

전기 및 전자뇌관을 이용한 노천발파 시 진동전파 특성에 관한 비교 연구 이기근^{1)*}, 이천식¹⁾, 황남순²⁾, 이동희²⁾

A Comparative Study on the Characteristics of Vibration Propagation during Open-Pit Blasting using Electric and Electronic Detonators

Ki-Keun Lee, Chun-Sik Lee, Nam-Sun Hwang, Dong-Hee Lee

Abstract Recently, Electronic Detonators have gradually increased their performance for various purposes such as vibration control and improved Fragmentation.

This study analyzed the vibration estimation equations of electric and electronic detonator blast by comprehensive analysis of the vibration data collected during electric and electronic detonator blast waves at the comparison sites of urban areas, geology and soil conditions, stone quarries and mines in different areas of Korea from June 2017 to December 2018.

It has been confirmed that electronic detonator blast can meet the criteria for allowing vibration even if maximum charge weight per delay is increased by 1.5 times compared to the electric detonator blast.

Key words Electric Detonator, Electronic Detonator, Vibration estimation equation, Maximum charge per delay, Vibration reduction

초 록 근래에 전자뇌관은 진동제어, 파쇄도개선 등 다양한 목적으로 사용이 점차 증대되고 있다. 본 연구는 2017년 06월~2018년 12월까지 지질 및 지반조건, 그리고 발파설계 조건이 다른 국내 여러 지역의 도심지, 토취장, 채석장, 광산 등의 노천발파 현장에서 실시된 전기 및 전자발파 시 수집된 진동 데이터를 종합 분석하여 전기 및 전자뇌관 발파의 진동추정식을 비교 분석하였다.

전자발파는 전기뇌관에 비해 동일 지발당 장약량 적용 시 진동은 약 30%정도 감소되고 동일거리에서 최대허용 지발당 장약량이 1.5배 증가되더라도 진동허용기준을 충족시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

핵심어 전기뇌관, 전자뇌관, 진동추정식, 최대지발당 장약량, 진동감소.

1) (주)네스트 엔지니어링

2) (주)한화

* 교신저자: gigamite@hanmail.net

접수일 : 2019년 2월 28일

심사 완료일 : 2019년 3월 7일

게재 승인일 : 2019년 3월 12일

1. 서론

전자뇌관은 전자 집적회로(IC Chip)가 내장되어 뇌관의 기폭초시 오차가 0.01% 이내의 초정밀도를 유지하여 입력되어 있는 지연시간에 정확하게 기폭 되므로 기폭오차에 따른 예기치 않는 진동 증폭현상을 제어할 수 있으며, 발파원과 구조물 사이의 지반조건에 따른 최적 시차조절이 가능하다.

본 연구는 2017년 06월~2018년 12월까지 다양한 암종과 지질 및 지반조건, 그리고 발파공법, 발파패턴, 지발당 장약량, 발파공수 등의 다양한 발파조건으로 수행된 도십지, 채석장, 광산 등의 노천발파 현장에서 전기 및 전자뇌관 발파 시 진동 측정값을 분석하였다.

이를 통해 전기뇌관을 활용한 발파와 전자뇌관을 활용한 발파의 진동전파 특성을 비교 분석하였으며 그 결과를 소개하고자 한다.

2. 전자뇌관의 특징

2.1 전자뇌관의 특징

자체 IC회로(Electronic Chip)를 내장하여 초정밀도(오차범위 0.01%)로 기폭이 가능하며, 기존 전기 및 비전기 뇌관에 비해 비용은 고가이나 더욱 우수한 진동감소 및 제어발파 효과의 극대화가 가능하다. 이로 인해 파쇄입도의 균일화 및 파쇄도 향상, 미려한 파단면의 생성에 따른 슛크리트 타설량 감소와 주변압반의 손상영역 제어효과가 탁월하여 전체 시공 측면에서는 비용을 절감할 수 있다. 또한 자체 Capacitor에 충전된 에너지를 사용함으로써 Cut-off를 방지할 수 있고 암호화된 발파 명령 신호에 의해서만 기폭 되므로 발파작업에 있어 일반 뇌관 대비 시공안전성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 최근 발파공해에 따른 환경피해 민원증가로 인해 점차 사용량이 증가하고 있다. 2)

과거 수입에 의존하던 전자뇌관은 최근 들어 전자뇌관 시스템을 국내에서 자체적으로 생산을 시작하여 국산화가 가능해짐에 따라 보급이 점차 확대되어 가고 있는 상황이다.

