

전자뇌관과 전기뇌관을 사용한 시추공 발파시험에서의 지반진동 특성에 관한 비교 연구

최형빈¹⁾*, 원연호²⁾

Comparative Study on the Characteristics of Ground Vibrations Produced from Borehole Blast Tests Using Electronic and Electric Detonators

Hyung-Bin Choi and Yeon-Ho Won

Abstract Ground vibration caused by blasting in the urban area close to structures can give some indirect damage to human body and may lead to structural damage to buildings. At the stage of design or when complaints were filed by residents, the test blasting in borehole, which is most practical for expressing simple vibration wave form quantitatively, is usually chosen for assessing the degree of damage to structures. In this paper, some lessons gained from the application of electronic detonator triggering system in borehole test blasting are presented. The difference in delay time of detonator when borehole is blasted by electronic detonator and electric detonator are discussed. The peak particle velocities measured at the structure embedded in the similar rock layer to main line of tunnel at test site and measured at the road surface just above the tunnel having different overburden layers were analysed to draw their relationship. By comparing the results with those appearing in some published literatures, the usefulness of the borehole test blasting and the importance of delay time of detonator are addressed.

Key words Electronic detonator, Borehole blasting, Delay time, Ground vibration

초 록 도심지 특성상 주변구조물에 근접한 발파로 발생하는 지반진동은 인체에 간접피해와 구조물에 물적피해를 줄 수 있다. 설계단계 또는 시공 전 민원발생 시 구조물의 피해정도를 평가하는 방법으로는 단순 진동파형을 정량적으로 표현하는데 가장 접근성이 좋은 시추공 발파시험이 주로 이용되고 있다. 본 연구는 소량의 폭약으로 인위적인 진동에너지를 발생시키는 발파시험에 전자뇌관 기폭시스템을 처음 적용하였다. 전기뇌관 시추공 발파와 전자뇌관 시추공발파의 뇌관 지연시차 상관관계, 시험장소의 터널본선과 유사 암층에 시설된 구조물에서 측정된 PPV와 서로 다른 매개 층을 포함한 터널상부 지상도로에서 측정된 PPV의 상관관계, 기존 연구결과 얻어진 시추공발파 및 터널발파 PPV와의 상관관계를 비교·분석하여 시추공 발파의 유용성과 뇌관 지연시차의 중요성을 언급하고자 한다.

핵심어 전자뇌관, 시추공발파, 지연시차, 지반진동

1. 서 론

도심지 특성상 발파에 의한 터널굴착공법은 주변구조물과의 근접발파로 수반되는 지반진동 전파로 인하여 발파환경 민원발생 사례가 급증하고 있다. 지반진동에 의한 민원발생 유형은 인체의 감응정도에 따른 인적 피해뿐만 아니라 구조물의 물적 피해를 포함하

¹⁾ High ENC 기술사 사무소 대표

²⁾ I&B 기술사 사무소 대표

* 교신저자 : pebin@hanmail.net

접수일 : 2010년 12월 9일

심사 완료일 : 2010년 12월 21일

게재 승인일 : 2010년 12월 24일

고 있으므로 시공자의 안전성 확보가 요구된다.

구조물 피해정도를 평가하기 위한 진동속도의 예측식은 차원해석에 의한 경험식을 이용하는 간접방식과 시추공·누두공·실규모 발파기법 등을 통하여 구하는 직접방식, 정량적으로 구하여진 진동속도를 동해석 모델링 기법(최성웅 외, 2008; 전병규 외, 2007)의 보정치를 이용한 예측식을 들 수 있다. 이들 중 발파 시험 장소가 복잡한 조건들을 만족시키지 못할 때 단순 진동파형을 정량적으로 표현하는데 가장 접근성이 좋은 시추공 발파시험을 택하는 것이 일반적이다. 따라서 시험 장소는 도심지 터널공사 현장으로서 터널 근접발파 조건과 발파공사 시작 전이라는 특수성을 포함하고 있으므로 소량의 폭약으로 인위적인 진동에너지원을 전달하는 시추공 발파시험 기법을 적용하였으며, 이때 정밀한 뇌관 지연시차에 의한 진동파형을 분석하기 위하여 전자뇌관 기폭시스템(윤지선 외, 2007)을 시추공 발파에 처음 사용하였다. 본 연구는 전기뇌관 시추공 발파(최형빈, 2008, 2009)와 전자뇌관 시추공발파의 뇌관 지연시차 상관관계, 시험장소의 터널본선과 유사 압층에 시설된 구조물에서 측정된 PPV와 서로 다른 매개 층을 포함한 터널상부 지상도로에서 측정된 PPV(최병희 외, 2008)의 상관관계, 기존 연구결과(임성식과 양형식, 2003) 얻어진 시추공발파 및 터널발파 PPV와의 상관관계를 비교·분석하여 시추공 발파의 유용성과 뇌관 지연시차의 중요성을 언급하고자 한다.

2. 발파시험 방법 선정

시공사는 발파환경공해에 대한 민원억제 차원에서

설계 초기단계부터 표 1과 같이 진동파형 분포 특성에 따른 진동영향권을 파악하기 위하여 여러 가지 발파시험 방법을 시행하고 있다. 터널발파 설계의 경우 동일한 설계단면과 암반조건 등을 만족하는 실규모 시험장소 등을 확보하지 못하였을 때 시추공 발파시험은 현장 시추공에서 직접 진동속도를 측정, 정량적으로 표현하는데 가장 쉽게 접근할 수 있으며, 설계입지상수 획득을 위해 사용되는 거의 유일한 방법이다.

3. 현장시험

3.1 주변현황 및 위치도

시험 장소는 도심지 터널공사 현장으로서 터널 측벽부로부터 거리 18~41m에 구조물들이 있으며(그림 1 참조), 5.0~6.7m 간격으로 진동에너지를 전달할 수 있는 NX(Φ76mm) 규격 회전수세식 시추공 3공을 천공하였다.

