〔技術資料〕

都市發破公害의 輕減 對策

서울地下鐵5號線 6監理團 火藥部長　沈　鍾　燮

1. 序　言

人口의 膨脹과 各種 産業施設의 擴大로 土地利用이 擴大되면서 地上의 生活空間이 좁아짐에 土地價格이 昻騰되고 環境公害等의 問題가 深刻해지는 現實에서 快適한 空間을 찾아 遊休空間을 利用하려는 人間이 努力이 繼續되고 있다.

社會的 文化的 經濟的 發展에 따라 國民의 生活水準과 意識水準이 向上되면서 좋은 環境 속에서 安樂한 生活을 하고저하는 意慾에서 衣食住의 패턴이 달아지고 있으며 快適한 生活 터전을 慾求하고 있다.

都市가 肥大해지면서 漸次的으로 衛星都市의 擴張建設로 道路, 아파트, 各種 産業施設等이 擴大되고 自動車의 急增으로 2,000年代에 이르러서는 飽和狀態에 이른다고 한다. 日本에서는 벌써부터 超高層都市, 海上人口都市, 地下都市, 地下施設物類, 네트워크等의 空間計劃들을 發表한바 있어 人口密度가 높은 國家들에게 關心의 對象이 된바 있으며 東京 앞바다에는 海上人口 飛行場이 建設中에 있다.

우리나라도 地下施設物로서 地下鐵을 비롯하여 에너지 備蓄基地, 地下商街等이 建設되여 活用中이며 最近에는 서울市에서 市內 長距離橫斷車道도 檢討되고 있으며 釜山까지 高速電鐵建設工事를 着工하였다. 釜山市에서는 影島와 松島間의 앞바다를 埋設하여 大規模의 人口섬을 計劃하여 着工한다는 報導도 있었다.

生活空間의 自然環境을 損傷시키는 公害의 種類는 여러가지가 있으나 여기에서 檢討하고자 하는 것은 各種 建設現場의 掘鑿作業에서 發生하는 發破振動과 騷音에 對한 것이다. 主要 發破工事로는 서울을 비롯한 仁川, 大邱 釜山等地의 地下鐵工事, 通信溝 및 電力溝 터널工事 地下商街 其他 建物의 터파기 等이다. 이 發破에 隨伴되는 振動과 爆音이 環境公害가 되여 民怨의 要素로 擡頭되고 있어서 이 發破公害를 輕減시키는 對策은 火藥發破技術者가 硏究하여야 할 課題라고 生覺한다.

2. 發破에 따른 地盤振動

(1) 發破振動의 槪念

發破作業에 있어서 火藥類의 爆發에 依해서 瞬間的으로 岩盤에 매우 큰 衝擊을 주는데 이때 發生되는 巨大한 에너지는 그 全部가 岩盤의 破碎에만 所要되는 것이 아니고 岩盤의 特性 發破諸元等에 따라 에너지의 一部는 岩盤을 媒質로하여 地盤內를 波動하면서 彈性波 形態로 速度가 傳波되며 이 波動에 依해서 地盤에 振動을 이르키게 된다. 이것이 地盤振動 卽 發破振動이라 한다.

地盤內에 터지게된 波動은 地盤內 或은 地盤上의 構造物에도 傳波되여 振動을 惹起하게 된다. 이러한 發破振動은 間或 周邊의 環境에 影響을 주어 公害問題의 一部分으로 重大한 問題가 될 수

있다. 最近에는 都心地域 特히 密集된 住宅家와 構造物 近處에서 發破作業을 施行하는 境遇가 많아짐에 따라 地盤振動에 依한 發破公害問題가 많이 發生하는 傾向이므로 發破作業에 있어서 細心한 計劃과 注意를 하지 않으면 안된다.

(2) 發破振動의 成分

爆源을 中心으로한 彈性波 形態의 速度는 岩盤의 粘性에 依하여 減速되면서 消滅한다. 이 彈性波는 物體波와 表面波가 있는데 物體波는 岩盤內部를 따라 傳達되는 波이며 波形은 縱波(P波 :Primary wave or Compressional wave)와 橫波(S波:Shear wave Secondary wave)가 있다. 表面波는 地盤表面을 따라 傳達되는 波이며 Raleigh wave(R波) Love wave(L波), Hydrodynamic wave, Couple wave 等의 波形이 있으나 垂直振動에 많은 影響을 주는 것은 R波이다.

이 彈性波의 進行에 同件하여 岩盤中에는 粒子運動이 이라나는데 이 粒字運動이 곧 地盤振動이 되고 地盤振動의 根源은 岩盤中의 彈性波의 發生이라고 할 수 있다. 이 粒子運動의 方向은 彈性波의 進行方向에 對하여 P波는 같은 方向으로 S波는 進行方向에 對한 垂直方向으로 R波는 表面波와 같은方向의 運動을 한다. 위에서 말한 P波, S波, R波는 波의 速度와 粒子의 運動方向에 있어서 나름대로의 差異를 가지고 있으며 P波, S波, R波의 速度를 V_P, V_S, V_R라고 하면 $V_P > V_S > V_R$의 關係가 있다.

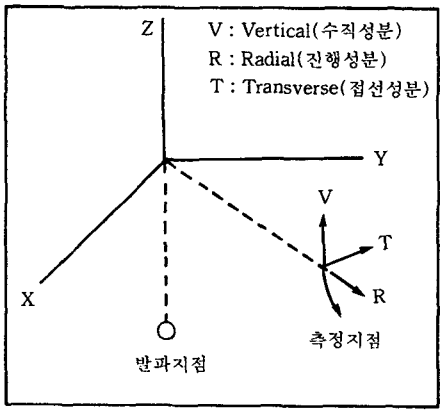


그림1 지표에서 측정한 발파진동의 3성분

그러나 이와같은 波形들이 測定位置에 到達할 때에는 短時間에 거의 同時에 複合波 形態로 到達하게 되므로 처음 發生時의 粒子運動 方向을 그대로 維持하지 못하고 合成된 任意의 方向으로 運動하게 된다. 여기에서 通常地盤振動의 現實的 方向이라고 할 수 있는 水平面에서의 最大速度가 되는 垂直 2方向 L(Longitudinal, Rodial)方向과 T(Transvers)方向과 最大垂直方向 V(Vertical)方向을 測定하여 振動의 基準으로 삼는데 現實에 있어서는 이것을 合成하는 方向의 振動이 이루어진다.

