

발파공 사이의 지연시차와 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향

강추원, 류복현*, 최태홍

Influence of Delay Time and Priming Location on the Blast-Induced Ground Vibration

Choo Won Kang, Bok Hyun Ryu*, Tae Hong Choi

Abstract In order to identify the characteristics of the propagation depending on delay time (20, 25 ms) and priming location (top priming, middle priming, bottom priming), test blasts were carried out a total of 4 times using different spacing, burden, drilling length, charge per delay and was derived the formula to predict blast vibration. This study investigated the characteristics of vibration by analysis of the nomogram and prediction of Peak Particle Velocity (PPV) from delay time and priming location by the formula to predict ground vibration. And it analyzed the trends of vibration increase by standards charge 0.5, 1.6, 5, 15 kg. Standards charge is "Blasting design and construction guidelines to road construction" by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Depending on the charge in favor of vibration control method is proposed. Thus, when the design was to be used as a variable.

Key words Delay time, Priming location, Ground vibration, PPV

초 록 본 연구는 현재 제품화 되고 있는 뇌관의 지연시차인 20, 25 ms의 지연시차와 기폭위치(정기폭, 중간기폭, 역기폭)에 따라 발파에 의한 지반진동의 전파특성을 파악하기 위해 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량을 달리하여 총 4회의 시험발파를 실시하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 도출된 평균 지반진동 예측식을 통해 지연시차와 기폭위치에 따른 최대입자속도의 노모그램 분석을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토교통부의 "도로공사 노천발파 설계 시공 지침 및 요령"에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15 kg을 적용하여 진동중가율을 비교분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다.

핵심어 지연시차, 기폭위치, 지반진동, 최대입자속도

1. 서 론

오늘날 우리사회는 산업화 과정을 통하여 고도의 성장을 지속해오는 동안에 등한시 되었던 환경문제, 특히 건설 분야에서는 소음·진동 문제가 최근에는 급속히 부상되고 있다. 이는 양적인 성장에서 질적인 성장으로

변화를 추구하고 있는 상황이다. 또한, 정부차원에서도 이와 같은 현실을 고려하여 환경피해의 규제를 위한 수단으로 환경 분쟁 조정위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있는 실정이다. 이러한 상황에 의해 발파에 의한 작업은 더욱 규제를 받게 되었고, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적인 진동제어 방법을 찾고 있으며, 발파설계를 실시할 때 효율성, 안정성 및 안전성 등의 설계변수들 중에서도 안전성을 가장 우선적인 기준으로 고려하고 있다.

Kim et al.(2012)은 기폭위치에 따라 지반진동의 전파 특성을 파악하기 위해 공간격, 저항선, 천공장, 장약량 등을 달리하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 도출된 지반진동 예측식으로 기폭위치에 따른 최대입자속

Received: Feb. 5, 2014

Revised: Feb. 21, 2014

Accepted: Feb. 21, 2014

***Corresponding Author:** Bok Hyun Ryu

Tel) +82625719020, Fax) +82625719021

E-Mail) pogryu@hanmail.net

KPecoENC, (2nd Floor) 15 Ilgokmaeul-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

도의 노모그램 분석을 통한 진동특성을 규명하였고, 기폭위치별 진동 감쇠경향을 비교분석하였다. Song et al.(2004)은 국내 석회석 광산에 적용되는 지발시차는 20 ms나 25 ms로 한정되어 있으며 기폭시차의 오차에 따른 진동 예측의 불확실성 및 파쇄입도의 불균일 등의 한계점에 당면했다고 한다. 따라서 기폭 시스템보다는 발파 규모를 줄이고 있는 실정이다. 이는 환경적인 측면에 맞추기 위하여 기술적인 측면을 고려하지 못하는 방법으로 발파가 이루어지고 있기 때문에, 이를 개선하고 보다 더 효과적인 발파를 시행하기 위하여 정확한 초시의 전자뇌관을 적용하여 현장에 경제성을 향상시키고, 환경적인 측면에서도 만족할 수 있는 최적의 기폭시차에 대해 연구하였다. 그리고 Wang Zhenyu et al.(2013)은 진동데이터의 시간 이력곡선에서 정보를 추출하는데 효과적인 시간-주파수 분해 방법인 WT(Wavelet Transform)와 HHT(Hibert Haung Transform)를 사용하였다. 이 방법을 사용하여 MS발파에서 진동 에너지 분석에 의해 지연시차 확인하는 비교연구를 수행하였다. 그 결과 진동데이터의 노이즈 제거 뿐만 아니라 MS 발파의 진동감쇠 메커니즘을 조사하는데 매우 유용하다고 하였다.