3.2 지질 및 지층구성

본 지역의 지질은 선캄브리아기의 변성암류가 기반암을 이루고 있고 그 상부를 수계에 의해 형성된 신생대 제4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 기반암인 호상 흑운모 편마암은 본 지역의 경기편마암 복합체 중 가장 광범위한 범위를 보이고 있으며, 풍화토층이 지표 가까이 암반층을 피복하고 그 하부는 풍화암층·연암층 순으로 구성되어 있다(표 2 참조). 기존자료의 실내시험 및 시추조사(그림 2 참조) 결과, 얻어진 암석의 물성자료는 표 3과 같이 일축압축강도 42~59MPa, 탄성파속도 2,670~3,900m/s, 포아송비

표 1. 발파시험 종류

구 분	시추공 발파	누두공 발파	실규모 발파	경험식 적용
방 법	시추공을 대상으로 장약량과 심도를 달리하면서 수회 발파 실시→지반진동 측정→진동상수 획득	누두암을 대상으로 수회 발파 실시→누두지수 획득→지반진동 측정→진동상수 획득	유사암반조건 Site에서 실규모 발파 실시→지반진동 측정→진동상수 획득	미광무국·서울지하철(1983) 등 이론식 적용→구조물 등 진동수준 예측
발파심도	수~수십 m	지표면 ±1.0~3.5m	±1.0~3.5m	-
특 성	- 굴착효율성, 굴진율, 암파쇄입도 미확인 - 암 파쇄 입도 예측 - 입지상수 획득	- 누두지수 및 발파 진동상수 획득 - 비산방지대책 요구 - 암반노출 요구	- 굴착효율성, 굴진율, 암파쇄 입도 확인 - 입지상수 획득 - 장소확보가 어렵다.	- 지반조건 미고려→일괄적인 발파진동 상수 적용
입도분석	확인불가	확인가능	확인가능	확인불가

0.21~0.24의 분포를 보였다.

3.3 시추공 발파시험 조건

시추공 발파 현장시험은 정밀한 뇌관 지연시차에 의한 진동특성 분석을 위하여 전자뇌관 기폭시스템을

이용한 것이 특징이며, 단일공 수회 발파에서 나타날 수 있는 시추공벽 손실을 피하기 위하여 200ms 시차 간격의 지발발파를 행하였다.

시추공 발파를 위한 폭원 위치는 시험장소 공사현장의 도심지 터널단면을 고려하여 굴착예정선공, 심

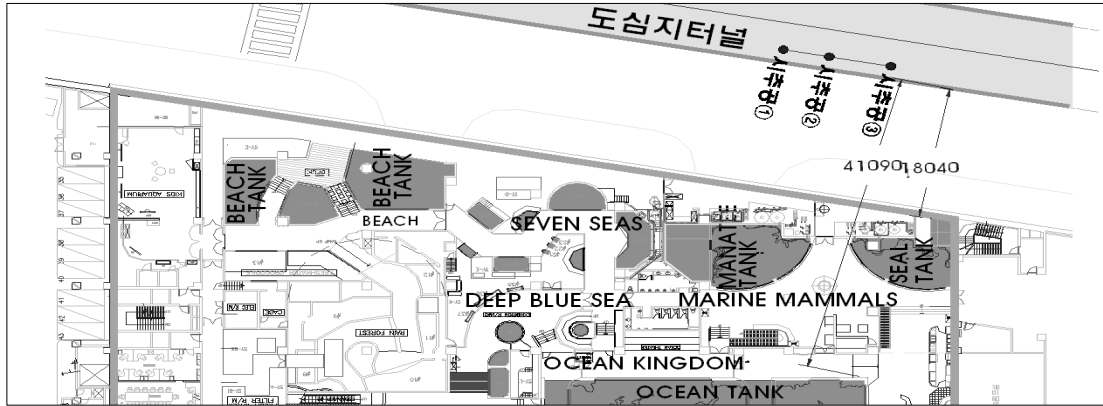


그림 1. 주변 현황도.

표 2. 지층구성

시추공번	심도 (GL-m)	지하수위 (GL-m)	층 후(m)			
			매립층	풍화토층	풍화암층	연암층
시추공①	20.5	-15.0	0.0~5.2	5.2~8.0	8.0~17.5	17.5~20.5
시추공②	20.3	-15.2	0.0~4.8	4.8~8.5	8.5~14.5	14.5~20.3
시추공③	20.0	-13.0	0.0~5.2	5.2~8.0	8.0~17.5	17.5~20.0

표 3. 실내암석시험 결과

일축압축강도(MPa)	단위중량(kN/m ³)	탄성파속도(m/s)	포아송비
42.0~59.0	25.8~27.1	2,670~3,900	0.21~0.24

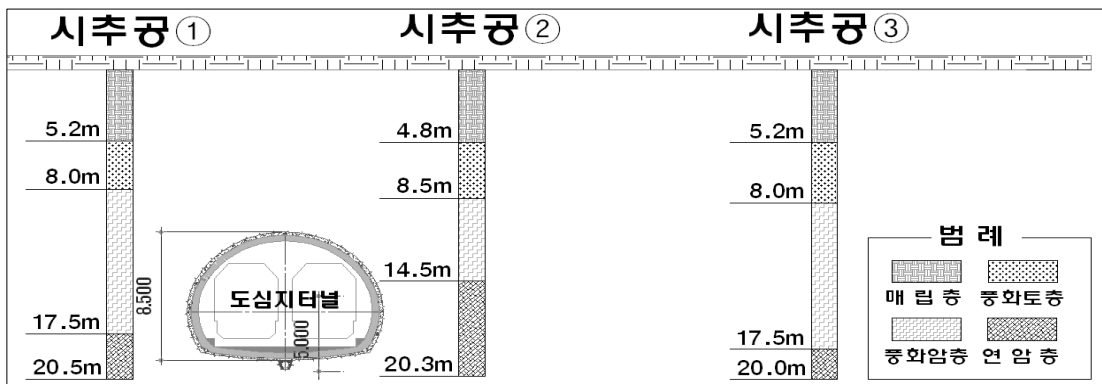


그림 2. 시추주상도.

발공, 바닥공에 해당되는 10, 15, 20m로 정하였고 지발당 장약량은 최소 굴진장을 고려하여 0.250~0.500kg을 사용하였다(그림 3 참조).