Fig 1에서 전기뇌관과 전자뇌관의 기폭 구성 요소를 비교하였으며, 전자뇌관은 전기뇌관의 지연요소(delay elements)를 delay module과 capacitor가 대체하고 있다.3)

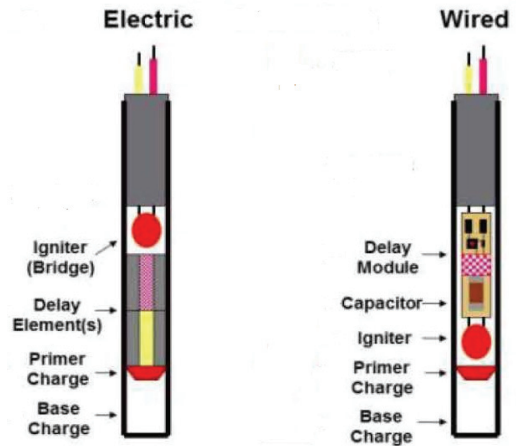


Fig. 1. 전기뇌관과 전자뇌관의 기폭 구성 요소 비교.

Table 1은 H사의 전자뇌관과 전기뇌관의 특성을 비교한 것으로 전자뇌관은 전기적 기폭신호에 의해 점화되고 Logger의 시차를 입력하면 지연 모듈(delay module)에 의해 원하는 지연시차를 0~15,000ms 까지 부여할 수 있으며, 전영역을 MS단위로 적용할 수 있는 등 전기뇌관과 확연한 차이점을 나타낸다.

2.2 작업 절차 비교

유압드릴을 이용한 천공작업과 천공 후 장약 작업까지는 전기 및 전자뇌관은 동일한 방법으로 시행되며, 뇌관 배치에 있어 전기뇌관은 자유면을 기준하여 순차적으로 자유면이 확대되도록 점화순서에 맞게 뇌관을 배열한 후 장약을 실시하지만 전자뇌관은 시차가 입력되어 있지 않기 때문에 자유면이나 천공위치와 관계없이 무작위로 배치하여 장약 작업을 수행한다.

결선작업은 전기뇌관은 직렬로 결선하나 전자뇌관은 Harness wire에 커넥터를 결합하는 병렬 방식으로 결선이 진행되며 결선작업이 완료된 후 전기뇌관은 도통시험기 또는 저항측정기로 회로의 이상 유무를 확인하나 전자뇌관은 Logger로 QR코드에 각 뇌관별 계획된 시차를 그룹별 또는 개별 순서대로 입력하고 입력자료를 전용 Tester로 다운받아 이상 유무를 점검하고 이상이 없을 경우 전용 Blaster로 발파를 실시한다. 따라서, 전자뇌관의 경우 시공방법상으로도 정확한 시차 설정이 가능함을 알 수 있다.

Table 1. 전자뇌관과 전기뇌관의 특성 비교(H사 제품)

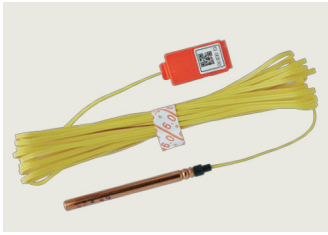
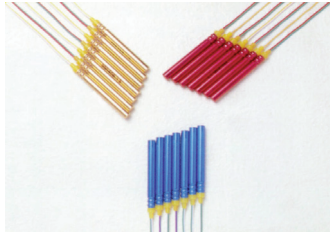
구 분	전자뇌관	전기뇌관
제품형상		
점화방식	기폭신호	전기전류
시차조정	전자회로	지연제 길이
설정초시	0~15,000ms	0~7,000ms
사용단수	750단 (20ms 단차 적용 시)	MS/LP 조합 42단
초시오차	0.01%	10%
발파시차	수영역 MS발파 시차적용 가능	대부분 영역 LP 시차

Table 2. 전기 및 전자뇌관 발파작업 비교

작업 공정	뇌관배치/장약	결선	회로점검	발파
전기뇌관				
	순번 고려 배열	직렬 결선	도통 시험기	전기발파기
전자뇌관				
	무작위 배열	병렬 결선	전용 Tester	전용 Blaster

3. 현장 시험

3.1 시험 현장 개요

전기 및 전자뇌관을 이용한 발파 비교시험은 Table 3과 같이 2017년 06월~2018년 12월까지 부지조성, 채석장, 광산 등의 다양한 노천발파 현장에서 실시하였다.