그리고 地盤振動으로 因한 構造物이나 住宅等에 對한 被害影響을 考慮할 때에는 위의 粒子速度뿐 아니라 周波數를 함께 考慮하여야 한다. 一般的으로 低周波일수록 同一한 振動速度라 하더라도 振動被害가 크게 나타나므로 振動速度의 크기와 同時에 周波數에 對한 振動速度도 重要視하여야 할 것이다. 위의 그림1과 그림2는 振動의 3 成分과 周波數에 依한 影響基準의 變化를 나타낸 것이다.

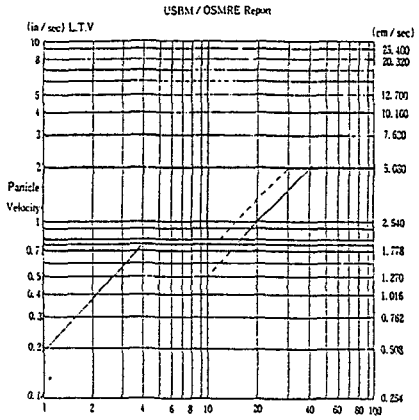


그림 2 Frequency(hz)

3. 發破振動에 影響을 미치는 要素

發破作業에 있어서 地盤振動을 일르키는 要素로는

① 火藥類의 種類에 따른 火藥의 特性
② 使用火藥의 量(裝藥量)
③ 起爆方法

④ 填塞의 狀態와 火藥의 裝塡密度
⑤ 自由面의 數
⑥ 爆源과 測點間의 距離
⑦ 地質條件(岩質과 構造)
⑧ 發破效果

等이 地盤振動에 影響을 미치는 要素이다.

(1) 發破振動의 豫測推定

地質條件에서 考慮되어야 할 點은 發破에 依한 彈性波를 傳達하는 岩盤의 特性 및 表土層의 두께 等이 重要한 要素가 된다.

그런데 이 많은 要素中에서 가장 重要한 變數는 裝藥量 및 爆源과 測點間의 距離이고 나머지는 이 表數에 影響을 미치는 常數로 決定된다.

여기서 裝藥量은 齊發時는 總裝藥量, 遲發時는 遲發當 或은 設差當 裝藥量을 말한다. 發破振動은 이 2要素에 指數的으로 比例한다. 卽 一般的인 發破振動 推定式은

$$V = K(\frac{D}{W_b})^n$$

V : 地盤의 振動速度(cm/sec)
W : 遲發當 裝藥量(kg)
D : 爆源과 測點間의 距離
K : 發破振動 常數
b : 裝藥指數
n : 減衰指數

위 發破振動 推定式 中에는 前述한 發破振動에 影響을 미치는 要素 W와 D 以外에 K와 n, b가 追加包含되여 있는데 b는 1/2 또는 1/3이 適用된다.

따라서 위 式을 利用하여 發破作業의 振動速度를 豫測하려면 實際로 現場에서 實測 또는 算出할 수 있는 D와 W 그리고 K와 n를 豫測하여야 한다. 여기서 K와 n의 豫測은 範圍가 매우 큼으로 現場에서 試驗發破를 數面 實施하여 이에 對한 振動測定値(V)와 W, D를 위式에 代入하여 K와 n을 求한다. 이에 對하여 이分野의 여러 學者들이 試驗發破를 實施한 試驗値에 依하여 發破振推走式을 誘導하였다.(表1)

표1. 발파진동 추정식

제창자	추정식	성립조건	발파조건에 따른 K치
伊 藤	$v=KL^{2/3}R^{-2}$		K=250~1000교질다이나마이트 K=15~21 흑색화약
吉 川	$v=KL^{3/4}R^{-2}$		K=100~700터널 K=150~650
日本油脂	$v=KL^{3/4}R^{-15}$		K=80±40, 터널발파 : 고성능다이너마이트 K=60±30, 터널발파 : 제어발파폭약 K=20±10, 터널발파 : 콘크리트파쇄기 K=50±30, 노천발파 : 고성능다이너마이트 K=45±25, 노천발파 : 제어발파폭약 K=15±10, 노천발파 : 콘크리트파쇄기
日本火藥	$v=KL^{3/4}R^{-2}$	0.2<L<4000 5<R<3000	K=450~900터널발파 : 심발발파 K=200~500터널발파 : 확대발파, 천반발파 K=300~700터널발파 : Toeing발파 K=100~300대구경벤치발파 K=300~2,000항타, Loosening발파
旭 化 成	$v=KL^{2/3}R^{-n}$	10<L<3000 30<R<1500	K=500~1000심발발파 K=300~500확대발파 K=200~500벤치발파 n=2.0발파지점과 물건과의 지질이 암반인때 n=2.5~3.0발파지점과 물건과의 지질이 점토인때
Langefors	$v=K\cdot\sqrt{\frac{L_3}{R^2}}$		K=30~70(경암인 경우)
U.S.B.M	$v=K\cdot(\frac{R}{L_m})$		m : 장약량에 따른 지수 n : 거리에 따른 감쇠지수 k : 진동상수

v : 진동속도 cm/sec, L : 장약량 kg, R : 폭원과의 거리 m

(2) 發破振動 許容基準에 따른 適正 裝藥量

發破作業에 있어서 許容振動値를 考慮한 裝藥量을 決定하는 要素는

① 振動許容値
② 使用火藥의 種類
③ 發破地點으로부터 建物까지의 距離
④ 最小抵抗線 또는 基盤岩의 強度
⑤ 發破方法

前述한 바와 같이 주어진 作業條件에서 發破振動式

$$V=K(\frac{D}{W^{1/3}})^{n}$$

으로 決定 하였을때 遲發當 裝藥量 W는

$$W=(\frac{V}{K})^{-3/n}\cdot D^{3}$$

에 依하여 求할 수 있다. 減衰指數 n은 한 地域에서 거의 一定하여 서울 花崗岩의 境遇 −1.7, 片麻岩의 境遇 −1.5의 값을 取하므로 裝藥量은 許容振動速度 V가 클수록 發破振動常數 K가 작을수록 −3/n의 指數곱으로 增加하며 距離 D의 3乘에 比例하여 增加함을 알 수 있다.

