

시험발파 결과보고서

중앙선 도담~영천 복선전철 제1공구
노반건설공사

2015. 12

현대건설(주)

제 출 문

현대건설(주) 귀중

본 내용을 “중양선 도담~영천 복선전철 제1공구 노반건설공사” 중
하피터널 종점부구간에 대한 다단평행 미진동 전자발파 시험발파 결과
보고서로 제출 합니다.

2015. 12



(주) NSB 나우이엔씨
Engineering & Consultant

대표이사
공학박사
화약류관리기술사

김 남 수



미래창조과학부 등록번호 제 10-20-061호
서울시 광진구 독성로 58길 19, 광성빌딩 302호
TEL : 02-458-2646/7, FAX : 02-458-2648

용역 총괄 : 김 남 수(NSB나우이엔씨 대표이사, 화약류관리기술사, 공학박사)

용역 책임 : 정 용 호(NSB나우이엔씨 전무, 공학석사)

용역 수행 : 이 종 우(NSB나우이엔씨 상무, 화약류관리기사, 공학석사)

용역 수행 : 조 경 빈(NSB나우이엔씨 부장)

용역 수행 : 정 민 성(NSB나우이엔씨 차장, 화약류관리기사)

용역 수행 : 최 민 영(NSB나우이엔씨 대리)

자 문 : 김 갑 수(Orica Mining Services 한국지사장, 공학박사)

< 목 차 >

시험발파 요약	1
1. 서 론	7
1.1 시험발파의 목적	7
1.2 검토구간	7
1.3 과업수행 범위 및 내용	8
1.4 시험발파 수행절차	9
1.5 시험발파 수행내용	10
2. 공사 및 주변현황	11
2.1 공사 개요	11
2.2 주변 현황	11
2.3 시험발파 구간 암반상태	13
3. 발파공해의 특성 및 영향	14
3.1 발파진동의 특성	14
3.2 발파진동의 전파특성과 환산거리	16
3.3 진동레벨	17
3.4 발파진동이 구조물에 미치는 영향	18
3.5 발파진동이 인체에 미치는 영향	21
3.6 발파폭음(소음)의 영향	24
4. 발파진동 및 소음 허용기준치 설정	27
4.1 발파진동 허용기준	27
4.2 발파소음 허용기준	29
5. 시험발파 적용 발파공법 선정	30
5.1 발파설계 개요	30
5.2 적용 가능한 터널 굴착공법	31
5.3 전자발파 공법	32
5.4 다단평행 미진동 전자발파	36
5.5 다단평행 미진동 전자발파공법 분류와 시험발파공법 선정	38
5.6 시험발파 공법 선정	39

6. 시험발파 수행 및 측정내용	41
6.1 시험발파 현황	41
6.2 시험발파 위치도	41
6.3 시험발파 수행 및 개요	42
6.4 시험발파 적용패턴	43
6.5 시험발파 방법 및 내용	46
7. 발파진동·소음 측정 및 결과 분석	48
7.1 계측기의 사양 및 계측항목	48
7.2 계측기의 특성	48
7.3 계측기 설치 위치	50
7.4 배경소음 측정	51
7.5 발파진동·소음 측정 결과	52
7.6 발파진동 이력곡선 분석	53
7.7 발파 결과 분석	55
7.8 발파진동 추정식 산출	56
8. 굴착공법 및 발파패턴 선정	60
8.1 시험발파에 의한 발파영향권 분석	60
8.2 발파진동 영향분석에 따른 굴착공법 선정	60
8.3 굴착공법 선정	62
8.4 제안 발파패턴	63
8.5 암질 변화에 따른 발파패턴 적용 방안	66
9. 결론 및 제안	67
참고문헌	75

※ 첨부

1. 발파패턴도
2. 시험발파 관련 사진
3. 배경소음 계측 DATA SHEET
4. 발파진동·소음 계측 DATA SHEET
5. 사업자 등록증, 기술사사무소 개설 등록증 사본

시험발파 요약

1 시험발파의 목적

“중양선 도담~영천 복선전철 제1공구 노반건설공사” 하피터널 종점부 민가 하부 통과구간에 다단평행 미진동 전자발파 공법으로 시험발파를 실시하여 터널 지상부 주변 보안물건에 가장 안전하고 효율적인 발파공법을 선정하고자 한다.

1) 공사 개요

- (1) 공 사 명 : 중양선 도담~영천 복선전철 제1공구 노반건설공사
- (2) 과업구간 : 충청북도 단양군 단양읍 상진리 하피터널 종점부 일원
- (3) 발 주 처 : 한국철도시설공단
- (4) 감 리 사 : (주)이산 외
- (5) 시 공 사 : 현대건설(주)
- (6) 협 력 사 : (주)범양이엔씨

2) 보안물건 현황

보안 물건	시험발파 구역에서 최단거리	현 황
수양개유적로 23-16 민가	38m	주거시설
박스구조물	41m	콘크리트 구조물
군부대	134m	군사시설

3) 발파 진동·소음 허용기준

보안 물건	진동속도	발파소음
민가 및 군부대	0.3 cm/sec	75 dB(A)
도로 및 박스구조물	1.0 cm/sec	-

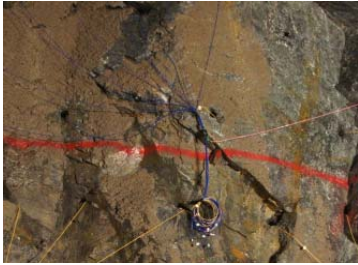


4) 영향평가 검토구간



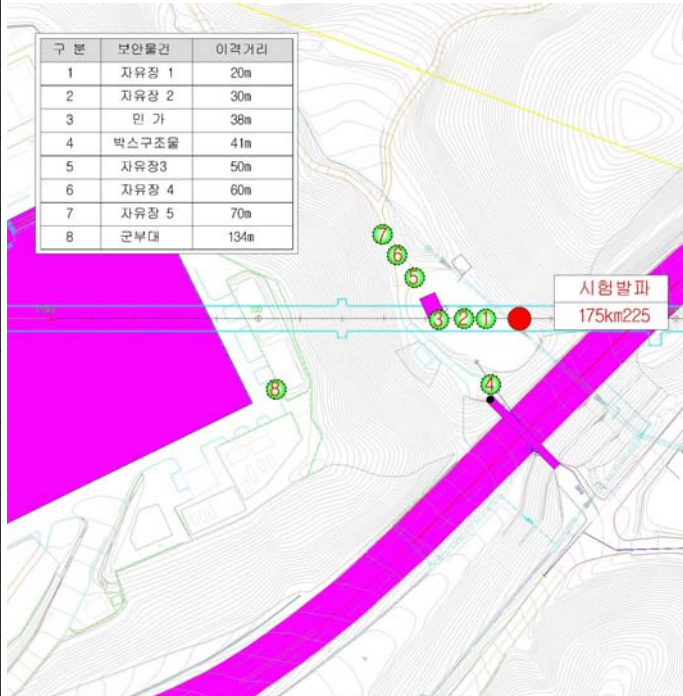
2 시험발파 수행

“하괴터널 종점부 량기(현)176km150~225 구간 민가 하부 통과구간”에 대하여 시험발파를 수행하고 민가에 대한 민원발생 억제 및 경제성, 시공성, 안정성에 대한 환경영향평가를 수행하여 최적의 굴착공법을 선정한다.

1) 굴착공법 종류

구 분	다단발파	다단평행 전자발파	무진동 암파쇄
모 습			
특 징	·다단회로를 이용 지연초시를 분산하여 지발당 장약량을 감소시켜 발파진동을 최소화하는 공법	·조정밀기폭시차를 가지는 전자뇌관을 사용하여 파형중첩에 의한 진동증가 현상을 개선한 발파공법	·썰기와 날개를 천공홀에 삽입하고, 파쇄기 실린더에 유압을 전달하여 암반을 파쇄 하는 무진동공법

2) 시험발파 수행

구 분	시험발파 패턴	시험발파 및 계측 위치도																											
위 치	176km225	 <table border="1" data-bbox="780 1357 1043 1576"><thead><tr><th>구 분</th><th>보안물건</th><th>이격거리</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>자유장 1</td><td>20m</td></tr><tr><td>2</td><td>자유장 2</td><td>30m</td></tr><tr><td>3</td><td>민 가</td><td>38m</td></tr><tr><td>4</td><td>박스구조물</td><td>41m</td></tr><tr><td>5</td><td>자유장3</td><td>50m</td></tr><tr><td>6</td><td>자유장 4</td><td>60m</td></tr><tr><td>7</td><td>자유장 5</td><td>70m</td></tr><tr><td>8</td><td>군부대</td><td>134m</td></tr></tbody></table>	구 분	보안물건	이격거리	1	자유장 1	20m	2	자유장 2	30m	3	민 가	38m	4	박스구조물	41m	5	자유장3	50m	6	자유장 4	60m	7	자유장 5	70m	8	군부대	134m
구 분	보안물건		이격거리																										
1	자유장 1		20m																										
2	자유장 2		30m																										
3	민 가		38m																										
4	박스구조물		41m																										
5	자유장3		50m																										
6	자유장 4		60m																										
7	자유장 5		70m																										
8	군부대	134m																											
일 정	12월 07일																												
발파패턴	PD-4(CB4)																												
발파공법	다단평행 미진동 전자발파																												
굴진장	1.0m																												
공당장약량	0.25kg																												
지발공수	1공																												
시험횟수	1회																												
천공수	153(+ 4)																												
화약량	37.45kg																												

3 시험발파 결과

1) 배경소음 측정

구 분	소음원	배경소음(L_{eq})	최고소음(L_{max})
수양개유적으로 23-16 민가	인접도로 차량 소음	48.21	67.60

2) 발파진동 분석

계측 위치 발파공법	수양개유적으로 23-16 민가			군부대	박스구조물
	진동속도 (cm/sec)	소음레벨 (dB(A))	진동레벨 (dB(V))	진동속도 (cm/sec)	진동속도 (cm/sec)
다단평행 전자발파	0.119	63.19	68.65	0.01 미만	0.083
분석 결과	·발파진동·소음 계측결과 주변 보안물건 모두 허용기준치 이내로 측정됨				

3) 진동추정식 산출

구 분	다단평행 미진동 전자발파	
	자승근 95%	삼승근 95%
추정식	$V = 97.9 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55}$	$V = 67.2 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55}$
상관계수	0.74	0.72

4) 발파진동 영향범위

장약량 (kg/delay) 거리(m)	민가, 군부대 V=0.3cm/sec		박스구조물, 도로 V=1.0 cm/sec	
	자승근	삼승근	자승근	삼승근
18	0.18	0.16	0.87	1.69
20	0.23	0.23	1.08	2.32
22	0.28	0.30	1.31	3.09
24	0.33	0.39	1.55	4.02
26	0.39	0.50	1.82	5.11
28	0.45	0.62	2.12	6.38
30	0.51	0.76	2.43	7.84
32	0.58	0.93	2.76	9.52
34	0.66	1.11	3.12	11.4
36	0.74	1.32	3.50	13.6
38	0.82	1.55	3.90	15.9
40	0.91	1.81	4.32	18.6

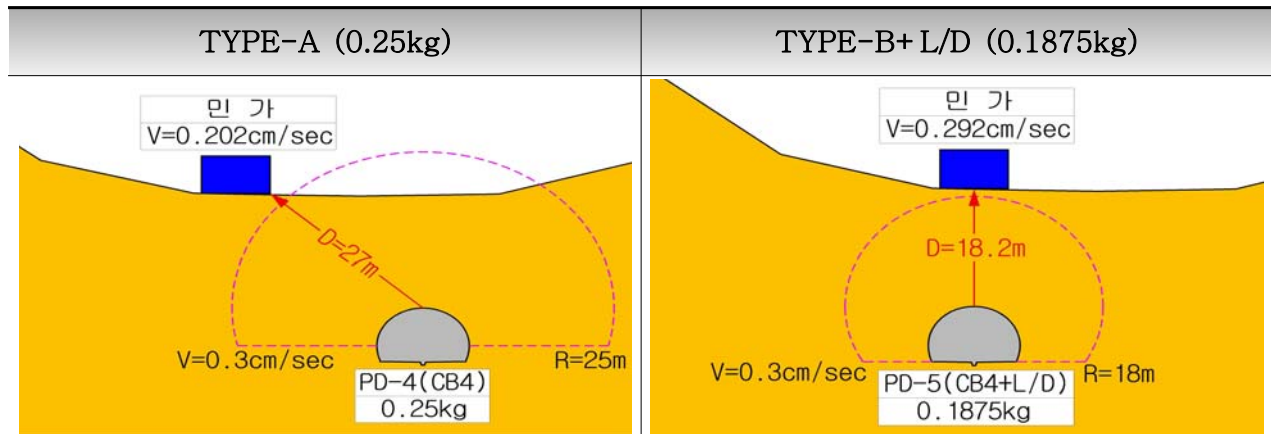
4 굴착공법 선정

1) 발파진동 영향분석

1) 발파진동 영향분석

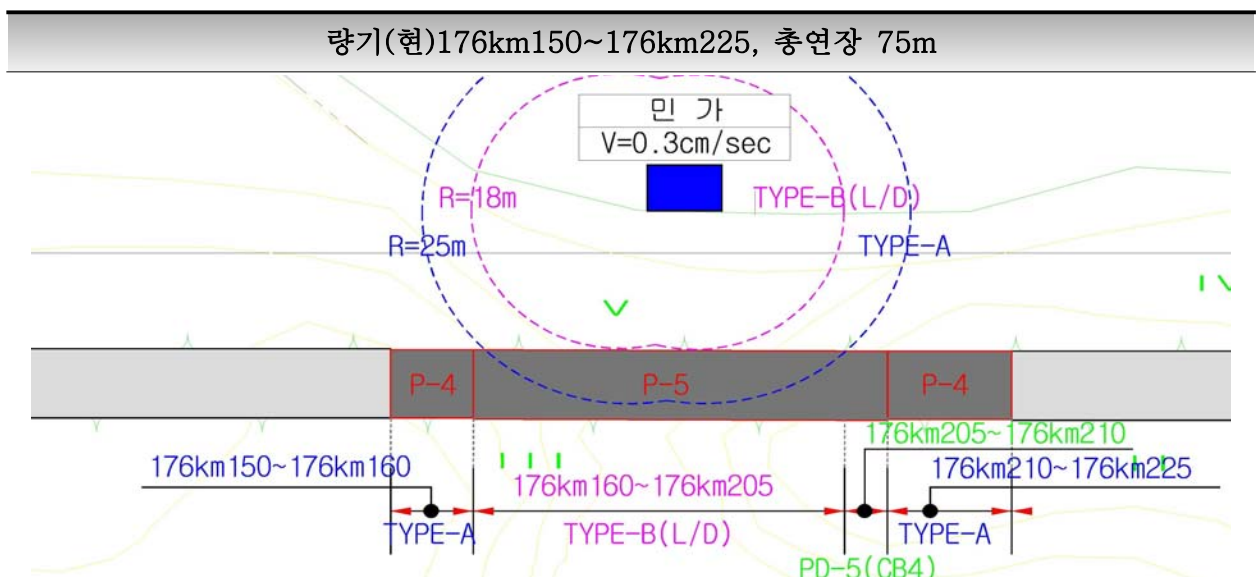
구 분	굴진장 (m)	지발당장약량 (kg/delay)	영향범위(m)
			0.3cm/sec
다단평행 미진동 전자발파	1.0	0.1875	18m
		0.250	25m

