

지표발파의 진동특성에 관한 기초연구

양 형 식¹⁾

On the Vibration Characteristics of Surface Blasting

Hyung-Sik Yang

ABSTRACT

Blasting vibrations of 3 quarries and 5 construction sites were measured and investigated with two reference data. Square and cubic root scaled distances were similar in fitness to peak particle velocity of individual blasting site, but the former is better fitted in total. It was suggested that the limit scaled distance for domestic surface blasting be $40\text{kg}/\text{cm}^3$ for $10\text{mm}/\text{s}$ level and $60\text{kg}/\text{cm}^3$ for $5\text{mm}/\text{s}$ level, which were lower than the OSM's regulation. Prevailing vibration components were in the order of radial, vertical and transverse directions. Site factors K and m were 242 and -1.283 for all studied area, 357 and -1.348 for construction sites, 118 and -1.160 for quarries. Most prevailing frequency was in the range of $10\sim 20\text{Hz}$. Overlapping effect of delayed blasting vibrations were insignificant. Vibration history of delayed blasting was longer than simultaneous blasting, and it became longer as measuring distance increased. Wave form and predominant frequencies were more complicated for delayed blasting than instantaneous blasting. The influence of blasting scale and measuring distance were not significant to determine peak particle velocity equation.

1. 서 론

최근, 소득과 국민의식의 향상으로 주거환경

* 1992년 6월 27일 접수

(이 연구는 학술진흥재단의 '90지방대 육성연구비 지원으로 수행되었음)

1) 정희원, 전남대학교 공과대학 부교수

의 안전에 대한 관심이 높아져서 각종 건설사업으로 인한 진동문제나 소음문제가 민원화 또는 사회문제화되고 있다. 도시의 비대화로 인한 도심지의 재개발사업이나 교통문제를 해결하기 위한 지하철의 건설은 피할 수 없는 현실인데, 이들 사업은 모두 주거지 주변이나 주요 지상구조물 주변에서 이루어질 수 밖에 없고 소음이나 진동원이 암반발파, 기초용 파일박기 또는 기존 시설물의 해체를 위한 브레이커 사용 등의 공정을 포함하기 마련이다. 실제로 근래 주거물의 진동에 의한 피해를 중심으로 한 분쟁이 많이 발생하고 있다.

그간의 국내학계의 연구는 진동소음원으로부터의 비거리별 입자진동속도를 측정하고 이로부터 입지상수를 결정하여 피해가능성을 평가하는 일에 치중하고 있다. 이 연구들은 지반입자속도의 예측을 위해서는 필수적인 과정이지만 국내에서는 아직 진동허용 규제조차 확립되어 있지 않은 형편이어서 국외학자들의 보고서와 외국의 관련 법령자료를 인용하고 있다. 특히 발파현장의 측정 협조를 얻기 곤란할 뿐만 아니라 엄격한 법적규제 때문에 임의설계에 의한 발파의 실시나 측정이 불가능하여 국내의 계측자료는 극히 빈약하다.

또, 구조물의 피해는 지반의 입자속도 뿐만 아니라 구조물의 반응특성이 크게 작용함에도 불구하고, 이에 대한 연구도 부족한 형편이다. 건축분야의 연구에서는 1988년의 건축법시행령개정에서 “내진설계”포함을 계기로 하여 구조물의 동적반응특성이나 이를 고려한 설계에 관한 관심이 고조되고 있으나, 진동수가 주로 1Hz이하인 지진반응이나 고주파인 교통문제에 편중하고 있어, 대부분 5~40Hz정도인 발파나 건설기계진동에 대한 연구는 등한한 실정이다.

본 연구에서는 발파에너지와 진동특성을 규

명하기 위하여 가급적 조건이 다른 여러 현장에서는 기존 발파방식의 발파에 대하여 각각 진동을 계측하고 특정 현장에서는 임의설계에 의한 발파를 시행하며, 건설기계류의 진동과 관련하여 입지와 구조물에 따른 반응특성도 조사, 검토하여 주거밀집지역이나 중요구조물 주변의 진동원 규제를 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 계측방법 및 계측장소

2.1 문헌조사

대한광산학회(현 한국자원공학회), 한국암반역학회, 한국토질공학회 및 몇몇 대학과 연구소 보고서를 중심으로 원자료를 수집하였다.¹⁻⁷⁾ 국내 자료들의 특징은 발파진동 탐지기의 기능상 제약 또는 이용기술의 미숙으로 완전하지 못한 자료들이 많았고 일부자료는 신뢰성이 낮아 이용가치에 의문이 있었다. 본 연구에서는 가급적 원자료를 모으려고 노력하였으나 발표된 보고서 외 특별히 자료를 보존하고 있는 연구진이 희소하였고 현재 진행중인 연구자료는 입수 대상에서 제외하였다.

미국의 경우도 미광무국(USBM)을 중심으로 하여 많은 문헌들이 발표된 바 있지만 새로운 연구는 적고 그 전 자료들을 재구성한 것이 대부분이다.⁸⁾

2.2 지표발파 및 건설공사 실현장계측

본 연구에서는 3개 광산과 5개 건설지역에 대하여 발파진동을 계측하였다. 경기도 평택군 원정리 지역, 전남 화순군 도곡지역, 전남 영광군 대불공단 조성지역, 광주시 동구 봉선동 아파트 건설단지 및 광주시 서구 덕남동 덕남정수장 건설지 등 건설발파지역과 노천광산으로 전남 장성군 장성읍의 남일 석회석 광산, 전북 순창군 적성면의 삼영 규석광산, 전남 장

성군 북하면의 대산산업 골재 채석장 등 지표 발파 광산에서 발파로 인한 진동을 계측하였다.

