

발파진동이 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향

On the Influence to the strength of Concrete Curing from blasting vibratin

정 동 호
Jung, Dong ho*

1. 서 론

지반의 진동은 크게 지진과 같은 자연적인 진동과 발파, 항타 및 중장비의 가동 등 인위적인 진동으로 대별할 수 있는데, 이들 지반 진동은 때때로 지상 구조물의 안전도에 큰 영향을 미친다. 특히 진동이 양생 중인 콘크리트의 강도 및 물리적 성질에 영향을 미치기 때문에 이미 선진국에서는 엄격히 진동 기준치를 제한하고 있다.

우리나라는 전 국토의 2/3 이상이 산지로 형성되어 있어 과밀한 인구의 소산과 국토의 효율적인 개발을 위하여 지상은 물론 지하의 생활공간 확보를 위한 발파작업이 더욱 확대될 것으로 예상된다. 더욱이 최근 대도시에서 활발히 시행되고 있는 각종 건설공사, 예를 들면 지하철, 통신구, 전력국 등 건설공사와 재개발을 위한 도심지에서의 택지조성공사 등을 실시할 때 경제성과 시공성 때문에 화약류에 의한 발파작업이 불가피한 경우가 많아지고 있다.

잘 알려진 바와 같이 발파작업에 따른 지반

의 진동·소음·폭풍압 및 파쇄 압편의 비사등 발파로 인한 공해는 민원의 대상이 되고 있을 뿐만 아니라, 때로는 건물 및 이체에도 중요한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 기준치의 설정, 공해 감소방안 확립 등을 위한 상당한 연구가 국내에서도 수행되고 있다.

대부분의 건설공사는 굴착과 동시에 인접지역에서 콘크리트의 타설작업이 실시됨에도 불구하고, 양생중인 콘크리트를 보호하고 설계강도를 발현시키기 위한 구체적인 허용진동치의 기준이 설정되어 있지 않고, 또 이에 관한 연구가 거의 되지 않고 있어서 콘크리트의 품질관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

다만 우리나라의 경우 지금까지 경화된 콘크리트 등을 포함한 시설물의 유지 관리를 위하여 허용진동치 기준은 몇가지 발표되고 있으나 양생중인 콘크리트 보호를 위한 허용기준치는 아직까지 설정되지 않고 있다.

더구나 최근 건축재료로서 콘크리트의 용도가 다양화됨에 따라 고 품질의 제품이 요구되는 시점에서 양생중인 콘크리트가 설계 강

*공학박사

도를 발현하기 위해서는 각종 발파 및 건설진동의 작용을 적극적으로 제어해야 함은 물론, 적절한 허용 기준치를 설정하여야 할 것이다.

특히 시공 현장에서 타설하는 콘크리트 구조물의 양생 도중에 각종 건설진동을 줄이기가 매우 어렵다. 몇가지 예를 들면, 전동열차가 지나가는 전철역에 콘크리트 플랫폼을 세우고 양생하는 경우나, 철로 및 도로 인접지역에서 양생 중인 콘크리트 건물 또는 대단위 아파트 단지나 공업단지 등에서 기초말뚝을 박을 때 이미 타설되어 양생되고 있는 콘크리트 건축 구조물 등이 있다.

일반적으로 콘크리트 재료의 특성은 복합재료로서, 그 조직에 있어 다상성과 다공성이 있다. 이들 특성은 수경성 시멘트오물 및 골재를 주 원료로 생성되며, 양생 조건에 따라 수화반응이 일어나고, 미소 구조의 조직에 따라 강도 이외에 여러가지 특성을 발휘하게 된다. 즉 콘크리트의 강도 및 물성에 영향을 미치는 요소로는 크게 두가지를 들 수 있다.

첫째, 구성재료의 성질, 물·시멘트의 배합비, 시공 및 양생방법, 재령시간 및 주변 온도와 물뿌림 등이고, 둘째로는 앞에서 예시한 각종 외부 진동의 영향을 들 수 있다.

