

발파공간 지연시차가 지반진동에 미치는 영향

김지수^{1)*}, 최태홍²⁾, 이창원³⁾

Influence of Delay Time on the Ground Vibration

Ji-Soo Kim, Tae-Hong Choi, Chang-Won Lee

Abstract In this study, 16 test blastings had been carried out with different spacings, burdens, drilling lengths, and charges per delay for investigating the characteristics of ground vibration propagation, which depends on the delay time. From the tests, it was possible to derive a ground vibration equation. Using the equation, the characteristics of ground vibration could be investigated by analyzing the nomogram and predicting the Peak Particle Velocity (PPV), which are influenced by the delay time and the priming location. The trend of ground vibration change depending on the delay time was analyzed for the standards charges of 0.5, 1.6, 5, and 15 kg, which were suggested in “Blasting design and construction guidelines to road construction” by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. From the study, it would be possible to suggest a favorable vibration control method, which depends on the charge.

Key words Delay time, Ground vibration, PPV

초 록 본 연구는 발파공간 지연시차에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파(2~3공)를 시행하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균 지반진동 예측식을 이용하여 발파공간 지연시차에 따른 최대입자속도의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토교통부의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 지연시차에 따른 진동 증가율을 비교·분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다.

핵심어 지연시차, 지반진동, 최대입자속도

1. 서 론

오늘날 우리 사회는 건설분야에 경제적이고 효율적인 방법으로 발파작업이 많이 사용되고 있는데 소음·진동 문제가 최근에는 급속히 부상되어 정부에서는 환경피해 규제를 위한 수단으로 환경분쟁조정위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있다. 그래서 발파 작

업은 더욱 엄격한 규제를 받게 되었으며, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 발파 설계 시 효율성, 안정성 및 안전성 등의 설계변수 중에서도 안전성을 가장 우선적인 기준으로 고려하고 있다.

두준기(2000)는 전기식 지발뇌관을 이용하여 지발뇌관 자체의 초시와 다단발파기로 조정된 초시를 이용하여 발파패턴을 설계할 때에는 선 발파공과 후 발파공의 초시가 뒤바뀌거나 8ms 이내의 중복시차가 나타나지 않도록 뇌관배열에 세심한 주의를 기울이지 않으면 발파설계에서 규정한 허용진동 값보다 큰 발파진동이 발생할 수 있다고 하였고, 송영석 등(2004)은 국내 석회석 광산에 적용되는 지발시차는 20ms나 25ms

¹⁾ 케이피에코이엔씨

²⁾ 도올발파기술사사무소 대표

³⁾ 삼정E&C 대표

* 교신저자 : feelluvei@naver.com

접수일 : 2014년 8월 31일

심사 완료일 : 2014년 9월 15일

게재 승인일 : 2014년 9월 22일

로 한정되어 있어 기폭시차의 오차에 따른 진동 예측의 불확실성 및 파쇄입도의 불균일 등의 한계점에 당면했다고 하였다. 이에 기폭 시스템보다는 발파 규모를 줄이고 있다. 이는 환경적인 측면에 맞추기 위하여 기술적인 측면을 고려하지 못하는 방법으로 발파가 이루어지고 있기 때문에, 이를 개선하고 더욱 효과적인 발파를 시행하기 위하여 정확한 초시의 전자뇌관을 적용하여 현장의 경제성을 향상시키고, 환경적인 측면에서도 만족할 수 있는 최적의 기폭시차를 연구하였다.

본 연구는 발파공간 지연시차에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파(2~3공)를 시행하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 95%와 50%(평균) 식 중에서 지반진동 특성만을 고려하여 평균 지반진동 예측식을 이용하여 발파공간 지연시차에 따른 최대입자속도의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토교통부의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 지연시차에 따른 진동 증가율을 비교·분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 연구대상의 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 4km지점에 위치한다. 노령산맥과 차령산맥 남서연장부에 해당하며 실험지역 일대에는 북동방향의 능선(망해산 230.3m~취성산 205.0m~용천산 141.0m)과 남북 방향의 오성산(227.7m) 능선이 발달한 지역이다(Fig. 1).

연구지역의 지질은 광역적으로 살펴보면, 함열도폭(1:50000) 남동부 일대에는 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 구릉 지대에 주로 분포하고, 하부로부터 편암류, 함라산층, 규암층 순으로 구성된다(Fig. 2).

3. 현장실험 방법 및 결과

3.1 실험 방법

본 연구는 총 16회 발파(2~3공)에 대한 현장실험을 시행하였다. 발파공간의 지연시차는 지발뇌관의 발화오차를 배제하기 위해 다단식 발파기를 사용하여 지연시차를 부여하였으며 이때 발생하는 발파진동을 발파진동계측기 34대로 측정하였다. 실험 조건은 Table 1, 발파패턴은 Fig. 3과 같다.



