

露天掘發破의 振動特性과 입지常數 決定에 關한 研究

梁亨植¹⁾ · 朱宰成²⁾

On the Vibration Characteristics and Determination of Site Constants for Surface Blasting

Hyung Sik Yang and Jae Seong Ju

ABSTRACT

Some surface blasting vibration was measured to determine site constants and vibration frequency was analyzed.

The results are summarized as follows ;

- 1) Design method to predict particle velocities was introduced using the logarithmic normal distribution characteristics of peak particle velocities.
- 2) Scaled distance diagram to determine limiting charge was presented.
- 3) Line fitness between particle velocity and scaled distance didn't depend on dominant component of vibration. Prevail fitness was in the order of transverse, peak, vertical and radial component.
- 4) Dominant component of particle velocity didn't related to drilling direction. Frequency was lowered as distance enlarged. Duration time of vibration was shortened as charge decreased.

서 론

발파에 의한 암반의 굴착은 광산뿐만 아니라 건설현장에서도 흔한 일이며 도시교통 문제의 강력한 해결책으로 제시되고 있는 지하철의 건설과 관련하여 시민생활과도 밀접한 관계를 갖게 되었다. 특히 근래에는 시민의식수준의 향상으로 발파진동 및 발파소음문제로 인한 민원이 도시뿐만 아니라 산간벽지의 광산지대나 건설현장 주변에서도 야기되고 있다.

한편 발파진동을 계측하고 해석하여 민원을 해결하거나 발파설계에 이용하는 일은 그리 많지 못하는데 그간 민원이 많지 않았고 측정기기가 별로 없었으며 현장에서도 경험적으로 처리하였던 때

문으로 생각된다. 현재 자원공학계에 보고된 발파진동측정과 관련한 연구보고는 청평발전소, 동양시멘트 삼척광구, 서울시 지하철, 쌍룡양회 동해채석장등 4건이며 파형이나 주파수특성 등의 계측, 분석은 사실상 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 검증하는 암반발파와 이로 말미암는 진동 문제와 관련하여 발파진동의 입자속도 분포에 근거한 설계방식을 제안하고 검토하였으며, 지표발파시 발파환경에 따른 진동 특성을 조사하였다.

측정대상지역 및 발파환경

본 연구의 측정 및 적용대상 지역은 석회석 광

1) 全南大學校 工科大學 助教授
2) 全南大學校 工科大學 助教

산인 N광산과 건설부지인 P지역이며 측정결과가 상세히 기발표된 동해 및 삼척 석회석광산의 자료들에도 적용하였다.

N광산은 지표면하의 깊은 응덩이 형태의 작업장으로 되어있고 화약류는 젤라틴 다이ना마이트 (60% strength, 28mmφ)를 주로 사용하며 초안과 함수폭약(KOVEX)을 일부 혼용하고 있다. 천공 방향은 대부분 수평천공이며 2~4단으로 DS지발(遲發) 발파한다. P지역은 완만한 경사의 구릉으로 수직공에 소량의 젤라틴 다이ना마이트를 순발 발파하였다.

각 대상지역의 위치와 명칭은 측정을 허락해 준 관계자들의 요구로 명시하지 못함을 밝혀둔다.

발파진동측정기는 미국 SINCO사의 S6 Peak Vibration Monitor이며 진동센서는 같은 회사의 Model 53137 Triaxial Transducer Package를 사용하였다. 진동측정시간은 최고진동속도점의 전후 0.6초 구간으로 하였으며 필자가 제작한 전송 및 그래픽 프로그램들을 이용하여 측정데이터를 PC-AT에 전송하고 그래프를 재구성하였다.