2) 발파진동 추정식에 따른 보안물건 영향검토



보안 물건	발파패턴 현황				이격 거리	영향분석(cm/s)		검토 결과
	적용 공법		굴진장 (m)	화약량 (kg)		허용 기준	예측 진동	
수양개유적로 23-16 (민가)	다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	27.0m	0.3	0.202	O.K
		TYPE-B+L/D		0.1875	18.2m		0.292	O.K

3) 굴착공법 선정결과



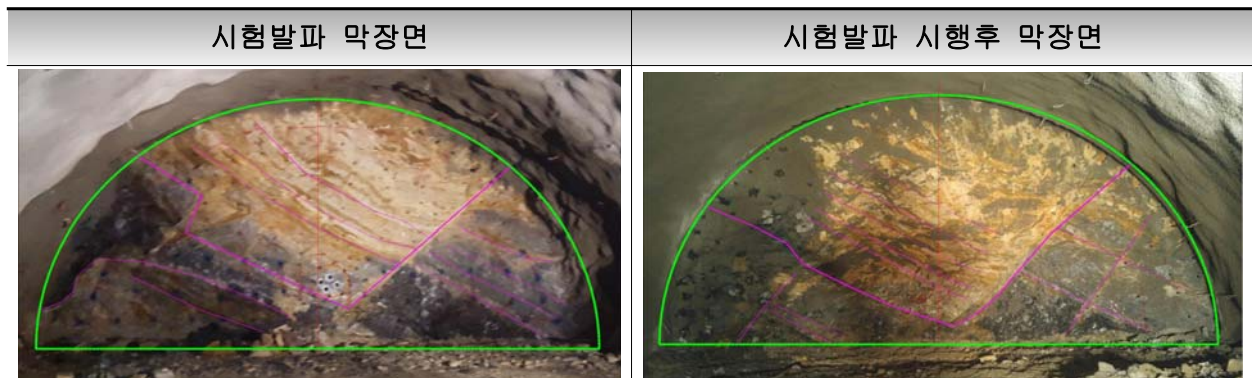
4) 굴착공법 변경(안)

굴착공법 선정						
STA. 176km150		160	205		210	225
	구 분	PD-4	PD-5		PD-4	
실시설계	연장	10m	45m		20m	
	굴착 공법	미진동 전자발파	무진동 암파쇄공법		미진동 전자발파	
시험발파 결과 변경안	연장	10m	45m		5m	15m
	변경 (안)	TYPE-A	TYPE-B (L/D)		PD-5 (CB-4)	TYPE-A
		다단평행 미진동 전자발파 적용				

발파 공법	패턴	굴진장 (m)	화약량 (kg)	적용구간	총연장 (m)
다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	176km150~176km160	10
	TYPE-B(L/D)		0.1875	176km160~176km205	45
	PD-5(CB4)		0.250	176km205~176km210	5
	TYPE-A		0.250	176km210~176km225	20

5 발파패턴 적용방안

1) 암질 변화에 따른 발파패턴 적용 방안



- 시험발파 막장면 상태는 중앙부 석회암층과 경사절리가 발달되어 있으며 좌우 측면은 III 등급 이상의 암반형태를 보임
- 시험발파후 막장면 상태는 시험발파 전과 거의 유사한 형태를 보임
- 설계 발파패턴은 전체 터널단면을 석회암구간으로 적용하여 천공수 및 장약량을 산정하였으나 시험발파 결과 굴진에 따른 막장면의 상태가 수시로 변경될 것으로 예상됨
- 따라서 발파후 FACE MAPPING을 시행하여 막장면 상태를 고려하여 천단부 석회암 구간은 천공간격을 늘리고 좌우측 전고한 암반은 천공간격을 좁혀 천공 작업을 수행하여 막장면 상태에 따른 유동적인 천공패턴을 적용하는 것이 발파효율을 최적화 할 수 있을 것으로 판단됨.

- 1) 하피터널 STA.176km150 ~ 176km225(L=75m) 구간은 대상 지장물에 대한 발파진동 영향을 고려하여 실시설계 단계에서는 다단평행 미진동 전자발파 및 무진동 암파쇄 공법으로 계획되었다.
- 2) 공사비 절감 및 공사기간 단축을 위해서 다단평행 미진동 전자발파 공법 시험발파를 실시하여 이에 따른 발파효과와 발파공해를 분석하여 터널 주변 보안물건에 안전하고 효율적인 굴착공법을 선정하고자 시험발파를 실시하였다.
- 3) 하피터널 STA.176km225에서 PD-4(미진동 전자발파) 패턴으로 시험발파를 수행한 결과 모든 보안물건에서 발파진동 허용기준치 이내로 측정되었다.
- 4) 실시설계 단계에서 STA.176km150 ~ 176km160(L=10m), STA.176km205 ~ 176km225(L=20m) 구간에 적용된 다단평행 미진동 전자발파 적용이 가능하며, STA.176km160 ~ 176km205(L=45m) 구간에 적용된 암파쇄 굴착공법은 공사비 절감 및 공사기간 단축을 위하여 다단평행 미진동 전자발파공법으로 변경 시공하여도, 민원발생 억제와 경제성 및 시공성 측면에서 효율적이라 판단된다.
- 5) 설계 발파패턴은 전체 터널단면을 석회암구간으로 적용하여 천공수 및 장약량을 산정하였으나 시험발파 결과 굴진에 따른 막장면의 상태가 수시로 변경될 것으로 예상되며, 발파후 정밀한 FACE MAPPING을 시행하여 막장면 상태를 고려하여 유동적인 천공패턴(공간격, 저항선 조정)을 적용하는 것이 발파효율을 최적화 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 민원발생 억제 및 경제성, 시공성, 안정성이 우수한 다단평행 미진동 전자발파공법 적용 구간은 민가를 기준으로 176km150~225(L=75m) 구간으로 분석 되었다.
- 7) 시험발파 결과에 따른 제안패턴은 막장면의 암질상태 및 현장 여건에 따라 감리단의 승인 후 최소저항선 및 공간격을 조정하여 적용 할 수 있다.
- 8) 발파진동 전파속도는 대상현장의 지형·지질적 특성 및 발파위치에 따라 변화되므로 지속적인 발파진동 모니터링을 실시하여 현장 지반의 발파진동 전파특성이 반영된 진동식을 재산정하여 시공관리가 이루어져야 한다.

1. 서 론

건설현장에서 발파작업으로 인해 발생하는 공해는 안락한 시민생활과도 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 발파공해로 인한 주변시설물의 재산상 피해 또한 큰 문제로 대두되고 있다. 발파 작업으로 인한 피해는 발파진동으로 인한 구조물의 피해, 발파폭음으로 인한 인체와 가축의 피해, 발파 비산석 으로 인한 인체 및 구조물의 피해를 들 수 있다.

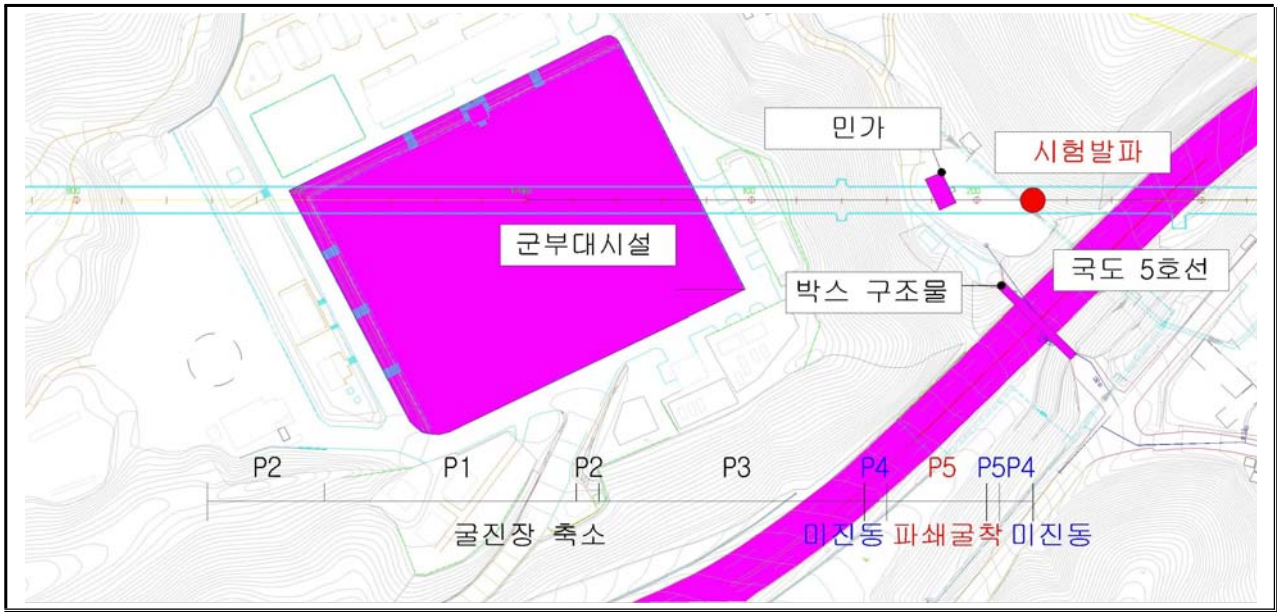
1.1 시험발파의 목적

『중앙선 도담~영천 복선전철 제1공구 노반건설공사』 하괴터널 중점부에 민가 하부 통과구간에 대한 발파피해 영향을 검토하여 시공성 및 경제성을 고려한 적절한 굴착공법을 제시하는데 목적이 있으며, 또한 실시설계시 과업구간이 다단평행 미진동 전자발파 및 무진동 암파쇄 굴착으로 적용되어 있어 공사기간 단축 및 공사비 절감을 위하여 다단평행 미진동 전자발파 시험발파를 실시하여 민원 방지 및 터널 주변 보안물건에 가장 안전하고 효율적인 굴착공법을 적용 하고자 한다.

1.2 검토구간

굴착 공법		적용구간	연장	비고
PD-4	다단평행 미진동 전자발파공법	176km150~176km160	10	영향권 분석구간
PD-5	암파쇄 굴착공법	176km160~176km205	45	
	다단평행 미진동 전자발파공법	176km205~176km210	5	
PD-4	다단평행 미진동 전자발파공법	176km210~176km225	15	
합계		176km150~176km225	75	

■ 검토구간 평면 현황



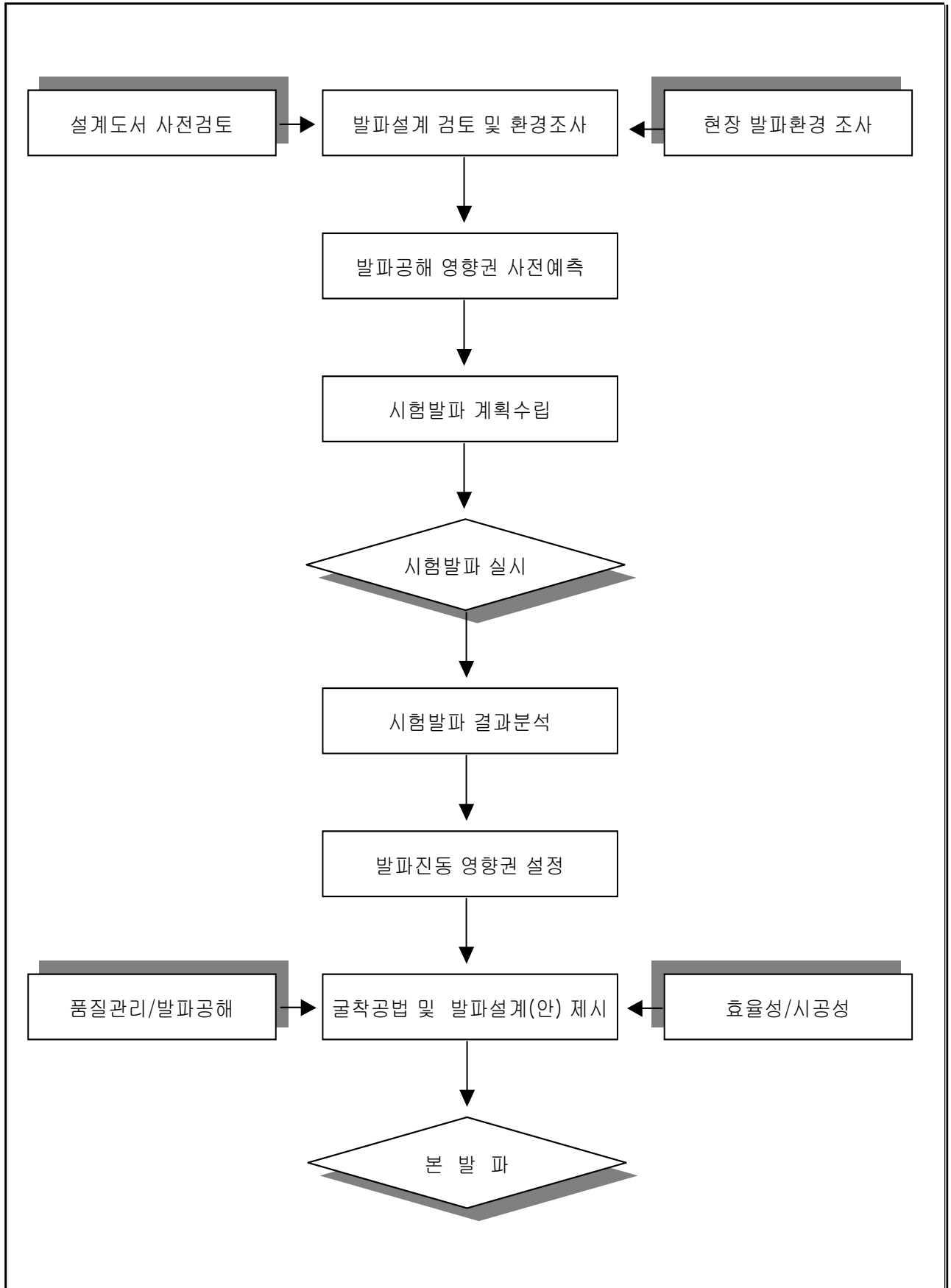
■ 실시설계 검토결과

- 량기(현)176km150~176km225 구간 상부에 민가가 위치하고 있으며, 실시설계시 과업구간이 다단평행 미진동 전자발파(L=30m) 및 암파쇄 굴착(L=45m)으로 적용되어 있어 공사비 및 공기에 대한 영향을 고려한 대안 굴착공법을 선정 하고자 한다.