본 연구에서는 서로 차이를 보이고 있는 연구결과를 규명하고 또, 외부의 진동이 미치는 영향을 평가하기 위하여 진동 이외의 모든 조건은 동일하게 유지하였다. 또한 이의 정밀도를 높이기 위하여 시험 대상이 되는 콘크리트는 한 배치에서 혼합함으로써 동일조건의 시험편이 제작되도록 하였다.

실험방법은 발파현장에서 직접 양생콘크리트를 타설 후 진동의 크기, 진동의 지속시간, 최

초로 진동을 가하는 시간 등을 변화시키면서 발파진동을 작용시킨 후 콘크리트를 양생하여 시험편의 압축강도 시험을 주로 하였다.

일부는 각종 물성 즉, 탄성파의 전파속도, 탄성계수, 포아송비를 측정하여 이들을 상호 비교하였다. 이 때 진동의 크기는 실제 건설현장의 진동규제 기준을 고려하여 0.25, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0cm/sec 등 5단계로 구분하였다.

이와 같은 연구결과는 콘크리트의 양생을 위한 최적 조건을 제시할 수 있어서 발파작업 책임자가 발파설계시 진동의 허용기준치를 설정하는 데 유익한 자료가 될 것이다.

2. 실험방법 및 시험편의 제작

2-1. 실험방법

발파진동이 타설된 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Y석산과 S채석장을 실험대상 작업장으로 선정하였다.

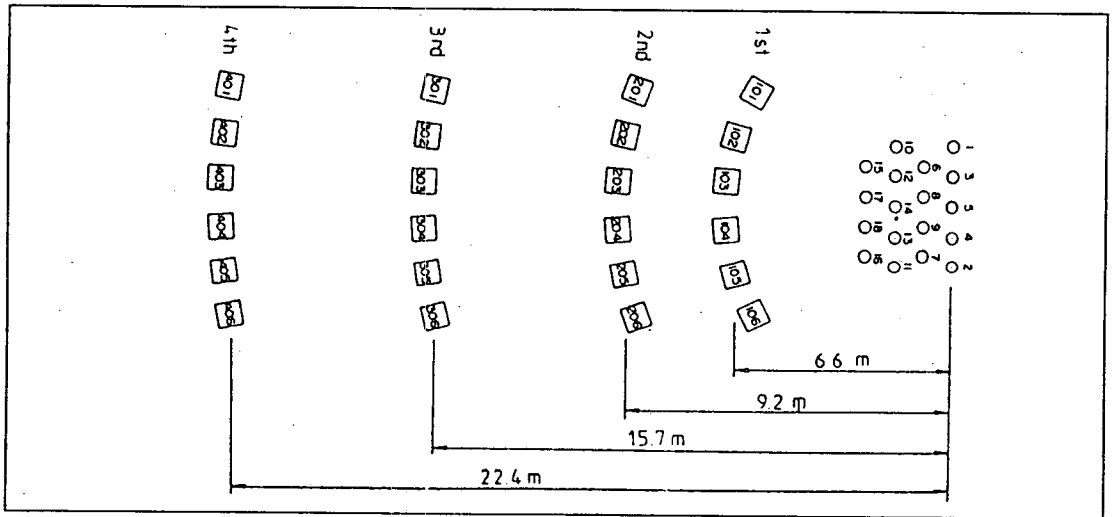
이들 실험지역에서 폭원으로부터 일정한 간격으로 떨어진 암반 위에 설치된 일정 크기의 불력에 콘크리트를 타설한 후 시험조건에 맞춰 기폭시킴으로써 발생된 진동이 양생 중인 콘크리트에 전파되도록 하면서 실험을 실시하였다.

실험방법은 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 하나는 콘크리트를 타설한 후 일정한 시간 간격으로 반복진동을 작용시키는 경우이고, 다른 하나는 타설 후 일정한 크기로 단일 발파진동을 작용시킨 경우이다. 이 두 지역의 발파조건은 Table 2-1과 같다.