시공사의 설계당시 발파진동추정식

$$V = 778.154 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.440}$$

을 적용하면 구조물에서

진동속도는 거리 18m에서 0.218~0.383cm/s로 예측

표 4. 시추공발파 시험조건

구 분	세 부 조 건		
	시추공①	시추공②	시추공③
암 종	풍화암층 · 연암층	풍화암층 · 연암층	풍화암층 · 연암층
천공경(NX)	Φ76mm	Φ76mm	Φ76mm
천공심도(GL-m)	20.5	20.3	20.0
장약심도(GL-m)	①10, ②15, ③20	①10, ②15, ③20	①10, ②15, ③20
발파회수(회)	지발발파(1)	지발발파(2)	
기폭시차(ms)	①0, ②200, ③400	①0, ②200, ③400	④900, ⑤1100, ⑥1300
지발당장약량(kg)	①0.375, ②0.375, ③0.500	①0.250, ②0.375, ③0.500	④0.250, ⑤0.375, ⑥0.500
총장약량(kg)	1.250	1.125	1.125
사용화약류	에멀전 폭약(Φ32mm× 295mm× 250g) 및 전자뇌관		
전색(tamping)	골재(Φ13mm) 및 모래		

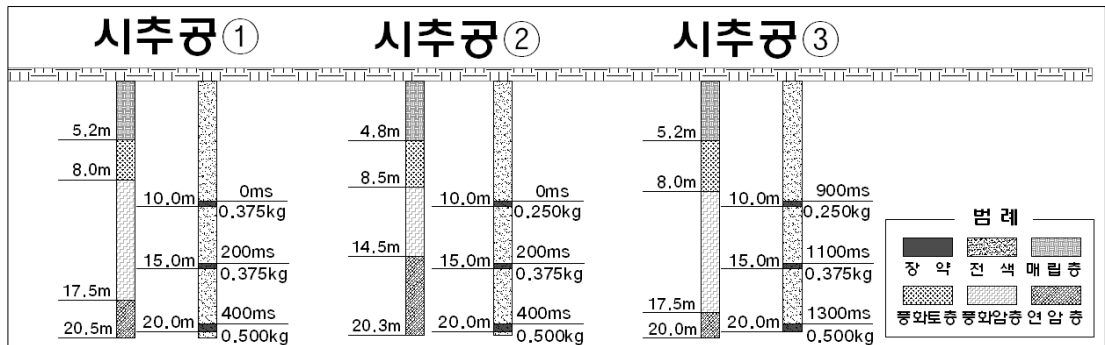


그림 3. 시추공 발파시험 모식도.



그림 4. 시추공 발파시험 절차.

표 5. 폭약







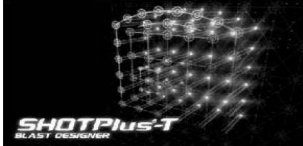
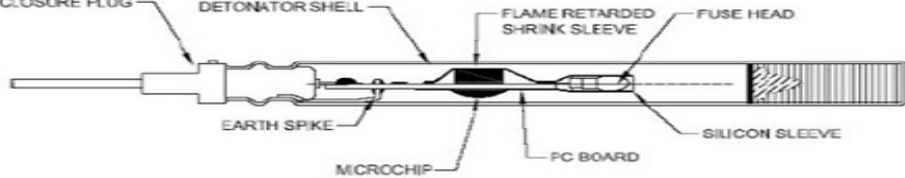
에멀전 폭약	<ul style="list-style-type: none"> - 유중수적형(water in oil)의 에멀전 폭약 - 내한성 · 내수성 · 안전성(열, 마찰, 충격 등) 및 후가스가 우수한 폭약으로 취급이 용이 	
--------	--	--

표 6. 전자뇌관

	<ul style="list-style-type: none"> - 전자 IC회로에 의하여 1ms 이상 단위로 지연시차 부여 - 기폭시차 정밀도에 의한 진동 분해능력 우수 - 1ms 단위로 기폭시차 설정 가능 - 파형중첩에 의한 진동 증가 현상이 나타나지 않음. - 현장 암반 및 발파조건에 맞는 최적 시차조절이 가능 		
전자뇌관 발파시스템	 <p>전자뇌관</p>	 <p>연결용 전선</p>	 <p>스캐너(시차입력)</p>
	 <p>발파기(뇌관과양방향통신)</p>	 <p>네트워크 테스트기</p>	 <p>설계 프로그램</p>
	 <p>전자뇌관 내부구조</p>		

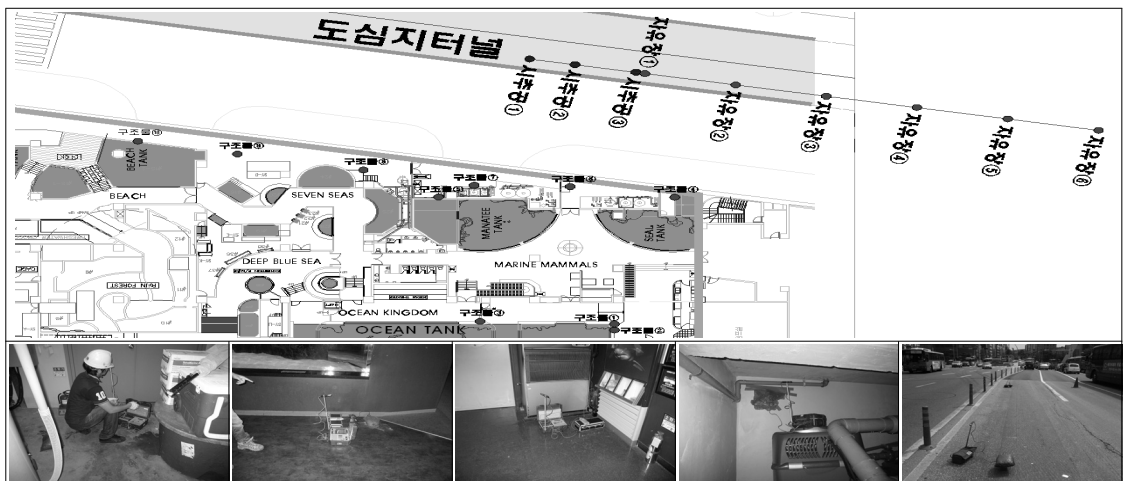


그림 5. 계측위치도.

할 수 있다. 즉, 국내(Technical Specifications, UCN 3 & 4)에서 비교적 보수적인 양생 콘크리트구조물 허용기준치인 양생시간 12~24 시간대의 1.27cm/s 이하이므로 최대 지발당 장약량 0.5kg을 선정하였다. 시추공발파 작업과정은 그림 4와 같이 전폭약포 제작, 장약, 전색, 결선, 전자뇌관 IC 회로 시험, 발파 순으로 전개된다.

3.4 사용 화약류 특성

시추공 발파시험에 사용된 화약류는 표 5 및 6과 같이 에멀전 폭약과 전자뇌관을 사용하였다.

3.5 지반진동 계측

사용된 계측기기는 변위·진동속도·진동가속도·주파수·폭풍압·소음을 모두 측정할 수 있는 전용진동계(Blastmate 모델)를 사용하였다. 이 장비는 진

동속도 PPV를 측정하고, PVS 값도 계산하여 출력해 준다.