이에 본 연구는 현재 제품화 되고 있는 뇌관의 지연시차인 20, 25 ms의 지연시차와 기폭위치(정기폭, 중간기폭, 역기폭)에 따라 발파에 의한 지반진동의 전파특성을 파악하기 위해 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량을 달리하여 다단발파기를 사용한 총 4회의 시험발파를 실시하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 도출된 평균 지반진동 예측식을 통해 지연시차와 기폭위치에 따른 최대입자속도의 노모그램 분석을 통해 진동특성을 규명하였고, “도로공사 노천발파 설계 시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15 kg(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006)을 적용하여 진동증가율을 비교분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 연구지역의 지형 및 지질

본 연구지역은 군산시 성산면 성덕리 산 2-1번지로 장항~군산간 29번 국도상의 당선리와 금강하구둑을 지나 요동에서 북동측으로 분지된 709호선 지방도를 따라 약 4 km지점에 위치한다. 노령산맥과 차령산맥 남서연장부에 해당하며 실험지역 일대에는 북동방향의 능선(망해산 230.3 m ~ 취성산 205.0 m ~ 용천산 141.0 m)



Fig. 1. Site map of study area

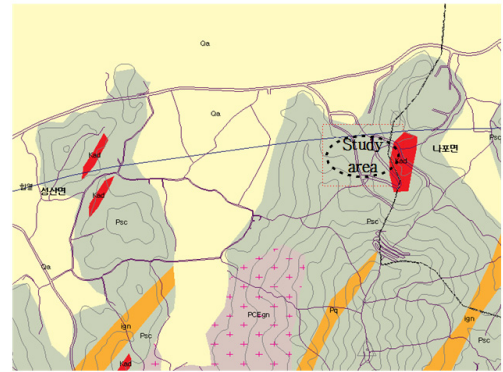


Fig. 2. Geological map of study area

과 남북 방향의 오성산(227.7 m) 능선이 발달한 지역이다(Fig. 1).

연구지역의 지질은 광역적으로 살펴보면, 함열도폭(1:50000) 남동부일대에는 고생대 편마암류를 포함한 변성퇴적암류를 기반암으로 하고 중생대 쥐라기로 추정되는 편마암류와 후기에 이들을 관입한 백악기 관입암류(섬록암, 석영반암, 암맥) 등으로 구성된다. 석영반암은 중생대 백악기 관입암류로 함열도폭 북부에 주로 발달했다. 편암은 함열도폭 북서부 구릉지대에 주로 분포하고, 하부로부터 편암류, 함라산층, 규암층 순으로 구성된다(Fig. 2).

3. 현장실험 방법 및 결과

3.1 실험 방법

본 연구의 현장실험은 다단발파기를 사용하여 총 4회의 시험발파를 실시하였다. 발파 회수별 실험조건과 발파패턴은 Table 1, Fig. 3과 같다.

Table 1. Experimental conditions

Sequential blast No.	I			II		III		IV		
Blast No.	1	2	3	4~6	7~8	9~11	12~13	14	15	16
Explosive diameter (mm)	Emulsion type $\phi 50$									
Detonator	DS detonator									
Drill hole diameter (mm)	$\phi 76$									
Hole depth (m)	9.0						6.0			
Hole spacing (m)	3.0						2.0			
Burden (m)	2.7						1.8			
Charge per delay (kg)	14						6.4			
Priming location	Top			Middle		Bottom		Top	Bottom	
Delay time (ms)	20		25	20	25	20	25	25	20	25
Blasting holes (ea)	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2

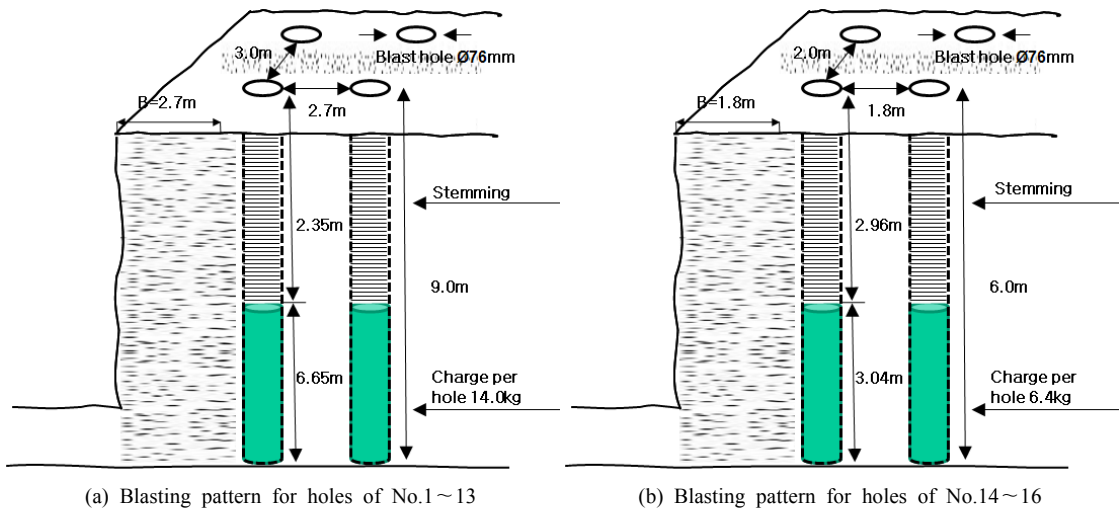


Fig. 3. Blasting pattern

폭약은 약경이 $\phi 50$ mm인 에멀전 폭약을 사용하였고, 뇌관은 순발 전기뇌관을 사용하였다.

순발 전기뇌관을 사용한 이유로는 지발 전기뇌관의 발화오차를 배제하기 위함이고, 다단식 발파기를 사용하여 발파공 사이의 지연시차를 부여하였다. 그리고 실험의 효율성을 높이기 위해 Fig. 4와 같이 다단식 발파기의 회로 별로 실험조건을 달리하여 한 번의 발파로 여러 Case의 분석 데이터를 획득하였다. 그리고 계측파형의 분리가 용이하도록 회로 당 100 ms의 시차를 두어 계측기 별로 3~5개의 분석데이터를 획득하였다.