특히 건설공사가 진행중인 현장에서 발파성적에 지장이 없는 한도 내에서 장약량과 천공방향, 매질의 종류 및 지형을 선택하며 지표 및 구조물 진동에 미치는 영향을 조사하였다.

또 광주시 광산구 하남공단 아파트 단지, 북구 오지동 주공 아파트 건설지, 전남 목포시 용해동 및 여수시 일원의 건설현장 등에서 브레이크 및 항타에 의한 진동을 계측하였다.

발파진동 측정기는 미국 SINCO사의 S6 Peak Vibration Monitor이며 진동센서는 같은 회사의 Model 53137 Triaxial Transducer Package를 사용하였다. 진동 계측시간은 최고 진동 속도점의 전후 0.6초 구간으로 하였으며 필자가 제작한 전송 및 그래픽 프로그램들을 이용하여 계측데이터를 컴퓨터에 전송하고 그래프를 재구성하였다.⁶⁾ 또 발파진동의 로그정규분포에 근거하여 환산거리에 의한 발파진동 예상치를 통계적으로 처리하고 작도하는 프로그램과 이의 해석에 사용되는 환산거리 다이어그램을 제작하였다.⁶⁾

3. 발파형태에 따른 지반진동 특성

3.1 자승근과 입방근

발파진동의 피해는 대체로 최대 입자속도에 좌우되고 입자속도는 환산거리의 함수로 표시된다.

종래의 입지상수는 입자속도와 환산거리의 비례관계를 이용하여 선형회귀분석법으로 입지상수를 결정하였는데 이는 평균적인 예상치이므로 적절한 안전율이 필요하다. 본 연구에서는 입자속도의 로그분포특성을 이용하여 로그표준편차 σ 를 구하고 50, 95 및 99%의 데이터

를 포함하는 설계용 진동한계 직선식을 적용하였다.⁶⁾

Table 1은 실제측 8개 지역과 문헌자료 2개 지역에 대하여 입지상수를 구한 것이다. 여기서 환산거리는 자승근($m/kg^{1/2}$) 또는 입방근($m/kg^{1/3}$)의 두가지로 각각 계산하였으며 표에서 K_0 , K_1 , K_2 는 50, 95 및 99%의 신뢰구간을 갖는 발파진동상수이고 n 은 감쇠지수, r 은 상관계수이다.

대산산업을 제외하고는 조사대상 전체에서 삼승근 환산거리가 자승근 환산거리보다 상관관계가 0.02정도 더 높았다. 그러나 이들을 종합한 건설계, 광산계 및 총계에서는 모두 자승근 환산거리의 상관관계가 삼승근보다 0.04정도 더 높았다.

개별 계측의 경우 장약량이나 거리 및 지반조건의 변화가 비교적 적다는 점을 감안한다면 자승근 환산거리는 이러한 변화가 클때 더 적용성이 높은 것으로 판단된다. 그러나 그 차가 근소하기 때문에 어느 쪽을 사용하여도 무관하리라 생각된다.

진동한계 직선식을 구하는 것은 구조물에 피해를 발생시키지 않도록 장약량을 합리적으로 조정하기 위한 것이다. 대개 발파작업장과 시설물 또는 민원대상 주거 구조물 사이의 거리는 이미 결정되어 있으므로 먼저 구조물의 허용 입자진동속도를 결정하고 실측하여 구한 진동한계 직선식에서 한계 환산거리를 결정하면 이로부터 최대 허용장약량을 유도할 수 있다.

한편 5, 10, 25mm/s의 진동수준에 대한 95% 신뢰구간의 자승근 환산거리를 구한 결과는 Table 2와 같다. 5mm/s수준에 대하여 건설지역의 95% 신뢰구간 환산거리는 30~55m/kg^{1/2}의 범위였으며 건설발파 지역 전체에 대하여는 57m/kg^{1/2}이었다. 10mm/s수준에 대하여는 10~

Table 1. Site factors of studied sites.

Sites	Nr. of Measured points	Square root scaled distance					Cubic root scaled distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
Dogok site	44	.938	361	1070	1678	-1.404	.943	2211	6268	9648	-1.493
Bongsun site	24	.862	147	444	702	-1.308	.873	303	879	1367	-1.393
Duknam site	34	.894	582	1389	1991	-1.403	.911	1383	3083	4297	-1.486
Daebul base	28	.898	819	2008	2912	-1.495	.902	184	4402	6340	-1.517
Pyungtaek site	10	.780	26	43	53	-0.602	.787	25	42	51	-0.596
Construction	142	.889	358	1163	1896	-1.348	.850	1232	4794	8413	-1.472
Namil Quarry	20	.883	88	218	316	-1.127	.888	210	508	732	-1.189
Daesan Quarry	17	.878	295	822	1255	-1.361	.821	546	1855	3077	-1.279
Samyoung Q.	3	.969	32	39	43	-0.889	.989	109	124	131	-1.059
Total Q.(GD)	40	.864	90	252	387	-1.071	.842	168	508	804	-1.046
Samcheok Q.*	23	.848	166	364	504	-1.335	.865	514	1083	1474	-1.340
Donghae Q.*	14	.802	457	1514	2486	-1.453	.815	6380	20411	33032	-1.624
Total(ANFO)	37	.811	337	996	1558	-1.484	.650	520	2116	3783	-1.221
Total Quarry	77	.837	119	350	548	-1.160	.755	161	588	1007	-0.980
Total site	219	.858	243	834	1391	-1.283	.815	623	2518	4487	-1.305

*Data of Samcheok and Donghae Quarry are obtained from references.