Fig. 1. Site map of study area.

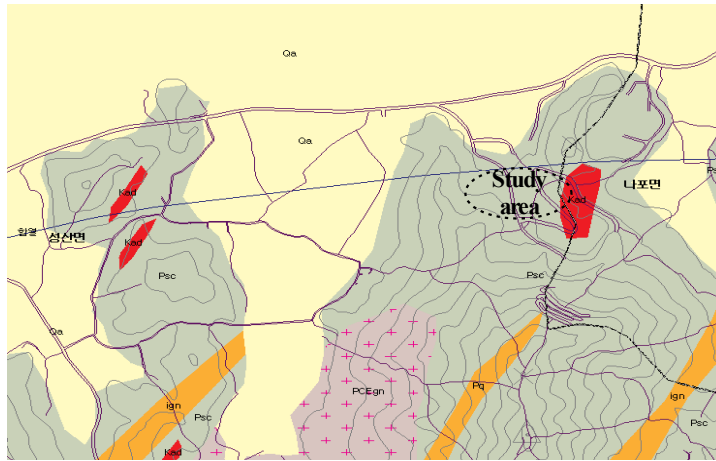
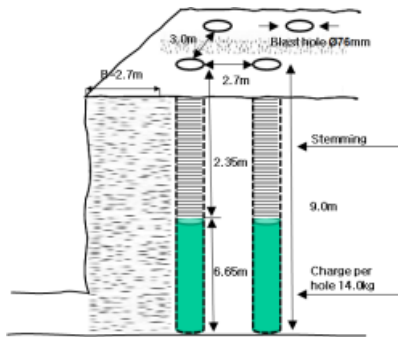


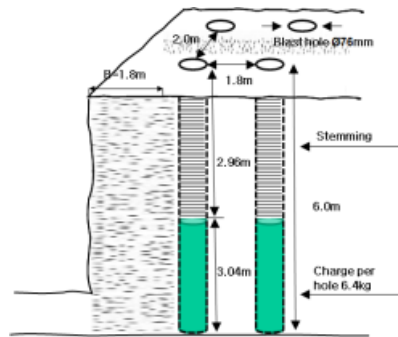
Fig. 2. Geological map of study area.

Table 1. Experimental conditions

Blasting No.	1~6	7~8	9~12	13	14	15~16
Explosive diameter(mm)	Emulsion type $\Phi 50$					
Detonator	MS Detonator					
Diameter(mm)	$\Phi 76$					
Hole depth(m)	9.0			6.0		
Spacing(m)	3.0			2.0		
Burden(m)	2.7			1.8		
Charge per delay(kg)	14			6.4		
Delay time(ms)	20		25		20	
Blastholes(ea)	2	3	2	3	2	2



(a) Blasting pattern for holes of Blasting No. 1~13



(b) Blasting pattern for holes of Blasting No. 14~16

Fig. 3. Blasting pattern.

3.2 현장실험 계측 결과

Table 1의 발파조건과 Fig. 3의 발파패턴으로 16회에 걸쳐 시행된 지반진동 계측 결과 34대의 계측기를 Fig. 4와 같이 등 간격으로 발파지점으로부터 23~227m

의 거리에서 총 544개의 자료를 획득하였다.

현장실험 계측결과에 따르면 최대입자속도의 경우 0.191~84.961mm/sec로 계측되었다.



Fig. 4. Foreground and Measurements of study area.

4. 분석

현장실험을 통해 측정된 지반진동 데이터에서 지연 시차에 대한 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV)를 이용하여 회귀분석을 하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계적으로 처리하여 지반진동 예측식을 구하였다. 지반진동 데이터의 전산처리는 TunDesign™ 4의 보조프로그램인 TDTestBlast를 사용하였다.

분석별로 지연시차의 조건은 다음의 Table 2와 같다.

5. 고찰

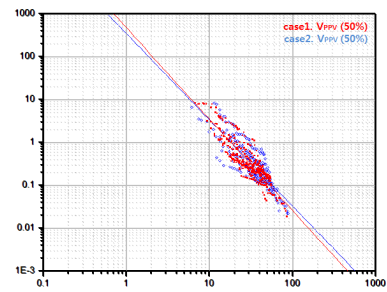
본 고찰에 사용된 지발당 장약량은 국토교통부의 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 최대입자속도(PPV)를 비교·분석하였다.

지연시차에 따른 최대입자속도(PPV) 평균(50%) 지반진동 예측식은 Table 3과 같다. 최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식으로 지연시차의 노모그램 분석(Fig. 5)을 하였다.