3.2 실험 결과

Table 1의 발파조건과 Fig. 3의 발파패턴으로 총 4회에 걸쳐 실시된 지반진동 계측 결과 136개의 계측 파형을 획득하였고, 발파공 사이의 지연시차와 기폭위치 조건에 따라 파형분리를 실시하여 총 544개의 분석 데이터를 획득하였다.

지반진동의 계측은 Fig. 5와 같이 총 34대의 계측기를 사용하여 발파지점과 23~227 m의 이격거리에서 실시하였고, 연구지역의 현장실험을 통해 얻어진 분석 데이터는 Table 2와 같다.

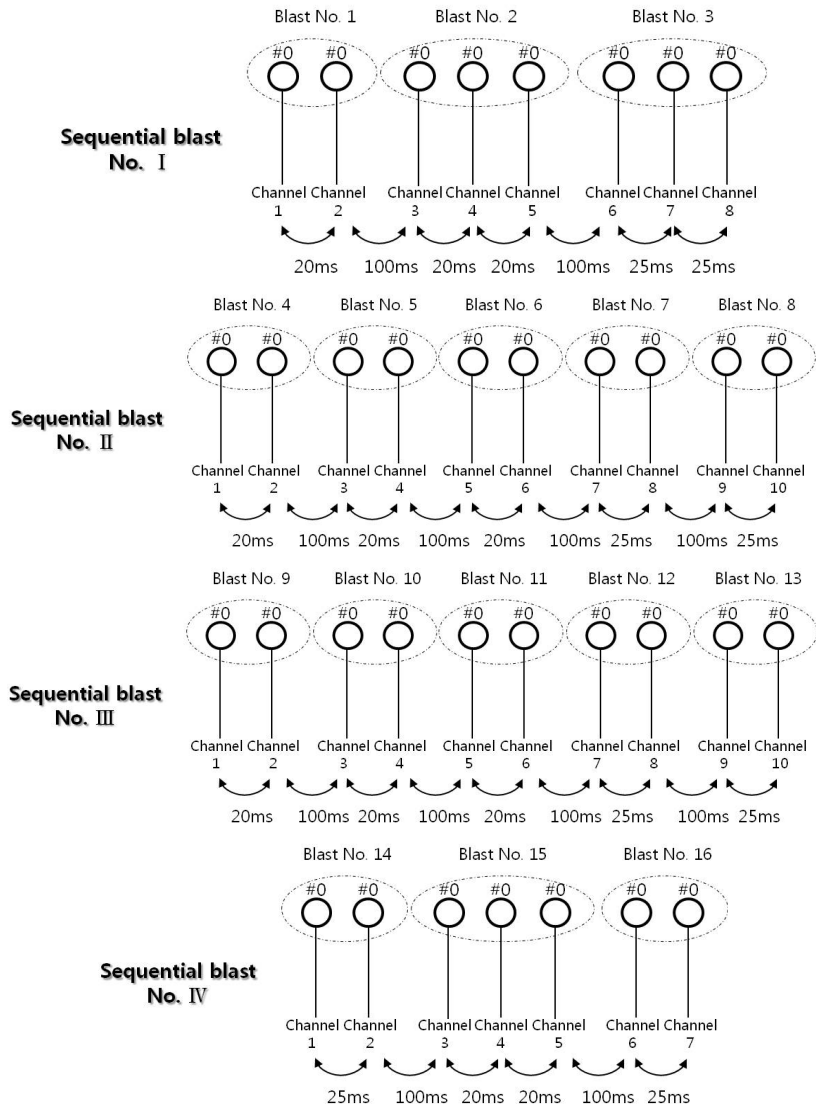


Fig. 4. Circuit of sequential blasting



Fig. 5. Measurements of ground vibration

Table 2. Measurement results

Sequential blast No.	Blast No.	Delay time (ms)	Priming location	PPV (cm/s)	Distance (m)	Number of data (ea)
I	1	20	Top	0.227 ~ 8.3399	27 ~ 157	34
	2	20	Top	0.262 ~ 8.4961	25 ~ 163	34
	3	25	Top	0.175 ~ 6.5978	23 ~ 167	34
II	4	20	Middle	0.0444 ~ 3.1915	35 ~ 180	34
	5	20	Middle	0.0921 ~ 3.0646	39 ~ 185	34
	6	20	Middle	0.127 ~ 6.6588	45 ~ 192	34
	7	25	Middle	0.129 ~ 8.1642	43 ~ 194	34
	8	25	Middle	0.132 ~ 7.6006	46 ~ 198	34
III	9	20	Bottom	0.138 ~ 1.2176	48 ~ 202	34
	10	20	Bottom	0.105 ~ 1.9496	50 ~ 204	34
	11	20	Bottom	0.1 ~ 1.7251	55 ~ 210	34
	12	25	Bottom	0.0683 ~ 1.9447	61 ~ 218	34
	13	25	Bottom	0.073 ~ 1.1663	66 ~ 222	34
IV	14	25	Top	0.0254 ~ 1.7788	25 ~ 175	34
	15	20	Bottom	0.0191 ~ 0.2416	58 ~ 214	34
	16	25	Bottom	0.0222 ~ 0.305	70 ~ 227	34