설계용 진동한계 직선식

입자진동속도의 분포특성

발파에 의한 진동과 그것이 구조물에 미치는 영향은 Buckingham pi 무차원해석일노로부터 $u-R$, \dot{u}/c , \ddot{u}/c^2 , ft , tc/R 및 $W/\rho c^2 R^3$ 의 여섯개 변

Table 1. Variables Considered in a Dimensional Analysis of Explosion Phenomena (after Ambrasey & Hendron, 1968)

Variable	Symbol	Dimension
Independent		
Energy (per delay)	W	FL
Distance	R	L
Seismic velocity	c	LT ⁻¹
Density of rock mass	ρ	FT ³ L ⁻³
Time	t	T
Dependent		
Ground displacement	u	L
Ground particle velocity	\dot{u}	LT ⁻¹
Ground acceleration	\ddot{u}	LT ⁻²
Frequency	f	T ⁻¹

수가 있음이 알려져 있다(Table 1 참조).

암석의 밀도나 탄성파속도는 암종에 따라 그리 큰 변화가 있는 것이 아니기 때문에 에너지와 거리의 항목인 $W/\rho c^2 R^3$ 은 W/R^3 으로 간략화될 수 있고 이를 환산거리(換算距離, Scaled distance)라 한다.

구조물의 피해에 크게 영향을 미치는 것은 입자의 변위, 속도, 가속도 및 주파수 등의 네개 종속변수로 좁혀지고 여러 계측결과에 의하면 입자속도가 가장 밀접한 관계가 있다.

이론적으로 입자의 진동속도는 환산거리에 역비례하며 수많은 계측의 결과로 일정 진동주파수 대역의 입자속도의 분포는 로그정규분포로 알려져 있다. 이러한 분산의 원인은 지질조건, 화약의 종류, 파형, 장약배열, 기폭오차 및 계측오차등으로 알려져 있다.

그러므로 발파진동은 경험적 예측이 어렵고 따라서 진동제어와 관련한 발파설계는 환산거리와 입자진동속도를 계측하여 입지상수를 결정하고 피해한계 진동속도와 주어진 거리로부터 최대 허용장약량을 산정하는 것이 된다.

통계적 입지상수 결정

종래의 입지상수는 입자속도와 환산거리의 비례관계를 이용하여 선형회귀 분석법으로 입지상수를 결정하였는데 이는 평균적인 예상치이므로 적절한 안전률이 필요하다. 본 연구에서는 입자속도의 로그분포특성을 이용하여 로그 표준편차 σ 를 구하고 50, 95 및 99%의 데이터를 포함하는 설계용 진동한계 직선식을 구하였다.

즉 종래의 입자진동식

$$v = K(SD)^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

에서

$$\log v = \log K - n \log(SD)$$

$$y = b_0 + b_1 X$$

이고 y의 표준편차를 σ 라 하면

$$K_0 = \exp b_0$$

$$K_1 = \exp (b_0 + 1.645\sigma)$$

$$K_2 = \exp (b_0 + 2.326\sigma) \quad \dots\dots\dots (2)$$

를 구할 수 있다. 여기서 v는 입자속도(mm/s), SD는 환산거리(m/kg^{1/2} 또는 m/kg^{1/3}), K는 발파진동상수, n은 감쇠지수(減衰指數)라고 부르

는 입지상수들이며 K_0, K_1, K_2 는 50, 95 및 99%의
 신뢰구간을 갖는 발파진동상수이다.

보통 입자속도의 단위로는 cm/s를 많이 사용하
 나 허용한계가 작아지고 있는 추세를 고려하여
 mm/s로 하였다.

적용례

N광산의 측정결과를 Table 2에, 이로부터 (1),
 (2)식으로 구한 진동한계 직선식을 Fig. 1에 보
 였다.

10개 이상의 발파진동을 계측한 N광산, P지역
 및 동해와 삼척광산의 기발표 자료^{2,3)}를 이용하여
 상기방식으로 입지상수를 조사한 결과는 Table 3
 과 같다.