Table 2-1에서 보는 바와 같이 Y석산에서는 지표로부터 2.0m 깊이로 공경 76mm되는 장약공을 18공 천공한 후 예측된 진동치를 얻기

Table 2-1 Drilling and charging conditions for test blast

Description	Contents	
	Y quarry	S quarry
Number of Holes	18holes	18~20 holes
Diameter of Hole	76mm	115mm
Hole Spacing	1.0m	3.0m
Drilling Depth	2.0m	12m
Explosive	Himite 50m	AN-FO
Charge per Hole	200~360g	80kg
Distance	3.30~24.30m	16.7~144.4m
Detonator	MS	MS, DS
Stemming Materials	Sand+Clay	Crushed Stone
Vibrometer	DS-477, VMS-500	DS-477, VMS-500



2-1 Drill hole distribution in case of I

위하여 반복 발파진동에서는 하이마이트 폭약을 거리에 따라 200~360g씩, 양생시간대별 단일 발파진동에서는 공당 250g씩 장약하여 기폭시켰다.

또 S채석장에서는 현재 석회석 채광에 적용하고 있는 발파법에 준하여 실험을 실시하였으며, 1발파당 천공수는 18~20공, 천공경 115mm,

최고저항선 2.7m, 천공간격은 3.0m이다. 벤치의 높이는 10m, 폭약은 석회석 채광에 주로 사용하고 있는 AN-FO를 사용하였으며, 실험시 공당 장약량은 80kg이고, 각공의 시차는 MS 및 DS뇌관을 병용하여 달리하였다.

일반적으로 발파진동의 크기는 지형, 암반의 조건, 암반내 불연속면의 발달상태와 그 정도,

폭원에서 측정점까지의 거리, 지발당장약량 등 여러가지 요인에 의하여 변화하는 것으로 알려지고 있다. 그러나 본 실험에서는 동일한 조건에서 진동측정 및 실험을 실시하였기 때문에 진동의 크기는 폭원으로부터 거리에만 관계되도록 단순화시켰다.

첫번째 실험장소인 Y석산에서는 발파진동의 크기별 반복진동을 작용시키기 위하여 Fig 2-1과 같이 실험하였다.

그림에서 보는 바와 같이 1.0m의 간격으로 장약공 18공을 2.0m 깊이로 천공한 후 제5공을 중심으로 4단계별 거리에 따라 각각의 열에 6개의 블럭을 설치하고 콘크리트를 타설하였다. 그 위치를 예로 들면, 1열의 경우 101, 102, 103, 104, 105, 106으로 명명하고 제4열의 경우는 401, 402, ..., 406으로 표기하였다. 이와 같이

폭원과 측정점(이 때 측정점에 콘크리트 블럭을 설치함)과의 거리를 달리 하면서 일정한 시간 간격으로 콘크리트를 타설한 후 양생시키면서 진동을 계측하였는데 그 결과는 Table 2-2와 같다.

이 반복 발파진동을 작용시킬 때 측정된 계측치를 근거로 하여 발파진동 상수 K와 감쇄지수 n을 구하기 위한 진동속도와 환산거리의 log-log 상관관계는 Fig. 2-2와 같다.

이때 진동속도의 크기는 종방향, 횡방향 및 수직방향의 성분을 종합한 백터값을 적용하였으며 회귀분석하여 이 실험지역에 적합한 2-1의 실험식을 구하였다.

$$V = 54.3 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.329} \quad (2-1)$$