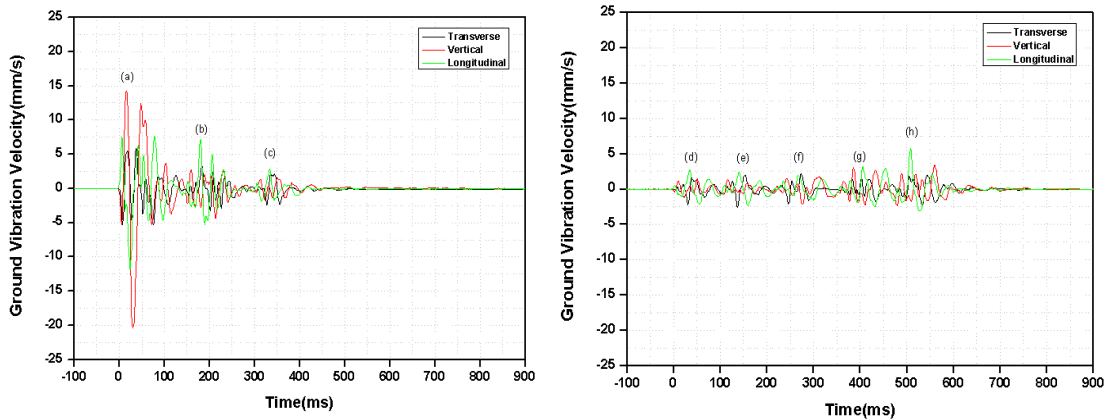


Fig. 6. Ground vibration time history of measurement results; (a) delay time=20 ms, priming location=top, distance=82 m, (b) 20 ms, top, 64 m, (c) 25 ms, top, 60 m, (d) 20 ms, middle, 98 m, (e) 20 ms, middle, 102 m, (f) 20 ms, middle, 106m, (g) 25 ms, middle, 110m, (h) 25 ms, middle, 114 m

Fig. 6의 9개 측정 파형은 전체 분석 데이터(544개) 중 대표적인 성분별 파형을 도시한 것이다. (a)는 발파 공 사이의 지연시차가 20 ms, 정기폭, 82 m의 이격거리, (b)는 지연시차가 25 ms, 정기폭, 64 m의 이격거리, (c)는 지연시차 25 ms, 정기폭, 60 m의 이격거리, (d)는 지연시차 20 ms, 중간기폭 98 m의 이격거리, (e)는 지

연시차 20 ms, 중간기폭, 102 m의 이격거리, (f)는 지연시차 20 ms, 중간기폭, 106 m의 이격거리, (g)는 지연시차 25 ms, 중간기폭, 110 m의 이격거리, (h)는 지연시차 25 ms, 중간기폭, 114 m의 이격거리에서 측정 한 파형이다. 여기서, (a)~(c)는 Sequential blast No. I 이고 (d)~(h)는 Sequential blast No. II이다.

Table 3. Case conditions and prediction equation of ground vibration

Case No.	Delay time (ms)	Priming location	Applied Blast No.	Number of data (ea)	Prediction equation
1	20	Top	1, 2	68	$V_{50} = 369.86 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$ R=0.917
2	20	Middle	4, 5, 6	102	$V_{50} = 225.36 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.97}$ R=0.875
3	20	Bottom	9, 10, 11, 15	136	$V_{50} = 135.78 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.82}$ R=0.926
4	25	Top	3, 14	68	$V_{50} = 93.64 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.79}$ R=0.937
5	25	Middle	7, 8	68	$V_{50} = 1409.32 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.22}$ R=0.932
6	25	Bottom	12, 13, 16	102	$V_{50} = 594.67 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.18}$ R=0.927

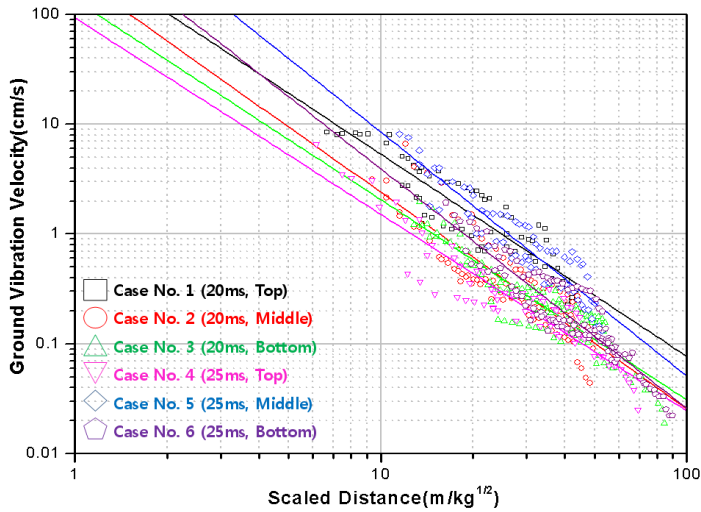


Fig. 7. Relationship between Peak Particle Velocity (PPV) and square root scaled distance

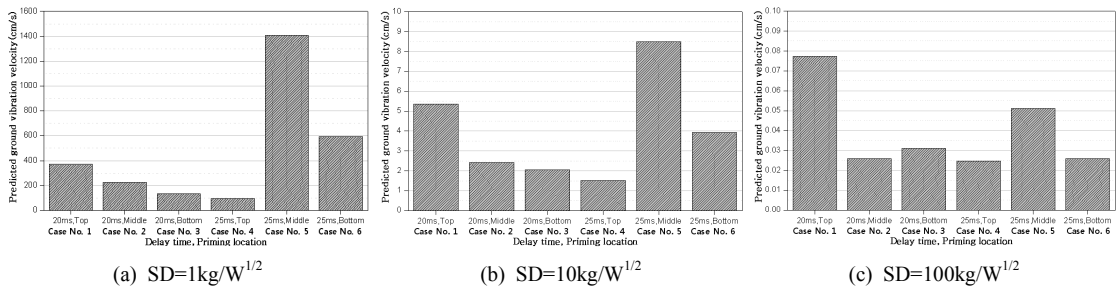


Fig. 8. Comparison to predicted ground vibration velocity by Case No.