차원해석에서 예견된 바와 같이 평방근 환산거
 리보다 삼승근 환산거리의 경우가 최대입자속도
 와의 상관관계에서 직선성이 더 좋으며 이러한
 관계는 입자속도성분과의 상관관계에서도 마찬가
 지였다. 따라서 이후의 한계입자속도식에는 통상
 의 평방근환산거리 대신 삼승근환산거리를 적용
 하였다.

Table 3에서 동해광산의 입지상수 값이 원전과
 다른 이유는 원전에서 최대속도성분을 최대입자
 속도로 간주했던 것을

$$V_0 = \sqrt{V_p^2 + V_r^2 + V_t^2} \dots\dots\dots (3)$$

으로 처리하고 일부 입자속도성분이 불분명한 것
 은 데이터에서 삭제했기 때문이다.

환산거리 다이어그램

진동한계 직선식을 구하는 것은 구조물에 피해
 를 발생시키지 않도록 장약량을 합리적으로 조정
 하기 위한 것이다. 대개 발파작업장과 시설물 또는
 민원대상 주거구조물 사이의 거리는 이미 결정되
 어 있으므로 먼저 구조물의 허용 입자진동속도를
 결정하고 실측하여 구한 진동한계직선식에서 한계
 환산거리를 결정하면 이로부터 최대허용장약량을
 유도할 수 있다. 이 일련의 작업은 계산만으로는
 단순하지 않다.

저자들은 현장에서 편리하게 장약량을 간단히
 결정할 수 있는 환산거리 다이어그램(Scaled Dis-
 tance Diagram)을 제작하였다(Fig. 2). 이것으로

Table 2. Measured particle velocities of N limes-
 tone quarry.

Nr.	Charge (kg)	Distance (m)	Particle Velocity (m/s)			
			V _p	V _r	V _v	V _t
1	22.05	50.9	8.35	3.13	8.35	5.96
2	13.95	68	2.83	-	2.54	-
3	45	72	5.294	3.862	3.922	2.043
4	28.20	70	4.429	2.207	3.892	2.282
5	36.45	76	8.38	4.891	-	3.146
6	53.10	108	8.03	-	4.981	5.681
7	11.25	115	1.49	1.34	0.89	1.04
8	45.	97.	6.41	6.25	5.52	3.43
9	26.25	94.5	8.142	7.083	4.518	2.460
10	26.85	161.	2.431	1.834	2.386	1.223
11	75.	233.8	0.552	0.298	0.507	0.179
12	79.5	26.	63.82	41.75	46.38	38.92

* p : peak, r : radial, v : vertical, t : transverse

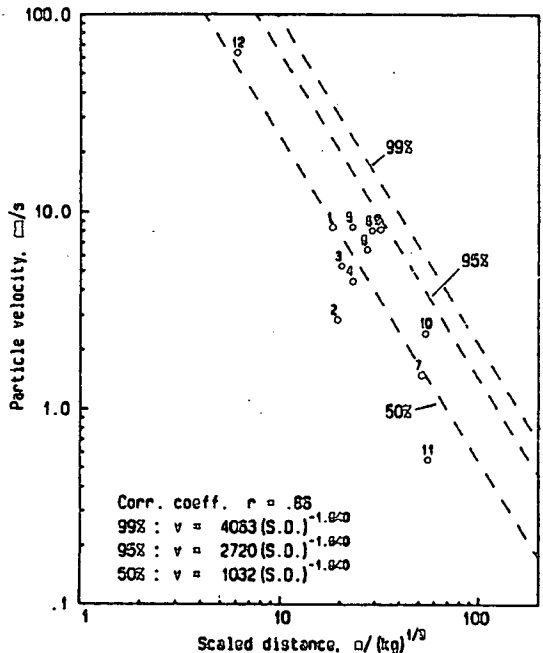


Fig. 1. Relationship between peak particle velocity and
 scaled distance of N Quarry.

장약량과 거리로부터 환산거리를 구할 수 있고
 역으로 상기의 작업도 가능하며 영미단위와의 혼
 용도 가능하게 하였다.