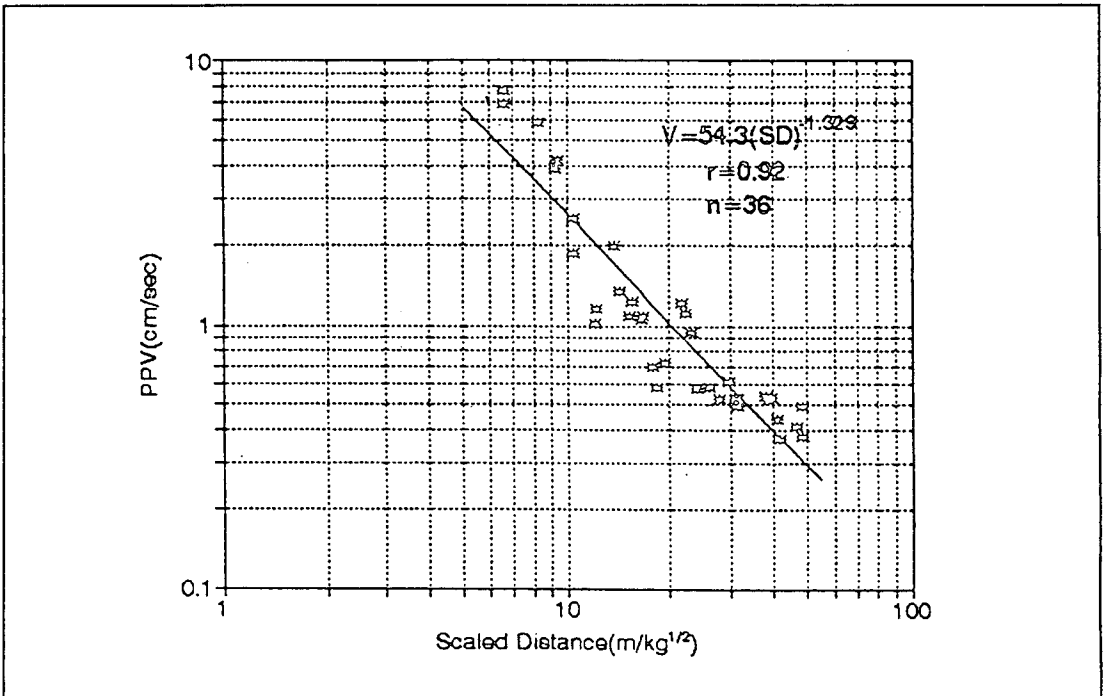


Fig. 2-2 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance at Y quarry

Table 2-2 Results of blasting vibration at Y quarry

Content Order of Blast	1st row		2nd row		3rd row		4th row	
	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)	D (m)	V (cm/sec)
1	8.40	2.33	11.30	1.09	17.70	0.49	24.30	0.39
2	7.80	2.42	10.70	1.10	17.30	0.51	24.20	0.38
3	7.10	2.35	9.70	1.21	16.40	0.52	23.30	0.41
4	6.90	2.52	9.40	1.42	15.80	0.52	22.60	0.36
5	6.60	2.68	9.20	1.51	15.70	0.49	22.40	0.35
6	6.30	2.48	9.00	1.46	15.50	0.52	21.50	0.36
7	6.05	2.47	8.60	1.35	14.90	0.61	21.20	0.37
8	5.50	2.62	8.30	1.08	14.60	0.61	21.00	0.36
9	5.20	2.54	7.90	1.21	14.10	0.64	20.70	0.38
10	4.90	2.75	7.60	1.10	14.00	0.53	20.60	0.44
11	4.90	2.72	7.10	1.33	13.10	0.58	19.70	0.53
12	4.70	2.13	6.80	1.56	12.90	0.72	19.40	0.54
13	4.70	2.55	6.10	1.52	12.90	0.72	19.40	0.51
14	4.50	2.75	6.10	1.54	12.40	0.76	19.10	0.54
15	4.40	2.85	6.00	1.21	12.00	0.60	18.90	0.43
16	4.30	2.91	5.20	1.33	11.60	0.66	18.30	0.45
17	4.25	2.91	5.10	1.45	11.20	0.72	17.70	0.47
18	4.20	2.97	5.00	1.67	10.90	0.78	17.50	0.48
average		2.61		1.35		0.61		0.43

D: distance from blast source to measuring point(m)

V: level of peak particle velocity(cm/sec)