Transverse component of Samcheok Q. were not measured.

Peak particle velocity was calculated by equation, $V_p = \sqrt{(\overline{Vr}^2 + \overline{Vv}^2 + \overline{Vt}^2)}$

35m/kg^{1/2}의 범위였고 미국 OSM(Office of Surface Mining, 지표채굴국)의 진동 허용수준인 1in./s에 대하여는 2~20m/kg^{1/2} 정도였다. 채석에 대하여는 5mm/s수준에 대하여 25~51m/kg^{1/2}, 10mm/s수준에 대하여 15~32m/kg^{1/2}, 1in./s수준에 대하여 7~17m/kg^{1/2}로 건설발파보다 약간 낮은 경향이며 대상지역 전체는 5mm/s에 대하여 54.0m/kg^{1/2}, 10mm/s에 대하여 31.4m/kg^{1/2}, 1in./s에 대하여 15.4m/kg^{1/2} 등이었다.

OSM이 제안한 수준을 SI단위계로 환산하면 22.6, 24.9, 27.2m/kg^{1/2}가 되므로 Table 2의 결과들은 OSM조건에 비해 대상지역들의 허용한

산거리가 비교적 낮음을 보여주고 있다. 이것은 대체로 각 대상지역에 대한 계측수가 많지 못하고, 미국의 경우에 비하여 장약 규모가 아주 적으며 미국에서는 주로 노천채탄이 많고 ANFO를 사용하는데 비하여, 우리나라는 채석장에서 폭속이 빠른 다이ना마이트를 주로 사용하기 때문으로 생각된다. 그 외에도 우리나라 암반의 특성이나 화약류의 성질 및 발파방식의 차이 등이 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

우리나라는 노천채탄이 전혀 없고 추후로도 주로 암반에 대하여 다이ना마이트를 사용하는 일이 당분간 계속될 것이므로, 국내에서 적용될 발파 허용 환산거리는 본 연구결과에 의거,

10mm/s수준에 대하여 40, 5mm/s에 대하여는 60으로 하고 각 지역별로 시험발파 성적을 참조하여 그 이하의 환산거리도 가능하게 함이 합리적일 것으로 생각된다.

3.2 우세성분

측정성분의 우세방향은 측정지역의 지형이나 측정점의 거리 및 발파방향 등에 따라 달라지지만 대개의 경우 진행방향성분, 수직방향성분 그리고 접선방향성분의 순으로 우세하다. 본 연구에서도 이와 같은 경향을 볼 수 있었다 (Table 3).

남일 석회석 광산은 지표하 20~30m가량의 계곡형 채석장이고 천공방향이 대부분 수평방향이어서 특히 수직성분이 우세했던 것으로 판단된다.

3.3 발파환경과 진동특성

1) 산업별

Fig.1은 대상지역 전체에 대해 환산거리와 입자진동속도를 처리한 결과이며, Fig.2는 건설지역에 대한 결과이고, Fig.3은 채석장 지역에 대한 결과이다.

연구대상지역 전체의 입지상수 K는 242이고 감쇠지수 n은 -1.283이었다. 142개 측정으로부터 구한 건설지역의 입지상수는 357이고 감쇠지수는 -1.348이었으며 측정수가 77개인 채석장에 대한 입지상수는 118, 감쇠지수는 -1.160이었다.

Devine에 의하면 입지상수는 0.675~4.04in./s로 평균 1.85in./s이고 감쇠지수 즉 기울기가 -1.083에서 -2.346이며 평균 -1.536으로 보고하였는데 대상지역의 기울기는 비교적 낮은 편에 속하였다. 입지상수는 Devine의 보고치가 대단히 적은 값이어서 비교가 곤란하였다.⁹⁾

Table 2. Limit of scaled distances for 3 vibration levels.

Site	Number of Measured points	Site factors of 95 % confidence		Limit of scaled distances (m/kg ^{1/2})		
		K ₁	n	5mm/s	10mm/s	25mm/s
Dogok site	44	1070	-1.404	45.7	27.9	14.5
Bongsun site	24	444	-1.308	30.9	18.2	9.0
Duknam site	34	1389	-1.403	55.2	33.7	17.5
Daebul Base	28	2008	-1.495	55.2	34.7	18.8
Pyungtaek site	10	43	-0.602	35.7	11.3	2.5
Total Construction	142	1163	-1.348	57.0	34.1	17.3
Namil Quarry	20	218	-1.127	28.5	15.4	6.8
Daesan Quarry	17	822	-1.361	42.5	25.5	13.0
Total Quarry(GD)	40	252	-1.071	38.9	20.3	8.6
Samcheok Quarry	23	364	-1.335	24.8	14.8	7.4
Donghae Quarry	14	1514	-1.453	51.0	31.7	16.8
Total ANFO	37	996	-1.484	35.4	22.2	12.0
Total Quarry	77	350	-1.160	39.0	21.4	9.7
Total sites	219	834	-1.283	54.0	31.4	15.4

Table 3. Prevail vibration components.