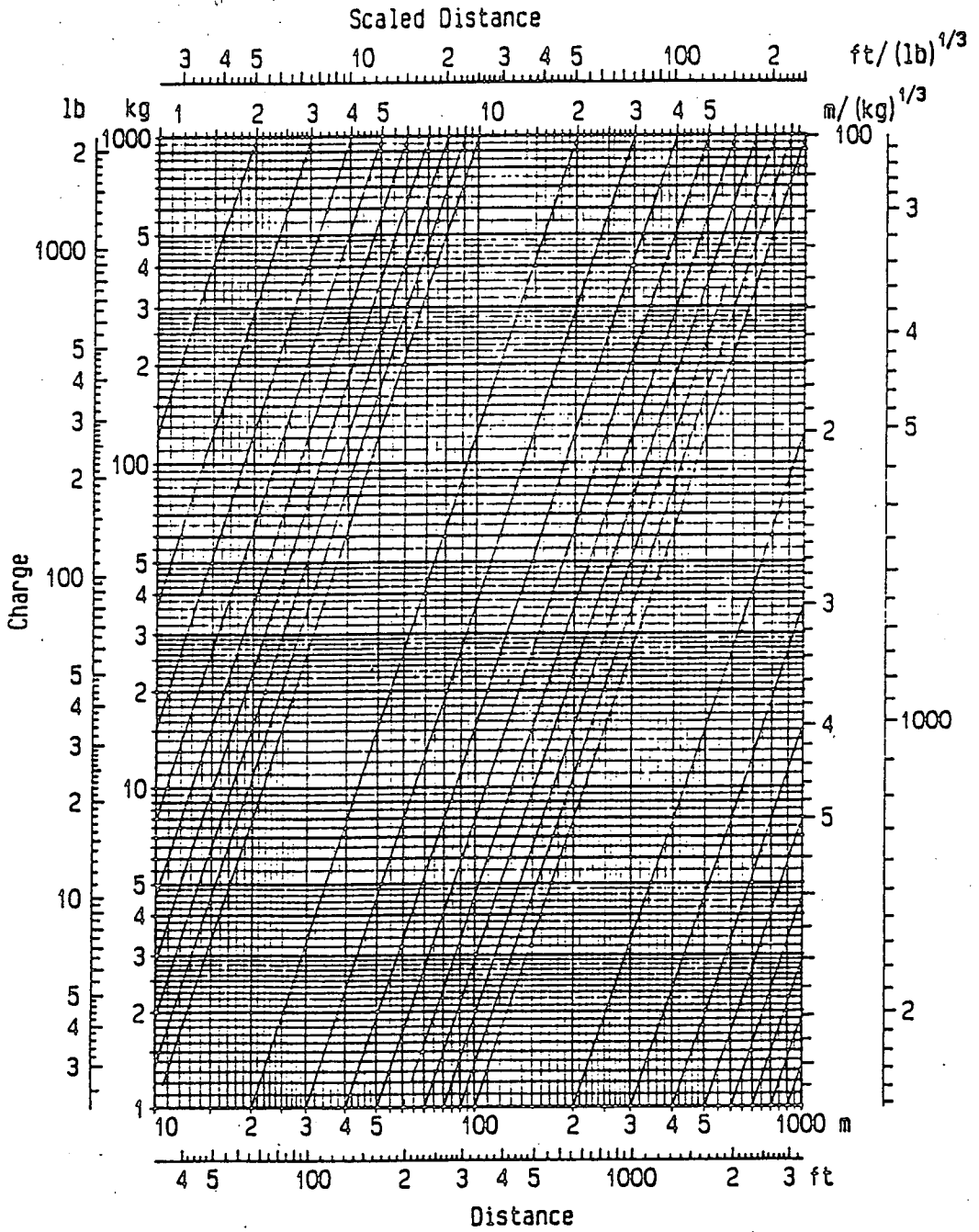
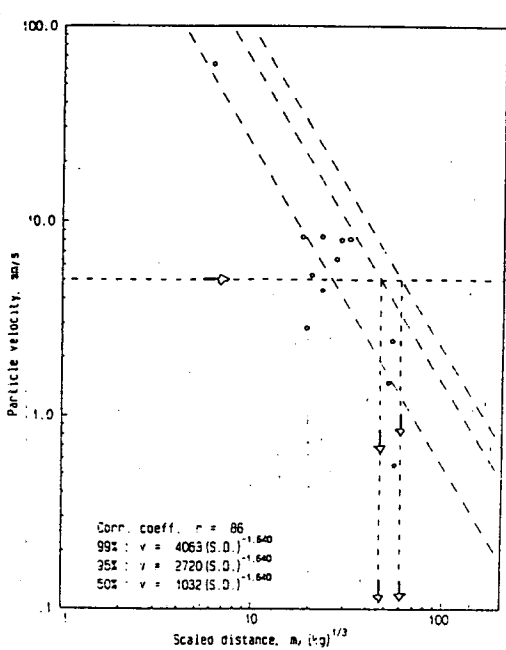