4. 분석 및 지반진동 예측

4.1 분석

현장실험을 통해 계속된 지반진동 데이터에서 지연시차와 기폭위치별로 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV) 데이터를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 입자상수 K와 n을 구하기 위하여 진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다. 지반진동 데이터의 전산처리는 TunDesign™ 4의 보조프로그램인 TDTTestBlast를 사용하였다.

Case별로 분석한 지연시차, 기폭위치의 조건과 평균(50%) 지반진동 예측식은 Table 3과 같고, 노모그램 분석을 실시한 결과는 Fig. 7과 같다.

환산거리가 1~100 m/kg^{1/2}의 범위에서 PPV의 Case No. 별로 종합 비교한 결과는 Fig. 8과 같다.

지연시차가 20 ms인 경우 정기폭 발파방법의 진동수준이 제일 높게 예측되었다. 중간기폭 발파방법과 역기폭 발파방법의 진동수준은 역전되는 구간이 다르지만 환산거리가 29.3 m/kg^{1/2}이내에서는 역기폭 발파방법의 진동수준이 환산거리 29.4 m/kg^{1/2}이상에서는 중간기폭 발파방법의 진동수준이 제일 낮게 예측되었다.

지연시차가 25 ms인 경우 중간기폭 발파방법의 진동수준이 제일 높게 예측되었고, 정기폭 발파방법의 진동수준이 제일 낮게 예측되었다.

지연시차(20, 25 ms)와 기폭위치(정기폭, 중간기폭, 역기폭)에 의한 발파방법인 Case No. 1~6을 종합 비교해보면 환산거리가 1~100 m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 25 ms이고 정기폭(Case No. 4) 발파방법이 진동제어 측면에서 가장 유리하게 예측되었다. 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법을 제외하고 1~29.3

m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 20 ms이고 역기폭(Case No. 3), 29.4~100 m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭(Case No. 2) 발파방법이 진동제어 측면에서 유리하게 예측되었다. 이를 보면 본 분석 환산거리 범위에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 다른 발파방법보다 지반진동의 상쇄간섭이 발생하는 발파방법일 것으로 판단된다.

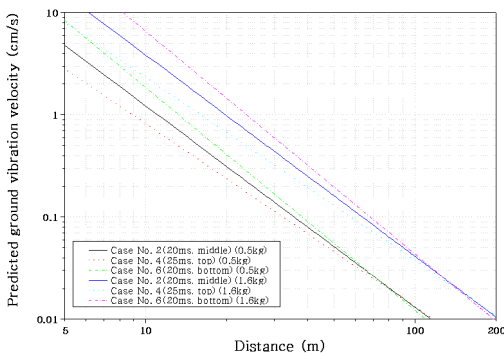
4.2 지반진동 예측

본 지반진동 예측에 사용된 지발당 장약량은 “도로공사 노천발파 설계시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15 kg을 적용하여 지연시차와 기폭위치별로 지반진동을 비교분석하였다.

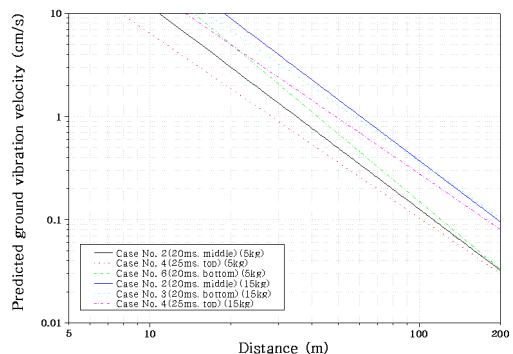
최대입자속도에 의한 지반진동을 예측하기 위해 자승근 환산거리(SRSSD)의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Fig. 9와 같이 도시하였다.

최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200 m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 3.0 kg 이내에서 발파원과 거리가 가까울수록 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 진동수준, 발파원과 거리가 멀어질수록 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 진동수준이 가장 낮게 예측되었다. 그리고 장약량이 3.0 kg 이상에서는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 진동수준이 가장 낮게 예측되었다.

지발당 장약량이 0.5 kg일 때 5~200 m까지의 거리에서 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5~80 m 구간에서는 최대 196.15% 낮게 예측되었고, 81~200 m 구간에서는 최대 29.74% 높게 예측되었다. 그리고 지연시차가 20 ms이고 중간



(a) Charge per delay=0.5, 1.6 kg



(b) Charge per delay=5, 15 kg

Fig. 9. Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for different delay time and priming location

