

發破로 인한 damage 와 그 抑制에 관하여

柳 忠 植

<雙龍洋灰 聞慶工場>

1. 序 言

發破에 의하여 發破地點 附近 建築物에 damage 를 發生시키는 重要한 要因은 ground vibration, 飛石, 空氣의 충격과 등을 들수 있다. 이중 damage 에 가장 영향이 큰 것은 ground vibration 으로 發破 地點 附近에 있는 建築物에 crack 을 形成하거나 내장을 훼손하는 피해를 주게되며 심한 경우에는 건축물을 붕괴 또는 부분 파괴에 이르게 하는 예도 있다.

建築物에 인접하여 發破作業이 施行되는 地域에서는 ground vibration 에 의한 피해 問題로 분쟁이 發生되고 심한 경우에는 法廷분쟁에까지 이르게 된다. 왜냐하면 피해 原因이 發破이외의 다른 原因 즉 建物の 構造, 材料의 결함, 設計 및 건축상의 결함 등으로 돌려질수도 있기 때문이다.

建築上の 결함은 確認이 용이하나 vibration 에 의한 피해 또는 根源(發破地點)과 建築物 사이의 여러가지 條件에따라 달라지므로 대개 근사적이며 추상적인 說明에 불과하기 때문이다. ground vibration 의 強度를 確認할 수 있도록 하기 위한 研究가 많은 사람들에 의하여 行하여졌지만 ground vibration 測定은 各自의 見解 差異가 커서 確實한 damage limit 를 結論짓기란 여간 어려운 것이 아니다.

여기에서는 ground vibration 의 理論과 外國의 實驗値를 中心으로 現場作業計劃에 어떻게 응용되고 있는가에 대하여 記述코자 한다.

2. 震動 및 damage 限界

Sweden 의 Langerfors 와 Kihlstrom 은 vibration 에 대한 研究를 charging 과 distance 와 理論的인 相關關係와 vibration 強度에 관한 理論을 綜合한 結果 vibration velocity 가 damage 標準으로서 가장 重要한 factor 임을 研究하여 다음과 같이 要約하였다.

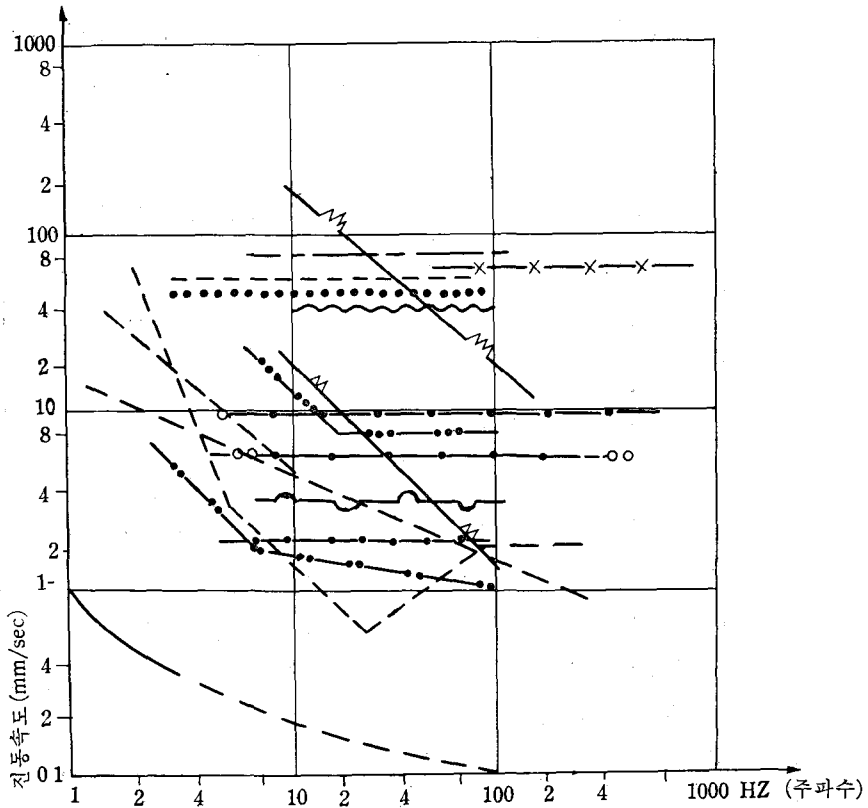
$$\text{damage criteria: } S(\alpha, \beta, \gamma) = \text{constant } Af^\alpha, C^\beta, f^\gamma$$