Site	Nr. of Measured points	Prevail component				Remark
		r	v	t	unknown	
Dogok site	44	22	12	10	1	r=v 1 data
Bongsun site	24	13	6	2	3	
Duknam site	34	25	7	2	0	
Daebul Base	28	16	8	5	0	r=t 1 data
Pyungtaek site	10	5	6	0	0	r=v 1 data
Total construction	142	82 (57)	40 (28)	19 (13)	4 (3)	Including Choonyang data
Namil Quarry	20	5	15	0	0	
Daesan Quarry	17	5	10	1	1	
Samyoung Q.	3	2	1	0	0	
Samcheok Q. *	18	1	3	—	0	transverse not m.
Donghae Quarry	15	7	3	5	0	r=t 1 site
Total quarry	73	34 (47)	32 (44)	6 (8)	1 (1)	
Total site	215	116 (53)	72 (33)	25 (11)	6 (3)	

* 5 data of Samcheok Quarry with vertical component only were excluded.

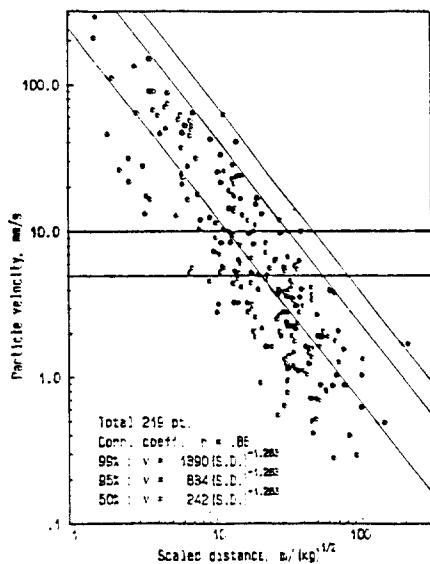


Fig.1 Distribution of peak particle velocities(total).

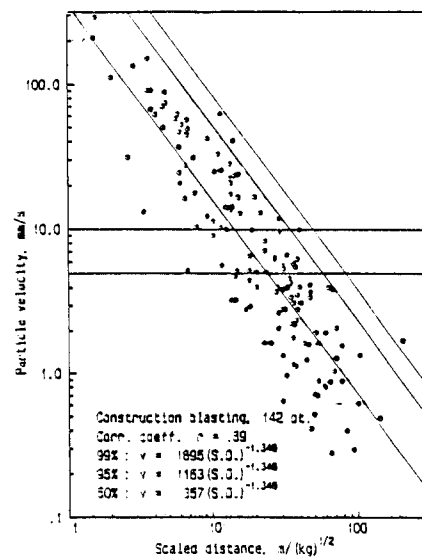


Fig. 2 Distribution of peak particle velocities (construction sites).

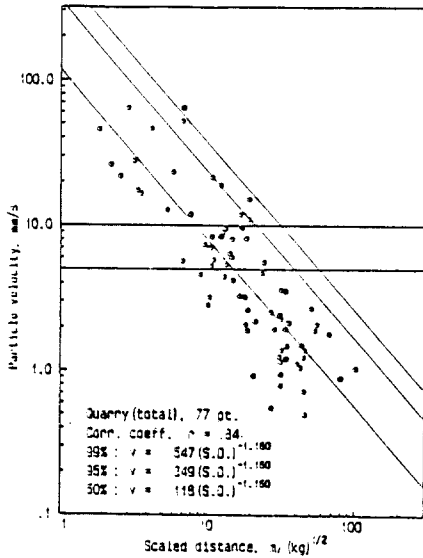


Fig. 3 Distribution of peak particle velocities (quarries).

Oriard는 평균예상선의 식에서 입지상수를 21.9in./s. 감쇠지수를 1.54로 제시하였는데⁸⁾ SI단위계에서 입지상수는 164mm/s에 해당한다. 따라서 본 연구에서 계산한 값들은 이보다는 약간 높은 것이다.

한편 Fig.4는 산업별 발파진동수 특성을 나타낸 것으로 건설발파, 채석발파 및 총팔에서도 10~20Hz가 가장 우세하며 5~30Hz가 절반 이상을 차지하고 있음을 볼 수 있다.

발파 주진동수는 지층의 두께나 측정거리, 지발간격 등에 따라 달라지는 것이지만 폭원으로 부터 멀어질수록 진동수가 낮아진다는 점을

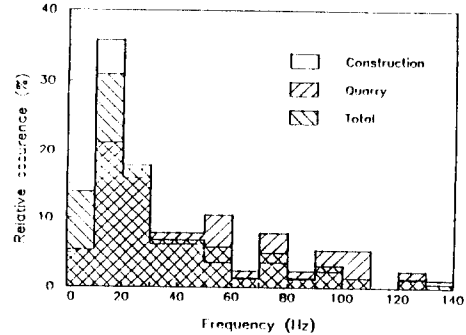


Fig. 4 Dominant frequencies.

고려하면, 상당 부분의 진동이 낮은 총 주맥들의 고유진동수인 10Hz내외에 분포하고 있다는 점은 발파피해 산정과 장약량 설계에 있어 유의해야 될 점으로 생각된다.

2) 제발과 지발

발파현장에서는 경제적인 이유 뿐만 아니라 관습적으로 제발발파를 선호하고 있다. 그러나 발파민원이 점증하고 있으므로 발파진동 허용 기준을 적용할 경우 발파규모가 현저하게 제약되기 때문에 부득이 지발발파(段別發破)를 할 수 밖에 없는 경우가 많아질 것이다. 지발의 경우 동시에 발파되는 장약량이 총장약량에 비해 현저히 작아지지만 각 단별로 발파되는 파형이 중복되어 예기치 않는 큰 진동이 일어날 것으로 우려하는 실무자가 많다.