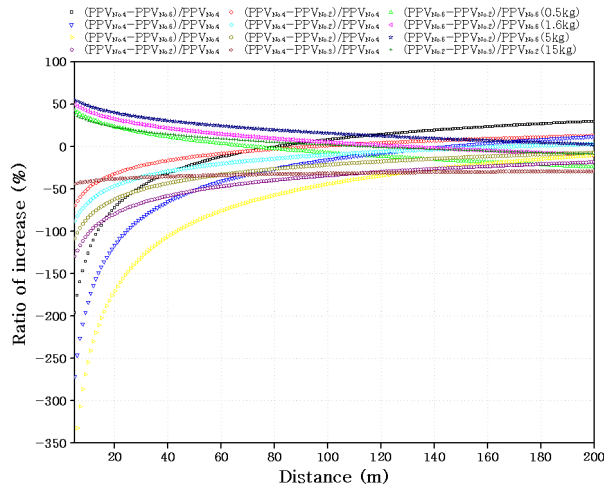


Fig. 10. Relationship between ratio of increase and distance for different delay time and priming location

Table 4. Maximum ratio of increase on rate of peak particle velocity

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum ratio of increase (%)
0.5	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.6})/PPV_{No.4}$	5 ~ 80	-196.15
		81 ~ 200	29.74
	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.2})/PPV_{No.4}$	5 ~ 92	-69.24
		93 ~ 200	12.88
	$(PPV_{No.6}-PPV_{No.2})/PPV_{No.6}$	5 ~ 71	42.85
		72 ~ 200	-24.00
1.6	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.6})/PPV_{No.4}$	5 ~ 144	-271.55
		145 ~ 200	11.85
	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.2})/PPV_{No.4}$	5 ~ 166	-87.92
		167 ~ 200	3.26
	$(PPV_{No.6}-PPV_{No.2})/PPV_{No.6}$	5 ~ 128	49.42
		129 ~ 200	-9.74
5	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.6})/PPV_{No.4}$	5 ~ 200	-(364.00 ~ 10.08)
	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.2})/PPV_{No.4}$	5 ~ 200	-(108.21 ~ 7.19)
	$(PPV_{No.6}-PPV_{No.2})/PPV_{No.6}$	5 ~ 200	55.13 ~ 2.63
15	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.2})/PPV_{No.4}$	5 ~ 200	-(129.85 ~ 18.33)
	$(PPV_{No.4}-PPV_{No.3})/PPV_{No.4}$	5 ~ 200	-(43.90 ~ 28.82)
	$(PPV_{No.2}-PPV_{No.3})/PPV_{No.2}$	5 ~ 113	37.40
		114 ~ 200	-8.87

* (+) : increase, (-) : decrease

기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5 ~ 92 m 구간에서는 최대 69.24% 낮게 예측되었고, 93 ~ 200 m 구간에서는 최대 12.88% 높게 예측되었다. 지연시차가 25

ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5 ~ 71 m 구간에서는 최대 42.85% 높게 예측되었고, 7

2~200 m 구간에서는 최대 24.00% 낮게 예측되었다. 지발당 장약량이 1.6 kg일 때 5~200 m까지의 거리에서 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5~114 m 구간에서는 최대 271.55% 낮게 예측되었고, 145~200 m 구간에서는 최대 11.85% 높게 예측되었다. 그리고 지연시차가 20 ms이고 중간기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5~166 m 구간에서는 최대 87.92% 낮게 예측되었고, 167~200 m 구간에서는 최대 3.26% 높게 예측되었다. 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5~128 m 구간에서는 최대 49.42% 높게 예측되었고, 129~200 m 구간에서는 최대 9.74% 낮게 예측되었다. 지발당 장약량이 5 kg일 때 5~200 m까지의 거리에서 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 최대 364.00%에서 최소 10.08% 낮게 예측되었고, 지연시차가 20 ms이고 중간기폭의 예측진동속도에 비해 최대 108.21%에서 최소 7.19% 낮게 예측되었다. 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭의 예측진동속도에 비해 최대 55.13%에서 최소 2.63% 높게 예측되었다. 지발당 장약량이 15 kg일 때 5~200 m까지의 거리에서 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법의 예측진동속도는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭의 예측진동속도에 비해 최대 129.85%에서 최소 18.33% 낮게 예측되었고, 지연시차가 20 ms이고 역기폭 발파

방법의 예측진동속도에 비해 최대 43.90%에서 최소 28.82% 낮게 예측되었다. 지연시차가 20 ms이고 중간기폭의 예측진동속도는 지연시차가 20 ms이고 역기폭 발파방법의 예측진동속도에 비해 5~113 m 구간에서는 최대 37.40% 높게 예측되었고, 114~200 m 구간에서는 최대 8.87% 낮게 예측되었다(Table 4, Fig. 10).

5. 표준발파공법을 통한 발파방법 적용에 대한 고찰

지연시차와 기폭위치에 의한 최대입자속도의 지반진동 예측 결과 지발당 장약량에 따라 진동수준이 역전되는 경향은 다르지만 대부분 발파원과 거리가 가까울수록 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법과 발파원과 거리가 멀어질수록 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에서 유리한 발파방법으로 예측되었다. 장약량에 따라 낮은 진동수준을 보이는 방법을 찾아내기 위해 “도로공사 노천발파 설계시공 지침 및 요령”에 제시된 장약량을 사용하여 발파방법에 따라 진동이 역전되는 거리를 구하였다.

진동수준이 역전되는 거리에 따라 진동제어에 유리한 발파방법은 다음과 같다.

소규모 진동제어발파에서 장약량이 0.5 kg인 경우 80 m, 0.625 kg은 90 m, 0.64 kg은 91 m, 1 kg은 114 m, 1.5 kg은 140 m 이내에는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법이 그 이후의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에 유리한 발파방법으로 분석되었다.