계측위치는 진동 추정식 도출을 위한 입지상수 획득을 위하여 지하구조물 10 개소에 설치하였고 진동 특성의 상관관계 비교를 위하여 터널본선 상부 지상도로 자유장 6개소에 시추공 ③에서 1m 떨어진 지점으로부터 10m 간격으로 51m까지 거리를 달리하면서 추가 설치하였다(그림 5 참조).

4. 자료획득 및 분석

4.1 진동계측 결과

지발당 장약량과 거리를 달리하면서 계측한 PPV는 지하구조물 21.2~55.6 m에서 0.008 ~0.82cm/s, 터널상부 지상도로 자유장 9.7~65.6m에서 0.0302~0.4050 cm/s의 진동수준을 보였다(표 7, 8 참조).

표 7. 진동계측 결과(지하구조물)

표본수	계측위치	지발당장약량(kg)	거리(m)	PPV(cm/s)	PVS(cm/s)
9	구조물①	0.250~0.500	43.9~48.8	0.030~0.054	0.032~0.054
9	구조물②	0.250~0.500	44.8~48.5	0.029~0.057	0.033~0.062
9	구조물③	0.250~0.500	45.7~47.0	0.017~0.051	0.018~0.054
9	구조물④	0.250~0.500	22.1~29.8	0.065~0.181	0.081~0.225
9	구조물⑤	0.250~0.500	26.0~31.3	0.035~0.117	0.039~0.117
9	구조물⑥	0.250~0.500	21.2~23.6	0.059~0.282	0.064~0.282
9	구조물⑦	0.250~0.500	22.8~27.2	0.043~0.152	0.061~0.168
3	구조물⑧	0.250~0.500	26.5~34.7	0.063~0.117	0.073~0.120
9	구조물⑨	0.250~0.500	35.8~45.9	0.021~0.121	0.023~0.127
9	구조물⑩	0.250~0.500	44.7~55.6	0.008~0.035	0.011~0.030
84	-	-	-	-	-

표 8. 진동계측 결과(지표도로 상부)

표본수	계측위치	지발당장약량(kg)	거리(m)	PPV(cm/s)	PVS(cm/s)
9	자유장①	0.250~0.500	9.7~23.2	0.142~0.405	0.211~0.493
9	자유장②	0.250~0.500	14.6~29.9	0.105~0.283	0.137~0.318
9	자유장③	0.250~0.500	23.1~38.0	0.078~0.159	0.114~0.182
9	자유장④	0.250~0.500	32.5~46.9	0.042~0.122	0.057~0.131
9	자유장⑤	0.250~0.500	42.1~56.2	0.038~0.083	0.046~0.086
6	자유장⑥	0.250~0.500	51.9~65.6	0.032~0.057	0.038~0.078
51	-	-	-	-	-

표 9. 입지상수

구 분	진동상수(k)	장약지수(b)	감쇠지수(n)	결정계수(r ²)	진동 추정식	예측구간
지 하 구조물	110.186	½	-1.895	0.76	$V_{50\%} = 110.186 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.895}$	50%
	199.397				$V_{95\%} = 199.397 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.895}$	95%
	95.105	⅓	-1.939	0.74	$V_{50\%} = 96.105 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.939}$	50%
	178.867				$V_{95\%} = 178.867 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.939}$	95%
지 상 도로	17.984	½	-1.310	0.76	$V_{50\%} = 17.984 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.310}$	50%
	31.669				$V_{95\%} = 31.669 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.310}$	95%
	14.579	⅓	-1.311	0.76	$V_{50\%} = 14.579 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.311}$	50%
	25.572				$V_{95\%} = 25.572 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.311}$	95%

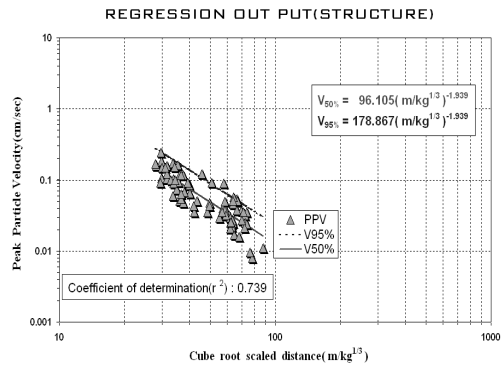
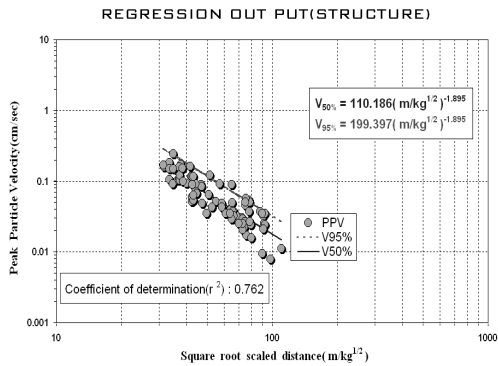


그림 6. 환산거리와 진동속도의 관계(지하구조물).

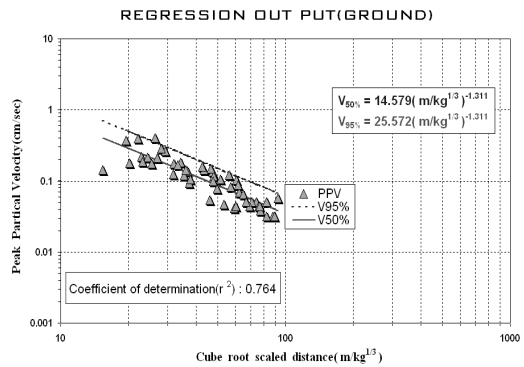
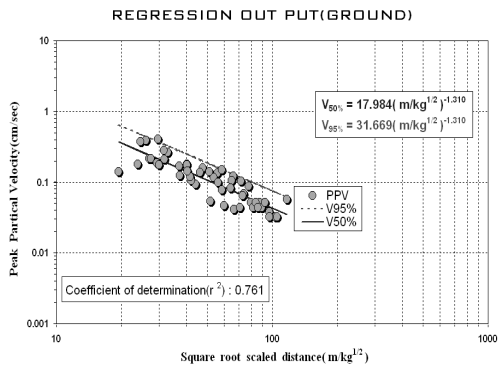


그림 7. 환산거리와 진동속도의 관계(지상도로).