4. 發破 PATTERN 設計

(1) 發破作業 分析

現場 岩盤의 種類를 硬岩, 準硬岩, 軟岩, 風化岩等 4種類로 分類하고 種類別 特性을 代表하는 것을 選定하여 理論的인 分析을 하고 그 結果를 實操業値와 對比해 본다.

(2) 基本理論計算

(i) 計劃條件

① 岩種(g)
② 掘鑿斷面積(A)
③ 穿孔長(l)
④ 爆藥(e)
⑤ 電管

(ii) 計算方式

① 岩石의 抗力係數(g)
② 爆藥의 威力係數(e)
③ 1發破當 掘進長(w)
④ 穿孔長(l)
⑤ m³當 裝藥量

$$L_T(kg/m^3)=\frac{(n+1)^2}{n^2}f(w)\cdot e\cdot g\cdot d$$

$$n=\frac{\sqrt{A}}{W},\ W=0.9\,\ell$$

$$f(w)=(\sqrt{1+\frac{1}{w}}-0.41)^3$$

$\frac{(n+1)^2}{n^2}$: 坑道掘鑿斷面係數

⑥ 1發破當 裝藥量

$$L(kg/round)=L_T\cdot A\cdot W$$

⑦ Angle cut

$$L=CW^3$$

⑧ Parallel cut

$$L=c\cdot l\cdot w$$

⑨ Bench cut

$$L=C\cdot D\cdot W\cdot H$$

⑩ 小割發破

$$L=C\cdot D^2$$

⑪ Stoping hole

$$L=c\cdot l\cdot w^2$$

⑫ 微振動破碎器 發破

$$L=C \cdot D^2 \cdot W$$

5. 發破振動의 影響과 許容基準

發破振動은 發破에 따른 振動波가 構造物 또는 人體에 미치는 影響이 問題가 되는데 이 發波公害의 半數는 發破振動이 占하고 있다. 發破作業에서 爆藥이 爆發하면 瞬息間에 매우 큰 衝擊壓을 岩盤에 주게 되는데 이러한 에너지는 大部分 岩盤을 破壞하는데에 利用되지만 一部 殘余 에너지 0.5~20%는 岩盤을 媒質로하여 爆源을 中心으로한 球狀의 彈性波 形態로 速度가 傳波한다. 이러한 彈性波의 發生은 外力에 對하여 岩盤內의 應力과 變形의 平衡을 維持하려고 하는 過程에서 始作되며 이 彈性波가 進行 傳波되어감에 따라 岩盤의 粘性에 依하여 減速되면서 消滅한다. 이 彈性波의 進行에 同伴하여 岩盤中에는 微細한 粒子運動이 이러남으로서 地盤振動 卽 發破振動을 이르킨다.

自然地震은 人體와 構造物에 미치는 影響을 震度로 表示하고 있으나 發破振動은 自然地震에 比하여 周波數가 매우 크면서 持續時間이 짧고 多樣하기 때문에 地震振動과 같은 方法으로 振動影響을 取扱하는 것과는 달리하고 있다. 實際로 現在까지의 硏究結果에 依하면 地震과 같이 周波數가 작고 時間이 긴 震動의 境遇에는 振動速度가 對象物에 미치는 影響이 크며 發破振動은 周波數가 크고 振動時間이 짧아도 對象物에 미치는 影響에 關聯性이 많으므로 發破震動에 對한 影響評價基準은 粒子速度의 最大値 卽 振動速度로 하며 速度의 單位로 cm/sec(kine)으로 한다.

發破振動의 學者別 影響評價는 다음 表2, 地盤條件에 따른 一般 住宅의 被害程度와 振動速度와의 關係는 다음 表3과 같다.

표2 발파진동의 학자별 영향평가

진동치 \ 연구자	Langefors (Sweden)	Edwards (Canada)	USBM (U.S.A)	E Pank (Gemary)	ASCE
50	큰 균열이 발생	피해발생	큰피해가 균열이 발생. 벽체의 흙이 멀어짐.	큰피해	구조물이 위험
	균열이 발생				10Hz, 35Hz, 구조물 주의
	미세한 균열				
10	요주의	요주의	가벼운피해	피해발생	
5	눈에 보이는 피해는 없다.	안전	안전	극히 가벼운 피해 요주의	10Hz, 30Hz, 기계의 안전한계
1					
0.5	인체에는 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없다.				
0.1	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낀다.				
0.05					
0.01	대단히 민감한 사람만이 진동을 느낀다.				
0.005	인체가 감각이 없다.				

주 : USBM : United Stated Bureau of Mines(미광무국)
ASCE : American Society of Civil Engineers(미국토목학회)변위속도(cm/sec)

표3 지반조건에 따른 일반주택의 피해정도와 진동속도와의 관계(Langefors)

조반조건 / 진동범위	지하수면 이하의 점토, 모래, 자갈	퇴석(Moraine) 슬레이트(Slate) 연약한 석회석	강한 석회석, 석영질 사암, 편마암, 화강암, 현무암	피해정도
종파의 전달 속도(m/sce)	300−1,500	2,000−3,000	4,500−6,000	
발파에 의한 진동속도 (cm/sec)	0.4−1.8이하	3.5이하	7.0이하	피해없음
	0.6−3.0	5.5	11.0	무시할 수 있는 피해(피해한계값)
	0.8−4.0	8.0	16.0	균열생성
	1.2−6.0이상	11.5이상	23.0이상	상당한 피해발생

發破振動의 크기를 表示하거나 또는 이의 許容基準을 規定할 때는 地盤의 움직이는 程度를 나타내는 變位 또는 地盤이 움지기는 速度가 加速度의 크기를 나타낸다. 그러나 至今까지의 研究結果에 依하면 人體가 感應하는 程度는 加速度 成分에 따라 變化하고 構造物이 받는 被害의 程度는 地盤의 振動 速度 成分과 直接的인 關聯이 있다.