Fig. 2. Cube root scaled distance diagram.

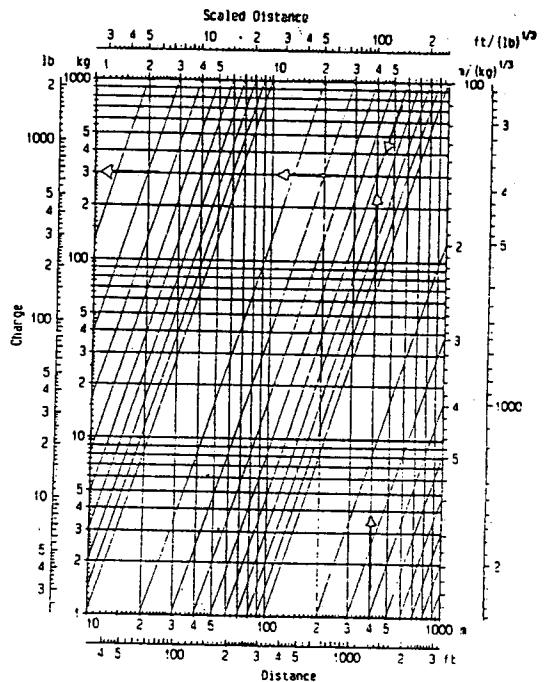
Table 3. Site constants for several places.

Place	component	Square Root Scaled Distance					Cube Root Scaled Distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
N Mine	P	.839	261.8	736.7	1130.6	-1.492	.861	1032.7	2720.8	4063.1	-1.640
	R	.795	182.2	627.0	1045.7	-1.463	.811	676.9	2228.4	3649.3	-1.597
	V	.864	216.8	555.9	820.9	-1.508	.881	844.6	2041.5	2941.9	-1.649
	T	.849	223.7	702.8	1128.9	-1.661	.881	1095.3	3059.3	4680.6	-1.844
P region	P	.780	26.3	43.4	53.4	-0.602	.787	25.3	41.5	51.0	-0.596
	R	.461	8.0	17.4	3.9	-0.388	.471	8.0	17.2	23.9	-0.389
	V	.747	46.2	100.5	138.6	-0.840	.755	44.1	94.9	130.3	-0.832
	T	.893	17.3	25.4	29.7	-0.730	.885	15.8	23.5	27.6	-0.710
Samcheok	P	.731	120.5	262.1	361.7	-1.243	.768	430.0	891.4	1205.5	-1.295
	R	.690	82.4	190.3	269.0	-1.192	.701	233.4	532.3	748.8	-1.199
	V	.867	452.4	1134.	1658.9	-1.803	.908	2093.0	4534.9	6245.8	-1.812
Donghae	P	.802	457.1	1514.	2486.4	-1.453	.815	6380.1	20411.	33032.	-1.624
	R	.751	279.1	1183.	2150.9	-1.483	.769	4349.3	17607.	31412.	-1.670
	V	.783	329.7	1280.	2245.5	-1.542	.794	5322.1	20063.	34751.	-1.719
	T	.810	188.9	574.3	910.0	-1.387	.819	2271.1	6737.	10569.	-1.543