1.3 과업수행 범위 및 내용

범 위	수 행 내 용
주변 현황분석	<ul style="list-style-type: none"> ■ 주변 보안물건에 대한 현황 조사
발파진동 및 소음 허용기준 검토	<ul style="list-style-type: none"> ■ 발파진동 및 발파소음의 전파특성 분석 ■ 각 보안물건에 대한 발파진동 및 소음 관리기준 검토 ■ 각 보안물건 보호를 위한 발파진동 및 발파소음 기준 설정
발파진동 및 소음 영향권 검토	<ul style="list-style-type: none"> ■ 발파진동 및 소음 영향권 범위 검토 ■ 발파진동·소음 영향을 고려한 발파패턴 적정성 평가
시험발파 계획 작성 및 시험발파 실시	<ul style="list-style-type: none"> ■ 주변 환경을 고려한 시험발파 패턴 선정 ■ 시험발파 적정 폭약 및 뇌관 선정 ■ 발파진동·소음 예측 계획 수립 ■ 시험발파 실시
발파영향권 분석 및 발파패턴 선정	<ul style="list-style-type: none"> ■ 획득한 발파진동·소음 예측데이터 분석 ■ 본 현장의 발파진동 추정식 산출 ■ 주변 보안물건에 따른 터널 발파영향권 분석 ■ 발파 인원 대책구간 터널발파 패턴 선정

1.4 시험발파 수행절차



1.5 시험발파 수행내용

구 분	내 용
목 적	<ul style="list-style-type: none"> ■ 실시설계 발파패턴을 적용하여 현장의 지반조건 및 지형적 특성에 맞는 현장 발파진동 추정식을 산출 ■ 허용기준이내의 발파패턴을 설계하는 자료획득.
수행기관	<ul style="list-style-type: none"> ■ 엔지니어링기술진흥법에 의한 용역업체(화약류관리) 또는 기술사법에 의한 화약류관리 기술사사무소 등 발파전문기관
수행 방법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 회귀분석을 위해 계측기 5대 이상을 현장내와 시설물에 대해 거리를 달리하여 설치 ■ 다양한 환산거리를 적용하여 발파진동상수와 장약지수 등을 파악
계측 방법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 진동속도(cm/sec), 가속도(gal) 및 주파수를 측정할 수 있는 것으로 측정방향에 따라 수직방향(Vertical), 진행방향(Longitudinal) 및 접선 방향(Transverse)의 3성분을 측정할 수 있는 측정기 ■ 센서는 적절한 지반에 설치하는데 발파장소(폭원)로부터 가장 근접되고 발파 영향권에 위치해 있는 보안물건 등에서 계측을 실시
시험발파 검측	<ul style="list-style-type: none"> ■ 시험발파 계획서상의 발파패턴에 의한 저항선, 공간격, 천공장, 천공수, 장약량, 뇌관배치 등 검측
결과분석	<ul style="list-style-type: none"> ■ 진동, 소음, 파쇄도, 굴진장 등 결과 분석 ■ 발파진동 전파 추정식 산출 ■ 발파진동 및 발파소음 허용기준치 적합성 여부 ■ 공당장약량 및 시험발파 패턴의 적합성 여부 ■ 최적의 발파패턴 설계 ■ 발파공해(발파소음, 진동 등)에 대한 저감대책
결과검토 및 적용	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현지여건을 고려한 시공성, 경제성, 안전성 등을 감안하여 적절한 발파공법을 선정 ■ 발파설계 패턴의 적합성을 판단하고, 주변 건축물이나 시설물에 미치는 피해 영향 등을 검토 ■ 영향권 분석에 따른 장비 및 작업효율 등을 감안하여 천공장, 천공경, 천공간격, 저항선 등 발파패턴을 설계 ■ 현장 적용 발파패턴 선정시 다음 사항을 고려. <ul style="list-style-type: none"> - 암발파 공법 구역과 보안물건과의 이격거리 - 주변 환경 조건을 고려한 발파공해(진동·폭음·비석 등) 제어능력 - 이격거리별 지발당 허용장약량 ■ 발파이론과 경험에 입각해 발파공해 저감대책 및 발파작업시 제기된 문제점을 검토하여 현장에 가장 적합한 발파계획을 수립
본발파	<ul style="list-style-type: none"> ■ 최종 확정된 발파공법을 적용하여 본발파를 시행 ■ 제시된 천공간격, 지발당 허용장약량, 발파패턴 등에 따라 발파공사를 시행하되, 계측관리를 철저히 시행하여 안전하게 발파

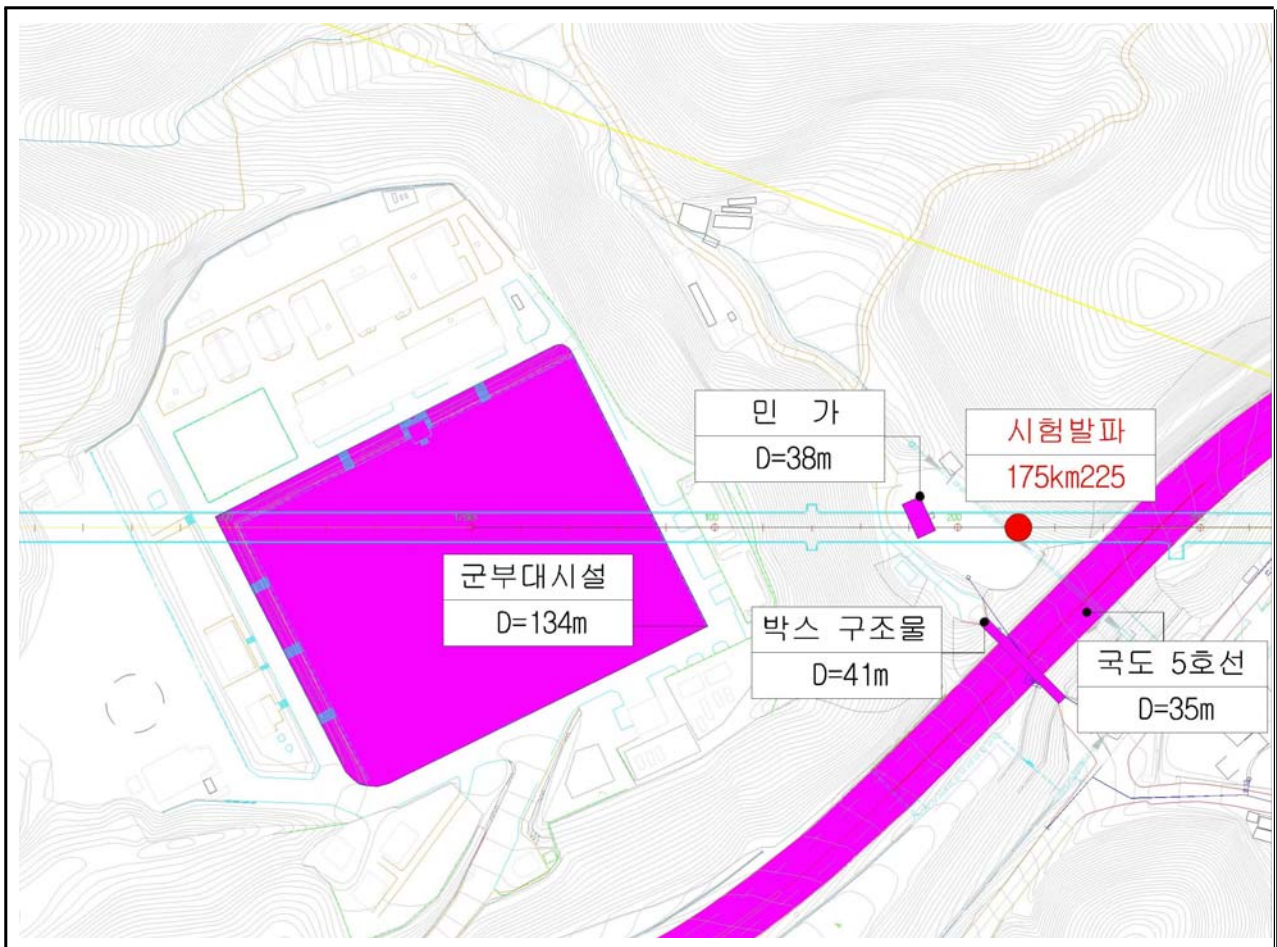
2. 공사 및 주변현황

2.1 공사 개요

- (1) 공 사 명 : 중양선 도담~영천 복선전철 제1공구 노반건설공사
- (2) 공사구간 : 충청북도 단양군 단양읍 상진리 하괴터널 종점부 일원
- (3) 발 주 처 : 한국철도시설공단
- (4) 감 리 사 : (주)이산 외
- (5) 시 공 사 : 현대건설(주)
- (6) 협 력 사 : (주)범양이엔씨

2.2 주변 현황


금번 시험발파가 수행되는 위치는 충청북도 단양군 단양읍 상진리 하괴터널 종점부 일원에 위치해 있으며, 주변에는 민가, 군부대, 박스구조물, 도로 등이 위치하고 있다.




■ 보안물건 현황

구 분	보 안 물 건	시험발파 위치에서 이격거리	현 황
1	도로	35m	기존 지방도로
2	수양개유적로 23-16 (민가)	38m	주거시설
3	박스구조물	41m	콘크리트 구조물
4	군부대	134m	군사시설

■ 보안물건 상세 현황

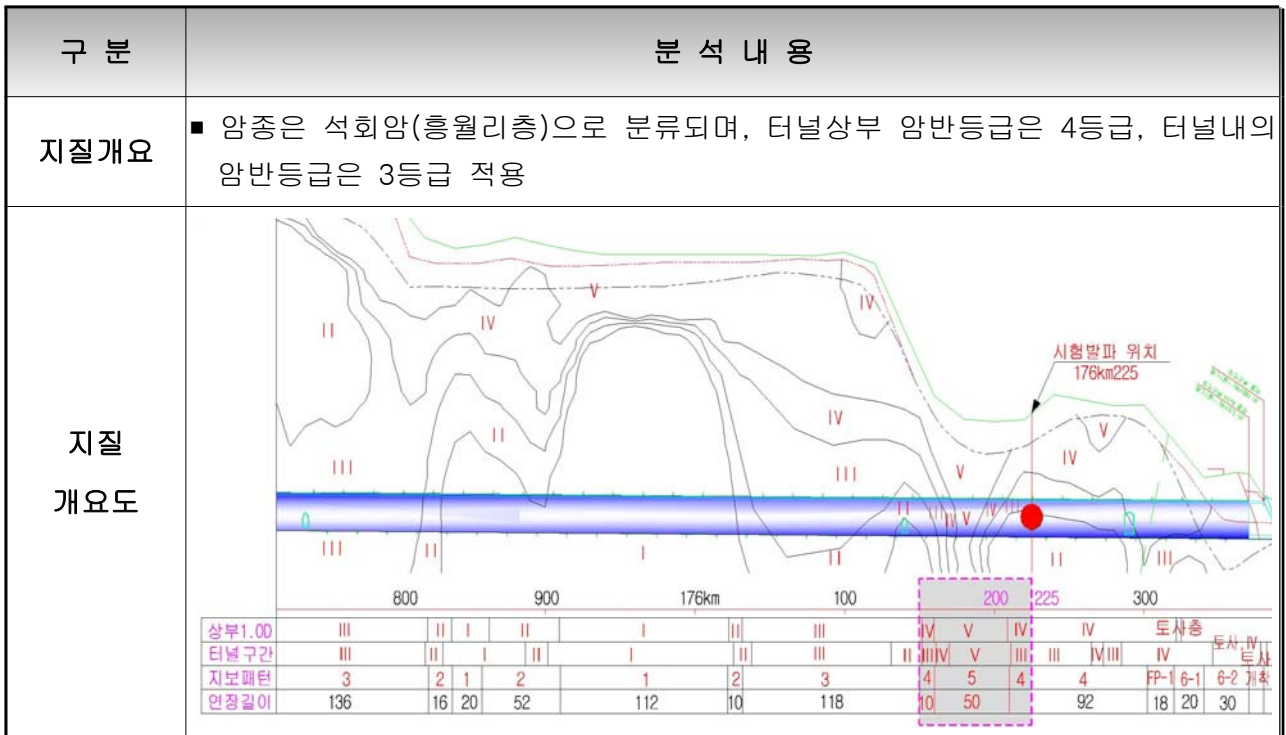
구 분	보안물건 전경	현황 및 발파시 고려사항
도로시설		<ul style="list-style-type: none"> ■ 현 황 : 기존 지방도로 ■ 발파시 고려사항 <ul style="list-style-type: none"> - 진동으로 인한 영향 ■ 발파공해 허용기준 : <ul style="list-style-type: none"> - 발파진동 : 1.0cm/sec

구 분	보안물건 전경	현황 및 발파시 고려사항
수양개 유적로 23-16 (민가)		<ul style="list-style-type: none"> ■ 현 황 : 주거시설 ■ 발파시 고려사항 <ul style="list-style-type: none"> - 진동, 소음으로 인한 영향 ■ 발파공해 허용기준 : <ul style="list-style-type: none"> - 발파진동 : 0.3cm/sec - 발파소음 : 75dB(A) - 진동레벨 : 75dB(V)

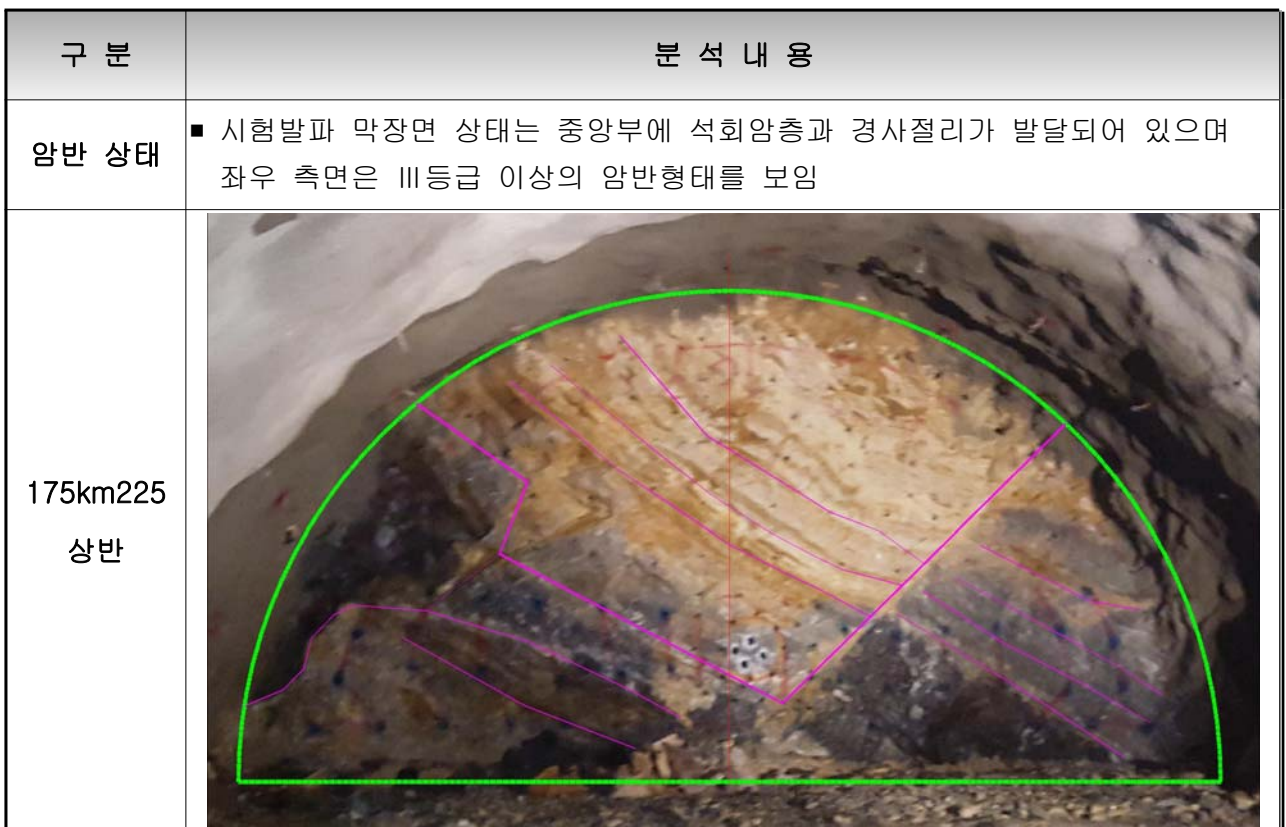
구 분	보안물건 전경	현황 및 발파시 고려사항
박스 구조물		<ul style="list-style-type: none"> ■ 현 황 : 콘크리트 구조물 ■ 발파시 고려사항 <ul style="list-style-type: none"> - 진동으로 인한 영향 ■ 발파공해 허용기준 : <ul style="list-style-type: none"> - 발파진동 : 1.0cm/sec

2.3 시험발파 구간 암반상태

■ 지질개요도



■ 시험발파 막장면 현황



3. 발파공해의 특성 및 영향

3.1 발파진동의 특성

발파진동에 대한 주변 구조물이나 시설물의 피해는 크게 나누어 진동의 매질에 따라 지반진동에 의한 피해와 폭풍압에 의한 피해 및 비석에 의한 피해로 나눌 수 있다.