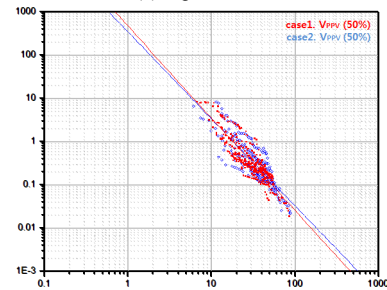
최대입자속도의 상승근 환산거리가 13.5kg/w^{1/2} 미

Table 2. Analysis conditions

Case	Delay time(ms)	Applied Blasting No.	Number of data
1	20	1~8, 14	306
2	25	9~13, 15~16	238



(a) square root



(b) cube root

Fig. 5. Relationship between peak particle velocity(PPV) scaled distance.

Table 3. Prediction equation of ground vibration for PPV(Case 1,2)

case	Square root method		Cube root method		Number of data
	Prediction equation	r	Prediction equation	r	
1	$V_{50} = 472.23 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.13}$	0.894	$V_{50} = 1285.16 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.15}$	0.879	306
2	$V_{50} = 345.80 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.01}$	0.855	$V_{50} = 687.97 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.98}$	0.814	238

만에서는 지연시차가 25ms인 Case 2가 지연시차가 20ms인 Case 1보다 낮은 진동수준으로 분석되었고, 자승근 환산거리가 13.5kg/w^{1/2} 이상에서는 지연시차가 20ms인 Case 1이 지연시차가 25ms인 Case 2보다 낮은 진동수준으로 분석되었다.

5.1 최대입자속도(PPV)에 의한 지반진동 예측

최대입자속도에 의한 지반진동을 예측하기 위해 자승근 환산거리의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Fig. 6과 같이 도시하였고, Table 4는 예측진동치와 증감률을 나타낸 표이다.

최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 최대입자속도의 진동수준이 역전되는 거리가 증가하지만 근거리에서는 지연시차가 25ms인 Case 2, 원거리에서는 지연시차가 20ms인 Case 1의 진동수준이 낮게 예측되었다(Table 5, Fig. 7).

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때
5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~9m 구간에서는

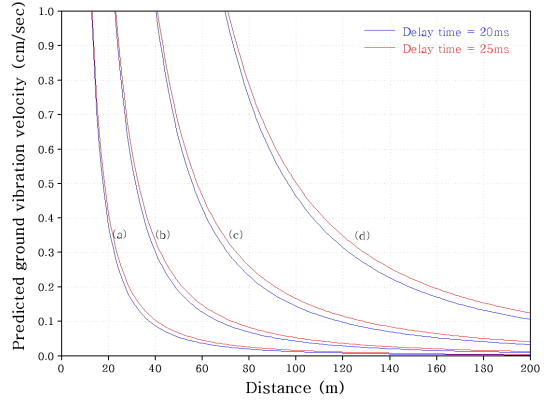


Fig. 6. Relationship between predicted ground vibration velocity (PPV) and distance for different delay time : charge per delay=(a) 0.5kg, (b) 1.6kg, (c) 5kg, (d) 15kg.

Table 4. The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for PPV

Distance(m)	Charge per delay(kg)	Predicted ground vibration velocity(cm/sec)		Ratio of increase(%)	
		PPV _{Case1}	PPV _{Case2}	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	
5	0.5	7.324	6.782	7.4	
10		1.673	1.684	-0.66	
20		0.382	0.418	-9.42	
40		0.087	0.104	-19.54	
60		0.037	0.046	-24.32	
80		0.020	0.026	-30.00	
100		0.012	0.016	-33.33	
120		0.008	0.011	-37.5	
140		0.006	0.008	-33.33	
160		0.005	0.006	-20.0	
180		0.004	0.005	-25.0	
200		0.003	0.004	-33.33	
5		1.6	25.278	21.829	13.64
10			5.775	5.420	6.15
20	1.319		1.346	-2.05	
40	0.301		0.334	-10.96	
60	0.127		0.148	-16.54	
80	0.069		0.083	-20.29	
100	0.043		0.053	-23.26	
120	0.029		0.037	-27.59	
140	0.021		0.027	-28.57	
160	0.016		0.021	-31.25	
180	0.012		0.016	-33.33	
200	0.010		0.013	-30.00	

Table 4. Continues

Distance(m)	Charge per delay(kg)	Predicted ground vibration velocity(cm/sec)		Ratio of increase(%)	
		PPV _{Case1}	PPV _{Case2}	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	
5	5	85.065	68.606	19.35	
10		19.434	17.033	12.35	
20		4.440	4.229	4.75	
40		1.014	1.050	-3.55	
60		0.428	0.465	-8.64	
80		0.232	0.261	-12.50	
100		0.144	0.166	-15.28	
120		0.098	0.115	-17.35	
140		0.070	0.085	-21.43	
160		0.053	0.065	-22.64	
180		0.041	0.051	-24.39	
200		0.033	0.041	-24.24	
5		15	274.085	206.951	24.49
10			62.617	51.380	17.95
20	14.305		12.756	10.83	
40	3.268		3.167	3.09	
60	1.378		1.402	-1.74	
80	0.747		0.786	-5.22	
100	0.464		0.502	-8.19	
120	0.315		0.348	-10.48	
140	0.227		0.255	-12.33	
160	0.171		0.195	-14.04	
180	0.133		0.154	-15.79	
200	0.106		0.125	-17.92	

