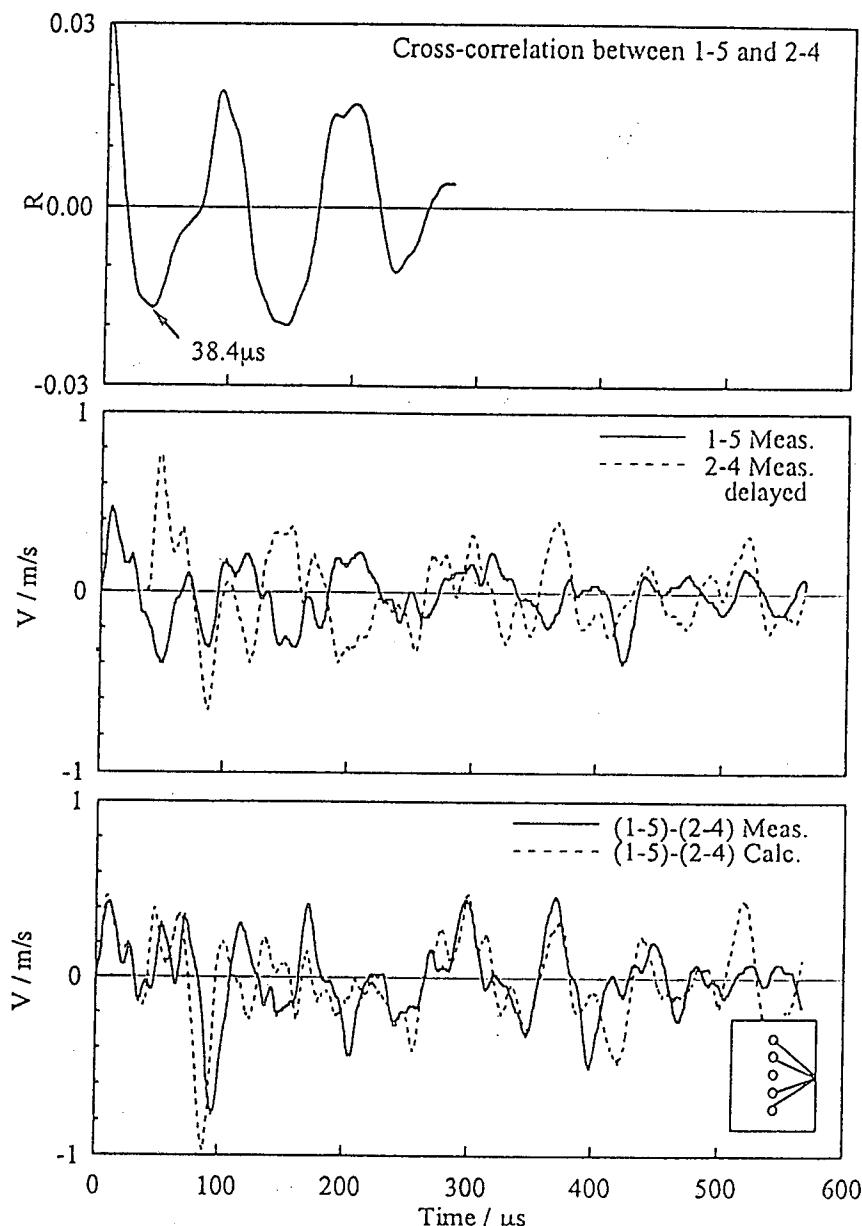


Fig. 7 Vibration wave caused by four detonators

番孔의 最適時間差로서 2번째에 負의 相關이 높은  $38.4\mu\text{s}$ 를 採用하였다. 따라서, 1-5-2-4의 時間差는  $0-20.8-38.4-59.6\mu\text{s}$ 가 된다. 단, 여기서 얻은 時間差는 振動이 到達했을 때의 時間差이므로 實際의 起爆時間差는 이것의 距離에 의한 到達時間의 差를 加減하고 있다.