또한 測定할 때 變位 成分은 가장 적은 값이기 때문에 誤差 發生 可能性이 많고 周波數를 正確히 잡지 못하면 값이 變할 憂慮가 있을 뿐만 아니라 時間과 變位 또는 時間과 過速度의 關係로부터 速度를 求하기는 때때로 어려우므로 變位나 加速度 보다는 速度를 測定하는 것이 바람직 하다.

한편 構造物이 받는 被害의 程度는 여러 學者들에 따라 다르다. 이들은 測定條件 卽 構造物의 狀態, 建物의 基礎等이 서로 다르기 때문에 比較하기는 어렵다. 그러나 Duvall과 Fogelson은 振動速度가 5.0m/sec 以下인 때는 安全하고 5.0~13.5cm/sec일때는 가벼운 被害를 입고 13.5cm/sec 以上일 때는 相當한 被害를 當한다고 報告하였다. 따라서 이들 學者들의 結果를 綜合하여 安全하게 最低値를 設定한다면 Dvorak의 1.0cm/sec, Langefors의 0.4cm/sec, Susuki의 1.0cm/sec라고 볼 수 있다. 한편 서울 地下鐵工事에서는 表4와 같이 許容値를 設定하였다.

표4 서울 지하철 발파 진동 허용치

건물등급	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
분 류	문화재	주택,아파트(실금이 있는 정도)	상가(crack이 없는 상태)	철근콘크리트빌딩 및 공장
건물기초에서의 허용 진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

비고 1) 위 표는 서독의 Vornorm DIN, 4150, Tcil 3을 기준하였음.
2) 주파수는 약 100Hz까지 통용된다.
3) pick up 위치를 해당 건물의 외곽 마당(ground)에 설치함을 기준으로 한다.

6. 發破에 依한 地盤振動의 特性

(1) 火藥類의 性能과 地盤振動과의 關係

一般的으로 爆速이 빠른 火藥類일수록 振動은 크고 그 周波數도 높게되는 傾向을 볼 수 있고 逆으로 爆速이 느린 火藥類일수록 振動의 크기는 急激히 減少하고 한편 周波數도 낮게 되는 것이다.

(2) 爆源에서의 距離 및 藥量과 地盤振動의 關係發破에 依해 發生되는 地盤振動의 크기는 振動源과 物件間의 距離, 使用되는 火藥類의 種類 및 齊發藥量 起爆方法(雷管의 種類), 自由面의 數等의 要因으로 左右되기 쉽고 또한 그 地盤振動時 波形의 狀態는 振動源과 物件 사이의 地盤狀態, 物件이 存在하고 있는 地質의 狀態에 따라 다른 傾向을 나타낸다.

(3) 地盤條件과 地盤振動과의 關係

① 一般的으로 地表面과 地盤內部(坑道壁面)로 나누어 地盤振動을 測定하는 境遇 發破에 依해 地盤振動의 크기는 地表面쪽이 地盤內部(坑道壁面)에 比해 크게 되고 그 範圍 또한 廣範圍하게 된다. 이것은 坑內의 地盤이 一般的으로 堅固한데 比해 地表面 가까이의 岩盤은 風化가 進入되어 있기 때문에 軟弱表土層의 影響이 크게 作用하고 있다고 말하고 있다. 要컨데 發破에 依한 地盤振動의 크기에는 地表面 가까이의 地盤條件에 따라서 크게 左右되고 있는 것이다.

② 其他 發破에 依한 地盤振動에 큰 影響을 미치는 要因으로서 地盤中에 含有한 水分의 問題가 있다. 發破에 依해서 生기는 波動이 水分을 많이 含有한 地盤中을 傳波하게 되는 境遇에는 一般的으로 振動이 크게 된다. 그 例로서는 다음과 같은 것이 發表되어 있다.

ㄱ) 물로 飽和된 地盤中에서 生기는 振動은 乾燥狀態에 있는 똑같은 地盤中에서 生기는 振動의 2~2.5倍에 達한다.

ㄴ) 同種類, 同量의 火藥類를 使用하더라도 河川에서 發破한 境遇에는 一般 大地中에 埋立해서 發破한 境遇에 比해서 5倍의 影響을 周邊에 주게 된다.

ㄷ) 粘土中에서 發破한 境遇의 地盤振動은 乾燥된 地盤中에서 施行하는 發破에 比해서 3~4倍의 影響力을 갖고 있다.

따라서 火藥類를 水中에서 爆發시키는 境遇는 粘土層에서 發破한 境遇에 比해서 約 4倍의 影響力을 갖고 있다.

이것들의 例에서 보면 同一 地盤에서도 乾燥狀態와 水分을 가진 狀態에서 地盤振動에 큰 差異가 있는 것을 알 수 있다. 장마철 後의 發破에는 特히 地盤振動이 달라지는 傾向을 나타내게 되므로 注意해야 할 必要가 있다.

7. 地盤振動의 輕減對策

發破作業에 있어서 爆藥이 爆發하여 發生한 에너지 全部 岩盤을 破壞하는데만 所要되고 殘余 에너지는 發生되지 않도록 하거나 或은 發生하였다 하더라도 發破公害를 이르키지 않도록 하는 理想的이라 하겠으나 이와 같은 理想的인 發破는 不可能하다.