A: 水平 또는 수직의 變形要素

f: 진폭에 속하는 주파수

C: 變形의 길이에 좌우되는 주파수

여기에서 vibration에 작동하는 固有 주파수 f_0 가 증가하지 않는다고 생각하면 $S(\alpha, \beta, 0)$ 가 되어 $S(\alpha, \beta) = \text{constant } Af^\alpha C^{-\beta}$ 로 되며 전파速度 C 는 대개의 경우 2,500~3,000 m/s이므로 전파속도를 고려하지 않는다면 $S(\alpha) = \text{constant } Af^\alpha$ 으로 vibration velocity $V = Af^2$ 로 damage 標準에 一致한다.



<Fig.-1>

<Fig.-1>은 ground vibration에 의한 damage의 限界에 관해 여러 사람들의 研究結果를 綜合한 것이다.

이들중 일부는 分明히 振動數와 關係가 있는 것으로 나타나 있으며 대개의 경우 damage의 限界는 1-100mm/s 크기의 vibration velocity 範圍內에 包含된다.

震動에 의한 damage는 一般的으로 建築物의 毀損으로 評價된다.

建物毀損에 주는 영향을 論함에 있어 建物の 狀態 및 建物の 基礎와의 關係에서 모든 영향은 여러가지 觀點에서 세밀히 檢討되어야 하나 이것은 實際적으로 거의 不可能하므로 獨逸에서는 오랜 積累를 거친후에 vibration velocity만으로 damage limit를 定하되 그 vibration velocity를 比較的 적게하여 Normen Entwurf에 公布하였다.

여기에 주어진 vibration 基準値는 建物を 4種으로 區分하고 그 分類에 따라 2-40mm/s 로 提示하고 使用者에게는 이를 vibration 이 damage 에 미치는 영향을 評價하는 根據로 提示하였다.

이에 의하면 2mm/s 以下の vibration velocity 에서는 damage 가 發生하지 않았다.

물론 이러한 基準値의 設定이 여러가지 實驗値를 綜合 整理한 結果라 할지라도 實際로 發生할 수 있는 damage 의 시작 및 程度는 建築物에 대한 震動의 크기는 물론 建物の 材料, 基礎 構造 및 老朽 程度에 關係됨을 유의하여야 하고 또 地層의 構造에 따라 同一한 振動에서 여러 方向으로 크기가 各各 다른 震動이 나타날 수 있다는 것을 고려하여야 하므로 위에 말한 damage limit 가 될수 없다는 것이 前提되어야 한다.

<表-1>

岩 種	n	Din/m ⁻¹
班 岩	2.0	0.01
角 礫 岩	2.0	0.015
白 雲 岩	1.3	0.05
石 膏	2.3	0.025
무 수 石 膏	1.1	0.025
부드러운 모래	2.5	0.01
세 립 모 래	1.71	0
편 마 암	2.0	0
점 판 암	1.8	0.01
석 영	0.9	0.01
편 암	1.9	0
조 립 모 래	3.12	0.05

velocity V 를 다른 式으로 表示 하면

$$V=C N^b R^{-3} e^{-DR} \text{ 에서}$$

V=진동속도(mm/s)

C=發破條件에 따른 常數

N=장전량

R=發破地點으로부터의 거리

b=장전계수

Dⁿ=감쇠계수

上記式에서 vibration 에 velocity V 는 岩石 裝藥量 距離에 關係되므로 岩盤 여건이나 距離는 고정적으로 決定된 여건이나 變動시킬 수

없으므로 結局 vibration velocity control 發破效果와 진동을 同時에 解決해야 한다.

<表-1>은 岩盤條件에 따른 감쇠 係數表이다.

vibration velocity 의 一般 住宅에 대한 피해 위험程度는 <表-2>와 같다.