Table 4와 Fig.5는 지발과 제발의 경우를 구분하여 표시한 것이다. 지발발파의 장약량은

Table 4. Site factors for blasting methods.

Blasting method	Nr. of Measured points	Square root scaled distance					Cubic root scaled distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
Instantaneous	132	.894	338	1099	1792	-1.350	.839	1083	4537	8209	-1.446
Delayed	50	.755	108	387	657	-1.015	.808	281	885	1425	-1.124
Total*	219	.858	243	834	1391	-1.283	.815	623	2518	4487	-1.305

* Include Samcheok and Donghae data.

단당 최고장약량으로 하였다. 그 결과 환산거리 10m/kg^{1/2}이하에서 지발발파가 제발발파보다 다소 낮은 진동속도를 보였으나 10~30m/kg^{1/2}의 범위에서는 두발파방법 사이에는 큰 차이가 없어 단별 발파진동의 중복 효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig.6~9는 덕남정수장에서 임의설계로 실시한 발파진동 형태로 각각 순발, 제발, 소규모 지발 및 대규모 지발의 진동 파형과 진동수 분포를 보인 것이다. Fig.6과 Fig.7은 순발과 제발(동시)발파의 결과로 거리가 40m인 제발발파보다 110m인 순발발파의 진동 지속시간이 약간 더 길다는 것을 알 수 있다. Fig.8과 9는 크게 다르지 않은 거리에서 계측한 2단 및 다단 지발발파의 진동 계측결과로 2단 지발은 4단 지발보다 파형이 단순하고 주진동수도 특정 진동수가 우세해져 간단함을 알 수 있다. 특히 다단 지발의 경우 진동수 분포가 다양하였다. 이러한 경향은 채석장에서의 계측에서도 확인할 수 있다.

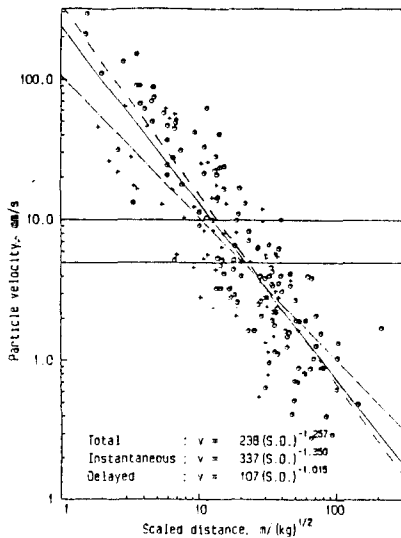


Fig.5 Prediction of peak particle velocities for delayed and instantaneous blasting.

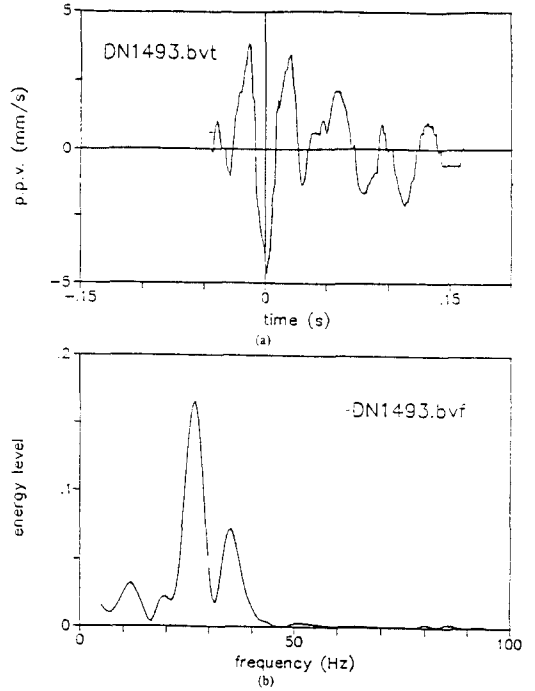


Fig.6 Wave form and frequency distribution of a single blasting record.

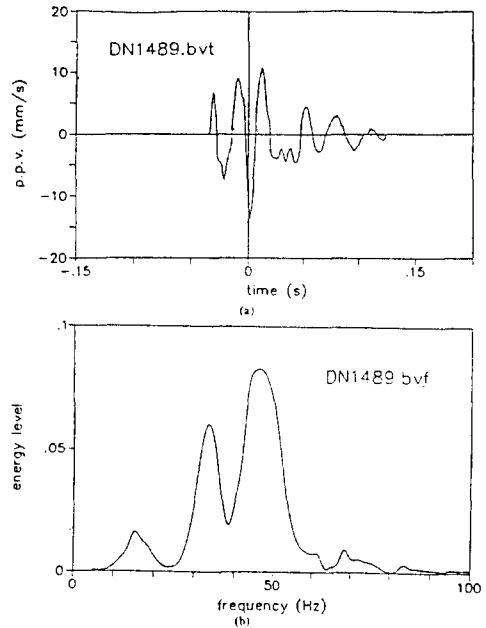


Fig.7 Wave form and frequency distribution of an instantaneous blasting record.