前述한 바와 같이 地盤振動의 크기와 使用하는 火藥類의 性能(爆速)과의 사이에는 相關關係가 있으므로 火藥類를 잘 選擇하고 藥量을 適當히 使用하면 發破에 依한 振動을 어느 程度 輕減할 수 있다. 그러나 이 때 低爆速의 火藥類를 使用하면 發破效果가 나쁘게 되어 그것을 補完하기 爲해 發破의 藥量을 增加하면 振動도 그것에 따라서 增加하므로 留意하여야 한다.

發破效果를 滿足시키기 必要한 發破의 藥量을 段發雷管을 利用해서 分割 發破한 地盤振動의 크기는 分割되어서 相當히 輕減될 수 있다. MS 雷管을 利用한 發破를 할 境遇의 地盤振動은 同數 同藥量의 發破孔에 對해서 齊發 發破를 할 境遇의 地盤振動에 比해 1/2, 1/3 或은 그 以下가 되는 事例도 있다. 또한 遲延時間 0.1~0.5秒의 遲發發破의 境遇에서도 齊發 發破에 比較하여 振動은 一般的으로 적다고 말하고 있다.

地盤振動의 傳波經路中에 人工的으로 龜裂이나 도랑을 設置하여 彈性波를 遮斷시켜 振動을 어느 程度 吸收시켜서 發破振動을 減少시키는 方法도 있다. 또한 人工的인 도랑을 掘削하는 대신에 Pre-Splitting에 依해 巖盤中에 龜裂이
생기자마자 그치고 그것들의 龜裂에 依해서 後續의 發破作業에 依해 생기는 地盤振動을 輕減시키는 方法과 Line drilling을 하여 홈(溝)의 役割을 하도록 하여 振動波의 遮斷效果로서 振動을 줄일 수 있게 하는 方法도 있다.

發破에 있어서 爆藥의 威力을 決定하는 主된 要表는 比重과 爆速에 있으면 또한 火藥力의 크기에도 있지만 通常 比重이 큰 爆藥일수록 火藥力의 크기도 커진다. 火藥類의 威力은 發破振動式의 K값을 決定하는데에 影響을 주게 되므로 火藥類의 選定이 重要한 要素이다.

一般的으로 다이나마이트는 高爆速 高比重 爆藥으로 製造되고 있으며 低比重 低爆速인 含水爆藥에 比하여 約 20%程度 爆力이 強하므로 振動을 크게 하는 要因인 된다고 하겠으며 含水爆藥(Slurry Explosive)은 Dynamite에 比해 그 振動速度가 80%程度이다. 그리고 硝安爆藥(Ammonium Dynamite)은 含水爆藥에 比해 그 振動效果가 80%程度이고 Dynamite에 比해 65%程度이라고 한다.

參考資料로서 서울地下鐵5號線 462造에서 發破振動을 考慮한 發破作業의 技術檢討에 依하여 施行한 開鑿逼 및 터널逼의 發破設計資料를 다음에 記載한다.

1. 발파 진동과 의해에 대한 기준

지하철 5-46공구 정거장 개착구 발파 작업으로 인하여 금호아파트에 미치는 영향을 별표 발파진동과 피해에 대한 기준표에 의하면 진동속도(CM/SEC)가 0.5 KINE 이내이면 인체에 심하게 느끼나 건물에는 피해가 없는 것으로 되어 있슴.

2. 미진동 파쇄기(CCR)를 사용할때의 영향

도심지 암반 발파작업을 시행함에 있어 근접한 건물 및 시설물, 사람을 보호해야하는 특수한 발파 조건이 요망되므로 이에 부응하기 위하여 미진동 파쇄기(CCR)를 사용한 발파에 대하여 장약량과 진동치를 검토해 본다.

(1) 장약량

$$L=C \cdot D^2 \cdot W$$

L : 장약본수(개)
D : 공간격(M)
H : 천공장(M)
C : 파쇄계수(개/M^3)

암 종	파쇄계수
경 암	5-7
중 경 암	4-6
연 암	3-5

W : 최소저항선(M)

1) 천공장별 장약량

구분 / 암질	장약량(L)	천공장(H)	공간격(D)
연 암	1개/공	0.8M	0.7M
	2개/공	1.0M	0.8M
	3개/공	1.3M	0.9M
	4개/공	1.4M	1.0M

2) 장약량과 최소저항선과의 관계

저항선이 짧으면 과잉에너지가 비석을 발생시키므로 알맞는 저항선이 필요하다.

3) 장약량과 공간격과의 관계

장약량(개)	공강격(M)
1	0.5-0.7
2	0.6-0.8
3	0.7-0.9

技術檢討意見書 (1993年 1月 20日)

工事名	地下鐵 5號線 江東區間	工區別	5-46工區
件名	정거장구간-금호아파트앞 발파 검토	位置	STA 44K364.5-426.5
根據公文	라길련 제93-13호 (1993. 1. 17)	回信公文	금호장 제93-11호(93. 1. 20)

지하철 5-46공구 정거장 개착구 발파 작업으로 인하여 금호아파트에 미치는 영향을 다음과 같이 검토함.

1. 발파 전동과 피해에 대한 기준
2. 미진동 파쇄기 (CCR)를 사용한 발파
3. 함수폭약 (KOVEX)를 사용한 발파

서울지하철 5호선 6공리단
화약담당 심 종 섭

4) 공경

미진동 파쇄기는 약통경이 28M/M ϕ 이므로 TAMPING효과, 파쇄효과, 천공능률을 고려하면 30-34M/M ϕ 의 BIT를 사용하는 것이 바람직하다.

5) TAMPING재료

TAMPING재료는 시멘트+모래+급결제를 중량비로 1:1:1로 혼합사용하는 것이 좋으며 발파까지 대기시간을 하절기에 30분이상, 동절기에는 60분이상 이어야 한다.

CEMENT MORTAR을 사용하기 곤란할 경우는 모래로서 단단히 하여야 하며 철포현상을 주의하여야 한다.

6) 미진동 파쇄기의 사용상 주의

미진동 파쇄기는 열을 이용한 GAS팽창으로 암석이 주로 이루어지며 점화후 파쇄가 종료될 때까지 공구로부터 GAS가 새어 나오므로 단단히 밀폐할 필요가 있다.