<表-2>

ground Condition	sand, gravel clay under ground water level	moraine slate soft limestone	hard limestone quartz sand stone gniess	result in normal housing unit (damage)	level at C=4,500~6,000 (m/sec.)
wave velocity m/sec	1,000~1,500	2,000~3,000	4,500~6,000		
진동속도 V mm/sec	18	35	70	crack 現象 없음	0.03
	30	55	100	미세한 crack 발생, 부착물 낙하	0.06
	40	80	150	cracking 발생	0.12
	60	115	225	심한 cracking	0.25

지면에 따라 速度 C 로 전파되는 地表波는 vertical vibration 을 유발시키고 또한 이는 가속

現狀을 더하여 전단 응력을 일으키는데 이 영향은 frequency 진폭, wave velocity에 좌우된다.

<表-2>에서 보는 바와 같이 전단력은 진폭 및 주파수에 비례하여 增加하고 wave velocity에 반비례함을 알 수 있다.

즉, 전단력

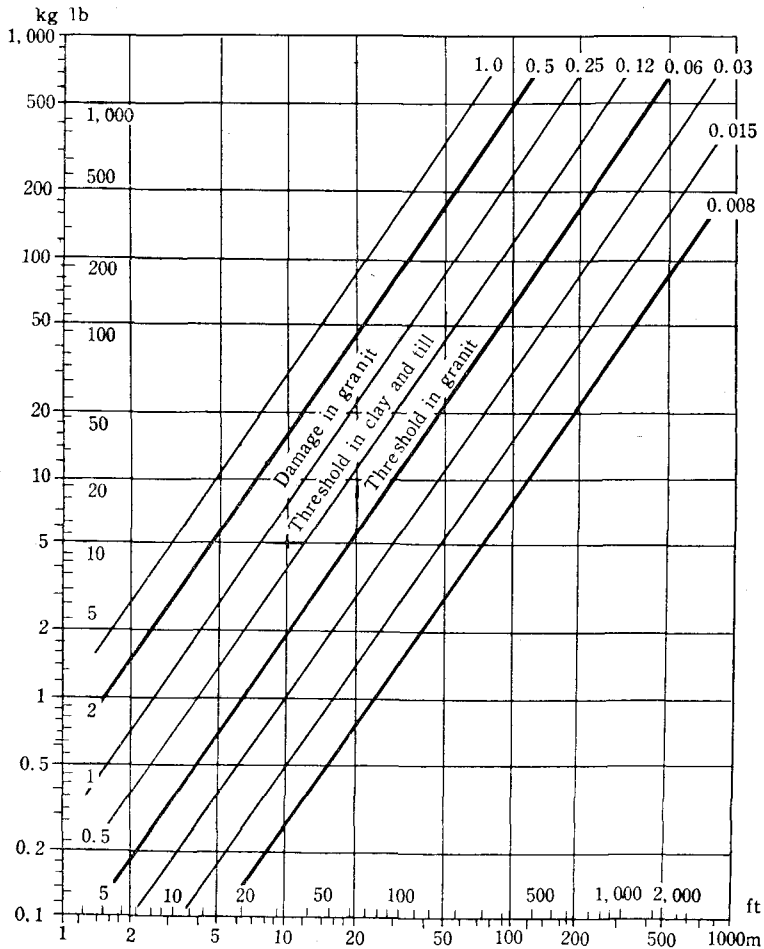
$$V = V/C = 2\pi f A/C \text{ 는 damage에 관련이 있음을 나타낸다.}$$

3. Damage를 減少시키기 위한 作業方法

1) 發破作業計劃(cautious blasting)