Table 2-3 Comparison of measured calculated peak particle velocity

Position of hole	Distance (m)	Calculated velocity (cm/sec)	Measured velocity (cm/sec)	Remarks
1st row	1.8	10.0	9.72(9.02~10.3)	$V=54.3(SD)^{-1.329}$ $r=0.92$ $n=36$
2nd row	3.0	5.0	4.94(4.82~5.01)	
3rd row	10.0	1.0	1.04(0.98~1.21)	
4th row	17.0	0.5	0.52(0.48~0.53)	
5th row	28.4	0.25		

이 2-1의 실험식을 역산하여 단일 발파진동의 크기가 시간대별 양생콘크리트에 미치는 영향을 검토하는 데 사용하였다.

일정한 폭약량으로 동일 지역에서 진동치의 크기 10.0cm/sec를 예측할 수 있는 거리($V=54.3(SD)^{-1.387}$ 적용)는 1.8m, 5.0cm/sec는 3.0m, 1.0cm/sec는 10.0m, 05/sec는 17.7m, 그리고 진동치의 크기 0.25cm/sec를 얻기 위하여 28.4m의 지점에 각각 양생콘크리트를 타설한 후 진동작용 횟수를 단 1회, 단일 발파진동을 작용시키는 실험을 실시하였다.

이와 같이 단일 발파진동을 작용시킨 경우의 실험방법은 기초실험의 연구결과 비교적 강도 및 물성의 변화에 큰 영향을 미친다고 생각되어지는 시점, 즉 타설 후 초기 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4시간까지는 30분 간격의 시차를 두어 실험을 하였다. 그러나 그 이후에는 타설 후 6, 8, 10, 12, 14시간대에 단일 발파진동이 작용하는 경우 그 영향을 분석하였다.

단일 발파진동에 대한 실험개요도는 Fig. 2-3과 같이 발파공을 중심으로 실험식에 의한 예상되는 진동치를 작용시키고자 하는 지점 즉, 1열 1.8m, 2열 3.0m 3열 10.0m, 4열 17.0m 및 마지막 5열 28.4m의 지점에 콘크리트를 역순으로 타설한 후 실험을 실시하였다.

또한 이의 정확도를 검산하기 위하여 실험식에 실제 계측한 값과 실험식에서 이론적으로 계산한 값을 Table. 2-3에 나타내었다.

이 결과는 현장실험 조건임을 고려할 때 잘 부합한 것으로 생각된다.

두번째 실험장소인 S채석장에서는 반복 발파진동과 단일 발파진동이 양생콘크리트에 미치는 영향을 검토하기 위한 현장실험 이전에 3

회에 걸쳐 약 30회 이상의 진동측정을 실시하였다. 이 진동측정 결과는 Table 2-4와 같다.

이 실험지역에서 발파진동의 전파특성을 대표할 수 있는 실험식을 얻기 위해서는 지발당장약량 및 폭원으로부터 거리를 다양하게 조절할 필요가 있다. 그러나 실험대상 지역 즉, S채석장은 전형적인 채굴을 위한 발파패턴으로 장약량이 일정하기 때문에 주로 폭원으로부터 거리를 조절하면서 진동치를 계측하였다. 측정지점은 비산의 염려를 고려하여 폭원으로부터 330m 떨어진 지점에서부터 1,010m까지의 거리에서 측정하였으며, 측정위치는 주로 벤치하부 또는 동일한 고도의 작업장 부근이었다. 또한 Table 2-4의 진동측정치에 근거하여 실험지역의 발파진동 상수와 감쇄지수를 구하기 위한 진동속도와 환산거리에 대한 log-log 상관관계는 Fig. 2-4와 같다.

이 때에도 진동속도의 크기는 종방향, 횡방향, 수직방향의 세 성분을 합성한 벡터값을 적용하였다. 환산거리는 적합도가 높은 세제곱근방정식을 채택하였으며, 회귀분석 결과 2-2의 실험식을 얻었다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-n} = 65.25(SD)^{-1.387} \quad (2-2)$$

이 2-2의 실험식을 역산하여 진동치 크기별 거리를 구한 후 Fig. 2-5와 같이 콘크리트를 타설한 후 반복 및 단일 발파진동을 작용시키면서 실험을 실시하였다.