4.2 진동추정식 도출

발파진동의 이론적인 특성을 관련된 변수의 차원해석으로 여러 가지 경험식 중 Devine의 이론식을 적용하였다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad (1)$$

위 식에서 V 는 지반진동속도(cm/sec), D 는 폭원과 측점간 거리(m), W 는 지발당장약량(kg), K , b , n 은 상수이다.

현장계측을 통하여 지하구조물에서 총 84개와 터널 본선 상부 지상도로에서 총 51개 표본수를 추출하였다. 시험대상지역에서는 PPV에 대한 진동상수(k), 감쇠지수(n)를 도출하여 진동속도 상관관계를 비교하였다. 즉, 최대입자속도(PPV)와 환산거리(D/W^b)의 관계를 선형 회귀분석에 의한 통계처리 방법으로 각 상수들(K , b , n)을 구하였다(표 9 참조). 이때 평방근 환산거리(square root scaled distance; SRSD)와 입방근 환산거리(cube root scaled distance; SRSD) 모델을 각기 적용하여 회귀분석 하였으며, 회귀선과 95% 예측구간의 상한선에 대한 예측식을 도출하였다(그림 6, 7 참조).

4.3 진동특성 감쇠율 비교

지하구조물과 터널 상부 지상도로 자유장의 진동특성을 비교해보면 진동상수(k)와 감쇠지수(n)는 후자가 매우 낮게 나타났다. 전자의 경우 암반층을 통하여 구조물에 전달되는 진동특성은 암반의 불연속면 등 기하학적 형태를 반영하고, 후자의 경우는 지하매질물, 도로특성상 서로 다른 매개 층(층다짐, 아스콘포장 등)의 특성을 반영하기 때문이다. 현장시험에서 얻어진 k, n 값은 지반특성이나 발파방법 등의 많은 변

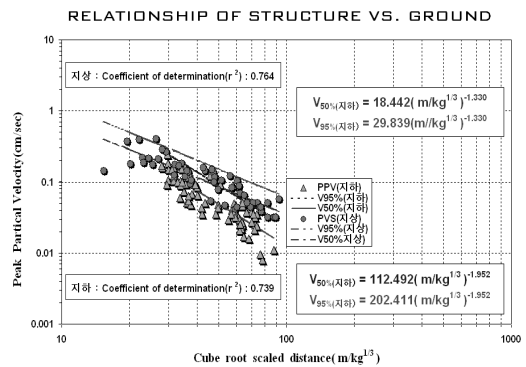
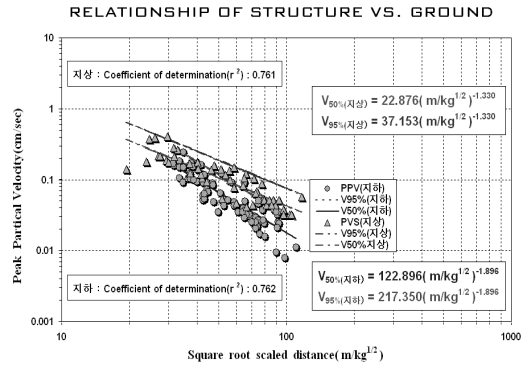


그림 8. 진동추정식 비교(1).

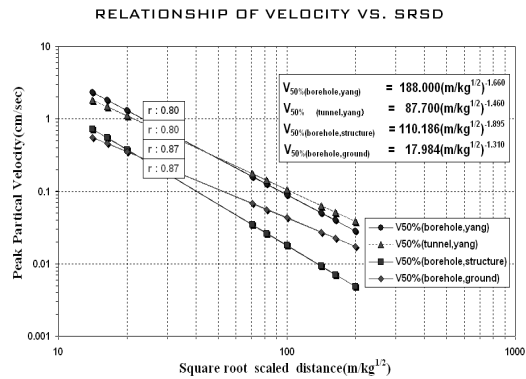


그림 9. 진동추정식 비교(2).

표 10. PPV의 감쇠율 비교

SRSD(m/kg ^{1/2})	Borehole(yang)		Tunnel(yang)		Borehole(structure)		Borehole(ground)	
	cm/s	%	cm/s	%	cm/s	%	cm/s	%
1	188.000	0.0	87.700	46.6	110.186	58.6	17.984	9.6
10	4.113	0.0	3.041	73.9	1.403	34.1	0.881	21.4
50	0.284	0.0	0.290	102.0	0.066	23.4	0.107	37.6
100	0.090	0.0	0.105	117.2	0.018	19.9	0.043	47.9

수의 영향에 따라 변화할 수 있다.

시험장소에서 구하여진 입지상수를 SRSD 환산거리에 따른 진동속도로 비교하면 22m/kg^{1/2} 이하에서는 지하구조물에서 크게 나타났으며, 그 이상에서는 오히려 도로상부 자유장에서 크게 나타났다(그림 8 참조). 또한, 국내문헌의 연구결과(임성식과 양형식, 2003) 얻어진 입지상수와 상관관계를 비교해보면 그림 9와 같이 환산거리 45m/kg^{1/2} 이하에서 Borehole(임성식과

양형식) > Tunnel(임성식과 양형식) > Borehole(지하구조물) > Borehole(도로상부), 환산거리 45m/kg^{1/2} 이상에서 Tunnel(임성식과 양형식) > Borehole(임성식과 양형식) > Borehole(지하구조물) > Borehole(도로상부) 순으로 나타났다. 즉, 진동상수는 터널 및 시추공발파의 메커니즘 차이보다 지반 및 암반조건에 의해 결정되는 원인이 큰 것으로 판단된다. 표 10에는 PPV의 감쇠율 비교 결과가 나타나 있다.

표 11. 거리별 지발당 장약량 비교

거리 (m)	지발당 장약량(kg)							
	지하 구조물				지상도로			
	SRSD50%		CRSD50%		SRSD50%		CRSD50%	
	0.3cm/s	0.5cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s	0.3cm/s	0.5cm/s
2	0.008	0.013	0.001	0.002	0.008	0.017	0.001	0.004
4	0.031	0.054	0.009	0.019	0.031	0.067	0.009	0.028
6	0.071	0.121	0.029	0.063	0.069	0.152	0.030	0.096
8	0.126	0.216	0.068	0.150	0.124	0.269	0.071	0.227
10	0.197	0.337	0.133	0.293	0.193	0.421	0.138	0.444
15	0.442	0.758	0.449	0.990	0.434	0.947	0.465	1.497
20	0.786	1.348	1.065	2.347	0.772	1.684	1.102	3.549
25	1.229	2.106	2.080	4.584	1.207	2.632	2.152	6.931
30	1.769	3.033	3.594	7.921	1.737	3.790	3.719	11.976
35	2.408	4.128	5.707	12.578	2.365	5.158	5.906	19.018
40	3.145	5.392	8.520	18.775	3.089	6.737	8.816	28.388
45	3.980	6.824	12.130	26.732	3.909	8.527	12.553	40.420
50	4.914	8.424	16.640	36.670	4.826	10.527	17.220	55.446
60	7.076	12.131	28.754	63.366	6.949	15.159	29.755	95.811
70	9.632	16.512	45.660	100.622	9.459	20.633	47.251	152.144
80	12.580	21.566	68.157	150.200	12.355	26.950	70.532	227.106
90	15.922	27.295	97.044	213.859	15.636	34.108	100.425	323.361
100	19.657	33.697	133.119	293.360	19.304	42.109	137.757	443.567