(가) Distance/charging과 ground vibration과의 相關關係

ground vibration이 문제가 되는 發破作業을 計劃할 때는 前述한 vibration velocity



<Fig-2> Level $Q/R3/2=0.008\sim1.0$ 일때의 장약량과 距離와의 相關表

<表-3>

distance (m)	charge in kg (instantaneous detonation)						
	level: 0.008	0.015	0.03	0.06	0.12	0.25	0.50
0.5				0.02	0.04	0.08	0.16
1	0.008	0.015	0.03	0.06	0.12	0.25	0.50
2	0.025	0.05	0.09	0.2	0.4	0.7	1.4
3	0.040	0.08	0.16	0.33	0.65	1.3	2.6
4	0.06	0.12	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
5	0.09	0.18	0.36	0.73	1.4	2.8	5.6
6	0.12	0.23	0.47	0.95	1.9	3.8	7.2
7	0.14	0.27	0.57	1.15	2.3	4.6	9.2
8	0.18	0.36	0.72	1.45	2.9	5.8	11.6
9	0.2	0.42	0.85	1.70	3.4	6.8	13.6
10	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0
12	0.3	0.6	1.3	2.5	5.2	10.5	21
14	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	13.0	26
16	0.5	1.0	2.0	3.9	7.8	15.5	31
18	0.6	1.2	2.4	4.7	9.4	19	38
20	0.7	1.4	2.8	5.6	11.2	22	44
25	1.0	2.0	4.0	8.0	16	32	64
30	1.3	2.6	5.2	10.4	21	42	84
35	1.6	3.2	6.5	13	26	52	104
40	2.0	4.0	8.0	16	32	64	128
45	2.4	4.8	9.5	19	38	76	152
50	2.8	5.5	11	22	44	88	176
55	3.3	6.5	13	26	52	104	208
60	3.8	7.5	15	30	60	120	240
65	4.3	8.5	17	34	68	136	272
70	4.8	9.5	19	38	76	152	304
75	5.3	10.5	21	42	84	168	336
80	5.8	11.5	23	46	92	184	368
85	6.4	12.8	25.5	51	102	204	408
90	7.0	14.0	28	56	112	224	448
95	7.6	15.2	30	61	122	244	488
100	8.5	16.5	33	66	132	264	528
110	9.3	18.5	37	74	148	296	592
120	10.5	21.0	42	84	168	336	672
130	11.7	23.5	47	94	188	376	752
140	13.2	26.3	52.5	105	210	420	840
150	14.5	29.0	58	116	232	464	928
160	16.0	32.0	64	128	256	512	1024
170	17.5	35.0	70	140	280	560	1120
180	19.0	38.3	76.5	153	306	612	1224
190	20.7	41.5	83	166	332	664	1328
200	22.5	45.0	90	180	360	720	1440
280			150	300	600	1200	2400
400			250	500	1000	2000	4000
600			500	300	1800	3700	
1000			1000	2000	4000	8000	

$V=C N^b R^{-n} e^{-DR}$ 에서 velocity의 強弱에 直接 기술적인 調整이 可能한 것은 裝藥量 N 의 量을 거리에 따라서 어떻게 調整해 주느냐 하는 것에 重點을 두어야 한다.

charging level에 대하여 Langer fors 關係를 利用하면

$$\text{level} = \frac{Q}{R^{3/2}} \quad (Q=\text{instantaneously detonating charge (kg)}, R=\text{distance (m)})$$

$$\text{震動速度 } V = K \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad \left(\begin{array}{l} V: \text{vibration velocity (mm/sec)} \\ K: \text{constant 약 400 (스웨덴의 硬岩)} \end{array} \right)$$

上記의 關係式을 利用하여 發破計劃 樹立時 使用하는 sample table은 <表-3>과 같다.

charge level = $\frac{Q}{R^{3/2}}$ 일때 硬岩에서의 vibration velocity와의 相關 關係는 <表-4>와 같다.

<表-4>

QR ^{-3/2} (kg/m)	V (mm/s)	V/C (u/m)	建築物의 damage 現狀
0.008	30	6	crack 現狀 전연 없음
0.015	50	10	外見上 crack 現狀 없음
0.03	70	14	crack 現狀 區分難點
0.06	100	20	미세한 crack 現狀 (분계점)
0.12	150	30	crack 現狀
0.25	225	45	坑道나 tunnel의 岩石이 떨어짐
0.50	300	60	岩石 破碎
1.00	—	—	

(나) Cautious bench blasting의 장약 計算

a) drill hole 당 장약량 計算方法

① 最大 調整 裝藥量은 허용 應력파와 거리를 根據로 한 distance-charge table (<表-2>와 <表-3>)에서 구한다.