Table 4에 기술한 발파제원과 같이 에멀전(Emulsion) 및 안포(ANFO), 벌크(Bulk) 등의 폭약을 사용하였고,

화성암, 퇴적암, 변성암 등 다양한 암종과 지반조건에서 진동제어 소규모~대규모 발파공법이 적용되었다.

발파패턴은 천공장 2.7~17.0m, 발파공 직경은 76~102mm, 1회 발파공수는 4공에서 100공, 최대 지발당 장약량은 1.0~135.0kg을 적용하여 전기 및 전자뇌관을 활용한 비교시험을 실시하였다.

각 현장별 발파공법 및 사용폭약, 상세한 발파제원은 Table 4와 같다.

Table 3. 시험발파 위치 및 현장별 압중

No.	현장명	현장위치	압중	시험 일자
1	○○공장 부지 증설공사	경남 함안군 칠원읍	신라통 세일	17년 08월
2	○○국가산업단지 ○○ NCC(주) 2공장증설용지 조성사업	전남 여수시 월하동	안산암, 안산암질 응회암	18년 01월
3	○○일반산업단지 조성사업	경남 김해시 진례면	안산암, 안산암질 응회암	18년 05월
4	영주 ○○석산	영주시 장수면	복운모 화강암	17년 6월~18년 4월
5	김해 ○○단지 조성사업	경남 김해시 상동면	각섬석 화강암	18년 05월
6	공주 ○○○석산	세종시 장군면	석영운모편암	18년 04월~05월
7	단양○○양회	충북 단양군 가곡면	석회암, 돌로마이트	18년 08월
8	단양 ○○시멘트	충북 단양군 매포읍	석회암	18년 08월
9	부여 ○○○ 인터스트리	충남 부여군 은산면	화강편마암	18년 08월~11월
10	○○○○ 연천NRC공장	경기도 연천군 연산면	편암, 화강편마암	18년 07월~09월
11	(주)○○시멘트 부지조성공사	강원도 삼척시 사직동	풍촌 석회암	18년 05월~06월
12	○○○시멘트(주) 영월 광산	강원 영월군 한반도면	회색 석회암	18년 10월
13	○○물산(주) 채석개발 사업	경기도 포천시 창수면	흑운모화강암	18년 03월~07월
14	○○산업 양주NRC 채석개발사업	경기도 양주시 은현면	흑운모화강암	18년 09월~12월

Table 4. 시험발파 현장별 발파공법 및 발파 상세 제원

No.	현장명	발파공법	사용폭약	천공경 (mm)	천공장 (m)	지발당 장약량 (kg/delay)	회당 발파공수 (공)	비고
1	○○공장 부지 증설공사	진동제어중규모	에멀전	76	3.2	3	4~40	
2	○○국가산업단지 ○○ NCC(주) 2공장증설용지 조성사업	진동제어소규모 ~중규모	에멀전	51~76	2.7~4.5	1~5	10~31	
3	○○일반산업단지 조성사업	진동제어 중규모~일반	에멀전	76	3.2~4.5	4.5~6.0	5~70	
4	영주 ○○석산	대발파	고성능에멀전+안포	89	14	56~135	15~78	
5	김해 ○○단지 조성사업	일반~대발파	에멀전+안포	76~89	4.5~12.0	9.0~30	58~60	
6	공주 ○○○석산	대발파	에멀전+안포	76	11.5	18~25	12~14	
7	단양 ○○양회	대발파(광산)	에멀전+안포+벌크	89~102	13	50~123	20~28	
8	단양 ○○시멘트	대발파(광산)	에멀전+안포+벌크	102	14~15	87~115	13~22	
9	부여 ○○○ 인터스트리	대발파	에멀전+안포	76	15	46	100	
10	○○○○ 연천NRC공장	대발파	에멀전	89	7.2	14~18	10~25	
11	(주)○○시멘트 부지조성공사	일반~대발파	에멀전+안포	76	6.0~8.7	13~22	5~11	
12	○○○시멘트(주) 영월 광산	대발파(광산)	에멀전+안포	89	14~17	52~65	15	
13	○○물산(주) 채석개발 사업	대발파	고성능에멀전+안포	76	14.5	42~126	30~95	
14	○○산업 양주NRC 채석개발사업	대발파	에멀전+안포	89	17	65~86	5	