이 境遇도 Simulation 結果와 測定波形은 양호하게 一致하였다.

### 3-4. 5孔 起爆의 振動波形

1-5-2-4와 3番孔의 振動波形에 의한 相互相關函數의 計算結果, 振動波形의 重複의 狀態 1-

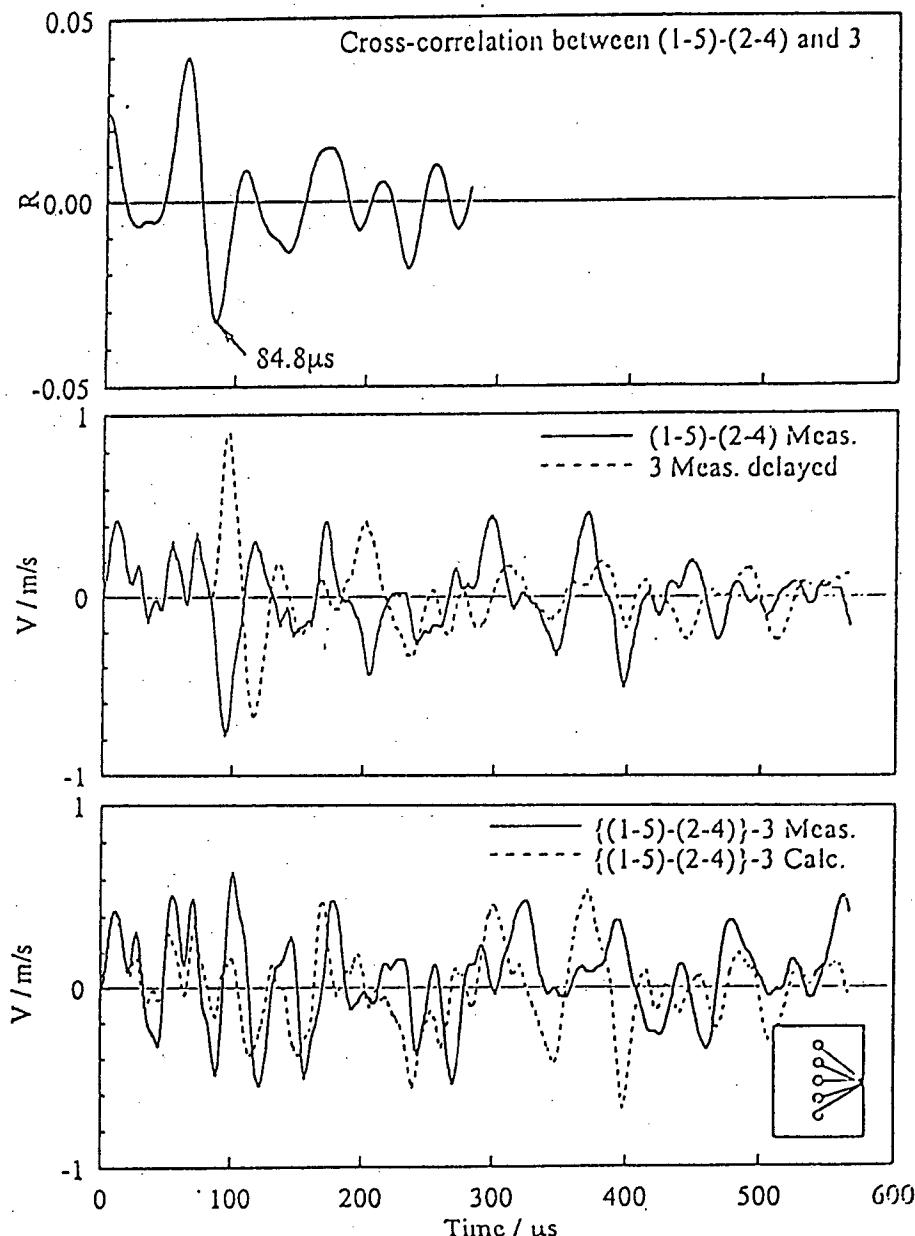


Fig. 8 Vibration wave caused by five detonators

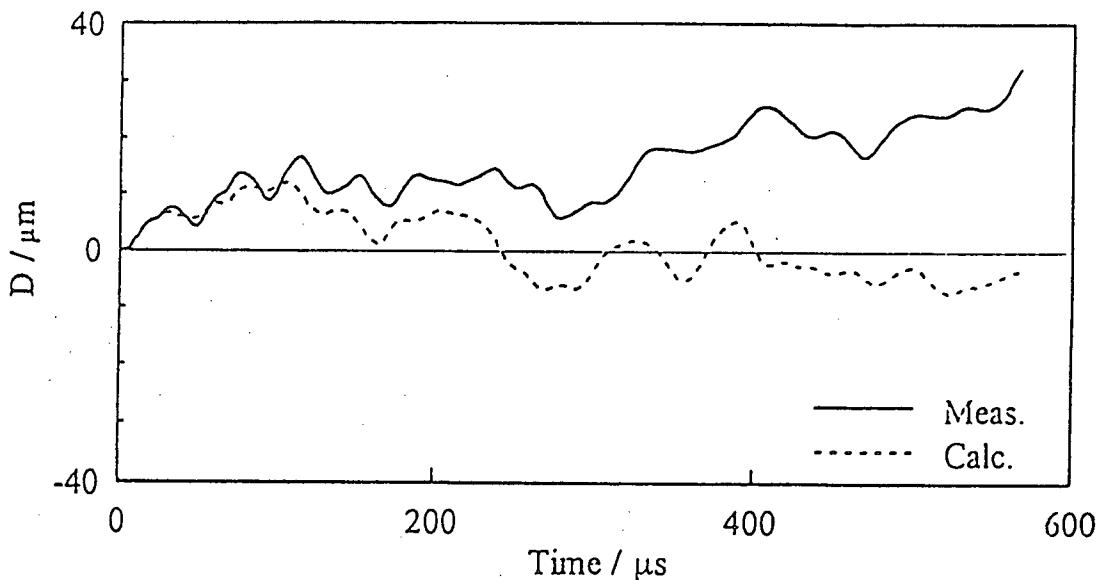


Fig. 9 Displacement caused by five detonators

5-2-4-3의 5孔起爆의 Simulation 結果 및 測定된 振動波形을 Fig. 8에 나타낸다.

1番孔과 3番孔의 最適時間差는  $84.8\mu\text{s}$ 가 되었다. 따라서 1-5-2-4-3의 時間差는 0-20.8-38.4-59.6- $84.8\mu\text{s}$ 가 된다. 實驗結果 振動速度의 最大值는  $0.63\text{m/s}$ 가 되고, 3番孔을 單獨으로 起爆한 境遇의 振動速度 最大值인  $0.90\text{m/s}$ 보다 작게 되었다.

5孔起爆의 境遇, 約  $50\mu\text{s}$ 에서 Simulation 結果보다 測定된 振動波形의 振幅이 크게 되었다. 각각의 振動變位速度를 時間으로 積分해서 變位를 求한 結果를 Fig. 9에서 나타낸다. Simulation에서는 變位가 0附近에 接近하지만, 測定波形에서는 變位가 時間과 함께 增大하고 있다. 이것은 Photo. 1에 나타내는 것과 같이 5孔起爆에서 試驗體가 分裂되어 移動하는 것의 原因으로 생각한다. 한편, 4孔起爆의 境遇까지는 供試體가 分裂되지 않았기 때문에 Simulation 結果와 測定된 振動波形이 一致했다고 본다.

### 3-5. 最大條件과의 比較

5孔起爆 最大條件의 Simulation 效果와 測定된 振動波形을 Fig. 10에 나타낸다. 兩者가一致하지 않는原因是 變位의 計算과 實驗後의 供試體 狀態에서 最適時間差의 境遇와 똑같은 供試體 破壞現狀이 考慮되지 않았기 때문이라고 생각된다.