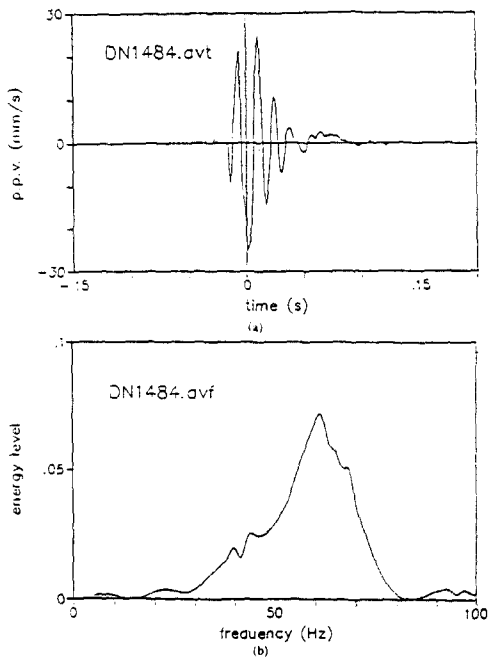


Fig.8 Wave form and frequency distribution of a small scale delayed blasting record.

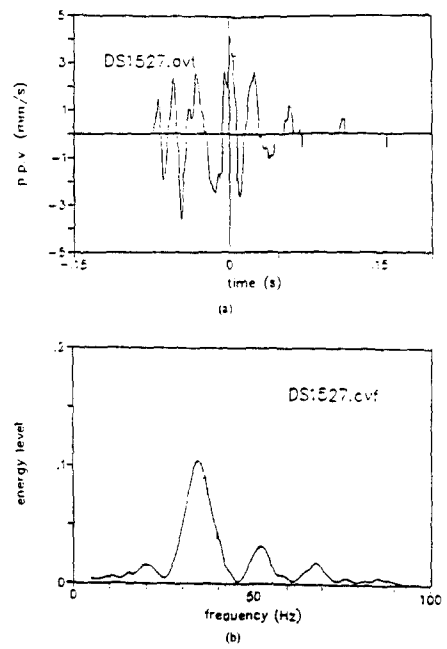


Fig.10 Wave form and frequency distribution of a small scale instantaneous blasting record measured at close distance.

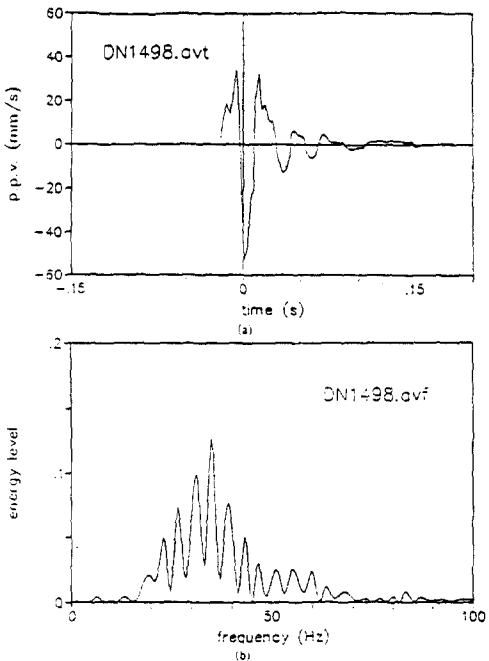


Fig.9 Wave form and frequency distribution of a large scale delayed blasting record.

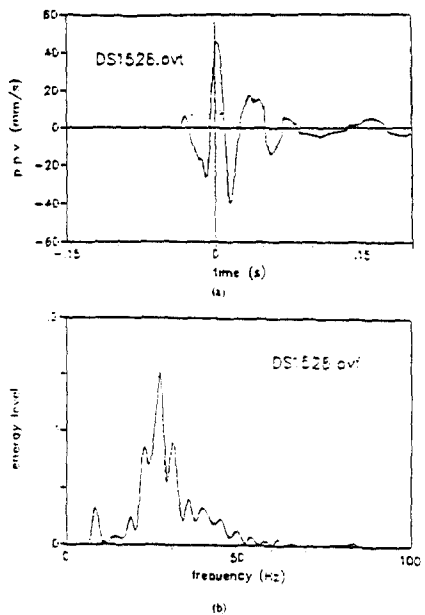


Fig.11 Wave form and frequency distribution of a large scale delayed blasting record measured at close distance.

Fig.10~11은 대산산업 채석장의 발파기록이다. 근거리에서 측정한 소량 제발발파와 대량 지발발파의 진동기록으로부터 지발발파는 제발에 비해 진동지속 시간이 길어지고 진동수 분포가 다양해짐을 알 수 있다. 한편 원거리 대규모 제발발파의 진동기록을 비교해 보면 제발 발파임에도 불구하고 전달거리의 증대에 따라 진동 지속시간이 길어지고 파형도 복잡해지나 대체로 저주파 진동수가 우세함을 확인할 수 있다(Fig.12).

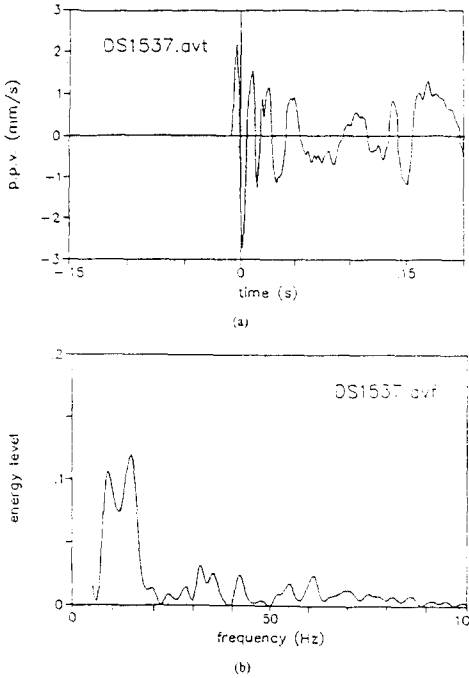


Fig.12 Wave form and frequency distribution of a large scale instantaneous blasting record measured at close distance.