② 一般 bench blasting이 공간격을 좁히지 않고도 成功할 수 있는가에 관하여 bench table (<表-7>)을 利用하여 調査한다.

③ 만약 ①項의 裝藥量이 一般 bench blasting에 充分하지 않을 경우에는 다음과 같이 計算한다.

(各 drill hole 當 裝藥比重이 0.35kg/m³가 되도록 하여 공간격을 計算)

$$m^3/\text{hole}: \frac{\text{permissible charge}}{\text{specific charge}} = \frac{Q_{\text{allowd}}}{0.35}$$

이것은 各 drill hole의 裝藥量에 의해서 얻어지는 量을 나타낸다.

各 drill hole의 裝藥量이 좌우하는 표면은

$$\frac{\text{volume per hole}}{m^3 \text{ per hole}}$$

m^2/hole : bench height bench height
 drill hole 當 表面을 알고있을 때의 공간격 計算

실제 저항선 $V_1 =$

실제 공간격 $E_1 =$

공 간 격 $1.25 \times V_1$

④ under drilling 의 計算

$$\begin{aligned} \text{under drilling} &= (V_1 + \text{approximate faulty drilling}) 0.3 \\ &= (V_1 + 0.03 \times \text{bench height}) 0.3 \end{aligned}$$

⑤ 공심

$$H = \text{bench 高} + \text{under drilling} + \text{hole 傾斜距離}$$

⑥ 穿孔誤差

$$F = 0.05 + 0.03 \times H$$

⑦ 最大 이론 저항선은 bottom charge 가 되도록 計算

$$V_{\max} = V_1 + F$$

⑧ 실제 공간격은 1回 發破 區域의 幅을 응용할 수 있고 공수는 여기에 따라 計算

$$\text{공간 격수} = \frac{\text{1回 發破區域의 幅}}{E_1} = \frac{B}{E_1}$$

$$E_1 \text{ corr} = \frac{B}{\text{공간 격수}}$$

$$\text{공수/열 (row)} = \text{공간 격수} + 1$$

⑨ bottom charge 는 V_{\max} 을 이길수 있는 적정 裝藥值를 bench table 에서 求한다.

孔依 裝藥量

⑩ 孔의 裝藥量 = 孔徑 \times 孔徑 / 1000

$$h_b = d \times d / 1000$$

⑪ 봉상 裝藥長 = 孔深 - (공저 장약고 + uncharged section)

$$h_p = H - (h_b + h_o)$$

⑫ 봉상 裝藥重量 = permissible charge - 공저 裝藥量

$$Q_p = Q_{co} - ord - Q_b$$

⑬ concentration of column charge = $\frac{\text{봉상 裝藥量}}{\text{봉상 裝藥長}}$

$$Q_{pk} = \frac{Q_p}{h_p}$$

⑭ weight of charge per hole = 공저 장약 + 봉상 장약 = $Q_b + Q_p$

⑮ 列當 裝藥量=공당 裝藥量×列當孔數

⑯ 列의 裝藥量 計算

$$\text{volume per row} = V_1 \times \text{bench width} \times \text{bench height}$$

$$Fm^3/\text{row} = V_1 \times B \times K$$

⑰ 裝藥比重 = $\frac{\text{kg/row}}{Fm^3/\text{row}}$

$$q = \frac{\text{kg/row}}{\text{volume/row}}$$

⑱ 列當 穿孔長=穿孔數×穿孔 深度

⑲ specific drilling = $\frac{\text{穿孔長/列}}{\text{volume/列}}$

$$Bm/m^3 = \frac{Bm/\text{row}}{Fm^3/\text{row}}$$

2) Firing pattern

Ground vibration 을 제한하지 않으면 안될 모든 경우의 發破作業은 可能的 限 同時 發破 裝藥量이 小量이 되도록 하여 M.S. 發破를 하면 效果的이다.

왜냐하면 milli-second 를 使用하면 처음 일어난 爆破震動이 가라 앉기 前에 다음 震動이 일어나고 이것이 서로 재발, 發破의 效果까지 얻을 수 있으므로 震動이나 air shock 도 줄어지고 鑛塵이 적게 나올뿐만 아니라 2次 發破量의 감소, 파단면을 파상시키지 않을 수 있다.