여러 학자들의 연구에 의하면 발파 에너지는 발파에 총에너지의 80 % 정도가 소모되고 나머지 0.5 ~ 20 %의 에너지는 탄성파의 형태로 발파진동을 유발한다.

발파진동은 하나의 파동이며 구조물에 영향을 미치는 요소로는 진동 에너지, 주파수(진동수), 전파 속도, 입자의 변위, 진동속도, 진동가속도 등이 있으나 일반적으로 진동속도에 가장 잘 비례하는 것으로 알려져 있다. 입자의 변위와 진동속도 및 가속도 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$u = \int v dt, \quad v = \frac{du}{dt} \quad (1)$$

$$v = \int a dt, \quad a = \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

여기서 u 는 변위, v 는 진동속도, a 는 진동가속도이며 $mm, mm/s, mm/s^2$ 이 대표적인 단위이다.

파동을 사인파로 단순화시켰을 때 파동의 식은

$$u = U \sin \left(2\pi f t + \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (3)$$

로 쓸 수 있고 이때 U 는 최대진폭, f 는 진동수, λ 는 파장이다. 따라서 최대변위, 최대 진동속도 및 최대 진동가속도간에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$u_{\max} = U \quad (4)$$

$$v_{\max} = 2\pi f U = 2\pi f u_{\max}$$

$$a_{\max} = 4\pi^2 f^2 U = 2\pi f v_{\max}$$

발파진동은 5~200 Hz 진동수 영역의 다양한 파들이 합성된 복합파이지만 (1)~(4) 식을 잘 만족하는 것으로 알려져 변위, 진동속도 및 진동가속도 간의 변환이 용이하다.

그러나 전술한 바와 같이 입자의 진동속도가 진동피해에 직접 비례하는 것으로 알려져 있으므로 대개의 경우 입자 진동속도를 계측한다.

한편 삼차원 공간을 전파하는 파동의 움직임은 물체파인 압축파, 전단파 및 표면파인 레일리파 등이 합성되어 있으므로 최대 진동속도를 알기 위해서는 세방향 성분을 각각 계측하여야 한다. 파의 전달방향 성분을 진행방향(radial 또는 longitudinal) 성분이라 하고 이에 수직되는 두 성분을 수직(vertical) 성분 및 접선(transverse) 성분이라고 한다. 일반적으로 수직성분(V)에는 표면파인 R-파가, 진행성분(L)에는 압축파인 P-파가, 접선성분(T)에는 전단파인 S-파가 우세한 것으로 알려져 있다.

각 성분별로 진동량의 단위는 표 3.1과 같이 표시한다.

< 표 3.1 > 진동량의 단위

성 분	기본 단위	그 밖의 단위	
변 위	cm	$\mu = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-4} \text{ cm}$ $\text{mm} = 10^{-1} \text{ cm}$ $\text{m} = 10^2 \text{ cm}$	in.
속 도	cm/sec	$\text{mm/sec} = 10^{-1} \text{ cm/sec}$ cm/sec $\text{m/sec} = 10^2 \text{ cm/sec}$	in./sec = ips
가 속 도	cm/sec ²	$\text{gal} = 1 \text{ cm/sec}^2$ $\text{g} = 980 \text{ cm/sec}^2 \div 1,000 \text{ gal}$ $\text{m/sec}^2 = 10^2 \text{ cm/sec}^2$	in./sec ²

* 진동주파수(f) : cycle/sec(C.P.S), Hz

3.2 발파진동의 전파특성과 환산거리

발파진동에 영향을 미치는 요소는 크게 입지 조건과 발파 조건으로 나눌 수 있으며 이를 구체적으로 살펴보면

1) 입지 조건

- 발파가 이루어지는 현장 부지의 지형과 인근 구조물의 형태
- 대상 지반의 지질학적 특성
- 대상 암석의 역학적 성질

2) 발파 조건

- 사용폭약의 종류
- 장약량, 장약밀도, 기폭방법
- 폭원과 대상지역까지의 거리
- 전색정도, 자유면의 수 등이 있다.

입지 조건은 조절이 불가능한 인자로 발파진동 수준을 낮추기 위해서는 발파조건의 인자들을 잘 파악하여 적극적으로 활용하여야 한다. 많은 인자 중에서 장약량과 발파지점에서 대상지역까지의 거리가 가장 중요한 영향 인자로 꼽을 수 있다. 일반적으로 진동속도는 거리와 장약량의 함수로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$V = K \left[\frac{D}{W^b} \right]^n \quad (5)$$

여기서 W : 지발당 장약량(kg)

D : 발파폭원과 계측점 간의 거리(m)

v : 입자 진동속도(cm/s)

K : 발파진동상수

b : 장약지수

n : 감쇠지수

이다. 특히 K와 n은 그 지역 매질의 진동전달 특성을 나타내므로 이를 입지상수라고도 한다. b는 장약의 형태와 관련한 상수로서 봉상장약의 경우 1/2, 구상장약의 경우 1/3로 되며 대체적으로 1/2로 보는 것이 타당하다. b가 1/2일 때

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (6)$$

를 제곱근 환산거리라 b가 하고, 1/3일 때를 삼승근 환산거리라고 한다.

$$SD = \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \quad (7)$$

따라서 발파진동을 제어하기 위해서는 발파 지역 주변 구조물의 현황과 상태, 그리고 인체에 미치는 감응정도 등을 파악하여 피해가 발생하지 않는 진동허용 기준치를 설정한 다음 거리에 따라 지발당 장약량에 대한 규제를 두는 것이 가장 합리적이다.

< 표 3.2 > 발파 변수가 진동에 영향을 미치는 정도

변 수	항 목	영향을 미치는 정도			비 고
		심각	보통	미약	
조 가 능 한 수	1) 지발당 장약량	○			
	2) 지면 시차	○			
	3) 화약류의 종류		○		
	4) 최소저항선과 천공간격		○		
	5) 자유면의 상태	○			
	6) 천공구경 각도		○		
	7) 발파방향		○		
	8) 1발파당 장약량			○	
조 불가능한 수	1) 폭원과 구조물과의 거리	○			
	2) 일반적인 지형		○		
	3) 토피 두께 및 형태		○		
	4) 암반 상태		○		
	5) 대기 상태			○	

3.3 진동레벨

구조물에 대해서는 진동속도가 잘 적용될 수 있으나 인체의 감각은 대수적으로 대응하므로 레벨로 표현한 진동레벨 dB(V)을 사용한다. 진동레벨은 인체로 느끼는 진동의 감각을 나타내는 양으로서 환경공해진동의 크기를 표현하는데 사용된다.

진동가속도 레벨(Vibration Acceleration Level)은 지반의 진동가속도를 비교단위인 dB로 나타내는 것이며 다음과 같다.

$$VAL = 20 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

A는 진동가속도의 실효치(m/s^2), A_0 는 진동가속도의 기준치(10^{-5} m/s^2)이다.

진동레벨(Vibration Level)은 1~80 Hz 범위의 주파수 대역별 진동가속도 레벨에 상하 및 수평 방향 진동에 대한 인체의 상대응답으로 보정한 것을 말하며 다음 식과 같다.

$$VL = VAL + W_n \quad (9)$$

W_n 은 상하 및 수평 방향 진동에 대한 주파수 보정치로, 상하진동에 대한 주파수별 보정 가속도 실효치 A_1 는

$$\begin{aligned} 1 \leq f \leq 4\text{Hz} & : A_1 = 2 \times 10^{-5} \times f^{-(1/2)} \\ 4 \leq f \leq 8\text{Hz} & : A_1 = 10^{-5} \\ 8 \leq f \leq 90\text{Hz} & : A_1 = 0.125 \times 10^{-5} \times f \end{aligned} \quad (10)$$

이고, 보정치는 $-20 \log(A_1/10^{-5})$ 의 식에 대입하여 구한다. 진동레벨계의 지시미터에 나타나는 레벨은 각 주파수 대역별 진동가속도레벨에 해당 상대응답이 보정된 후 dB 합산된 값이며, 보정 방향에 따라 dB(V), dB(H)로 표기한다. 그러므로 인체에 대한 진동피해 기준은 진동레벨이 잘 표현해 주고 있다.

3.4 발파진동이 구조물에 미치는 영향

발파진동에 의한 구조물의 피해는 대상 구조물에 따라 다양하게 나타나며 나라별로 여러 학자들에 의해 많은 실험결과와 측정사례가 있으며 관련 자료들은 다음과 같다.

1) 스웨덴

스웨덴의 Langefors(1958) 등은 암반위에 세워진 스톡홀름의 빌딩 철거작업 과정에서 수많은 시험발파를 실시하여 지반진동이 빌딩에 미치는 피해영향을 연구하였다. 그에 따르면 주파수 범위 50~500cps 에서의 변위(수직성분)에 대한 분석에서 7.1 cm/sec 이하에서는 건물에 아무런 피해가 나타나지 않은 것으로 보고하였다.

< 표 3.3 > 발파진동에 의한 피해수준 (Langefors와 Kihlstrom)

지반조건 피해정도	발파 진동값 (peak particle velocity, cm/sec)		
	모래, 자갈, 지하수위 아래의 점토	빙퇴석 (moraine), 점판암 (slate), 연한 석회석	화강암, 편마암, 강한 석회암, 규암, 사암
	C < 1,000~1,500cm/s	C=2,000~3,000cm/s	C > 4,500~6,000cm/s
가시적인 균열 발생 없음	1.8	3.5	7.0
미세 균열 발생	3.0	5.5	10.0
가시적 균열 발생	4.0	8.0	15.0
심한 균열	6.0	11.5	22.5

2) 캐나다

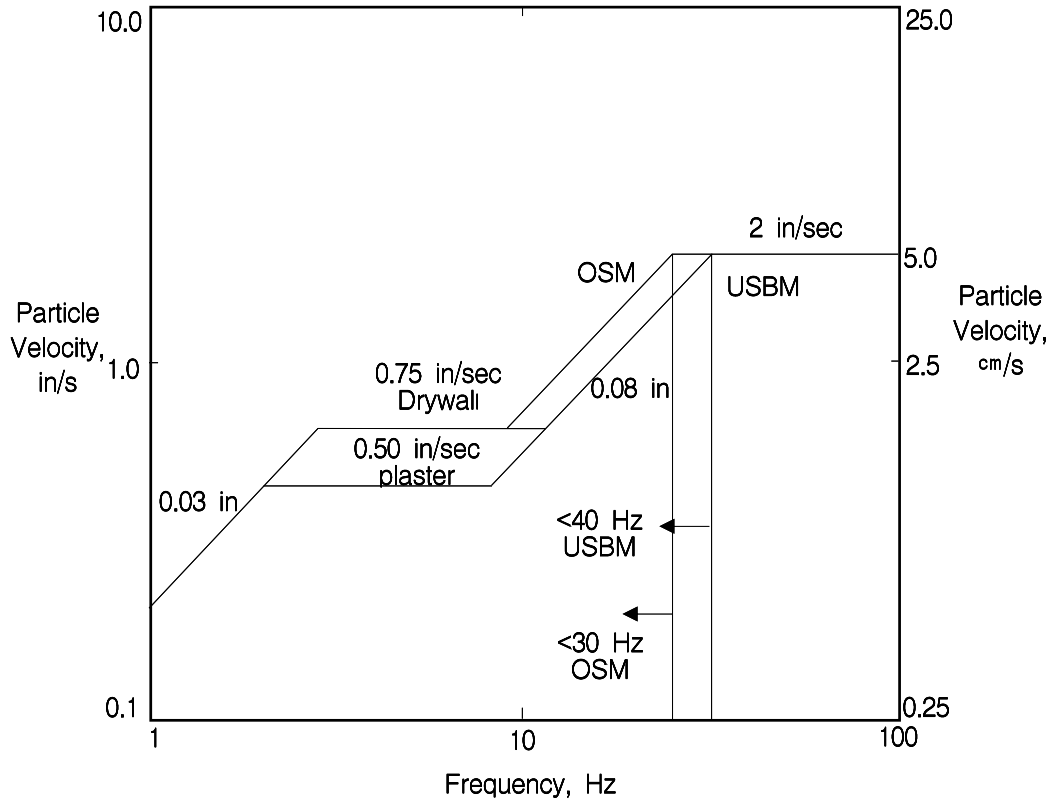
캐나다의 Edwards와 Northwood(1960)는 St. Lawrence Power의 빌딩 철거시 실시한 시험발파 결과를 분석한 결과 피해정도는 진동의 가속도나 변위보다 속도에 연관이 깊고, 피해가 진동속도 10~12.7 cm/sec 에서 발생하였기 때문에 안전율을 고려하여 진동속도 허용한계로 5 cm/sec가 적당하다고 보고되었다.

3) 미국

1980년에 Siskind 등에 의한 미광무국의 보고서는 진동속도에 대한 진동수의 영향을 고려하여 진동수 40Hz 이상의 진동수를 갖는 발파진동에 대하여는 5 cm/sec를 허용치로 적용할 수 있으나, 40Hz 이하의 저주파를 갖는 발파진동에 대하여는 1.2 cm/sec로 낮추어야 할 것으로 보고되었다.

미광무국(USBM : United States Bureau of Mine)과 내무부 노천광업청(OSM : Office of Surface Mining)에서 제안한 구조물에 대한 발파진동의 안전수준은 다음과 같다.

내무부 노천광업청은 노천채광작업에 대한 안전기준으로 미광무국과 유사한 기준을 제안하고 있으나, 주파수 경계를 30Hz로 낮추어 정한 것이 주된 차이이다.



< 그림 3.1 > USBM과 OSM에서 제안한 발파진동 안전수준

4) 독일

표 3.4는 독일의 진동속도 허용치를 나타내고 있다. 여기에서 진동속도는 수직방향, 진행 방향, 접선방향의 실 벡터 합(Vector sum)으로 표시된다. 독일의 경우 일반 산업건물 및 콘크리트 구조물에 대하여는 진동속도를 주파수에 따라 2~5cm/sec로 규제하고 있으며, 문화재의 경우는 0.3cm/sec까지 제한하고 있다.