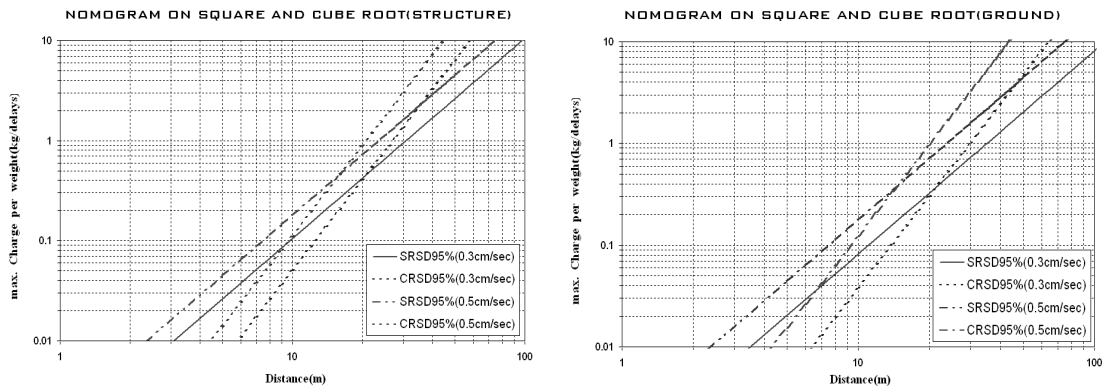


그림 10. 거리와 지발당 장약량 관계 (1).

4.4 지발당 장약량 비교

SRSD 또는 CRSD에 따른 지발당 장약량은 함수관계에서 하나의 교점을 만나게 된다. 교점에 준하여 가까운 쪽은 CRSD가 먼 쪽은 SRSD가 보수적인 값을 나타내는데 진동속도가 0.5cm/s일 때 지상구조물(도로상부) 16.0(14.5)m에서 환산거리에 관계없이 지발

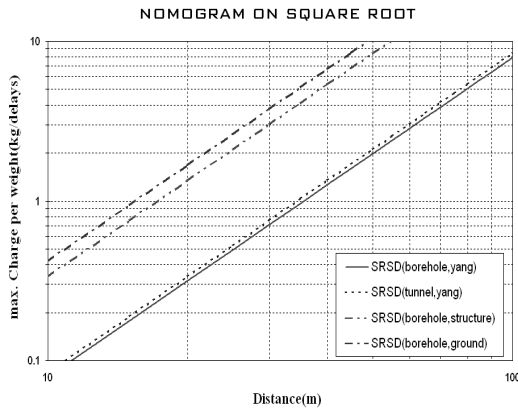


그림 11. 거리와 지발당 장약량 관계 (2).

당 장약량이 0.460(0.371)kg/delay로 동일하며, 그 이상(이하) 거리에서는 입방근(평방근) 환산거리의 지발당 장약량이 커지게 된다(그림 10 참조). 폭원과 측점간 거리가 교점거리보다 멀어지면 CRSD의 장약량이 기하급수적으로 증가하는 문제(최병희 외, 2010)를 해결하고 SRSD의 결정계수가 높게 나타났으므로 SRSD를 중심으로 거리변화에 따른 지발장 장약량을 비교하였다(그림 11 참조). 또한, 진동속도를 신뢰수준 50%와 95%로 비교할 수 있는데 95% 신뢰수준으로 비교할 때 추정치의 표준오차(standard error of estimate)가 클 경우 결정계수가 낮아짐에 따라 지발당 장약량은 크게 영향을 받는다(김일중 외, 2009). 따라서, 지발당 장약량은 진동속도의 중앙값인 50% 신뢰수준으로 비교하였다. 통계학적 안전성을 고려하여 진동속도 관리상 운영기법인 95% 한계선을 포함시키는 것이 바람직하다. 지하구조물과 터널 상부 지상도로에서 거리별 사용할 수 있는 지발당 장약량을 비교하면 근소한 차이를 보였으며, Borehole(임성식과 양형식) < Tunnel(임성식과 양형식) < Borehole(도로상부) < Borehole(지하구조물) 순으로 나타났다.

표 12. 진동파형 비교

구 분		세 부 내 용	
전 자 뇌 관 기 폭	시추공번	시추공①	시추공②·③
	압 중	풍화암층·연암층	풍화암층·연암층
	장약심도(-m)	①10,②15,③20	①10,②15,③20,④10,⑤15,⑥20
	발파회수(회)	지발발파(1)	지발발파(2)
	지발장약량(kg)	①0.375,②0.375,③0.500	①0.250,②0.375,③0.500,④0.250,⑤0.375,⑥0.500
	총장약량(kg)	1.250	2.250
	고유시차(ms)	①0,②200,③400	①0,②200,③400,④900,⑤1100,⑥1300
	폭평시차(ms)	①0,②200,③393	①0,②200,③393,④900,⑤1100,⑥1293
	시간차(ms)	7	7
	SRSD	42.5~61.0 m/kg ^{1/2} (21.2~23.6 m)	
전 기 뇌 관 기 폭	유 형	유형①	유형②
	압 중	연암층·경암층	연암층·경암층
	장약심도(-m)	①10,②12,③14,④16,⑤18	①5,②8,③11,④14,⑤17,⑥20
	발파회수(회)	지발발파(1)	지발발파(1)
	지발장약량(kg)	①0.6,②0.4,③0.8,④0.8,⑤0.6	①0.800,②0.800,③0.800,④0.400,⑤0.800,⑥0.800
	총장약량(kg)	3.2	4.4
	고유시차(ms)	①0,②400,③800,④1200,⑤1600	①0,②400,③800,④1200,⑤1600,⑥2000
	폭평시차(ms)	①0,②411,③845,④1333,⑤1698	①0,②406,③849,④1191,⑤1731,⑥2071
	시간편차(ms)	11~133	6~131
	SRSD	48.2~61.5m/kg ^{1/2} (36.1~38.9 m)	47.1~72.3 m/kg ^{1/2} (42.1~48.8 m)