밀폐가 불완전하면 철포현장이 일어나 매석의 원인이 되고 파쇄 효과가 저하된다.

7) 미진동 파쇄기의 사용 효과

미진동 파쇄기를 사용 발파할때는 천공장 1.4M에서 미진동 파쇄기 4개를 장약하는 것이 능율적인 작업을 수행이 가능하다고 보나 금호아파트앞에서 발파 작업을 할때에는 안전성을 고려하여 천공장 1.3M에 미진동 파쇄기 3개를 사용하는 것이 바람직하다.

(2) 발파 진동치

$$V=K\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-N}$$

V : 진동 속도치(KINE) CM/SEC
K : 진동계수 E×(R×S+Q)=34
W : 사용폭약량 KG
D : 폭원에서 측점까지의 거리 15M
N : 감쇄지수 서울편마암 1.5

1공만 발파시는 철포현상이 생기는 경우가 있으므로 2공씩 발파 하면

V=0.272CM /SEC

3. 함수폭약(KOVEX)를 사용할때의 영향

지하철 개착구 발파는 지하수로 인하여 수분이 많은 데에서 발파하므로 내수성이 좋고 에너지가 약하며 열, 마찰, 충격에 두감하여 도심지 발파에는 최적일뿐더러 장진이 용이하고 장진밀도가 크므로 작업공정상 유리하며 미진동 파쇄기와 비교하여 본다.

구 분	미진동파쇄기	함수폭약
반응열	1.500CAL /GR	800 CAL /GR
경기변화	열처리후 70° HOUR 불변	상온, 상압에서 1년 불변
폭 속	60 M /SEC	3.900 M /SEC
양 상	분 상	교 질
내수성	미 약	우 수

(1) 장약량

$L=F(N).G.D.L.W^3=0.21KG(2/3분)$

L : 장약량 KG

F(N) : 파괴도지수$(\sqrt{1+\frac{1}{W}}-0.41)^3=1.0127$

E : 폭약의 위력계수 0.8

G : 암석의 위력계수 연질암 0.26

D : 전쇄계수 SAND CLAY TAMPING 1.0

L : 장악계수 보통장전 1.0

W : 최소저항선 1.0M

(2) 발파진동치

$V=K(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-N}=0.18$ CM /SEC

V : 진동속도치 (KINE) CM /SEC

K : 진동계수 E×(R×S+Q)=34

W : 사용폭욕량 KG

D : 폭원에서 측점까지의 거리 15M

N : 감쇄지수 서울편마암 1.5

발파는 MSD뇌관 각 1개씩 10번으로 지발 시킨다.

(3) 의견

발파 작업 공정상으로 보아 함수폭약을 사용하는 것이 유리하며, 따라서 현재 시행하고 있는 장약량(KOVEX 1본)의 2/3본을 장약하면 발파진동으로 인하여 건물이나 인체에 미치는 영향으로 인한 피해는 없을 것으로 사료된다.

따라서 발파 진동치는 안전율 0.7%로 감안하여 0.35 KINE 이내이면 이상이 없을 것으로 판단함.

發破振動과 被害

建物에 큰 被害가 일어난다.
建物에 龜裂이 生긴다.
建物에 가벼운 被害가 일어난다.
建物에 極히 가벼운 被害가 生긴다.(建物이 무너질듯한 느낌을 사람이 받는다
人體에 其하게 느끼나 建物에는 被害가 없다.
一般的으로 많은 사람이 振動을 느낀다.
매우 敏感한 사람이 振動을 느낀다.
人體로 느낄 수 없다.

터널 발파 장약량 산출 및 진동치 검토

1. 막장위치 : 시점부터널(8갱 : STA 44K 183.3)

2. 작업조건
   1) 공　경 : 32M /M
   2) 공　심 : 1.0M
   3) 공　간 : 0.6M

3. 장약량 및 발파진동
   1) 장약량 산출

$$L=CW^3$$

발파계수 C의 값은

$$C=f(n)\times e\times g\times d\times l$$

$$L=f(n)\times e\times g\times d\times l\times w$$

f(n) : 파괴도 계수, $(\sqrt{1+\frac{1}{W}}-0.41)^3$
e=폭약의 위력계수, KOVEX 0.8
g=암석의 항력계수, 연질암 0.26
d=진쇄계수 SAND CLAY TAMPING 1.0
l=장약계수 보통장진 1.0
w=최소 정항선 0.8M

위 식에서

$$L=1.5145\times0.8\times0.26\times1.0\times1.0\times0.8$$
$$=0.160\ KG$$

따라서 천공장 1.0M에 폭약(KOVEX) 0.160KG 장약하면 됨.

2) 발파 진동치 산출

$$V=K\cdot(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-n}$$

K의 값은

$$K=E\times(R\times S+Q)$$

E : 폭약 보정율, KOVEX 0.8
R : 발파계수, 서울 편마암 0.0206
S : 압축강도 100KG /CM²
Q : 발파방법에 따른 보정값 : 편마암 40

위 식에서

$$K=0.8\times(0.0206\times100+40)$$
$$=33.648$$
$$W=0.161\times2=0.322KG$$
$$D=15M$$
$$N=-1.5$$
$$V=34\times(\frac{15}{\sqrt{0.321}})^{-1.5}$$
$$=0.249\ CM\ /SEC$$

따라서 발파진동 계산치를 보면 인근건물 및 시설물에 영향을 주지 않는 수치임.

8. 發破音에 依한 公害

發破音에 對하여는 發破에서 發生하는 波動問題로서 振動과 類似한 問題이지만 이것은 人的被害 卽 心理的인 것으로 限定된다.

爆藥이 岩盤의 自由面上 或은 自由面에서 比較的 얕은데에서 爆發하였을 때 爆發 Energy는 彈性波로서 或은 空中에서의 發破音으로서 周邊에 傳播되면서 消費된다. 이 때 空中에서 生기는 波動은 爆源近方에서는 衝擊波의 形態를 取하나 이것은 媒體中을 音速보다 빠른 速度로 傳播한다. 暴風이라고 불리워지고 있는 것은 이 衝擊波에 依한 것이다. 그러나 爆源에서 어느 程度 떨어진데에서는 音波로 傳播한다.