3.2 진동 전파 특성 비교 분석

1) 발파장소별 진동 추정식 비교

진동 전파 특성 분석을 위해 발파진동 전용계측기인 Blastmate Series 및 SV-1을 동일 지반선상에 일정 간격으로 설치하여 다양한 환산거리(Scaled Distance)가 반영될 수 있도록 하였으며, 수직성분(Vertical), 진행성분(Longitudinal), 점선성분(Transverse)의 세 성분 중 가장 큰 값인 최대입자속도(PPV : Peak Particle Velocity) 중 최고치(PPVmax)를 사용하여 95% 신뢰도의 진동 추정식을 도출하였다.

진동추정식은 진동제어소규모~일반발파 공법이 적용된 부지조성 공사장과 일반적인 골재생산을 위해 일반~대규모 발파가 진행된 채석장, 석회석 생산을 위해 대규모발파가 진행된 석회석 광산으로 구분하여 발파장소별로 진동추정식을 산출하였으며, 전기 및

전자뇌관 발파의 진동전파 특성 분석 결과는 Table 5와 6에 나타내었다.

2) 전기 및 전자뇌관 진동추정식 비교

상기 발파현장별 수집된 진동데이터 전체를 종합하여 전기 및 전자발파 시 자승근 및 삼승근 환산식에 의한 신뢰도 95% 진동추정식을 산출하였으며, 분석에 사용된 데이터수는 전기뇌관은 약 147개, 전자뇌관은 312개이며, 분석결과 전기 및 전자 모두 삼승근 환산식보다 자승근 환산식의 상관계수(R)가 높게 나타나며 장약지수에 따른 진동상수 및 감쇠지수는 Table 7과 같다.

Table 5. 발파장소별 전기뇌관 진동추정식 비교

구 분	자승근 환산식	삼승근 환산식
부지조성	$R=0.92, V_{95\%} = 217.1(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.57}$	$R=0.93, V_{95\%} = 349.3(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.64}$
채석장	$R=0.98, V_{95\%} = 437.5(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.73}$	$R=0.98, V_{95\%} = 5,061.1(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-2.10}$
석회석광산	$R=0.93, V_{95\%} = 227.0(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.62}$	$R=0.93, V_{95\%} = 870.6(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.66}$

Table 6. 발파장소별 전자뇌관 진동추정식 비교

구 분	자승근 환산식	삼승근 환산식
부지조성	$R=0.85, V_{95\%} = 110.7(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.48}$	$R=0.85, V_{95\%} = 139.8(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.46}$
채석장	$R=0.93, V_{95\%} = 414.6(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.81}$	$R=0.89, V_{95\%} = 1,076.6(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.74}$
석회석광산	$R=0.94, V_{95\%} = 244.6(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.75}$	$R=0.93, V_{95\%} = 876.6(\frac{D}{\sqrt[3]{W}})^{-1.75}$

Table 7. 전체 데이터 적용 진동추정식 비교

구 분	자승근 환산식	삼승근 환산식
전기뇌관	$R=0.93, V_{95\%} = 230.7(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.59}$	$R=0.89, V_{95\%} = 635.0(\frac{D}{W^{1/3}})^{-1.64}$
전자 뇌관	$R=0.90, V_{95\%} = 225.7(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.65}$	$R=0.84, V_{95\%} = 512.0(\frac{D}{W^{1/3}})^{-1.63}$