여기서 重要的 것은 同一 delay number 內에서의 點火配列이다.

一般的으로 <表-5>에 實用法則을 적용한다. <表-5>는 60 cycle/sec 이상의 주파수에 대하여 使用할수 있으며 實用的인 주파수의 경우, Langer fors 에 의하면 다음과 같이 조정이 크다.

<表-5>

detonator type	delay number	delay 內의 조정
TE/MS	1-12	1/2
	13-18	1/3
VA/MS	1-10	1/2
	11-20	1/3
TE, VA/HS	1-20	1/6

<表-6>

detonator type	delay number	delay 內의 조정
TE/MS	1-12	1
	13-18	1/2
VA/MS	1-10	1
	11-20	1/2
TE/MS	20 cycle 以下	1
	1-18	
VA/MS	1-20	1

3) Smooth blasting 中 presplitting method 實施方法

이 方法은 人工的으로 自由面을 岩盤內에 만들기 위하여 切斷 豫定面을 따라 密集 平行孔을 뚫고 裝藥 發破하여 crack 을 形成시켜 應力 作用을 억제시킨다. presplitting hole 의 發破는 25-38 m/m 直徑의 藥包를 deck charge 하고 導火線으로 起爆 發破 하든지 더욱 效果的으로 하

려면 M.S 發破를 한다.

<表-7> Blaster's hand book 에 의한 presplitting 穿孔 및 裝藥 規格表

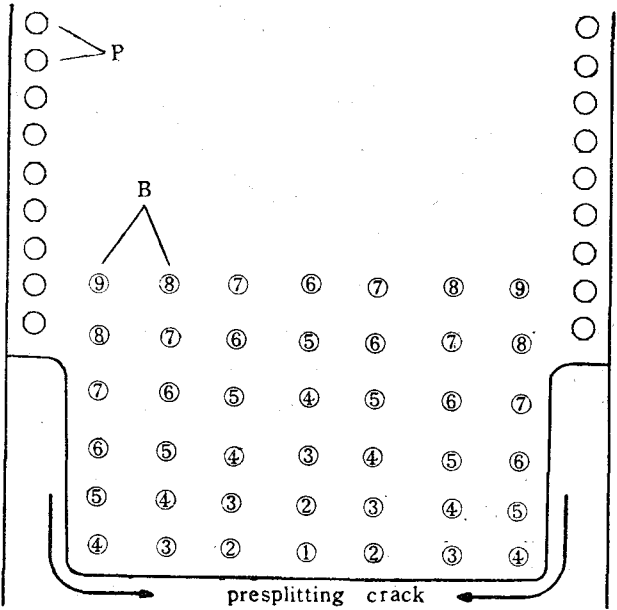
孔 徑(d) (mm)	m 當 火藥 使用量 Dyn (kg/m)	裝 填 單 位	孔 間 隔 m
25—32	0.07	11 mm Garit	0.20—0.30
25—32	0.16	17 " "	0.35—0.60
40	0.16	"	0.35—0.50
51	0.32 half the hole	2×17 m/m Gurit	0.40—0.50
	0.16 "	17 m/m "	
64	0.36	22 m/m Nabit	0.60—0.80

4) Damage 를 減少시킬 수 있는

blasting method 實施上의 問題點 및 經濟性

Damage 를 감소시킬 수 있는 發破法은 震動을 制限할 必要가 없는 재래식 發破法에 비하여 다음 要因들로 인하여 發破費用이 增加된다.

- 1) 穿孔比의 增加
- 2) charging cost 의 增加
- 3) volume 單位當 drill hole 의 增加
- 4) 충격과 測定
- 5) 보다 철저한 作業監督과 設計
- 6) 發破作業의 回數 增加
- 7) 鑿岩技術의 熟鍊과 鑿岩機具의 適應性 考慮
- 8) 岩石性質에 부합되는 decoupling factor 선정



P: presplitting
B: blasting holes

<Fig.-3> 穿孔 配列 및 規格

결국 作業能率 저하 및 原價上昇에 대한 모든 關係를 調整 檢討해야 한다.