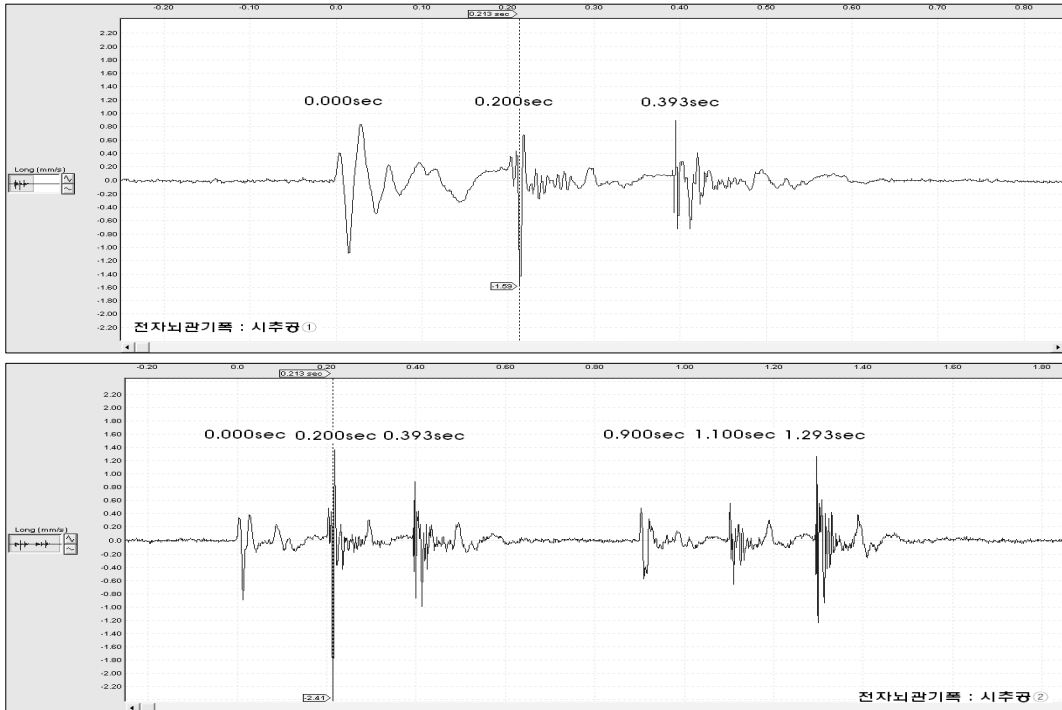


그림 12. 전자뇌관 시간이력곡선.

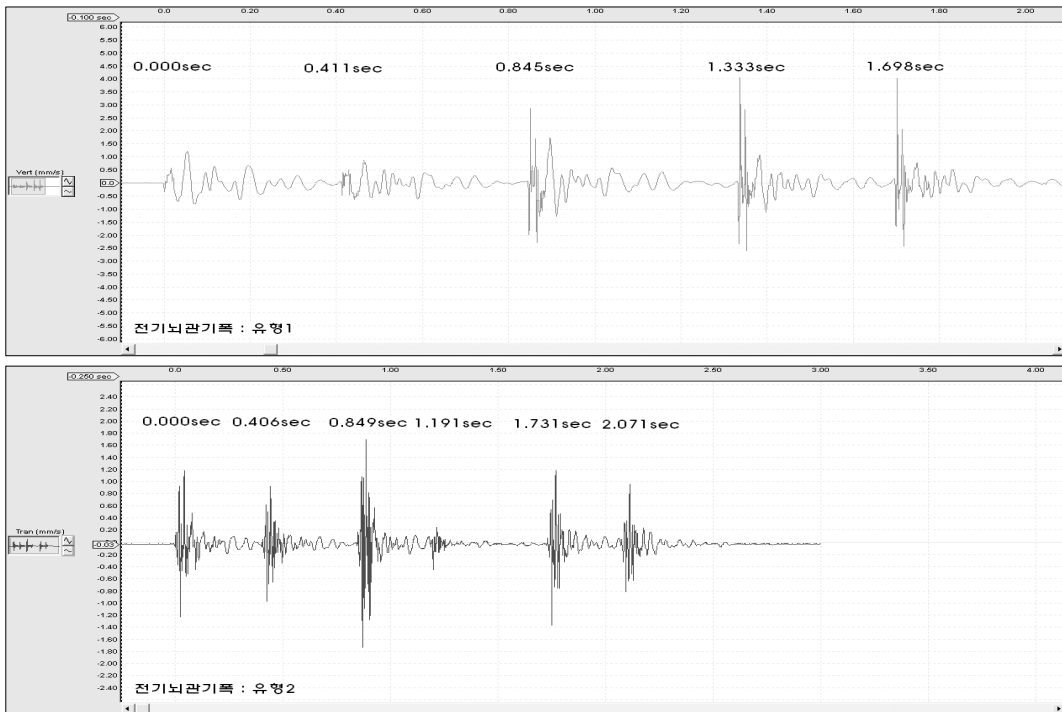


그림 13. 전기뇌관 시간이력곡선.

4.5 진동파형 분석 및 비교

표 12와 같이 진동파형 분석결과, 전자뇌관을 이용한 시추공 발파시 진동 시간이력은 전자뇌관 고유기폭시차와 시추공 발파시 폭굉되는 기폭시차를 비교하였을 때 평방근 환산거리 $42.5\sim 61.0\text{m/kg}^{1/2}$ 에서 7ms 편차를 보였으며, 400ms 대역에서 발생하였다. 전기뇌관을 이용한 시추공 발파시 진동 시간이력은 이와 유사한 평방근 환산거리 $47.1\sim 72.3\text{m/kg}^{1/2}$ 에서 6~113ms 편차를 보였으며, 특히 1,000ms 이후 시간이력에서 편차가 커짐을 알 수 있다. 즉, 그림 12, 그림 13에서 볼 수 있듯이 전자뇌관에 의한 기폭시차는 전기뇌관에 의한 기폭시차보다 거의 일정한 시간이력곡선을 보였다. 따라서 위의 시험방법은 극히 적은 부분을 포함하고 있으나 지연시차의 편차는 분명히 발생하고 있는 것으로 여겨지며, 전기 또는 비전기 뇌관 터널발파에서의 진동감쇠 효과는 뇌관 지연시차 100~500ms 대역을 수 회 영역 분할하여 지발당 장약량을 감소시키는 방법을 택하는데 이의 조건을 만족시키기 위해서는 뇌관 지연시차에서 발생하는 시간이력의 편차를 최소화하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

시험장소인 도심지 특정지역에서 전자뇌관을 이용한 시추공 발파시험 결과 얻어진 진동추정식으로 민원발생 특정장소에서 진동속도 예측이 가능토록 하였으며, 또한 전기뇌관과 전자뇌관 지연시차의 상관관계, 국내문헌 연구결과 얻어진 시추공발파 PPV의 상관관계를 비교·분석하여 시추공 발파의 유용성 및 중요성에 대해 연구하였다.