* Transverse velocity component of Samcheok Mine wasn't measured. Peak values are calculated by $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$



(a)



(b)

Fig. 3. Determination of limit scaled distance and maximum charge.

예로서 Fig. 1의 N광산 채석면에서 400m 떨어진 곳에서 허용입자속도가 5mm/s인 구조물이 있을 때 99% 신뢰구간의 안전환산거리는 약 $60m/(kg)^{1/3}$ 이며(Fig. 3a) 환산거리 다이어그램으로부터 거리 400의 수선과 환산거리 60의 사선이 만나는

점으로부터 지발당 최대허용장약량은 300kg임을 알 수 있다(Fig. 3b). 같은 방법으로 95% 신뢰구간의 안전환산거리는 46.6이고 최대허용장약량은 약 750kg이 된다.

Table 4. Drilling direction and dominant component.

Region	Rocks	Drill direction	Dominant component	Prevail fitness
N mine	Limestone	Horizontal	$V7>R4>T1$	$T=V>P>R$
P region	Volcanic R	Vertical	$V6>R5>T0$	$T>P>V>R$
Samcheok	Limestone	Vertical	$R15>V3$	$V>P>R$
Donghae	Limestone	Vertical	$R7>T5>V3$	$T=V>P>R$

*P : peak, R : radial, V : vertical, T : transverse, Number : appearing frequency.

진동특성

지금까지의 발파진동에 관한 연구는 환산거리와 입자속도의 계측에 의한 암반의 입자상수 계측이 대부분이었고 주파수 특성이나 파형의 관찰과 같은 기초부분은 등한시되고 있었다.

본 연구에서는 몇개의 발파조건이 상이한 현장의 계측결과로부터 진동성분과 입자속도의 관련성을 비교하고 파형과 FFT(Fast Fourier Transformation)에 의한 주파수분포도를 작성하고 분석하였다.

Table 3에서 진동성분이 우세한 방향을 조사한 바 천공 및 장약의 방향과는 뚜렷한 관계가 존재하지 않았고 환산거리와의 상관관계에서 직선성이 좋은 방향성분과도 일치하지 않았다. 다만 수직

성분과 반경방향 성분이 비슷하게 우세하였고 직선성은 대체적으로 접선방향(T) > 합성벡터(P) > 수직성분(V) > 진행방향(R) 성분의 순이었으며 특히 모든 계측에 있어서 진행방향 성분에 대한 직선성이 가장 나빴다.

주파수는 대체적으로 100Hz이내 였으나 거리가 멀어지는데 따라 진동수가 저주파 쪽으로 편위되는 경향을 볼 수 있다(Fig. 4).

한편 진동의 계속시간은 소량의 폭약을 순발 발파한 경우 짧았고 지발발파 시에는 길어지는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 5는 대표적인 소장약 순발(a)과 대장약 지발발파(b)의 발파진동속도 파형을 보인 것이다.