이 때 실험식($V=65.25(SD)^{1.387}$)에 의한 각 거리별 이론적인 진동치는 Table 2-5와 같으며, 실제 진도치 5.0cm/sec와 3.0cm/sec를

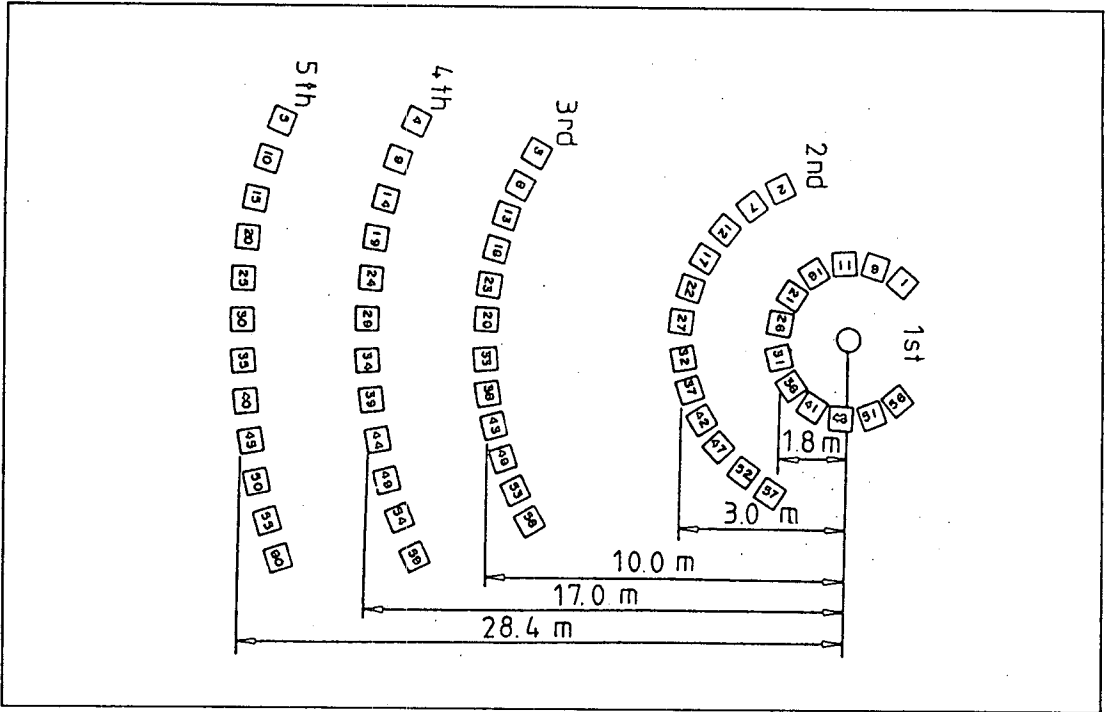


Fig. 2-3 Drill hole distribution in case of II

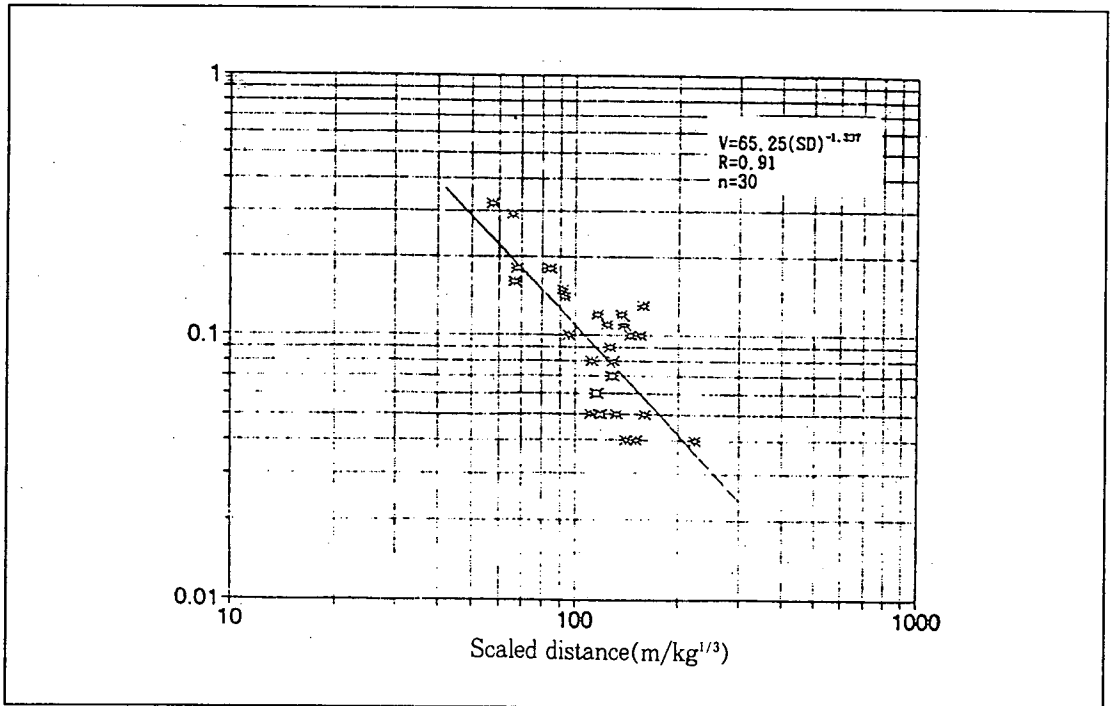


Fig. 2-4 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance at S quarry

Table 2-4 Results of blast vibration at S quarry

Test No.	Site	D (m)	W (kg)	Peak Particle Velocity (cm/sec)				Freq. (Hz)
				L	V	T	V.ves	
1	237-3	960	239	0.14	0.04	0.09	0.10	13
2	238-3	1010	261	0.08	0.06	0.11	0.13	32
3	116-2	710	133	0.07	0.08	0.07	0.11	18
4	115-1	670	192	0.11	0.12	0.09	0.12	26
5	318-3	640	166	0.06	0.03	0.06	0.06	19
6	110-2	330	190	0.24	0.23	0.31	0.32	19
7	110-2	370	177	0.15	0.23	0.29	0.29	12
8	318-3	640	164	0.05	0.03	0.04	0.05	26
9	237-2	970	300	0.06	0.04	0.07	0.10	20
10	318-2	640	184	0.05	0.04	0.07	0.08	23
11	237-2	970	224	0.05	0.02	0.04	0.05	12