一般的으로 音壓이 180dB 以下가 되면 音波로 生覺할 수 있으며 發破作業에서 騷音의 對象으로서는 主로 音波로서의 發破音을 生覺하면 된다. 發破音은 繼續時間이 몹시 짧으며 周波數는 50~2000Hz에 分布하며 主要 周波數는 50~150Hz으로서 發破 條件에 依하여 周波數와 音壓이 變化한다. 騷音을 生覺할 때에는 音壓 Level과 騷音 Level을 區別하여 生覺하지 않으면 안된다. 이것을 式으로 表示하면 다음과 같다.

$$S=20\log_{10}(P/P_0)$$

S : 音壓 Level(dB).
P : 音壓實效値
P_0 : 基準의 音壓實效値($P_0=2\times10^{-4}$ μbar)

(注) $1\mu par=10^{-6}bar=1{,}019mg/cm^2$,
$1ng/cm^2=1{,}0197\ bar=1{,}0332atm$

音壓 Level에서 P는 對象으로하는 音의 音壓 그 自體를 말하며 그 값은 周波數에 無關係하게 一定値인데 對하여 騷音 Level에서는 P는 聽感補正을 加한 音壓이다. 이 補正은 別途의 表에 依하여 하게 된다.

前述한 바와 같이 爆風과 騷音은 不可分의 關係에 있다. 爆風壓에 依한 被害의 例를 들면 表5와 같다.

表5 爆風壓과 被害

爆風壓 (g/cm^2)	被害程度
1,500以上	建坪 15坪(約 50m^2) 程度의 집이 倒壞한다.
600~700	작은 집이 기울고 챙의기둥의 부러진다
400~500	기와가 崩壞되고 지붕판자가 짜개지나 建物構造에 심한 損傷은 나타나지 않는다.
250~350	大部分의 창문틀이 破損된다.
150~200	窓문틀이 破損되는 일이 있다(音壓 Level로 換算하여 177~180db)
80~100	受壓面의 창유리는 대개 破損된다.
60	창유리가 破損되는 일이 있다.

爆風이나 騷音은 藥量 및 距離에 關係된다. 例를들면 音波에 依해 生긴 壓力變化 △P (kg/cm^2)(이것을 音壓이라고 한다)는 藥量을 L(kg), 距離를 d(m)라 하면

$$\triangle P=aL^m \qquad \triangle P=bd^{-n}(a,b\text{는 定數})$$

로서 表示되고 指數m은 爆源 附近에서는 0.6~0.8, 音波의 傳播라고 生覺되는 距離에서는 0.5程度이다. 指數a는 爆源附近에서는 2.0~2.8, 中距離에서는 1.5程度, 遠距離에서는 1.0程度이다.

또한 3次元的으로 傳播하는 空氣中에서는 爆風壓은 爆源 附近에 있어서는 距離의 거의 1.5乘에 爆源으로부터 相當히 떨어진 地點에서는 距離의 거의 1.0乘에 反比例하여 減衰한다.

發破音이 人體나 構造物에 對한 影響은 다음 表6과 같다.

表6. 人體 및 構造物에 對한 音壓의 影響

音壓	人體	構造物
180 dB		建造物 損害
170 dB		大部分의 窓glass 破損
150 dB	鼓膜損傷	窓glass 若干破損
140 dB		窓glasss 破損안된다.
120 dB	痛感을 받는다	
100 dB	長期間에 難聽	
80 dB	安全	

이 表에 依하면 音壓 Level이 150dB 以上이 되면 瞬息間에 귀(耳)의 鼓膜이 損傷됨은 勿論이려니와 그 以下의 音壓에서도 長期間동안 露出되어 있으면 聽力이 疲勞하고 長期間 露出되면 難聽이 되나 80dB 以下이면 音의 種類에 關係없이 聽力障害를 일으킬 可能性은 적다고 한다.

音壓이 180dB(decibel) 以下일 때는 音波라고 生覺해도 좋으나 TNT 10kg을 爆發시켰을 때에는 5.5m 떨어지면 音波가 되고 1000kg을 爆發하여도 33m 떨어지면 音波로 된다고 한다. 따라서 騷音의 對象으로서는 主로 音波로서의 爆發音이다.

• 機의 騷音은 140phon, 電車通過時의 Guard 밑은 100phon임에 對하여 Concrete破碎器에 依한 無筋 Concrete의 破碎音은 10~30m地點에서 80~90phon으로서 더구나 이것은 瞬間的이므로 特別한 問題는 없으나 靜寂을 깨뜨린다는 側面에서 볼 때는 公害가 된다 (注 : db과 phon의 數는 그대로 騷音 Level을 表示한다고 生覺해도 좋다).

特히 最近 重要視되고 있는 低周波音의 境遇 發破規模 形態에 對하여 充分한 對策이 必要하다. 爆風壓이나 爆發音은 地形이나 發破의 規模에 따라 크게 左右되고 또한 氣溫, 風速, 風向, 溫度 等의 氣象條件에 依해서도 變化한다.

爆風이나 爆發音을 輕減시키는 方法으로서는 裝藥量을 減少시킬 것, 瞬發電氣雷管과 段發電氣雷管을 併用할 것, 遮弊物을 爆發物 위에 덮어 씌우는 것 等이 採用되고 있다.

9. 飛石에 依한 公害

飛石에 依한 事故는 거의가 露天發破에서 일어나지만 터널發破에서도 間或 飛石事故가 이러난다. 이 飛石事故는 小藥類의 發破中에 生기는 事故中에서는 가장 많은 比率(60~75%)을 차지하는 것이기 때문에 發破를 施行하고자 할 때는 飛石防止에 充分한 注意를 하여 飛石發生을 未然에 防止하지 않으면 안된다.