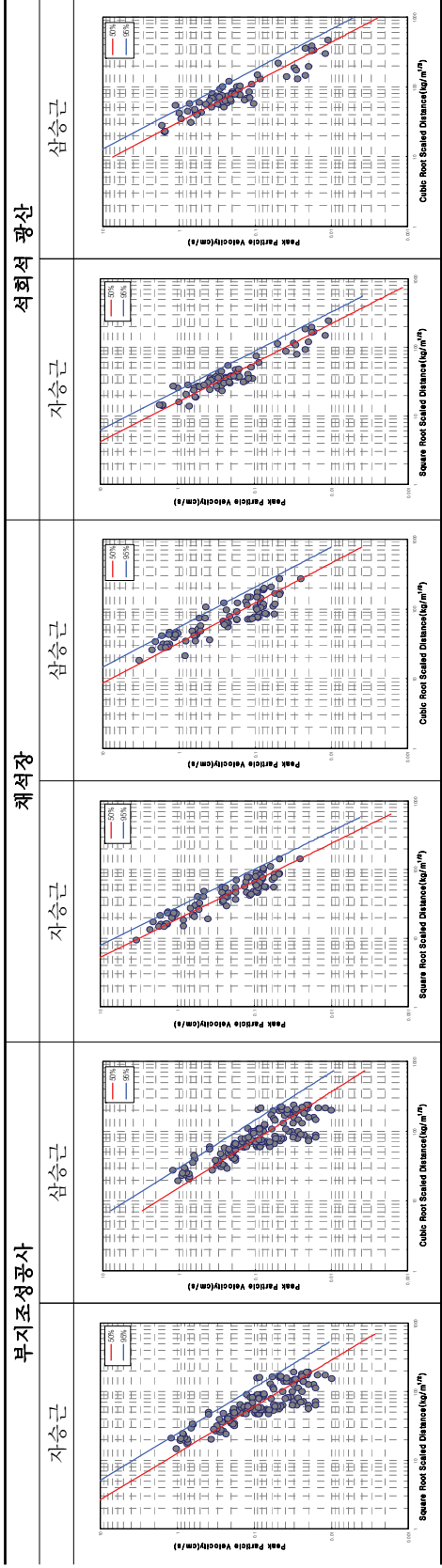


Fig. 2-a. 발파장소별 진자발파와 진동추정식

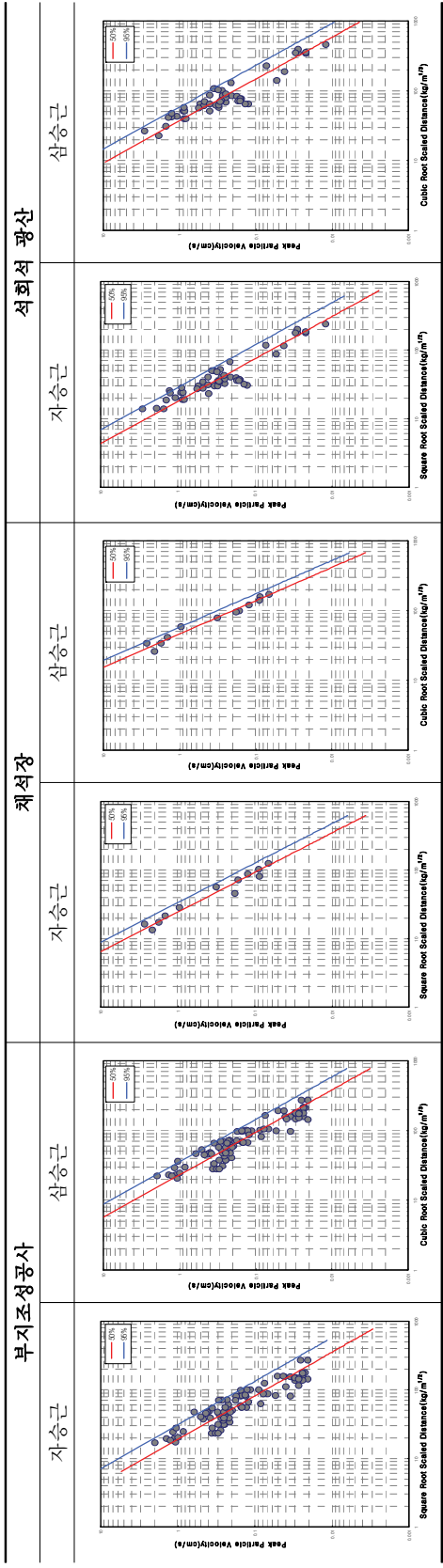