12	116-3	690	129	0.11	0.08	0.06	0.12	22
13	318-2	700	204	0.04	0.04	0.05	0.05	17
14	115-1	670	147	0.04	0.06	0.09	0.09	22
15	318-4	640	191	0.04	0.03	0.04	0.05	16
16	318-3	640	172	0.05	0.04	0.04	0.06	16
17	110-3	370	162	0.11	0.15	0.15	0.18	15
18	318-3	540	204	0.10	0.13	0.10	0.15	19
19	318-3	510	164	0.12	0.13	0.09	0.14	20
20	318-3	240	179	0.09	0.07	0.08	0.10	14
21	115-1	690	154	0.04	0.06	0.07	0.08	18
22	115-2	660	153	0.08	0.07	0.09	0.11	26
23	115-2	690	154	0.05	0.04	0.05	0.07	17
24	110-2	370	171	0.13	0.13	0.11	0.16	24
25	115-2	690	159	0.06	0.06	0.05	0.07	18
26	318-2	640	95	0.03	0.02	0.04	0.04	16
27	110-2	370	85	0.11	0.16	0.14	0.18	39
28	116-1	950	78	0.02	0.03	0.04	0.04	20
29	318-3	600	93	0.05	0.03	0.03	0.05	15
30	318-2	640	78	0.03	0.03	0.03	0.04	21

양생콘크리트 타설시 반복 및 단일진동으로 작용시켰을 때 측정된 값은 Table 2-6과 같다. 이 두 진동치의 결과를 비교하면 거의 유사함을 알 수 있다.