(1) 飛石의 發生과 그 原因

① 飛石의 發生

發破에 依한 岩盤의 破壞는 動的인 衝擊作用과 推進作用에 依하여 이루어지는데 衝擊波에 依한 Hopkinson效果로서 自由面으로부터 剝離되면서 爆發Gas壓에 依하여 飛散하게 된다. 이 速度는 빠를 境遇 3~4m/sec 程度이다. 이와 같이 發破에서는 瞬間的이긴 하지만 衝擊作用(動的效果), 推進作用(靜的效果), Gas壓에 依하여 自由面으로부터 剝離(Hopkinson效果)의 3段階를 거쳐 岩石이 破壞된다.

② 飛石의 原因과 種類

使用藥量 및 發破方法이 適當한 때에는 生成 Gas의 推進作用 一部가 破碎片을 現場의 所定區域內에 밀어내지만 使用藥量 및 發破方法이 適切하지 못한 때에는 破碎片을 遠距離까지 날려보내게 된다.

(ㄱ) 過裝藥에 依한 飛石

藥量이 많아서 全面에 걸쳐 飛石이 發生한다.

(ㄴ) 裝藥部의 吹出에 依한 飛石

岩盤內에 龜裂이나 空洞이 있어서 裝藥附近이 다른 部分에 比하여 弱하면 이 部分에서 Gas가 噴하여 豫想外의 飛石이 發生한다.

(ㄷ) 鐵砲에 依한 飛石

弱裝藥으로 荷重이 지나치면 爆力이 不足하여서 抵坑線側으로 岩石을 破壞할 수가 없어서 빠져나갈 수 없는 爆發Gas가 發破孔으로부터 Gas와 메지가 噴出되어 孔口附近의 岩石을 불어 날리는 飛石이다. 그리고 메지가 없는지 或은 메지의 材質이 나쁜 境遇 또는 不充分한 境遇에도 發生한다.

(2) 飛石의 防止對策

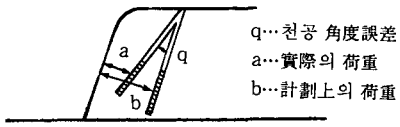
① 試驗發破의 實施

岩盤의 狀況 斷層 龜裂 地形 地質等을 미리 잘 調査하여 穿孔位置 藥量 藥長을 産出하고 標準岩盤에 對해서 먼저 試驗發破를 하여 그 結果를 보고 發破計劃을 修正變更하는 것이 必要하다.

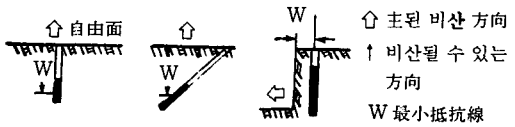
② 穿孔

(ㄱ) 低坑線 穿孔方向을 保安物件의 方向으로 取하지 말아야 한다.

(ㄴ) 穿孔 誤差를 極力化한다.



(過裝藥이 되는 例)



③ 裝藥

(ㄱ) 孔掃除를 充分히 하고 所定의 位置에 裝藥되도록 한다.

(ㄴ) 過裝藥을 避하여 若干 弱裝藥으로 한다.

(ㄷ) 다짐물을 充分히 하여 鐵砲가 되지 않도록 한다.

(ㄹ) 雷管付 起爆藥包의 Cut off가 生기지 않도록 穿孔配置 및 起爆藥包의 位置에 主意하여야 한다.

(ㅁ) ANFO를 Bulk裝塡하는 境遇는 孔內에 連結다는 空洞 龜裂에 注意하여야 한다.

(ㅂ) 小割發破의 境遇 自由面이 많은 岩石에서는 最小抵坑線을 測定하기 어려우므로 藥의 位置는 바위의 中心에 두고 適正量으로 發破를 하지 않으면 飛石이 發生하기 쉽다.

④ 防護具

飛石을 防止하기 爲해 岩石 위에 直接 防護具를 뒤집어 씌우는 方法이 有效하다. 防護具로서는 Gum belt mat, Ring mat Groos mat 等이 있다.

10. 結論

發破作業을 實施하는 環境 卽 作業現場은 奧地에 있는 Dam工事 現場에서부터 人家가 密集한 住宅區域 都市의 建物附近等 사람이 居住하는 都市地域까지 미치고 있다.

發破作業 自體의 安全對策은 保安責任者와 發破補助員의 充實한 安全管理로서 그 效果를 올릴 수 있으나 發破公害問題는 最近 一般公害問題에 對하여 世人의 認識이 高調됨에 따라 社會的으로 注目을 받게 되었다.

發生公害란 具體的으로 發破振動 發破音 爆風壓 發破彩塵 飛石等을 말하며 이 中 發破振動 發破音 爆風壓等은 現實的으로 直接 物的 被害에 連結되는 境遇는 적지만 飛石은 人的 物的 被害와 連結되여 發破事故例의 過半數를 占하고 있다.

이들의 問題는 個個의 實施場所에 따라 그 重要性이 다르게 되겠지만 이것이 原因으로 그 事停止 發破規模縮小等의 規制를 받게 되므로 그 對策을 充分히 세울 必要가 있다.

發破振動은 發破에 따른 振動波가 構造物 人體에 미치는 影響이 問題가 되는데 發破公害의 半數는 發破振動이 占하고 있다. 이것은 發破振動이 構造物에 對한 物的被害의 槪念으로서 精神的 苦痛이 主가 되므로 住民과의 對話로서 幅넓은 對策이 必要하다.

發破公害를 輕減시킬 對策을 前述한바 이와같이 工事現場에서 安全對策을 講究하여 實行하고 있지만 特히 發破現場 隣近의 保安物件에 對한 損傷은 여러가지 原因 卽 排水에 依한 地盤波下 또는 建物自體의 施工瑕疵等에서 일어날 수 있으므로 損傷狀態를 全的으로 發破振動 原因으로 看做하여서는 안될 것이다.

結論的으로 安全한 作業과 施工 및 關聯技術의 硏究開發이 絶對的으로 必要한 事案이라고 生覺하는 것이다.