Dowding은 진동이 전달되는 매질의 종류에 따라 암반보다는 토양층이, 거리에 따라 근거리 보다는 원거리에서 고주파 진동수가 감소되어 저주파 진동수가 우세해진다고 하였다.⁸⁾ 이 연구에서도 이와 같은 경향을 확인할 수 있으

나 지층조건 등에 대해서는 자료의 획득이 여의치 않아 개략적인 경향성 만을 확인할 수 있다.

3) 발파규모

Table 5와 Fig.13은 발파규모별로 환산거리와 진동속도의 관계를 보였다. 전체에 대한 입지상수가 243, 감쇠지수가 -1.283인데 대하여 100kg이하, 200kg이하, 1000kg이하, 1000kg이상의 네 군으로 나누어 구한 입지상수는 131~753, 감쇠지수는 -1.071~-1.697의 범위로 변하고 있다. 그러나 그림에서 보면 그 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

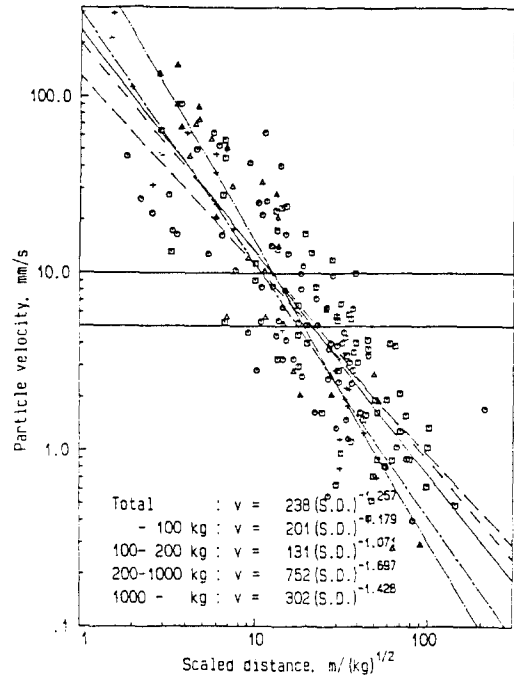


Fig.13 Distribution of peak particle velocities for different blasting scale.

환산거리 10m/kg^{1/2}이하에서는 대량의 장약을 하는 경우 평균보다 다소 높은 진동속도가 예상되며 환산거리가 큰 경우에는 평균보다 낮은 값이 예상되며 10~30m/kg^{1/2}의 범위에서 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

Table 5. Site factors for blasting scale.

Blasting Scale(kg)	Nr. of Measured points	Square root scaled distance					Cubic root scaled distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
- 100	62	.770	202	705	1183	-1.179	.752	315	1148	1960	-1.217
100 - 200	67	.793	131	464	782	-1.071	.802	263	907	1515	-1.104
200 -1000	30	.924	753	2204	3438	-1.697	.926	4955	14290	22155	-1.758
1000 -	23	.965	303	723	1036	-1.428	.959	1715	4356	6408	-1.426
Total*	219	.858	243	834	1391	-1.283	.815	623	2518	4487	-1.305

* Include Samcheok and Donghae data.

Table 6. Site factors for blasting scale.

Measuring Distances(m)	Nr. of Measured points	Square root scaled distance					Cubic root scaled distance				
		r	K ₀	K ₁	K ₂	n	r	K ₀	K ₁	K ₂	n
- 50	41	.769	118	391	642	-0.951	.728	300	1121	1906	-1.184
50 - 100	58	.861	294	1076	1842	-1.296	.863	4312	15672	26740	-1.901
100 - 200	47	.875	518	1500	2329	-1.446	.867	15660	46722	73460	-2.121
200 -1000	23	.909	301	822	1248	-1.404	.868	6961	23133	38031	-1.858
1000 -	13	.390	11	35	58	-0.554	.427	72	236	387	-0.816
Total*	219	.858	243	834	1391	-1.283	.815	623	2518	4487	-1.305

* Include Samcheok and Donghae data.

4) 계측거리

Table 6과 Fig.14는 계측거리별로 환산거리와 진동속도의 관계를 보였다. 계측거리를 50m이내, 100m이내, 200m이내, 1000m이내와 1000m이상의 다섯 군으로 나누어 진동예상식을 구한 결과, 입지상수는 10~517의 범위이고 감쇠지수는 -0.554에서 -1.446으로 변동의 폭이 컸다. 특히 그림에서 보는 바와 같이 50m이하와 1000m이상인 군은 전체 평균과 크게 다른 회귀식을 보이고 있다. 이는 극단으로 가깝거나 먼 경우 장약량의 조절로 얻어질 수 있는 환산거리의 변동폭이 광범위하지 못하기 때문에 왜곡된 결과가 얻어지는 것으로 판단된다. 50~1000m의 세군은 예상선과 잘 부합하는 결과를 보여주었다.