Fig. 2-b. 발파장소별 전기발파와 진동추정식

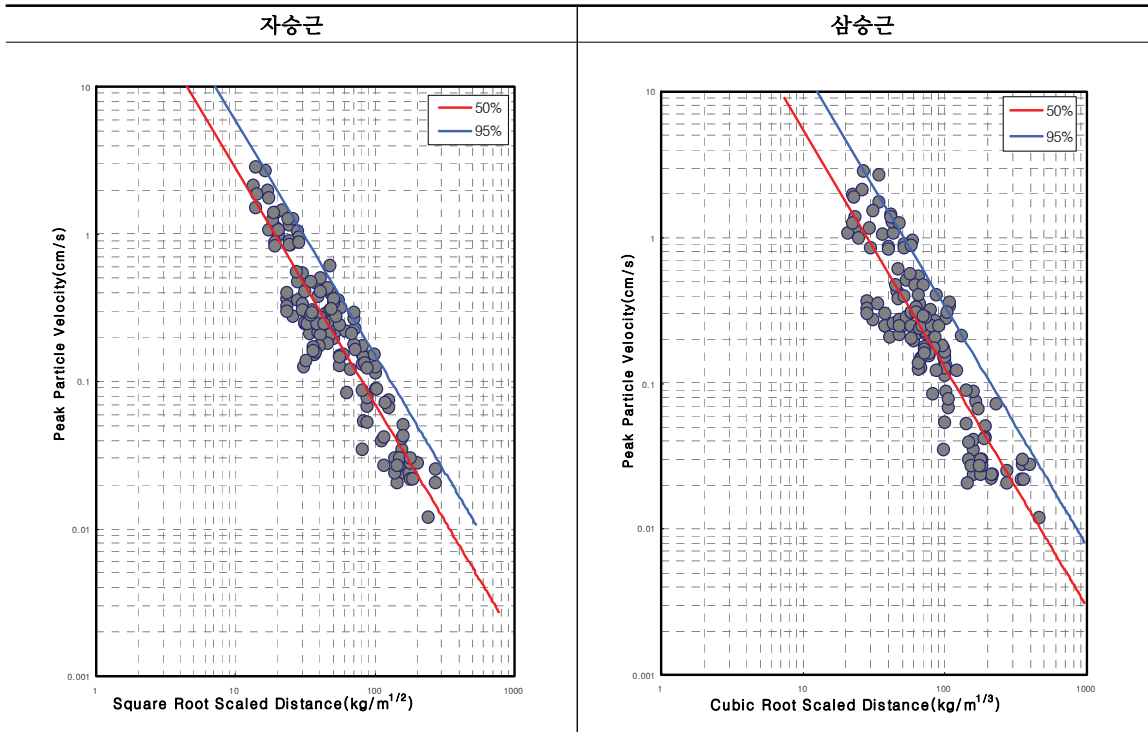


Fig. 3-a. 전기발파 진동추정식.