Y석산 및 S채석장에서 진동의 측정은

Instantel사 DS-477 기종 2대와 Thomas사 V MS-500기종 1대 등 총 3대로 진동을 측정하였다. 물론 각 진동계의 특성상 약간의 오차가 있을 수 있으므로 동일조건에서 비교실험을 통해 보정한 후 사용하였다.

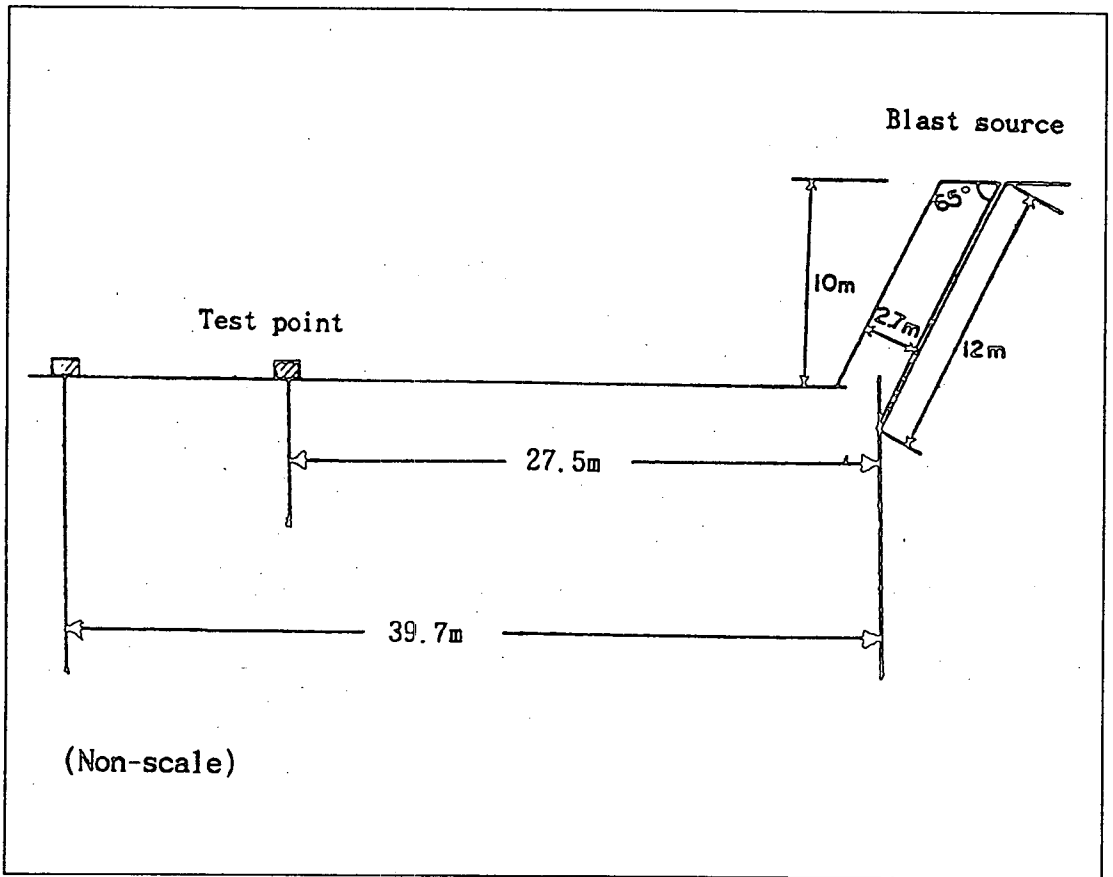


Fig. 2-5 An example of drill hole distribution at S quarry