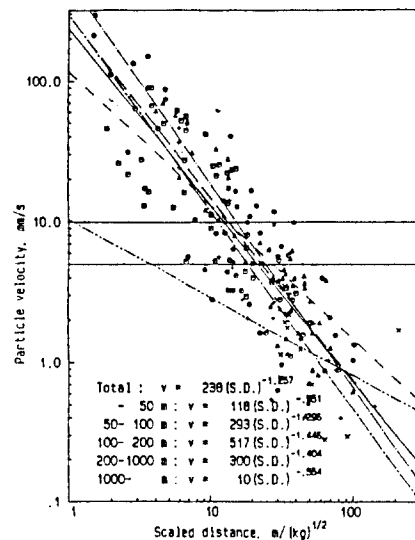


Fig.14 Distribution of peak particle velocities for different measuring distances.

4. 결 론

3개 광산과 5개 건설지의 지표발파에 대한 진동을 측정하고 문헌조사한 2개 지역의 자료를 같이 분석한 결과 지표발파의 진동특성에 대하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 개별 계측의 경우는 지반의 변화 등이 적어 자승근 환산거리보다 삼승근 환산거리의 적합도가 약간 높았다. 그러나 각 지역간의 비교 또는 산업별 종합, 전체를 나타낸 경우는 자승근 환산거리의 적합도가 높았다.
- 2) 계측지역 전체의 5mm/s수준에 대한 95% 신뢰구간 환산거리는 $54\text{m/kg}^{1/2}$, 10mm/s수준에 대하여는 $31\text{m/kg}^{1/2}$ 이고 미국 OSM(Office of Surface Mining, 지표채굴국)의 진동허용수준인 1in./s 에 대하여는 $15\text{m/kg}^{1/2}$ 로 OSM조건에 비해 허용 환산거리가 비교적 낮다. 따라서 우리나라의 발파 허용 환산거리는 10mm/s수준에 대하여 $40\text{m/kg}^{1/2}$, 5m/s에 대하여는 $60\text{m/kg}^{1/2}$ 으로 하고 각 지역별로 시험발파 성적을 참조하여 그 이하의 환산거리도 가능하게 함이 합리적일 것이다.
- 3) 측정성분의 우세방향은 대개 진행방향성분, 수직방향성분 그리고 접선방향성분의 순으로 우세하였다.
- 4) 연구대상지역 전체의 입지상수 K는 242이고 감쇠지수 n은 -1.283 이었다. 건설지역의 입지상수는 357이고 감쇠지수는 -1.348 이었으며 채석장의 입지상수는 118, 감쇠지수는 -1.160 이었다.
- 5) 발파진동수 특성은 건설발파, 채석발파 및 총괄에서 모두 10~20Hz가 가장 우세하며 5~30Hz가 절반 이상으로 낮은 층 주벽들의 고유진동수인 10Hz 내외에 분포하고 있어 발파피해 산정과 장약량 설계에 있어

유의해야 될 것이다.

- 6) 환산거리 $10\text{m/kg}^{1/2}$ 이하에서 지발발파가 제발발파 보다 다소 낮은 진동속도를 보였으나 10~30m/kg^{1/2}의 범위에서는 두 발파방법 사이에는 큰 차이가 없어 지발 발파진동의 중복 효과는 크지 않은 것으로 판단된다.
- 7) 동시발파보다는 지발이, 근거리 보다는 원거리의 경우가 더 발파진동지속시간이 길었다. 지발발파는 동시발파보다 파형이 복잡하고 우세 진동수도 다양하였다.
- 8) 진동속도의 크기는 발파규모의 영향이 크지 않았으나 환산거리가 아주 작거나 큰 경우에는 차이가 있었다. 거리별로도 50m 이내나 1000m 이상의 경우와 같이 극단으로 가깝거나 먼 거리의 자료만으로는 보편적인 자료를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

감사의 말

이 연구는 학술진흥재단의 '90 지방대 육성 연구비의 지원으로 수행되었으며 관계자 제위께 감사드립니다. 발파진동 계측에 도움을 주신 (주)광주고속 건설사업부 외 여러분들께 감사드립니다. 계측에 많은 수고를 아끼지 않은 대학원의 주재성 박사. 자원공학과 김태기 조교에게도 감사합니다.

참 고 문 헌

- 1) 우형수, 廉永夏, 玄炳九, 金東基, 李慶雲, "爆破作業이 施設物에 미치는 影響," 大韓鑛山學會誌 第4卷(1967), pp. 81-93.
- 2) 柳暢夏, 李正仁, "發破作業에 依한 地盤振動이 地上構造物에 미치는 影響에 關한 研究," 大韓鑛山學會誌 第16卷(1979), pp. 41-50.

- 3) 李慶雲, 金旻圭, “石灰石 採石場의 大規模 發破에 대한 發破振動,” 大韓鑛山學會誌 第24卷(1987), pp.320-327.
- 4) 李慶雲, 金旻圭, 申僖淳, “火藥, 岩石強度 및 發破類型이 發破振動에 미치는 影響,” 大韓鑛山學會誌 第21卷(1984), pp.334-339.
- 5) 金雄秀, “發破振動式 確立과 制御發破 指針 決定을 위한 研究報告書,” 江原大學校 産業 技術研究所(1983), pp.1-168.
- 6) 梁亨植, 朱宰成, “노천굴발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구,” 한국자원공학 회지 第27卷(1990), pp.316-323.
- 7) 河槿東, 金載極, “모형실험에서의 Decoupling 効果에 관한 研究,” 大韓鑛山學會誌 第23卷(1986), pp. 172-182.
- 8) Dowding, C.H., Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., (1985), pp.297.
- 9) Devine, J.R., “Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations,” Highway Research Record 135, Highway Research Board, National Research Council, National Academy of Sciences, (1966), pp. 35-42.