< 표 3.4 > 독일의 허용 진동 속도(DIN 4150)

건축물의 종류	허용 진동 속도 (cm/sec)			
	건축물의 기초			건축물의 옥상
	10Hz 이하	10~50Hz	50~100Hz	모든 진동수
상업용, 공업용 빌딩	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0	4.0
주택, 주거빌딩	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0	1.8
유적이거나 고적	0.3	0.3~0.8	0.8~1.0	0.8

5) 각국의 발파진동에 의한 피해수준 < 표 3.5 >

진동치		연구자		Langefors (Sweden)	Edwards (Canada)	USBM (U.S.A)	E.Banik (Germany)	ASCE
변 위 속 도 (cm / sec)	50		큰 균열이 발생	피해 발생	큰 피해의 균열이 발생 벽체의 흙이 떨어짐	큰 피해		구조물이 위험
			균열이 발생					
			미세한 균열					
	10		요주의	요주의	가벼운 피해			
			요주의					
	5		눈에 보이는 피해는없다	요주의	요주의	피해 발생		10Hz,35Hz 구조물 주의
	1		안전	안전	극히가벼운 피해		10Hz,30Hz 기계의 안전한계	
	0.5		인체에는 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없다.					
	0.1		일반적으로 많은 사람들이 진동을 느낀다.					
	0.05		대단히 민감한 사람만이 진동을 느낀다.					
	0.01		인체에 감각이 없다.					
	0.005							

주) * USBM : United States Bureau of Mines (美鑛務國)

* ASCE : American Society of Civil Engineers(美國土木大學會)

3.5 발파진동이 인체에 미치는 영향

1) 인체에 미치는 영향

발파진동이 인체에 미치는 피해는 생리적인 피해와 심리적인 피해를 들 수 있다. 심리적인 면에서의 진동 영향은 개인이 갖고 있는 감정이나 분위기에 의해 크게 좌우되며 개인차가 크다. 생리적인 반응은 객관적인 심리현상, 호흡, 맥박, 신진대사 등의 변화를 의미하며 개인적 차이가 크지 않다.

높은 수준의 진동을 일정시간 이상 전신에 받게 되면 순환기계, 자율신경계, 내분비계 등에 생리적 영향을 미치며 성가심, 불쾌감 등의 심리적 영향 및 수면, 업무 등 일상생활에 영향을 줄 수 있다. 그러나 보통의 낮은 진동이 생리적인 피해를 직접적으로 야기하는 경우는 드물고, 직업병 수준의 신체 피해는 착암기 브레이커 등의 작업자가 국부진동에 오랫동안 노출되어 발생하는 경우가 있다.

실제 생활 중에서도 상당한 수준의 진동에 노출되어 있고, 차량 이용자에게 가해지는 진동수준은 10cm/sec가 넘는 경우가 많고 각종 조사 보고서에 의하면 일상생활 중에 발생하는 진동은 다음과 같다.

(1) 미국 광무국(USBM)의 조사자료 (1984, Stagg) < 표 3.6 >

구 분	진동 수준 (cm/sec)
일상 활동 걷기	0.08
뒹뒹기	0.71
문을 쾅 닫았을 때	1.27
벽면에 못을 박을 때	2.24

(2) 국내 지하철공사 조사자료 < 표 3.7 >

구 분	한발을 굴렀을 때	두발을 굴렀을 때	버스나 트럭이 지나갈 때
진동속도 (cm/sec)	0.16~0.35	0.40~0.63	0.28~0.89
측점위치	방 구들	방 구들	도로변

2) 발파진동 및 소음에 대한 인체반응

진동에 대한 인간의 반응 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 진동은 인간에게 위험을 알리는 신호로 해석하는 본능적인 감각 대상으로 특히 사전에 경고가 없으면서 발생원을 파악하기 어려운 진동에 대해서는 매우 불쾌하게 감지된다.
- (2) 진동이 소음, 초고주파 음과 같은 다른 저해요소와 병행해서 발생될 때는 더 크게 부각된다. 인간의 반응은 유전적 조건 외에도 학습에 따른 영향이 있기에 진동을 수반하는 둔탁한 소음은 지진을 연상케 하여 어떤 사람에게는 공포감을 일으킨다. 반면 지나가는 트럭의 소음과 진동은 무엇이 발생원인지 즉각 판단할 수 있어서 밝혀지지 않은 발생원에 대한 진동과 비교하여 약하게 반응하게 된다. 또 원하지 않는 소음이 나 진동이 반복적으로 영향을 주면 불평에 상승효과를 가져오게 되어 실제 계측되는 수준에서보다 높은 반응을 하게 된다.
- (3) 이와 반대로 주변의 소음과 진동을 일으키는 사항이 본인에게 피할 수 없고 이익을 주는 수단이라고 하면 인내할 수 있는 수준이 상당히 높게 된다.

- (4) 수면에도 학습효과가 있으므로 방해를 받으며 자던 습관의 사람은 조용한 환경에서 자던 사람보다 주변 진동에 덜 예민하다. 아직까지 수면 중의 사람이 어느 수준에서 부터 방해를 받는가에 대한 연구는 많지 않으나 자료를 요약하면 표 3.8과 같다.

< 표 3.8 > 진동이 인체에 감응되는 수준

지속시간	진동수준	주파수대	인식정도	비 고
500 s	0.02 mm/s	3 ~ 25 Hz	겨우 인식	Reiher와 Meiser
	0.5 mm/s	30 Hz	불편	"
	50 mm/s	5 Hz	불편	"
5 s	< 25 mm/s	2.5 ~ 25Hz	강하게 인지	Wiss와 Parmelee
반복적	> 5 mm/s	교통진동	불편	Armberg

3) 영향 검토

- (1) 인체의 반응은 구조물보다 훨씬 민감하게 반응한다. 입자속도 0.05cm/sec 이상이면 많은 사람이 진동을 느끼게 되고, 0.5cm/sec에서는 인체는 건물이 무너질 듯한 느낌을 받지만 실제 건물에는 가벼운 피해가 생길 수 있는 정도인 것으로 알려져 있다.
- (2) 발파진동 $V=0.2\text{cm/sec}$ 이하에서는 일반적으로 많은 사람이 진동을 느끼는 수준 이지만 불쾌감이 적은 수준이라고 판단할 수 있다.

< 표 3.9 > 발파 진동에 따른 건물 피해 및 인체에 미치는 감응 진동속도(cm/sec)

진 동 속 도	cm/s	
	50.0	건물에 큰 피해가 일어난다.
		건물에 균열이 생긴다.
	10.0	건물에 가벼운 피해가 일어난다.
	5.0	건물에 극히 가벼운 피해가 생긴다.
	1.0	(사람은 건물이 무너질 듯한 느낌을 받는다)
	0.5	인체에 심하게 느끼나 건물에는 피해가 없다.
	0.2	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낀다.
	0.1	매우 민감한 사람이 진동을 느낀다.
	0.05	
	0.01	
	0.005	인체로 느낄 수 없다.

3.6 발파폭음(소음)의 영향

1) 음압레벨과 소음레벨

① 음압레벨 (Sound Pressure Level)

폭풍압(airblast overpressure)은 발파풍압 또는 발파압력파로 불리며 암반이나 구조물의 파괴에 수반하는 자체변형으로 인하여 발생하는 공기압력파와 지반진동으로 인한 압력파를 들 수 있으나 주로 공기압력파에 기인한다.

폭풍압을 표현하는 방법에는 압력(Pa)과 음압레벨(dB)이 있다. 인체가 감지할 수 있는 음압의 크기가 너무 광범위하기 때문에 이를 레벨로 표현한 음압레벨이 많이 사용되고 있다.

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (11)$$

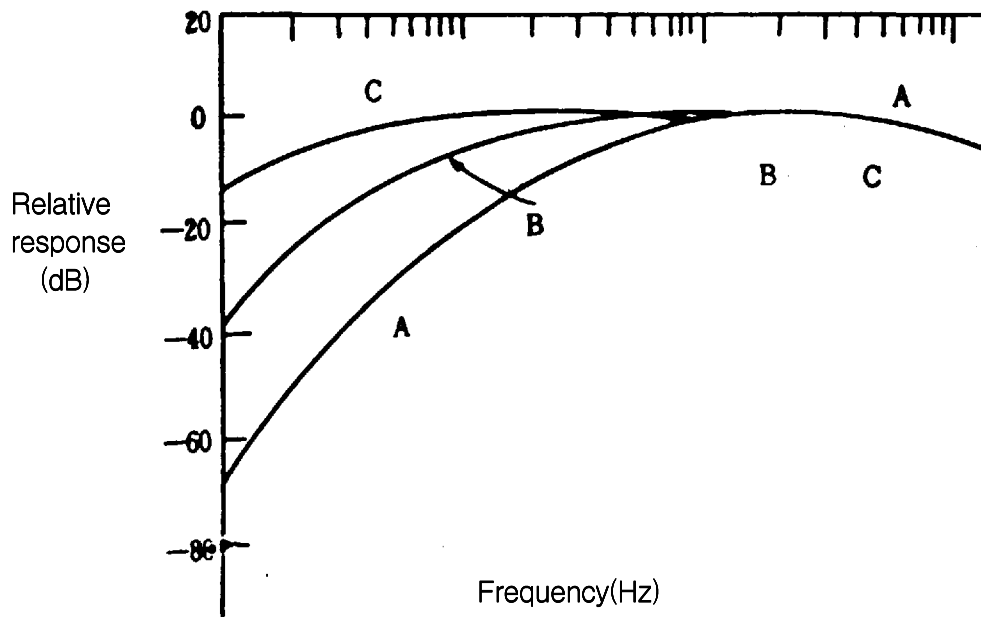
여기서 SPL (Sound Pressure Level)은 음압레벨로 단위는 dB(L)을 사용하며, **P** 는 폭풍압(Pa), **P₀** 는 기준압으로 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 이며 사람이 인지할 수 있는 최저의 음압이다.

폭풍압은 심적인 영향을 미치는 고주파수대의 진동과 구조물에 큰 피해를 야기할 수 있는 저주파수대의 진동을 공히 포함하고 있으며 20 Hz 이하의 저주파가 주로 문제된다.

② 소음레벨 (Sound Level)

압력의 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 있으며, 주파수에 관계없이 일정하다. 그러나 귀로 느끼는 소음의 감각량은 저주파일수록 둔하게 감각하기 때문에 소음의 dB 단위는 주파수에 따른 사람의 청감에 따라 적절한 보정회로를 사용해야 한다.

그림 3.2는 일반적으로 쓰이는 세 가지 A, C, L 청감보정회로의 주파수 스펙트럼 즉 변환기의 상대응답을 나타낸다. 건강한 사람이 가청할 수 있는 1,000 Hz 음을 기준으로 주파수에 따른 보정을 하는데, A 와 C 보정회로는 가청응답을 연구하는데 적합하고, 구조물 응답에 관련한 필요정보는 L 회로를 사용한다. 이와 같은 청감보정회로를 통하여 측정된 소음을 소음레벨(Sound Level)이라 하고, 일반적인 환경소음에서는 A 특성을 사용하고 dB(A)라 표기한다.



< 그림 3.2 > 청감보정회로

2) 발파음의 특성

발파음은 폭약의 에너지가 파쇄되는 암괴를 통하여 대기 중으로 방출되는 압축파에 의해 주로 발생되며, 이외에도 지반진동으로 전파되었다가 자유면 근처에서 공기중으로 전파되는 과정에서 매질의 차이로 소음을 야기하는 경우가 있으나, 이는 무시할 정도로 경미한 상태이다.

대기 중으로 전파되는 발파폭음은 0.1Hz에서 200Hz 범위의 저주파 특성으로 20Hz 이상의 주파수는 가청소음으로 들을 수 있고, 20Hz 이하의 초저주파는 귀로 들을 수는 없으나 비교적 먼 곳까지 에너지의 손실 없이 전파되는 특성이 있으며 건물과 구조물을 진동시켜서 2차 소음을 발생시킨다.

실제로 지하철의 터널이나 개착구간 발파에서 발파음의 주파수를 분석하면 40Hz 이하의 저주파가 우세하며, 풍압 기준으로 110dB(L) 이하로 측정되어 건물이나 구조물에 손상을 주지는 않은 정도 수준이지만, 현실적으로 창문이나 문짝 등이 덜컹거리는 2차적 영향으로 불쾌감이 많아 인근 주민들은 발파진동으로 오해하여 주된 민원의 대상이 되고 있다.

여기에서 발파음으로 인한 인체 감응은 아직도 정량적으로 계산되지 못하고 있다. 인체에 대한 발파음의 영향중에서 건물 안에 있을 때가 건물밖에 있는 것 보다 영향이 증가된다. 그 이유로는 건물에 초저주파로 전달되는 발파음이 건물자체를 진동시켜서 인체를 자극하기 때문이다.

미국광무국 조사 결과에 의하면 100dB(L)부터 접시나 창이 흔들림 현상이 발생되며 고통의 한계는 110dB(L)으로 조사되었다.

발파폭음에 대한 구조물 및 인체의 영향은 표 3.10과 같이 정리할 수 있다.

< 표 3.10 > 폭풍압 크기에 의한 구조물 및 인체 반응 단위: dB(L)

dB (L)	폭 풍 압 (psi)	구조물 및 인체 반응
180	3	←구조물 손상
170	0.95	←대부분의 유리창이 깨어짐
150	0.095	←일부 유리창들이 깨어짐
140	0.030	←피해 한계
130	9.5×10^{-3}	←미광무국 허용 한계치
120	3.0×10^{-3}	←미광무국 안전 수준
110	9.5×10^{-4}	←고통 한계
100	3.0×10^{-4}	←불평 한계 (접시나 창문 흔들림)
80	3.0×10^{-5}	←안정
60	3.0×10^{-6}	←일상적인 대화
20	3.0×10^{-8}	←속삭임
0	3.0×10^{-9}	←가청 한계

3) 발파진동과 소음의 차이점

발파진동과 소음은 전파매질(지반, 대기)이 다를 뿐 파동 현상은 마찬가지로 파동론 범주에 속하는 문제로 같이 다루는 경우가 많다. 발파음은 전술한 바와 같이 발생원은 진동체이며, 초저주파를 수반하므로 크든 작든 간에 진동을 수반한다.

발파음에 의한 영향을 받는 주택이나 건물에서는 창호나 선반 등에서 소리를 내는 경우가 많아 일차적으로 도착하는 발파진동보다도 더욱 성가시게 느껴지므로, 발파음에 대한 인체 감응도는 더욱 커서 사실상 민원의 주 대상이 되고 있다. 그러나 발파진동과 달리 발파음은 주택이나 구조물에 피해를 주는 일은 극히 드물기 때문에 인체 감응에 대한 대수척도는 소음 Level(dB)을 사용하며, 발파진동은 건물이나 구조물에 직접적인 피해를 주므로 진동 속도(cm/sec)을 사용한다.