중규모 진동제어발파에서 장약량이 1.6 kg인 경우

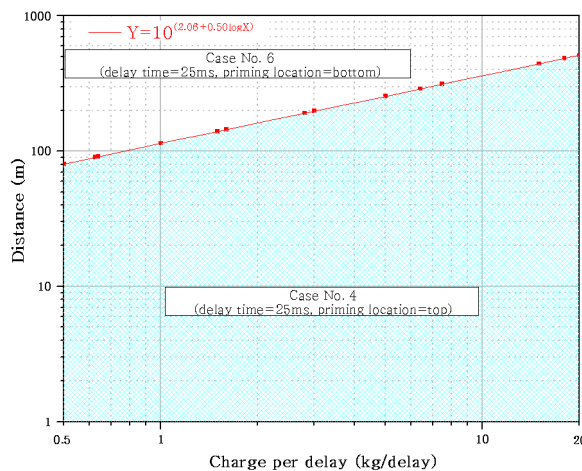


Fig. 11. Relationship between charge per delay and monitoring distance where the two levels of peak particle velocity from Case No. 4 and Case No. 6 are reversed

Table 5. The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for all Case No(continued)

Classification of surface blasting type		Charge per delay (kg)	Distance (m)	Predicted ground vibration velocity (cm/s)		Cross point (m)
				Case No.4(25,T)	Case No.6(25,B)	
Type III Vibration control blasting small scale	Standard pattern	1	90	0.029742	0.032661	114
			114	0.019481	0.019508	
			115	0.019178	0.019141	
			130	0.015399	0.014651	
	Application pattern (1)	0.5	60	0.033048	0.037135	80
			80	0.019747	0.019834	
			81	0.019313	0.019304	
			100	0.013245	0.012194	
	Application pattern (2)	0.625	70	0.030623	0.033843	90
			90	0.019529	0.019568	
			91	0.019147	0.019102	
			110	0.013636	0.012634	
	Application pattern (3)	0.64	70	0.031280	0.034729	91
			91	0.019557	0.019602	
			92	0.019178	0.019141	
			110	0.013928	0.012965	
Application pattern (4)	1.5	120	0.025546	0.027139	140	
		140	0.019386	0.019394		
		141	0.019141	0.019095		
		160	0.015265	0.014496		
Type IV Vibration control blasting middle scale	Standard pattern	3	170	0.025467	0.027037	198
			198	0.019384	0.019391	
			199	0.019210	0.019180	
			210	0.017447	0.017057	
	Application pattern (1)	1.6	120	0.027065	0.029117	144
			144	0.019529	0.019568	
			145	0.019289	0.019275	
			160	0.016172	0.015552	
	Application pattern (2)	2.8	170	0.023942	0.025078	191
			191	0.019437	0.019455	
			192	0.019256	0.019235	
			210	0.016402	0.015821	
Type V General blasting	Standard pattern	7.5	290	0.022230	0.022912	313
			313	0.019392	0.019400	
			314	0.019281	0.019266	
			330	0.017640	0.017288	
	Application pattern (1)	5	230	0.023418	0.024411	255
			255	0.019469	0.019494	
			256	0.019333	0.019328	
			270	0.017575	0.017210	
	Application pattern (2)	6.4	270	0.021921	0.022524	289
			289	0.019408	0.019420	
			290	0.019289	0.019275	
			310	0.017118	0.016666	

Table 5. The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for all Case No

Classification of surface blasting type		Charge per delay (kg)	Distance (m)	Predicted ground vibration velocity (cm/s)		Cross point (m)
				Case No.4(25,T)	Case No.6(25,B)	
Type VI Large scale blasting	Standard pattern	20	490	0.020914	0.026340	511
			511	0.019400	0.024403	
			512	0.019333	0.024317	
			530	0.018173	0.022834	
	Application pattern (1)	15	420	0.021303	0.026839	443
			443	0.019364	0.024357	
			444	0.019286	0.024257	
			460	0.018102	0.022744	
	Application pattern (2)	18	460	0.021311	0.026848	485
			485	0.019384	0.024383	
			486	0.019313	0.024292	
			500	0.018356	0.023068	

* 25=25 ms, T=top priming, B=bottom priming

144 m, 2.8 kg은 191 m, 3 kg은 198 m 이내에는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법이 그 이후의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에 유리한 발파방법으로 분석되었다.

일반발파에서 장약량이 5 kg인 경우 255 m, 6.4 kg은 289 m, 7.5 kg은 313 m 이내에는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법이 그 이후의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에 유리한 발파방법으로 분석되었다.

대규모 발파에서 장약량이 15 kg인 경우 443 m, 18 kg은 485 m, 20 kg은 511 m 이내에는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법이 그 이후의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에 유리한 발파방법으로 분석되었다.

위와 같이 장약량에 따라 진동수준이 역전되는 교차점 거리를 이용하여 Fig. 11과 같은 그래프를 도시하고 아래와 같은 하나의 식을 산출하였다.

$$Y = 10^{(2.06 + 0.50 \log X)}$$

여기서, X는 지발당 장약량(kg/delay)이고, Y는 발파방법에 따라 진동수준이 역전되는 교차점(m)으로써, 교차점 이전은 25 ms이고 정기폭 발파방법, 교차점 이후는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 지반진동값이 적어 진동제어 측면에서 유리한 발파방법이다. 예를 들어 지발당 장약량이 12 kg일 때에는 397 m 이내

의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법, 398 m 이후의 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에서 유리한 발파방법이다.