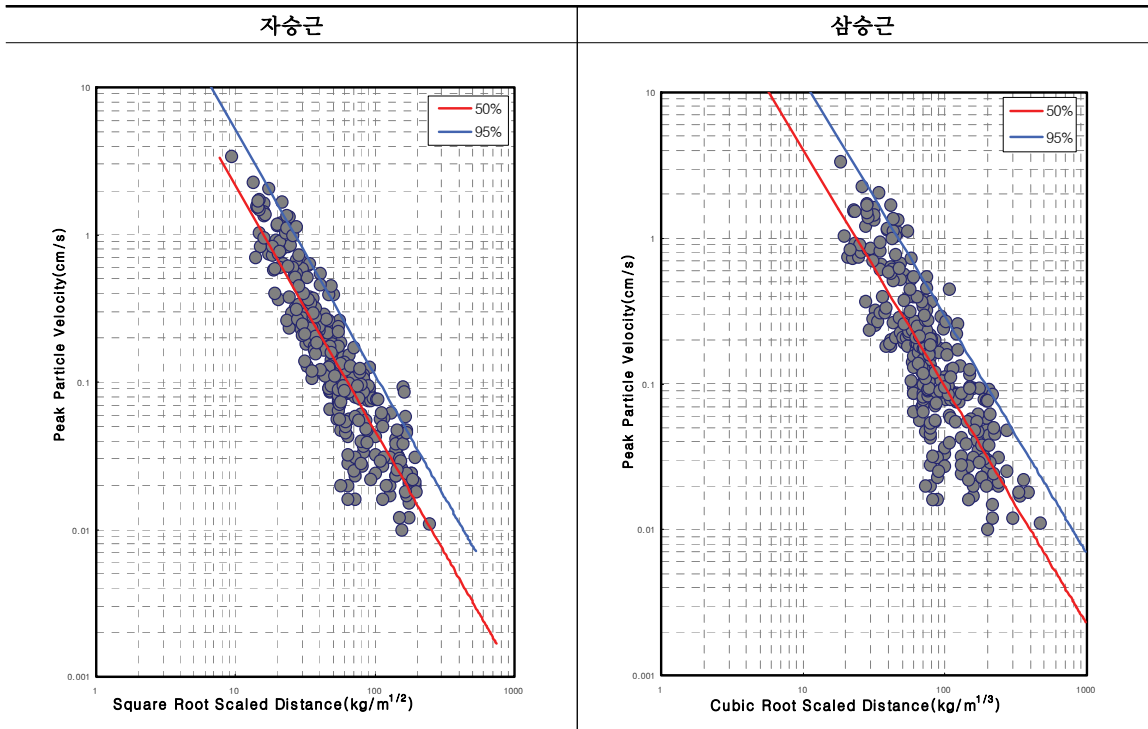


Fig. 3-b. 전자발파 진동추정식.

3) 이격거리별 지발당 장약량 검토

전기 및 전자뇌관 진동추정식 중 삼승근에 비해 상관성이 높은 자승근 진동추정식을 통해 보호대상 보안물건의 진동허용기준에 대한 거리별 최대 지발당 장약량을 Table 8에 나타냈으며, 동일거리에서 전자뇌관을 사용할 경우 전기뇌관에 비해 약 1.5배 지발당 장약량을 많이 사용하더라도 동일 허용기준을 준수할 수 있을 것으로 분석된다.

4) 지발당 장약량에 따른 거리별 진동 예측

Table 7의 전기 및 전자발파 자승근 진동추정식을 통해 적용 지발당 장약량에 따른 이격거리별 진동을 예측하면 Table 9와 같이 동일거리에서 전기발파에 비해 전자발파 시 평균 약 30% 진동이 감소되는 것으로 분석된다.

Table 8. 진동허용기준에 대한 이격거리별 지발당장약량 비교

거리(m)	지발당 장약량(kg)				거리(m)	지발당 장약량(kg)			
	0.1cm/s		0.2cm/s			0.1cm/s		0.2cm/s	
	전기	전자	전기	전자		전기	전자	전기	전자
10	0.006	0.009	0.014	0.020	110	0.713	1.042	1.704	2.414
20	0.024	0.034	0.056	0.080	120	0.848	1.240	2.028	2.873
30	0.053	0.078	0.127	0.180	130	0.995	1.455	2.380	3.372
40	0.094	0.138	0.225	0.319	140	1.154	1.688	2.760	3.911
50	0.147	0.215	0.352	0.499	150	1.325	1.938	3.168	4.489
60	0.212	0.310	0.507	0.718	160	1.507	2.205	3.605	5.108
70	0.289	0.422	0.690	0.978	170	1.702	2.489	4.070	5.766
80	0.377	0.551	0.901	1.277	180	1.908	2.790	4.563	6.465
90	0.477	0.698	1.141	1.616	190	2.126	3.109	5.084	7.203
100	0.589	0.861	1.408	1.995	200	2.355	3.445	5.633	7.981