結 論

發破地點 부근 建築物에 대한 damage 의 許容値를 決定하는 것은 前記한 여러가지 要因 때문에 대단히 어려운 일이다. 이러한 源泉的 어려움을 피하기 위하여서는 當該 建築 감독 기관은 震動이 2 mm/sec 以上되는 區域에 대하여서 이를 危險區域으로 정하고 建築主에 대하여 震動으로

인하여 發生될 수 있는 damage를 미연에 防止할 수 있도록 新築建物에 대하여서는 미리 計算된 크기의 vibration에 의하여 damage가 發生치 않도록 建築이 이루어져야 한다.

지금까지의 採石場으로부터 300m 밖에서는 特別한 制限이 없이 建築이 許可되어 왔는데 이것은 飛石에 대한 安全 措置일뿐 震動의 면에서는 安全치 못하다.

그리고 이미 建築된 建築物 및 人家에 인접한 發破作業은 發破技術의 研究 및 開發로 發破 回數를 줄이어 대피 소동을 감소시켜 주며 夜間發破 作業을 禁하는 등 發破 음향과 震動을 줄일수 있는 保安措置에 最善을 다해야 하겠다.

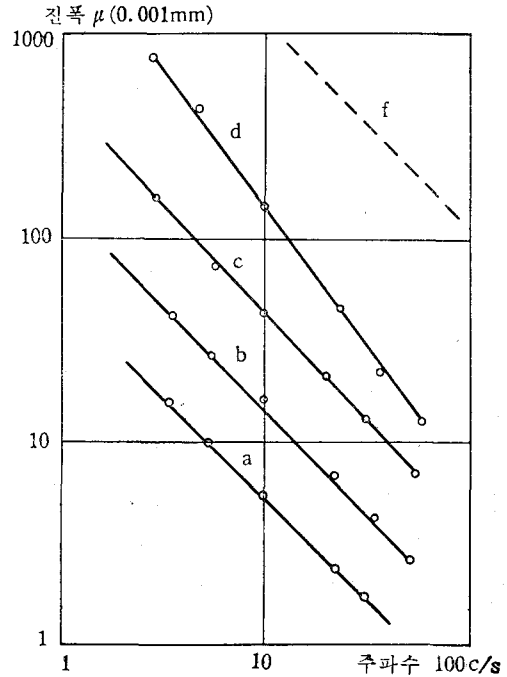
前述한 여러가지 問題點 못지 않게 重要한 것은 發破作業場 인근 住民들의 震動으로 인한 damage 發生에 관한 그릇된 思考 方式이다. 이것은 發破作業場 인근 住民들이 야기시킨 damage에 관한 不平이 實際 發破 震動과는 무관하며 不當하다는 것이 여러가지 實驗에 의하여 事實로서 立證될 수 있기 때문이다.

Reiher와 Meister가 vibration에 관한 human reaction을 研究한 결과를 보면 <Fig.-4>와 같다.

<Fig.-4>의 line은 vibration의 效果가 ① scarcely noticeable, ② clearly noticeable, ③ Irritating, ④ disagreeable로 나타났다.

이 <Fig.-4>에서 보여 주는 바와 같이 사람들이 實際 자기집의 damage를 우려할 단계에 미쳐 도달하기도 前에 震動으로 인한 피해의 소동부터 야기시키는 것이 우리의 現實이기도 하다. 實際로 大部分의 一般의인 不平이 發破震動은 無條件 피해를 유발시킨다는 그릇된 認識으로 인하여 본의 아닌 불평과 반발심을 조장하기 일쑤다.

上記한 바와 같이 發破作業場과 인접한 住民들이 實際의인 피해 可能性보다 훨씬 앞서 damage에 대한 의심과 不安을 얘기한다면 damage에 관한 사실을 보다 광범위하게 계몽하여 發破로 인한 不安과 소동을 理解하고 이로 인해 제기되는 불의의 피해 보상 건수를 줄일 수 있도록 最善을 다해야 하겠다.



<Fig.-4> Ground vibration에 의한 主觀的 見解差