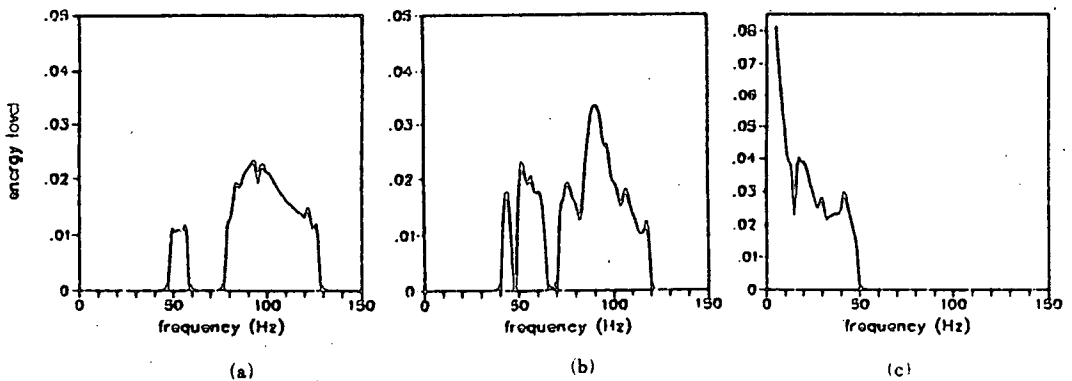


Fig. 4. Relationship between frequency and energy level for various distance (P region).

(a) 23 m (b) 58 m (c) 96 m

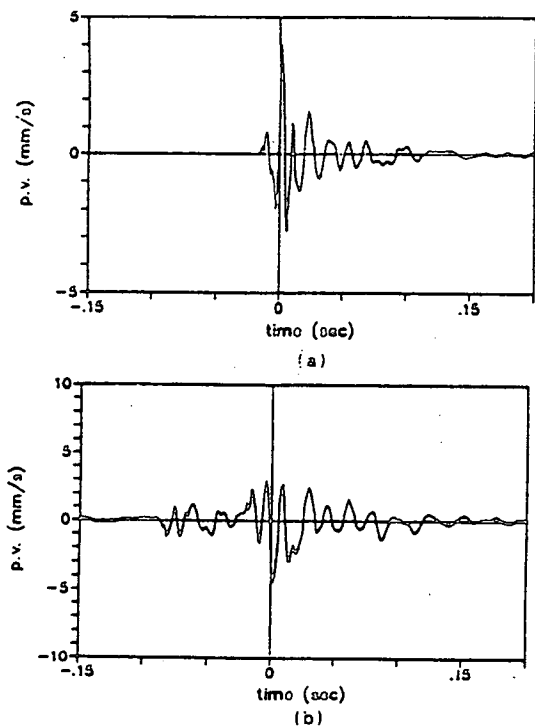


Fig. 5. Typical wave form of instantaneous and delayed blasting.

결 론

몇몇 지표발파현장에서 발파진동을 실측하고 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 입자속도의 분포특성을 고려하여 통계적으로 예상입자속도식을 산출하므로써 이식이 설계적인 의미를 갖도록 하였다.
- 2) 국내의 대부분 계측자료에서 자승근 환산거리 보다는 삼승근 환산거리가 더 입자속도의 직선성이 좋았다. 이를 이용하여 발파장약량을 설계하는 보조기구로서 삼승근 환산거리 다이어그램을 제작하였다.
- 3) 입자속도와 환산거리의 상관관계는 우세진동 방향과는 무관하고 대체적으로 집선방향, 합성벡터, 수직, 진행방향순으로 직선성이 뛰어난을 알았다.
- 4) 발파진동의 파형과 진동수 특성을 조사한 결과 천공, 장약 방향과 우세진동 방향과는 무관하며 거리가 멀수록 진동수대역이 저주파쪽으로 편위하고 장약량이 적고 순발일 때 진동계속 시간이 짧아짐을 확인하였다.

本學會發刊叢籍

- ANFO 爆劑新發破學, 東亞出版社 1964. 12.
- 新火藥發破學, 機電研究社 1981. 9.
- 新火藥發破學解說, 寶晉齋 1982. 5.
- 서울地下鐵工事 3, 4號線發破工法, (非賣品) 1984. 4.
- 岩石力學, 機電研究社 1985. 2.
- 岩石力學解說, 同上 1986. 7.
- 智山許墳博士回甲記念集, 1987. 2.