最大條件과 相關函數에 의한 最適時間差 起爆과의 測定된 振動 波形의 比較를 Fig. 11에 나타낸다.

最大條件의 振動速度 最大值는  $3.28\text{m/s}$ 가 되고, 最適時間差의 境遇와 比較하면 最初의 最大值는  $0.47\text{m/s}$ 에서 約  $1/7$ , 最大值는  $0.63\text{m/s}$ 에서 約  $1/5$ 로 減少되었다.

### 3-6. 破斷面의 狀態

Photo. 1에서 보는바와 같이  $\mu\text{s}$ 精度의 時間差 起爆에서는 發破에 의한 破斷面이 非常 美麗한 것이 確認되고, 本方法을 實際發破에 適用하기에 따라 目的한 振動低減效果에 附加하여 smooth blasting效果를 期待한다.

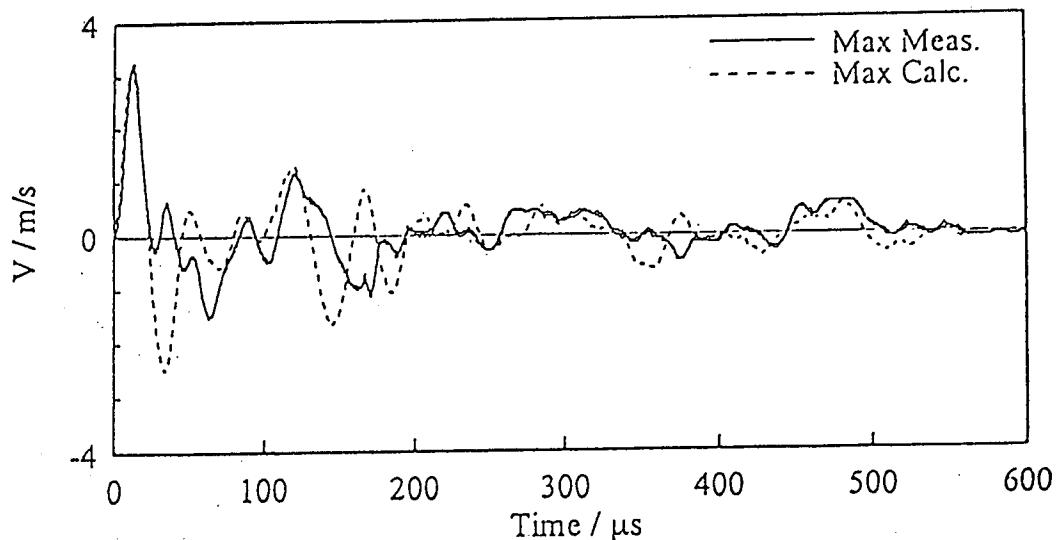


Fig. 10 Vibration wave caused by five detonators on the maximum condition

#### 4. 結 論

發破時의 振動을 相互干渉시키고, 低減하기 위해서 最適의 起爆時間差, 振動波形의 相關函數를 利用해서 決定하는 方法을 開發하였다. 그래서, 이 方法을 Mortar block供試體를 利用하여 小規模 發破實驗에 適用하고, 振動의 低減效果를 檢討하였다. 그 結果, 이 方法을 利用해서 精密雷管의 5孔列狀 發破에서 振動變位速度의 最大值는 0.63m/sec가 되고, 觀測位置에서 가장 가

까운 3番孔에서 單獨으로 精密雷管을 起爆할 경 우에 最大值 3.28m/s의 約 1/5에 低減되었다.

本 方法을, 實際 發破에 適用하기 위해서는 앞으로 現場感 있는 實驗效果, 測定位置의 距離와 方向에 따른 振動 低減效果의 相異等을 檢討하지 않으면 안되지만, 예를들어 發破位置 周圍에 部分的으로 振動을 低減하고 싶은 設備가 있는 境遇에는 非常 有効한 手段이 될 것으로 생각한다.