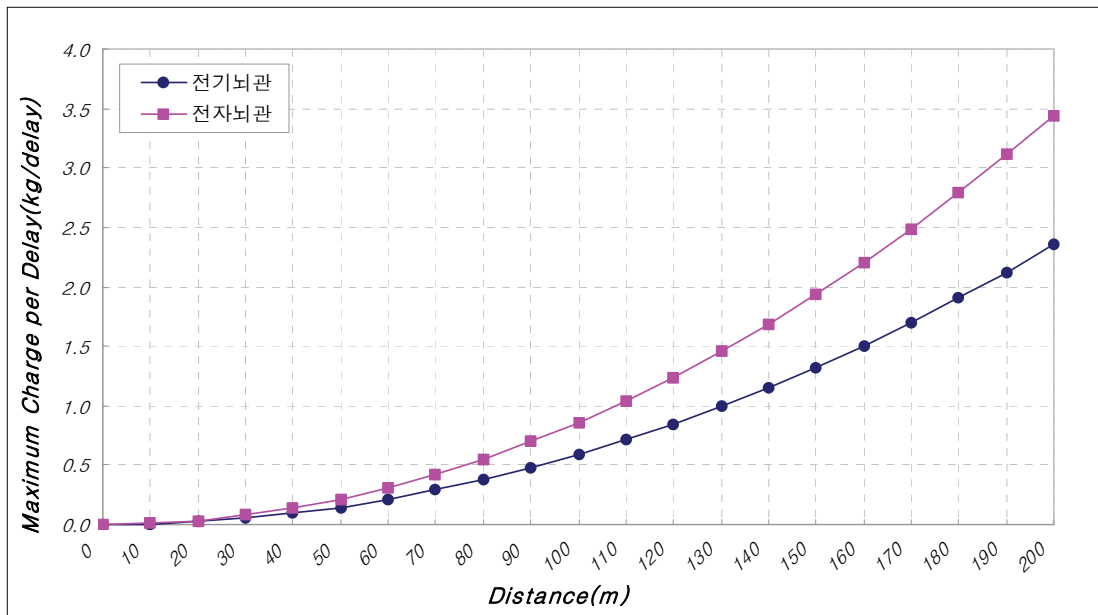


Fig. 4. 0.1cm/s 진동기준 시 이격거리별 지발당 장약량 비교.

Table 9. 지발당 장약량에 따른 이격거리별 예상 진동 비교

거리(m)	예상 진동(cm/s)							
	0.25kg		0.5kg		0.75kg		1.0kg	
	전기	전자	전기	전자	전기	전자	전기	전자
20	0.654	0.513	1.135	0.909	1.566	1.270	1.969	1.610
40	0.217	0.163	0.377	0.290	0.520	0.405	0.654	0.513
60	0.114	0.084	0.198	0.148	0.273	0.207	0.343	0.263
80	0.072	0.052	0.125	0.092	0.173	0.129	0.217	0.163
100	0.051	0.036	0.088	0.064	0.121	0.089	0.152	0.113
120	0.038	0.027	0.066	0.047	0.091	0.066	0.114	0.084
140	0.030	0.021	0.051	0.037	0.071	0.051	0.089	0.065
160	0.024	0.017	0.042	0.029	0.057	0.041	0.072	0.052
180	0.020	0.014	0.034	0.024	0.048	0.034	0.060	0.043
200	0.017	0.011	0.029	0.020	0.040	0.028	0.051	0.036

4. 결론

본 연구에서는 2017년 06월~2018년 12월까지 지질 및 지반조건, 발파목적, 발파방법, 발파패턴이 다른 국내 여러 지역의 노천발파 현장에서 실시된 전기 및 전자발파 시 수집된 진동 데이터를 종합 분석하여 전기 및 전자뇌관 발파 진동전파 특성을 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전기 및 전자뇌관 발파 시 진동전파 특성을 비교한 결과 자승근 환산거리와 진동속도와의 상관계수는 전기발파 시 $R=0.93$, 전자발파 $R=0.90$ 으로 유의성 있는 결과가 도출되었으며, 진동상수는 전기발파 시 $K=230.7$, 전자발파 $K=225.7$, 감쇠지수는 각각 $n=-1.59$ 와 -1.65 를 나타내었다.

2. 전자발파는 전기뇌관에 비해 동일 지발당 장약량 적용 시 동일 거리에서 진동은 평균 약 30%정도 감소효과가 있는 것으로 확인되었으며, 같은 거리에서 최대허용 지발당 장약량은 전기발파에 비해 전자발파 시 약 1.5배 증가시키더라도 보호대상 보안물건

에 대한 진동허용기준을 충족시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

3. 상기 제시된 발파진동추정식은 아직까지 국내 모든 암반 및 발파현장의 지형 및 지반조건을 대별하기에는 미흡한 것으로 판단되며, 다양한 지질 및 지반조건, 발파조건이 반영된 발파자료를 축적하고 추가적인 분석을 통한 지속적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 양형식 외 7명, 2006, 도로공사 노천발파 설계, 시공 지침, 건설교통부
2. Dingxiang Zou, 2016, Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering, Hong Kong, pp.194-197
3. IME, 2017, Electronic Blast Initiation Systems (EBIS) Guideline, General User Information for Mining, Quarrying and Construction Applications, pp. 7~9



이 기 근
(주)네스트엔지니어링 전무

Tel: 051-202-6452
E-mail: gigamite@hanmail.net



이 천 식
(주)네스트엔지니어링 대표

Tel: 051-202-6452
E-mail: gigamite@hanmail.net



황 남 순
(주) 한화 기술지원팀

Tel: 02-729-1557
E-mail: namsun@hanwha.com



이 동 희
(주) 한화 기술지원팀

Tel: 02-729-1557
E-mail: flyldh@hanwha.com