4. 발파진동 및 소음 허용기준치 설정

4.1 발파진동 허용기준

■ 국내 공공기관의 발파진동 허용기준치

구 분	건 물 종 류	허용진동치(cm/sec)
서울시 지하철 시방기준	문화재(역사적으로 매우 오래된 건물)	0.2
	주택, 아파트, 상가 등(작은 균열을 가진 건물)	0.5
	주택, 아파트, 상가 등(균열이 없는 양호한 건물)	1.0
	산업시설용 공장(철근콘크리트로 보강된 건물)	1.0~4.0

구 분	건 물 종 류	허용진동치(cm/sec)
한국토지공사 시방기준	가축(소, 닭, 돼지등)	0.09
	문화재, 진동예민 시설물	0.2
	주택, 아파트	0.5
	상가건물	1.0
	철근 콘크리트건물	1.0~4.0

구 분	건 물 종 류	허용진동치(cm/sec)
노동부 산업안전보건법 (2009)	문화재	0.2
	주택, 아파트	0.5
	상가(금이 없는 상태)	1.0
	철근 콘크리트 빌딩 및 상가	1.0~4.0

구 분	건 물 종 류	허용진동치(cm/sec)
국토교통부 노천발파 설계·시공지침 (2006)	가 축	0.1
	문화재	0.2
	주택, 아파트	0.3~0.5
	철근콘크리트 및 공장	1.0~5.0

■ 소음진동관리법의 생활진동 규제기준 : 소음진동관리법 시행규칙 제20조 제3항

(단위 : dB(V))

대 상 지 역	주 간 (06:00-22:00)	심 야 (22:00-06:00)
가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 · 주거개발진흥지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역에 소재한 학 교·종합병원·공공도서관	65 이하	60 이하
나. 그 밖의 지역	70 이하	65 이하

- 비고 : 1. 진동의 측정방법과 평가단위는 소음·진동공정시험방법에서 정하는 바에 따른다.
 2. 대상지역의 구분은 국토의 계획 및 이용에 관한 법률에 의한다.
 3. 규제기준치는 생활진동의 영향이 미치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.
 4. 공사장의 공사진동 규제기준은 주간의 경우 특정공사의 사전신고대상 기계·장비를 사용하는
 작업시간이 1일 2시간 이하일 때는 +10dB을, 2시간 초과 4시간 이하일 때는 +5dB을 규제기
 준치에 보정한다.
 5. 발파진동의 경우 주간에 한하여 규제기준치에 +10dB을 보정한다.

■ 법원 판례

- 서울민사지법 합의50부 판례(1995년 1월 13일)
 “발파공사로 주민들의 건물에 균열이 생긴 점이 인정된다”며 “공사는 계속하되 발파진동
 속도는 초당 0.3cm, 소음은 주간에는 80dB 심야에는 65dB을 넘지 않는 한도에서 발파작
 업을 실시하라”고 판결함.

■ 당 현장의 발파진동 허용 기준치 설정

- ◆ 본 현장은 주변에 보안물건이 위치하고 있으므로 국내의 발파진동 허용기준치 중에서
 최소 기준치를 설정하여 발파진동에 의한 피해가 발생되지 않도록 설정한다.
 ◆ 본 현장의 발파진동 허용기준은 실시설계 보고서를 참고로 하여 관리기준을 다음과 같
 이 설정하고자 한다.

대상 보안물건	진동속도 허용기준 (cm/sec)	진동레벨 허용기준 dB(V)	설 정 근 거
민가	0.3	75	- 소음진동 관리법 - 실시설계보고서 - 유사현장 및 연구사례적용
군부대	0.3	75	
도로, 박스구조물	1.0	-	

4.2 발파소음 허용기준

■ 소음진동관리법의 생활소음 규제기준 : 소음진동관리법 시행규칙 제20조 제3항

생활소음의 규제기준

가. 2010년 6월 30일부터

단위 : dB(A)

대 상 지 역	시간별 소음원		아침, 저녁 (05:00-07:00, 18:00-22:00)	주간 (07:00-18:00)	야간 (22:00-05:00)
주거지역, 녹지지역, 관 리지역 중 취락지구·주 거개발진흥지구 및 관광 ·휴양개발진흥지구, 자 연환경보전지역, 그밖의 지역에 소재한 학교·종 합병원·공공도서관	확 성 기	옥외설치	60 이하	65 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 소 음이 나오는 경우	50 이하	55 이하	45 이하
		공장·사업장	50 이하	55 이하	45 이하
		공 사 장	60 이하	65 이하	50 이하
기 타 지 역	확 성 기	옥외설치	65 이하	70 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 소 음이 나오는 경우	60 이하	65 이하	55 이하
		공장·사업장	60 이하	65 이하	55 이하
		공 사 장	65 이하	70 이하	50 이하

비고

1. 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 따른 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한다.
3. 규제기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장의 소음규제기준은 주간의 경우 특정공사의 사전신고대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB을, 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파소음의 경우 주간에만 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.

■ 당 현장의 발파소음 허용 기준치 설정

- ◆ 발파소음은 소음진동 관리법상의 생활소음 공사장의 주간소음 65 dB(A)에 발파소음 보정치 + 10 dB(A)를 보정하여 75 dB(A)로 설정한다.

발파소음	인 체 75 dB(A)	<ul style="list-style-type: none"> - 소음진동 관리법 - 실시설계보고서
------	--------------	---

5. 시험발파 적용 발파공법 선정

5.1 발파설계 개요

1) 터널발파패턴 기본방향

구 분	설 계 방 향
적 용 성	<ul style="list-style-type: none"> 굴착심도 및 굴착단면에 적합한 굴착공법 선정 기반암의 물리역학적 특성을 고려한 발파수량 및 발파패턴 결정
경 제 성	<ul style="list-style-type: none"> 터널 굴착선 여굴 최소화 및 파쇄석 입도 최적화를 위한 발파설계
안 전 성	<ul style="list-style-type: none"> 발파사고를 미연에 방지할 수 있는 발파 시스템 적용 주변 구조물 및 사람의 발파공해 피해방지를 위한 대책 수립
친환경성	<ul style="list-style-type: none"> 터널발파 지발당장약량 산출을 위한 합리적인 발파진동추정식 적용 구조물에 대한 발파진동 및 소음의 전달특성 분석을 통한 신뢰성 확보

2) 터널발파설계 고려사항 및 주안점

구 분	고려사항	설계 주안점
굴착공법	<ul style="list-style-type: none"> 터널 암반의 물리적, 구조역학적 특성을 고려하여 적합한 굴착공법 선정 암반층 굴착깊이를 고려한 공법 선정 발파진동 및 소음 영향권을 고려한 공법 선정 	<ul style="list-style-type: none"> 발파진동 영향구간
발파공법	<ul style="list-style-type: none"> 천공 발파의 굴진효율과 시공성을 고려한 발파공법 선정 발파공사 안전성을 고려한 발파공법 	<ul style="list-style-type: none"> 발파공법 적용
수량산출	<ul style="list-style-type: none"> 기반암 암반특성을 고려하여 발파수량 산출 동일암종 터널 발파공사 적용사례 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 비장약량 (kg/m^3) 최소화 비천공장 (m/m^3) 최소화
폭약 및 뇌관	<ul style="list-style-type: none"> 기반암과 주변환경을 고려한 화약류 적용 안전발파를 위한 뇌관 시스템 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 사용화약 : 에멀전폭약 사용뇌관 : 전자뇌관
진동·소음식	<ul style="list-style-type: none"> 현지암반 특성과 발파조건이 반영된 발파진동·소음 추정식 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 진동식 : 설계 발파진동 추정식 소음식 : 환경부 제안식
영향검토	<ul style="list-style-type: none"> 주변 구조물에 미치는 발파공해 영향검토 	<ul style="list-style-type: none"> 발파진동 및 소음 허용치 설정
안전관리	<ul style="list-style-type: none"> 발파진동 저감대책 수립 발파소음의 저감대책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 발파진동 저감공법 적용 발파소음 방음시스템 적용

5.2 적용 가능한 터널 굴착공법

■ 터널 굴착공법 검토

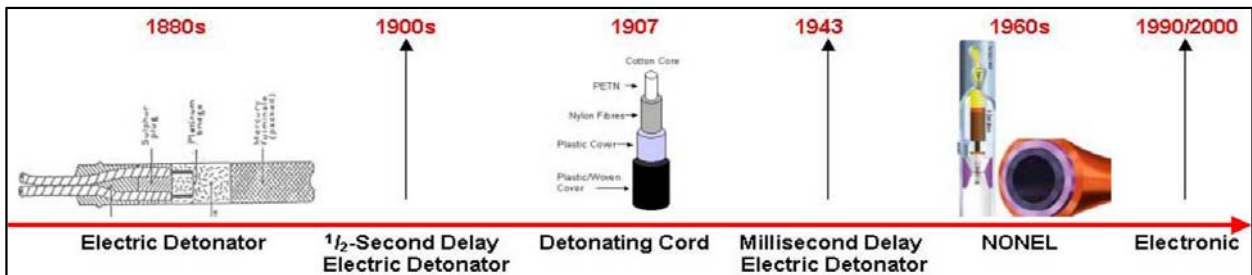
구 분	다단발파	전자발파	무진동 암파쇄
시 공 모 습			
공 법 내 용	•다단회로를 이용 자연초 시를 분산하여 지발당장 약량을 감소시켜 발파진 동을 최소화하는 공법	•조정밀기폭시차를 가지는 전자뇌관을 사용하여 파 형중첩에 의한 진동증가 현상을 개선한 발파공법	•깨기와 날개를 천공홀에 삽입하고, 파쇄기 실린더 에 유압을 전달하여 암반 을 파쇄하는 무진동공법
사 용 장 비	•Jumbo Drill •전기 및 비전기 뇌관	•Jumbo Drill •전자뇌관	•Jumbo Drill •유압장비 등
작 업 특 성	•진동·소음 민원 발생 •굴착공사비 최소 •시공성 우수 •굴착공기 우수	•진동·소음 민원 최소 •굴착공사비 증가 •시공성 우수 •굴착공기 우수	•진동·소음 영향 없음 •공사비 매우 고가 •시공성 불량
적 용		●	
적 용 사 유	<ul style="list-style-type: none"> ■ 본 과업구간 상부 민가를 고려하여 실시설계 단계에서 다단평행 미진동 전자 발파 및 암파쇄 굴착공법이 적용되어 있어, 공사비 절감과 공사기간 단축을 위 한 굴착공법을 검토함. ■ 다단평행 미진동 전자발파는 분산장약에 의한 심발부 장약량 최소화 및 조정 밀기폭시차를 가지는 전자뇌관을 사용하여 진동을 분산하여 제어하는 발파공법 으로 진동저감 효과가 매우 우수함. ■ 또한 굴착공사기간 단축 및 공사비용 절감을 위해 최근 원주~강릉 철도건설 노반신설 기타공사 및 동해선(포항~삼척) 철도건설 노반건설공사 에서 다단평 행 미진동 전자발파공법을 적용하여 굴착이 완료 및 시공 중에 있음. 		

5.3 전자발파 공법

■ 전자발파 공법

뇌관은 폭약의 기폭장치로서 전기식, 비전기식, 전자식 뇌관으로 분류되고 있으며, 뇌관의 역사는 1880년대 순발 전기뇌관(시차가 없는 뇌관)이 개발되고 1900년대 500ms(0.5초) 단위의 시차를 가지는 전기뇌관이 개발되었으며, 1943년에 이르러 현재의 20ms 또는 25ms 단위의 전기뇌관이 개발되었다. 또한 제어방식에 따라 외부 전기에너지에 의한 폭발 위험성을 가진 전기뇌관을 개선한 비전기 뇌관이 1960년대에 개발되어졌다.

전기 및 비전기 뇌관의 기폭시차 오차(약 $\pm 10\%$) 및 한정된 시차는 발파환경 규제가 강화되면서 기폭시차 오차에 의한 진동제어 한계성과 발파효율성 저감에 따른 생산성 저하를 가져오게 됨에 따라 정밀시차에 의한 진동제어 향상과 생산성 도약을 위한 무한단차의 필요성으로 1990년대에 전자뇌관의 개발이 시작되어 2000년대에 상용화되면서 현재 0.1~0.01%의 초정밀 기폭시차의 기대효과를 얻을 수 있게 되었다.



< 그림 5.2 > 뇌관의 발전단계

과업구간에 시험 적용한 터널용 전자발파 시스템은 ORICA사의 eDev II 뇌관과 시차할당을 위한 Scanner, 결선의 이상 유무를 점검하기 위한 Network Tester, 각 뇌관과 교신하여 할당된 시차를 Programming 후 최종 순차적으로 기폭시키는 Blast Box 등으로 구성되어 있다.




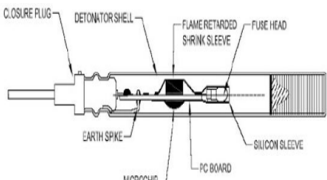
< 표 5.2 > 전자뇌관 제원

제품명	eDev II (터널용)	
각 선	Copper Alloy	
각선길이	6.0m	
지연요소	ASIC 전자집적회로	
각선인장력	20kgf	
첨 장 약	PETN	
시차정밀도	$\pm 0.01\%$	
시차범위	0~20,000ms	
박스당 수량	80pcs/box(각선6m시)	

< 표 5.3 > 전자발파 시스템의 제품구성

사 진	내 용	사 진	내 용
	·각 뇌관의 시차 지정 을 위한 고유 ID 바 코드와 작업속도 향 상을 위한 Duplex Connector		·각 뇌관의 시차를 부 여하기 위한 사용자 입력장치
	·통신불량(결선오류), 스캔누락 뇌관, 뇌관 내부 결함, 단선, 숏 트, 누설전류량 디지 털 수치 확인		·각 뇌관과의 양방향 통신을 통해 스캐너 로 입력받은 각 뇌관 의 시차정보를 프로 그래밍 및 최종발파 명령을 내리는 장치
	·각 뇌관을 연결하는 전용 보조모선		·발파설계 및 가상발파 발파진동분석 소음제어분석 발파 3차원 모델링

< 표 5.4 > 전자뇌관 적용효과

구 분	내 용	개요도
Cut-Off에 의한 불발뇌관 방지효과	·기폭은 Capacitor에 충전 에너지 사용 ·발파명령 이후 단선시 Programming 시간 에 자동기폭 ·공내 불발뇌관 및 폭약 없음	
장약공 내부의 불발뇌관 방지효과	·발파기의 양방향 통신에 의한 불량뇌관 보 고로 교체 지시 ·결선, 시차 오류 뇌관 보고로 보완 지시 ·보완 지시 없이 발파 진행될 경우 자동기 폭명령으로 뇌관 잔류 방지	
작업자 실수에 의한 발파사고 방지효과	·천공조건에 따른 발파패턴 변경 용이 ·장약 완료 후 기폭순서 부여 ·미숙련자에 의한 시차배열 오류 방지	
전기적 충격에 대한 안전사고 방지효과	·누설전류, 낙뢰등 고압전류 유입시 내부 안전장치 작동으로 기폭사고 방지 ·내부 ASIC(집적회로)는 특정 신호명령 체 계를 가진 전용발파기에만 작동	