Note) PPV_{Case1}=PPV of Case 1, PPV_{Case2}=PPV of Case 2

Table 5. Maximum ratio of increase on rate of velocity components for PPV

Charge per delay(kg)	Rate of velocity components	Distance(m)	Maximum ratio of increase(%)
0.5	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	5~9	7.4
		10~200	-37.5
1.6	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	5~16	13.64
		17~200	-33.33
5	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	5~30	19.35
		31~200	-24.39
15	(PPV _{Case1} -PPV _{Case2})/PPV _{Case1}	5~51	24.49
		52~200	-17.92

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

최대 7.40% 높게 예측되었고, 10~200m 구간에서는 최대 37.50% 낮게 예측되었다.

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때
5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~16m 구간에서

는 최대 13.64% 높게 예측되었고, 17~200m 구간에서는 최대 33.33% 낮게 예측되었다.

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때
5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~30m 구간에서

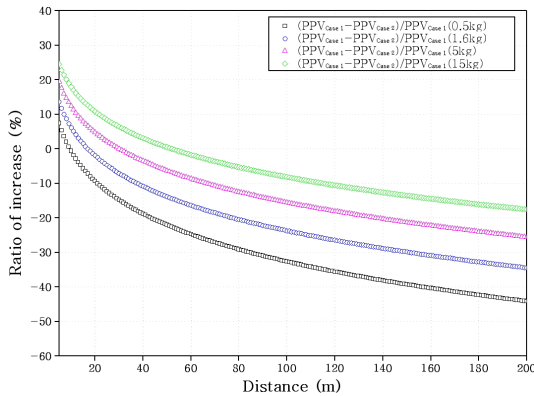


Fig. 7. Relationship between ratio of increase and distance for different delay time(PPV).

는 최대 19.35% 높게 예측되었고, 31~200m 구간에서는 최대 24.39% 낮게 예측되었다.

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~51m 구간에서는 최대 24.49% 높게 예측되었고, 52~200m 구간에서는 최대 17.92% 낮게 예측되었다.

6. 결론

본 연구는 발파공간 지연시차에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파(2~3공)를 시행하여 도출된 50% 발파진동 예측식을 이용하여 발파공간 지연시차에 따른 최대입자속도(PPV)의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토교통부의 “도로공사 노천발파 설계 시공·지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 지연시차에 따른 진동 증가율을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구지역에서 총 16회의 시험발파를 통해 이격거리 23~227m 지점에서 총 544개의 자료를 획득하였다. 계측결과는 접선성분 입자속도의 경우 0.127~80.203mm/sec, 수직성분 입자속도의 경우 0.127~84.961mm/sec, 진행성분 입자속도의 경우 0.127~81.642mm/sec, 최대입자속도(PPV)의 경우 0.191~84.961mm/sec, 최대벡터합(PVS) 입자속도의 경우 0.197~107.047mm/sec로 계측되었다.
2. 최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 최대입자속의 진동수준이 역전되는 거리가 증가하지만(0.5kg에서 역전거리 9m, 1.6kg에서 16m, 5kg에서 30m, 15kg에서 51m), 근거리에서는 지연시차가 25ms인 Case 2, 원거리에서는 지연시차가 20ms인 Case 1의 진동수준이 낮게 예측되었다.
3. 본 연구수행 결과 표준발파공법의 경계 장약량으로 지연시차 별 예측지반진동속도를 구하여 발파원과 보안물건 간의 거리에 따라 진동제어 측면에서 유리한 발파방법을 결정할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구는 기존에 상용화 되고 있는 뇌관의 지연시차를 이용하여 지반진동을 규명하였는데, 사용이 증가하고 있는 전자뇌관은 임의의 지연시차 구현이 가능하므로 다양한 기폭시차에 따른 지반진동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 두준기, 2000, 지발뇌관의 시차와 다단발파에 대한 고찰, 대한화약발파공학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 29-41.
2. 송영석, 이윤재, 민형동, Dave Kay, 2004, 석회석 광산에서 전자뇌관의 적용성에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 1-11.



김 지 수
케이피에코이엔씨

Tel: 062-571-9020
E-mail: feelluvei@naver.com



최 태 홍
도올발파기술사사무소 대표

E-mail: 1394131@hanmail.net



이 창 원
삼성E&C 대표

Tel: 02-418-8787
E-mail: lcw117@hanmail.net