- 1) 시험 장소는 구조물과 18m의 근접발파조건에 해당되고 발파공사 시작 전이라는 특수성과 풍화암층·연암층을 포함하고 있으므로 전자뇌관을 이용한 시추공발파를 택하였으며, 회귀분석 통계처리를 위한 진동자료는 주변구조물 10개 측정점에서 84개, 지상도로 6개 측정점에서 51개를 획득하였다.
- 2) 시추공 천공심도는 도심지 터널단면을 고려하여 10·15·20m로 정하였고 지발당 장약량은 최

소 굴진장을 고려하여 0.25~0.50kg의 소량 폭약으로 진동에너지를 발생시켰으며, 단일공 수회 발파에서 나타날 수 있는 시추공벽 손실을 피하기 위해 200ms 간격의 지발발파를 행하였다.

- 3) SRSD에 따른 진동속도는 지하구조물 $< 22\text{m/kg}^{1/2}$, $22\text{m/kg}^{1/2} <$ 도로상부로 나타났다. 지하구조물에 전달되는 진동특성은 암반의 불연속면 등 기하학적 차이로 볼 수 있고 도로상부에 전달되는 진동특성은 지하매설물, 도로특성상 서로 다른 매개층과 계측센서에 전달되는 변수로 기인된다.
- 4) 국내문헌 연구결과(임성식과 양형식, 2003) 얻어진 시추공발파 및 터널발파의 입지상수 상관관계는 $45\text{m/kg}^{1/2}$ 이하에서 Borehole(임성식과 양형식) > Tunnel(임성식과 양형식) > Borehole(지하구조물) > Borehole(도로상부), 환산거리 $45\text{m/kg}^{1/2}$ 이상에서 Tunnel(임성식과 양형식) > Borehole(임성식과 양형식) > Borehole(지하구조물) > Borehole(도로상부) 순으로 나타났다. 진동속도가 0.5cm/s일 때 지하구조물과 터널 상부 지상도로에서 거리별 사용할 수 있는 지발당 장약량을 비교하면 2% 이내로 근소한 차이를 보였으며, Borehole(임성식과 양형식) < Tunnel(임성식과 양형식) < Borehole(도로상부) < Borehole(지하구조물) 순으로 나타났다. 이는 터널 발파와 시추공발파의 메커니즘 차이보다 지반 및 암반조건에 의해 결정되는 원인이 크므로 시추공 발파의 유용성은 필요한 것으로 여겨진다.
- 5) 전자뇌관과 전기뇌관을 이용한 시추공 발파진동 시간이력의 비교에서 전자의 경우 $42.5\sim 61.0\text{m/kg}^{1/2}$ 에서 7ms편차를 보였고 400ms 대역에서 발생하였다. 후자의 경우 $47.1\sim 72.3\text{m/kg}^{1/2}$ 에서 6~113ms 편차를 보였고 1,000ms 이후 시간이력에서 급격이 증가하는 현상을 보였다. 전기뇌관 지연시차의 편차발생은 있는 것으로 여겨지며, 전기 또는 비전기 터널발파에서 진동저감을 위한 영역분할 발파조건을 만족시키기 위해 편차발생을 최소화하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김일중, 기경철, 박정봉, 조영동, 김완석, 2009, 발파진동 추정식에 미치는 상관계수의 영향, 2009 춘계학술발표회 논문집, 대한화약발파공학회, pp. 33-40.
2. 윤지선, 임수환, 이진무, 이 효, 2007, 터널굴착 시 전자 뇌관과 비전자뇌관 발파에 관한 비교 연구, 2007 춘계학술발표회 논문집, 대한화약발파공학회, pp. 135-141.
3. 임성식, 양형식, 2003, 시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구, 화약 · 발파(대한화약 발파공학회지), Vol. 21, No. 2, pp. 15-19.
4. 전병규, 전석원, 나상민, 위용곤, 이상필, 2007, 진동저감을 위한 터널발파기법의 수치해석적 연구, 2007 춘계학술발표회 논문집, 대한화약발파공학회, pp. 67-79.
5. 최병희, 류창하, 이경진, 양형식, 2008, PPV, PVS에 의한 지반진동 허용기준의 설정에 관한 고찰, 2008 춘계학술발표회 논문집, 대한화약발파공학회, pp. 31-38.
6. 최병희, 류창하, 황현주, 최용근, 안명석, 2008, 제어발파의 설계 및 관리 과정에서의 PPV와 PVS의 역할, 화약 · 발파(대한화약발파공학회지), Vol. 26, No. 2, pp. 1-9.
7. 최병희, 류창하, 정주환, 2010, 제어발파설계에서 자승근 및 삼승근 환산거리 기법의 적용한계에 대한 고찰, 화약 · 발파(대한화약발파공학회지), Vol. 28, No. 1, pp. 27-39.
8. 최성용, 김재동, 선우춘, 2008, 현장계측 진동파형을 이용한 발파 동해석에 관한 연구, 2008 춘계학술발표회 논문집, 대한화약발파공학회, pp. 47-53.
9. 최형빈, 2008, 시추공발파를 이용한 발파영향평가보고서, 고현~하동 IC 국도건설공사, 대우건설(주), pp. 38.
10. 최형빈, 2009, 시추공발파를 이용한 발파영향평가보고서, 고속국도 제12호선 담양~성산간 확장공사, 현대건설(주), pp. 45.
11. Technical Specifications, UCN 3 & 4, EXHIBIT D, C.P. No. ; CP-C1, Spec. ; 9-192-C290, Rev.A.



최형빈

High ENC 기술사 사무소 대표

Tel : 02)2057-1891

E-mail : pebin@hanmail.net



원연호

I&B 기술사 사무소 대표

Tel : 031)487-1271

E-mail : won1407@hanmail.net