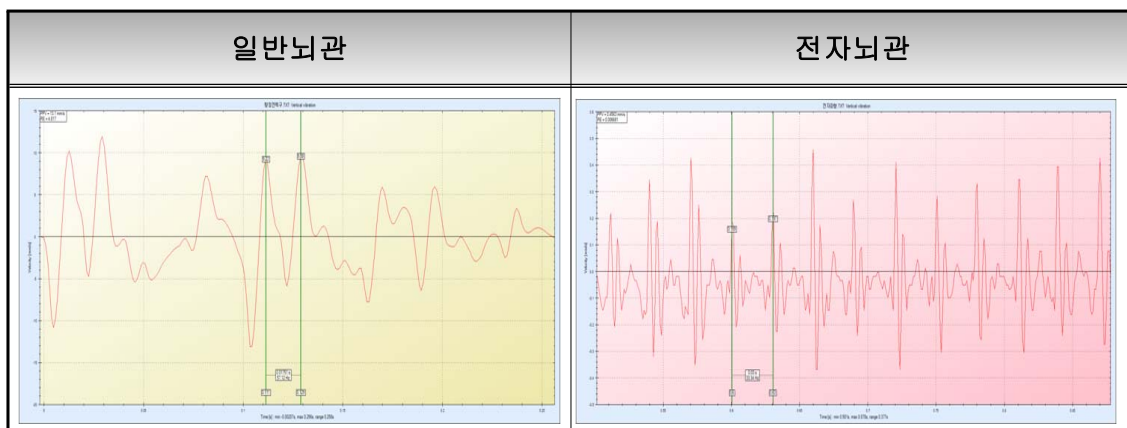
< 표 5.5 > 뇌관종류별 특성 비교

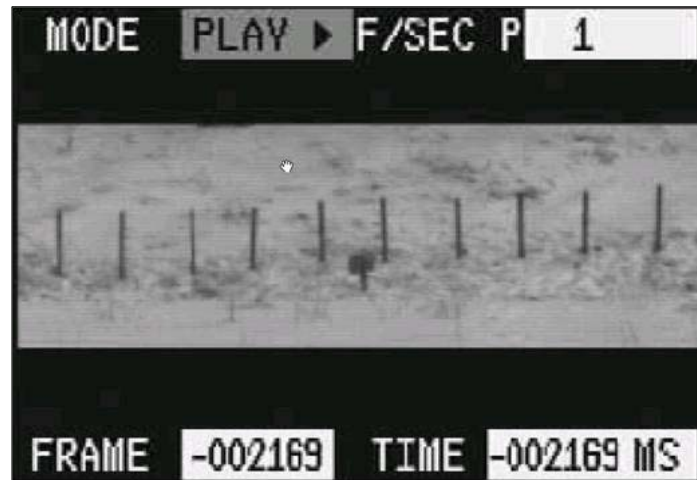
구 분	전기뇌관	비전기뇌관	전자뇌관
점화방식	전기전류	충격파	ASIC(전자회로 통제)
시차정밀도	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 0.01\%$
시차결정요소	지연화약의 길이	지연화약의 길이	전자 집적회로통제
안전성	전기적 충격에 민감	외부 전기 요인에 안전 (전용발파 신호체계에서만 작동)	
설정초시	0~7,000ms	0~7,000ms	0~20,000ms
사용단수	MS: 20단/LP: 22단, MS & LP조합: 약42단		800단 (무한단차 효과)
장 점	가격 저렴	전기적 안전	진동 분해능력 우수
단 점	뇌관오차로 진동증가 전기적 위험	뇌관오차로 진동증가 가격 다소 높음	가격 고가

전자발파 시스템은 일반뇌관 발파와 달리 뇌관의 정밀도가 우수하여 발파진동 파형중첩에 의한 진동증가 현상이 없으며, 장약공과 장약공 사이의 짧은 시차설정으로 인한 뛰어난 제발 발파효과로 파쇄효율이 높고 발파작업시 발생하는 소음의 크기가 일정한 것이 특징적이다.

그림 5.3은 일반뇌관과 전자뇌관의 진동파형 비교자료 이며, 그림 5.4는 ISEE 2006/Why the 8ms rule doesn't work/Bickford USA에서 발표된 전기 및 비전기 뇌관의 시차오차 관련 실험 결과이다.

< 그림 5.3 > 진동파형 비교





Grade Stake	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pyrotechnics/ms	405	411	417	383	428	405	413	412	419	421
Electronics/ms	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

< 그림 5.4 > 초고속카메라 시차오차 측정모습 및 결과

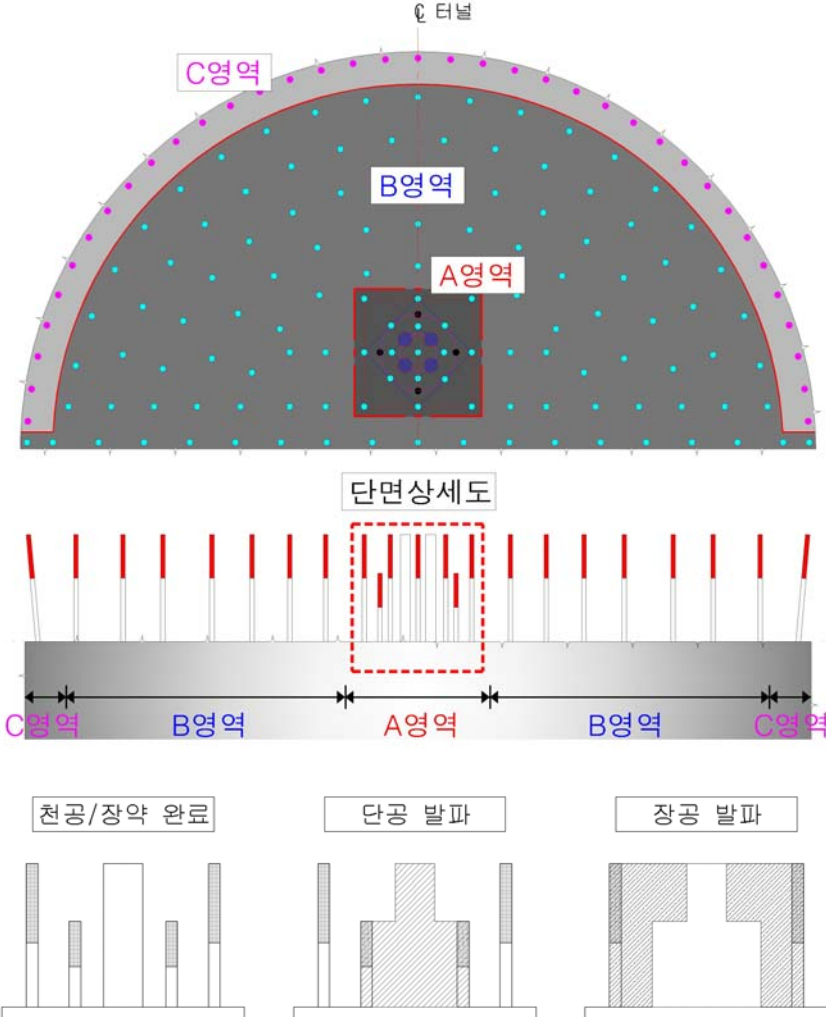
일반뇌관의 시차오차는 $-4.3\% \sim +7.0\%$, 전자뇌관 시차오차는 0% 로 분석 되었으며, 400ms 뇌관 10개를 9ms, 17ms, 25ms, 25ms, 42ms로 각각 기폭 시험한 결과는 다음과 같이 분석 되었다.

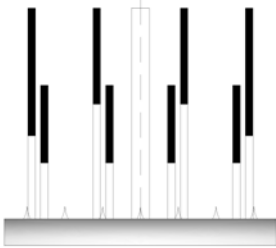
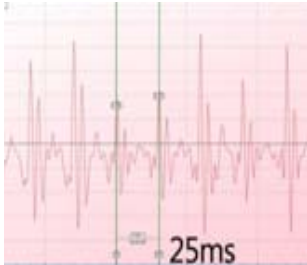
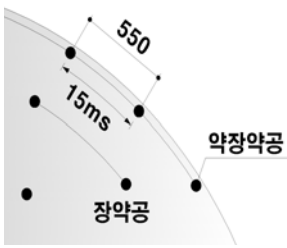
- 9ms 시차간격 : 50% 뇌관기폭순서 역전
- 17ms 시차간격 : 40% 뇌관기폭순서 역전
- 25ms 시차간격 : 20% 뇌관기폭순서 역전
- 30ms 시차간격 : 인접공 한 두공이 동시기폭
- 42ms 시차간격 : 정상기폭유지

전자발파와 일반발파(전기다단 및 비전기발파)의 기폭시스템을 비교하면 전자발파가 진동제어 및 시공효율성이 우수한 결과를 나타내므로 보안물건 근접한 본 현장은 환경친화성을 바탕으로 안전성 및 시공성의 장점을 지닌 전자발파 기폭시스템의 터널굴착 공법이 우수할 것으로 사료된다.

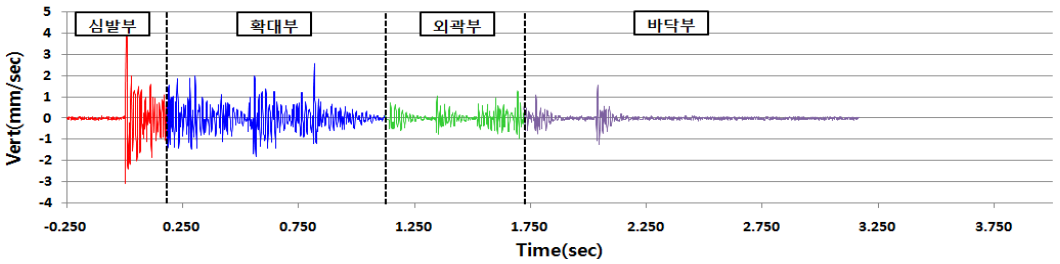
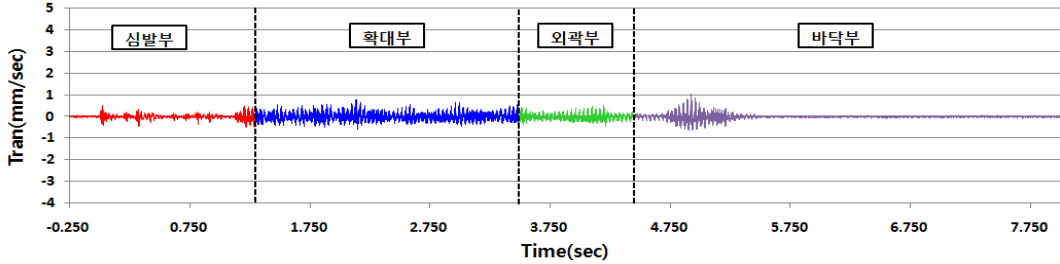
5.4 다단평행 미진동 전자발파

■ 개 요

구 분	다단평행(LVED) 미진동 전자발파공법 (Low Vibration Electronic Deck Blasting)
개요	 <p>다단평행(LVED) 미진동 전자발파공법 (Low Vibration Electronic Deck Blasting)</p> <p>단면상세도</p> <p>천공/장약 완료 단공 발파 장공 발파</p>
원리	<p>• 다단평행 미진동 전자발파공법은 진동제어와 굴진효율 개선을 위해 단공과 장공의 다단천공 2단계로 분할 발파하여 암반의 구속도 최소화 및 최소저항선을 축소시키고, 전자뇌관에 의한 정밀시차제어로 발파진동 분해능력을 극대화 시켜 지발당 장약량을 줄여 발파진동을 제어하는 터널발파공법</p>
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 다단 발파시 사압, 소결현상 없음 • 단계별 2자유면 확장발파로 진동 · 소음 최소화하고 발파효율 증대 • 천공비 및 뇌관비 다소 증가
등록사항	<p>• 특허 제10-0751729호</p>

구 분	모 식 도	특 성
심발 (A)		<ul style="list-style-type: none"> • 다단천공 : 암반 구속저항 최소 • 분산발파 : 화약량 축소(1/2) • 자유면 증가 : 362 → 764mm
확대 (B)		<ul style="list-style-type: none"> • 분할영역 감소 : 6회로 → 1회로 • 정밀시차제어 : 25ms 이상 확보 • 굴진효율개선 : MS 지발 발파
외곽 (C)		<ul style="list-style-type: none"> • 인장파 발생량 증가 : 인접공 순차 기폭(LP → MS) • 암반손상개선 : MS 지발 발파

■ 일반뇌관과 다단평행 전자뇌관 진동파형 비교

구 분	그 래 프
일 반 뇌 관	
다단평행 전자뇌관	
비교 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 일반뇌관은 심발부의 발파진동이 가장 크게 발생하여 진동제어 곤란 • 다단평행 전자뇌관은 심발부의 진동을 완벽하게 제어하고 긴 시차로 진동의 중첩을 제어하여 진동저감가능

5.5 다단평행 미진동 전자발파공법 분류와 시험발파공법 선정

■ 시험발파공법 선정

분류	다단평행 미진동 A, B TYPE	다단평행 미진동 C TYPE
개요도	<p>●: 무장약공 (Ø 102mm) ●: 장약공 단공 (Ø45mm) ○: 장약공 장공 (Ø45mm)</p>	<p>●: 무장약공 (Ø 362mm) ●: 장약공 단공 (Ø45mm) ○: 장약공 장공 (Ø45mm)</p>
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> • 평행하게 심발공을 단공과 장공으로 교차 천공하고 분산장약 하여 최소저항선을 축소시켜 단계별로 확대하는 발파공법 • 외곽부 Line Drilling적용 진동감쇄 	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 중앙부에 Ø362mm 이상 직경으로 대구경 무장약공을 천공하고 자유면으로 활용하여 발파하는 공법 • 외곽부 Line Drilling적용 진동감쇄
적용 범위	<ul style="list-style-type: none"> • 대구경 Ø102mm 3~4공 천공 • Line Drilling 	<ul style="list-style-type: none"> • 대구경 Ø362mm 이상 천공 • Line Drilling
무장약공	<ul style="list-style-type: none"> • TYPE-A : 0.25kg • TYPE-B : 0.125~0.1875kg 	<ul style="list-style-type: none"> • TYPE-C : 0.125~0.1875kg
선 정	◎	
선정사유	<ul style="list-style-type: none"> • 시험발파 위치에서 보안물건까지의 이격거리는 38m로 TYPE-A를 적용할 경우 허용기준 이내로 예측됨 • 적용구간내 굴착효율 및 시공성, 경제성을 고려하여 TYPE-A 선정 	

■ 발파진동 영향검토 (실시설계 예측식 적용)

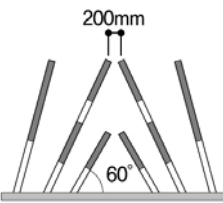
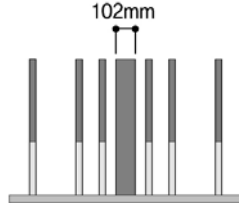
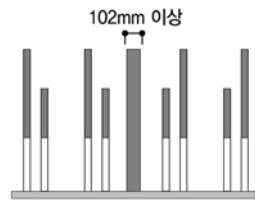
굴착공법 구분		장약량 (kg/delay)	이격거리 (m)	진동예측 (cm/sec)	예측결과 (0.3cm/s)
TYPE-A	다단평행 미진동 전자발파	0.25	38	0.117	O.K

5.6 시험발파 공법 선정

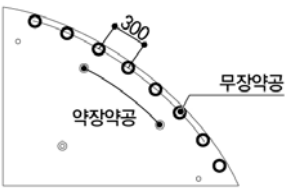
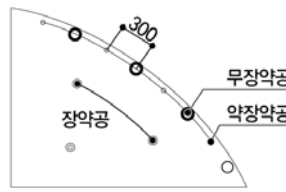
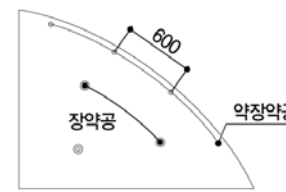
1) 선정 기준