보안물건이 근접해 있어 허용된 지발당 장약량이 적을 경우 위와 같은 방법으로 발파설계를 적용하면 발파공경이 작고, 공간격, 최소저항선 등이 좁아져서 정기폭을 사용할 경우 발파공 윗부분의 지반운동으로 인해 cut off가 발생될 우려가 있다. 그러나 정기폭이 역기폭보다 충격파가 자유면에 도달하는 시간이 빠르므로 자유면에서 반사하는 반사파의 세기가 크다는 이유 때문에 정기폭이 발파위력이 크고, 순폭성도 우수하다고 보고되고 있다(Dupont Co., 1980). 그런 이유로 정기폭의 단점이 우려되지 않은 경우에는 정기폭 발파방법도 발파설계에 충분히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 발파공 사이의 지연시차와 기폭위치에 따라 발파에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파를 실시하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 발파공 사이의 지연시차(20, 25 ms)와 기폭위치(정기폭, 중간기폭, 역기폭)에 따른 최대입자속도(PPV)의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동 특성을 규명하였고, 국토교통부의 “도로공사 노천발파

설계 시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15 kg을 적용하여 지연시차와 기폭위치가 따른 진동 증가율을 비교분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 지연시차(20, 25 ms)와 기폭위치(정기폭, 중간기폭, 역기폭)에 의한 발파방법 중 환산거리가 1~100 m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 (Case No. 4) 발파방법이 진동제어 측면에서 가장 유리하게 예측되었다. 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법을 제외하고 1~29.3 m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 20 ms이고 역기폭(Case No. 3), 29.4~100 m/kg^{1/2} 범위에서는 지연시차가 20 ms이고 중간기폭(Case No. 2) 발파방법이 진동제어 측면에서 유리하게 예측되었다.
2. 지연시차와 기폭위치가 의한 최대입자속도의 지반진동 예측 결과 지발당 장약량에 따라 진동수준이 역전되는 경향은 다르지만 대부분 발파원과 가까운 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 정기폭 발파방법과 발파원과 멀어지는 거리에서는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법이 진동제어 측면에서 유리한 발파방법으로 예측되었다. 장약량에 따라 진동수준이 역전되는 교차점 거리를 아래와 같은 하나의 식을 산출하였다.

$$Y = 10^{(2.06 + 0.50 \log X)}$$

여기서, X는 지발당 장약량(kg/delay)이고, Y는 발파방법에 따라 진동수준이 역전되는 교차점(m)으로써, 교차점 이전은 25 ms이고 정기폭 발파방법, 이후는 지연시차가 25 ms이고 역기폭 발파방법의 지반진동 값이 적어 진동제어 측면에서 유리한 발파방법으로 발파설계시 인자로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 보안물건이 근접해 있어 허용된 지발당 장약량이 적을 경우 위와 같은 방법으로 발파설계를 적용하면 발파공경이 작고, 공간격, 최소저항선 등이 좁아져서 정기폭을 사용할 경우 발파공 윗부분의 지반운동으로 인해 cut off가 발생할 우려가 있다. 그러나 정기폭이 역기폭보다 충격파가 자유면에서 도달하는 시간

이 빠르므로 자유면에서 반사하는 반사파의 세기가 크다는 이유 때문에 정기폭이 발파위력이 크고, 순폭성도 우수하다고 보고되고 있다. 그런 이유로 정기폭의 단점이 우려되지 않은 경우에는 정기폭 발파방법도 발파설계에 충분히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 연구는 군산의 편암지역에서 기존에 상용화되고 있는 뇌관의 지연시차인 20 ms와 25 ms를 이용하여 지반진동을 규명하였다. 이는 다른 지역에서 지연시차와 기폭위치가 따라 진동의 합성에 의한 증폭 혹은 감쇠가 발생할 가능성이 있는 지역적인 한계성을 보이나 추후에 위와 같은 실험조건으로 다양한 지역에서 실험을 실시한 결과가 추가된다면 발파설계 적용시 가장 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 전자뇌관 등의 지연시차 구현이 다양한 뇌관의 사용이 늘어남으로 다양한 지연시차에 따른 지반진동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2012년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Dupont Co., 1980, Blaster's Hand Book, 16th Edition, pp. 209-212.
2. Kim, J.W., C.W. Kand and C.S. Ko, 2012, Influence of Inner-hole Priming Location on Ground Vibration, Explosive & Blasting, Journal of Korean Society of Explosive & Blasting Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 29-36.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006, Blasting design and construction guidelines to road construction.
4. Song, Y.S., Y.J. Lee, H.D Min. and Dave Kay, 2004, A Case Study of Applying Electronic Detonator in Limestone Quarry, Explosive & Blasting, Journal of Korean Society of Explosive & Blasting Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 1-11.
5. Wang Zhenyu, Cheng Fang, Yinl Chen and Weifeng Cheng, 2013, A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol, 60, pp. 389-400.



강추원

1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1981년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 062-230-7117
E-mail: cwkang@chosun.ac.kr
현재 조선대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수



류복현

2004년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2006년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2014년 조선대학교 대학원 에너지자원공학과 공학박사

Tel: 062-571-9020
E-mail: pogryu@hanmail.net
현재 케이피에코이엔씨 대표



최태흥

1995년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1997년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2007년 조선대학교 대학원 자원공학과 박사수료

Tel: 062-603-0352
E-mail: 1394131@hanmail.net
현재 도올발파기술사사무소 대표