선정기준	<ul style="list-style-type: none"> ■ 굴착심도 및 기반암의 물리역학적 특성을 고려하여 선정 ■ 굴착공법별 굴착능률 및 시공성을 고려하여 선정 ■ 주변 보안물건 배치상태와 진동 및 소음의 전파특성을 고려하여 선정
------	--

2) 심발부 발파공법

구 분	V-Cut	Cylinder-Cut	다단평행 분산장약
개요도			
특 징	<ul style="list-style-type: none"> •시공경험이 풍부함 •진동·소음이 크게 발생 	<ul style="list-style-type: none"> •터널 단면크기에 제약없음 •소결현상 발생 우려 	<ul style="list-style-type: none"> •장공과 단공으로 분산장약하여 진동·소음 저감
적 용			●
적용사유	<ul style="list-style-type: none"> ■ 분산장약에 최소단위 화약 사용으로 심발부 진동·소음 제어가 우수한 다단평행 발파를 적용 		

3) 최외곽공 제어발파 공법

구 분	Line Drilling	Pre-Splitting	Smooth Blasting
개 념 도			
천공형태	<ul style="list-style-type: none"> •공경의 2~4배 •전열 최소저항선의 0.5~0.75배 	<ul style="list-style-type: none"> •공간격 : 공경 10배 •S.B보다 좁은 공간격 유지 	<ul style="list-style-type: none"> •$S:W=(0.5\sim0.8):1$ S : 공간격 W : 최소저항선
특 성	<ul style="list-style-type: none"> •굴착선 균열 최소화 •다수 무장약공 설치 •과도한 천공비 소요 •속련공 필요 	<ul style="list-style-type: none"> •균질한 암반에서 효과적 •암반균열 최소 •선행 발파시 진동발생 우려 	<ul style="list-style-type: none"> •주변 암반 이완 및 손상 최소화 •여굴량 작고 평활한 굴착면 확보 가능
용 도	진동저감, 여굴방지	진동저감, 여굴방지	여굴방지
선 정			●
선정사유	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국내에서 가장 많이 적용하고 발파기술자의 경험이 풍부한 조절발파공법 적용 ■ 천공시 발생할 수 있는 천공오차에 조절발파 효과의 영향을 작게 받는 공법 적용 		

4) 사용 화약류

구 분	다이너마이트	에멀전폭약	정밀폭약
화약모습			
특 성	<ul style="list-style-type: none"> •경암에 적용 •진동, 소음이 큼 •발파 후가스 존재 	<ul style="list-style-type: none"> •보통암 이하 적용 •도심지발파 적합 •작업환경 양호 	<ul style="list-style-type: none"> •굴착선에 적용 •여굴 최소화 가능 •디커플링효과 적용
폭발속도 (m/sec)	6,100	5,700 ~ 5,900	4,200 ~ 4,400
선 정	비사용	●	●
적용구간		심발공, 확대공	외곽공
선정배경	<ul style="list-style-type: none"> ■ 보통암으로 에멀전 폭약 적용 ■ 정밀폭약류는 굴착선 암반의 여굴 최소화 및 손상방지 가능 		

5) 적용 기폭시스템

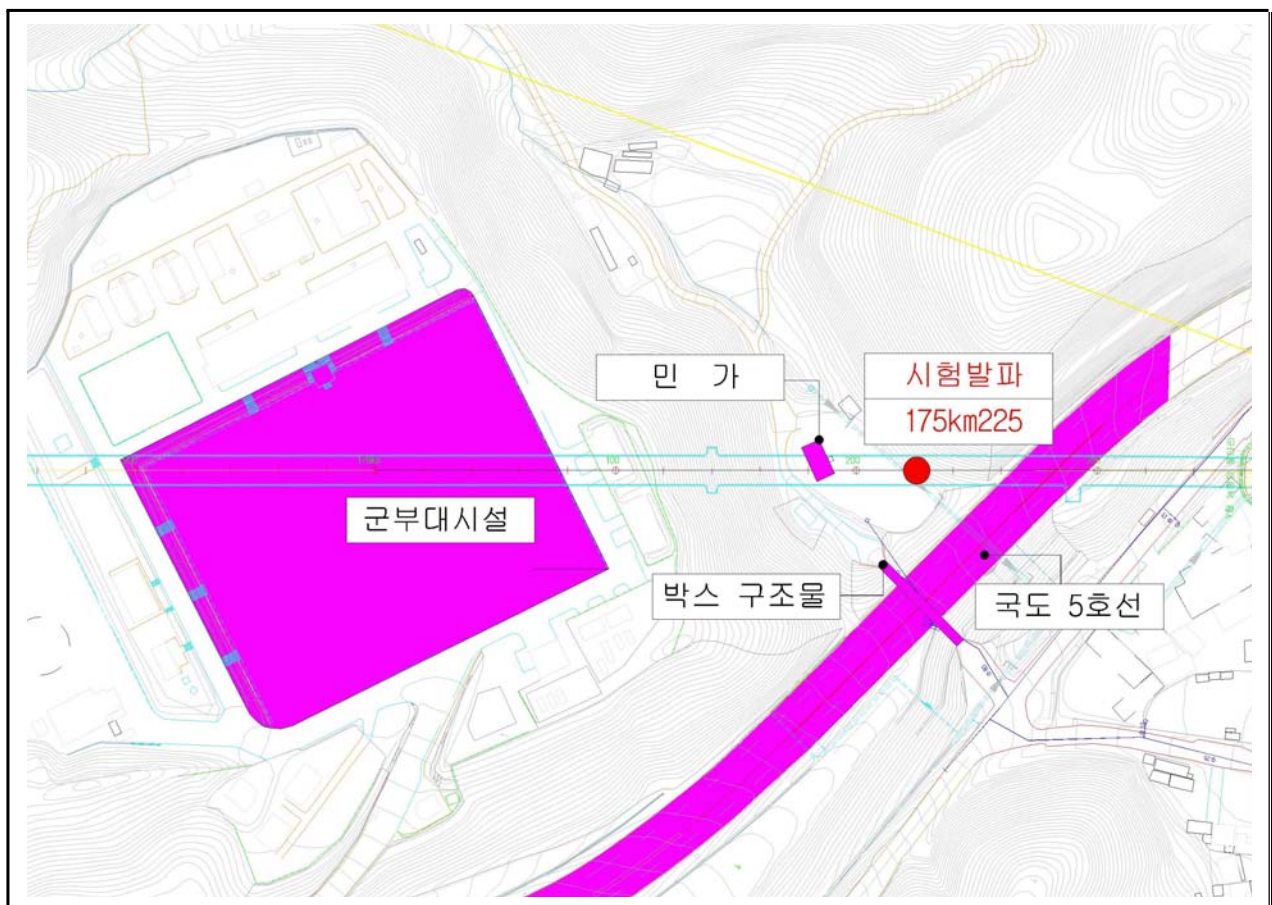
구 분	전기식 뇌관	비전기식 뇌관	전자뇌관
뇌관모습			
기폭원리	전기에너지	충격에너지	전자회로
특 성	<ul style="list-style-type: none"> •전기요인으로 기폭사고 •대중적이고 경제적임 	<ul style="list-style-type: none"> •전기적 요인에 안전 •뇌관시차 무한대 	<ul style="list-style-type: none"> •지발시간 초정밀 조정 •가격 고가 및 전량수입
선 정			●
선정배경	<ul style="list-style-type: none"> ■ 전기적 충격에 안전하며, 짧은 시차설정으로 제발효과에 의한 파쇄효율이 높음 ■ 뇌관의 기폭시차에 대한 정밀도가 우수하여 발파진동 파형중첩으로 인한 진동증가 현상이 없어 발파진동 제어효과가 우수한 전자뇌관을 적용 		

6. 시험발파 수행 및 측정내용

6.1 시험발파 현황

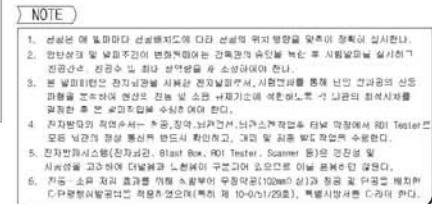
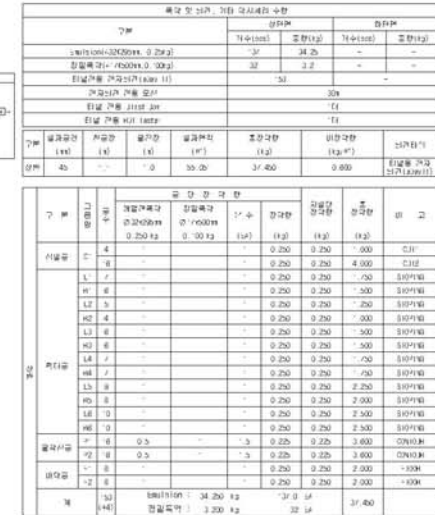
구 분	수행 현황	현장 모습
일 시	2015년 12월 07일	
발파횟수	1회	
위 치	176km225	
적용공법	다단평행 미진동 전자발파	
진동측정	8 개소	
발파패턴	PD-4(CB4)	
적용노관	전자노관	

6.2 시험발파 위치도



6.3 시험발파 수행 및 개요

구 분		적용 현황
시험발파 공법		다단평행 미진동 전자발파
위치(STA.)		176km225
발파패턴		PD-4(CB4)
단면적(m ²)		55.051
일 시		2015년 12월 07일
심발공법		다단평행 미진동 전자발파
굴진장/천공장(m)		1.0/1.1
장약공(mm)		Φ 45
무장약공(mm)		Φ 102 (4공)
천공수(공)		153(+4)
사용폭약류		NewMite Plus (Ø32*295mm), 정밀폭약(Ø17*500mm)
적용뇌관		전자뇌관(eDev II)
지발당 장약량 (kg/delay)	심발부	0.25 kg
	확대부	0.25 kg
	외곽공	0.225 kg
	바닥부	0.25 kg
총 장약량(kg/total)		37.450
비장약량(kg/m ³)		0.680
시험횟수		1회



■ PD-4, CB4 시험발파 장약제원표





구 분	상부 단면		기 타
	개수(pcs)	중량(kg)	
NewMite Plus (Ø32*295, 0.25kg)	137	34.25	
정밀폭약(Ø17X500mm,0.100kg)	32	3.2	
터널전용 전자뇌관(eDev II)	153 개		
전자뇌관 전용 모선	30m		
터널 전용 Blast Box	1대		
터널 전용 Test Box	1대		

구 분			공수	공 당 장 약 량 (kg/Hole)				총 장약량 (kg)	기 타
				에멀전 Ø32*295 0.25kg/pcs	정밀폭약 Ø17*500 0.100kg/pcs	본 수 (EA)	장약량 (kg)		
상반	심발공	C1	4	1.0		1.0	0.25	1.000	CUT-1
			16	1.0		1.0	0.25	4.000	CUT-2
	확대공	L1	7	1.0		1.0	0.25	1.750	STOPING
		R1	6	1.0		1.0	0.25	1.500	
		L2	5	1.0		1.0	0.25	1.250	
		R2	4	1.0		1.0	0.25	1.000	
		L3	6	1.0		1.0	0.25	1.500	
		R3	6	1.0		1.0	0.25	1.500	
		L4	7	1.0		1.0	0.25	1.750	
		R4	7	1.0		1.0	0.25	1.750	
		L5	9	1.0		1.0	0.25	2.250	
		R5	8	1.0		1.0	0.25	2.000	
		L6	10	1.0		1.0	0.25	2.500	
		R6	10	1.0		1.0	0.25	2.500	
	외곽공	P1	16	0.5	1.0	1.5	0.225	3.600	CONTOR
		P2	16	0.5	1.0	1.5	0.225	3.600	
	바닥공	F1	8	1.0		1.0	0.25	2.000	FLOOR
		F2	8	1.0		1.0	0.25	2.000	


구 분	발파공경 (mm)	천공장 (m)	굴진장 (m)	발파면적 (m ²)	총장약량 (kg)	비장약량 (kg/m ³)	뇌관타입
상부	45	1.1	1.0	55.051	37.450	0.680	터널용 전자뇌관 (eDev II)

6.5 시험발파 방법 및 내용





■ 천공작업

방법 및 내용			
<ul style="list-style-type: none"> • 천공작업 전에 심발부 위치를 결정한 다음 암반 자유면에 천공위치를 표시(Marking) • 천공작업은 현장에서 보유하고 있는 점보드릴을 이용하여 천공 • 천공장은 1.1m 로 동일하게 천공 • 모든 장약공 및 무장약공의 천공경은 45mm Bit를 사용하되, 무장약공은 102mm Reaming Bit를 이용하여 확장 천공 • 다단평행 미진동 전자발파공법은 중심축에 4개의 대구경 무장약공을 천공한 후 무장약공과 근접해서 원형 및 4각형태의 심발공 배치 • 천공상태를 확인한 후 정확하지 않은 천공위치는 재차 천공토록 하여 발파공법별 메커니즘 특성을 정확히 하고 데이터의 비교분석에 신뢰성을 확보함. 			
장약공 천공	천공장 확인	공간격 확인	저항선 확인
			

■ 발파공법별 심발부 설치

방법 및 내용	다단평행 심발공법
<ul style="list-style-type: none"> • 심발부 위치는 발파단면 중심축 대칭으로 좌우에 심발공 배치 • 다단평행 심발공법의 심발부 무장약공 및 장약공의 배열은 설계에 준하여 설치 • 다단평행 심발공법 천공수는 장약공 20공, 무장약공 4공으로 함 	

■ 장약 및 발파작업

방법 및 내용			
<ul style="list-style-type: none"> • 사용 화약은 현장의 암반상태를 고려하여 Emulsion류 화약을 사용하였음. • 사용된 Emulsion 화약의 발파효과를 제고시키기 위해서 직경이 32mm 인 화약을 사용하고 전색봉을 이용하여 장전밀도를 유지 시켰음. • 다단평행 미진동 전자발파는 1지발로 함 • 장약 후 다짐봉을 이용하여 메지를 넣고 전색작업 마무리 함. 			
사용 화약	사용 뇌관	장약 작업	결선작업
			

■ 발파진동 및 소음측정

방법 및 내용	
<ul style="list-style-type: none"> • 발파진동 측정은 총 8지점으로 자유장 5지점, 주변 보안물건 3지점에서 수행됨. • 진동측정은 Minimate Plus, SV-1, HLVS-04 및 eXAD-8 장비를 사용함. • 진동측정기 지반에 설치시 스파이크를 이용하여 센서를 설치한 후 모래주머니로 센서를 고정 시키고, 콘크리트 바닥에 설치시에는 Plate를 이용하여 센서를 지반에 고정함. • 발파진동 측정기의 Trigger Level은 0.013cm/sec로 하고 Continuous Mode로 설정함 	
자유장 설치모습	보안물건 설치모습
	

7. 발파진동 · 소음 측정 및 결과 분석

7.1 계측기의 사양 및 계측항목

계측기종	MiniMate Plus	SV-1	HLVS-04	eXAD-8
측정대수	4	2	1	1
계측항목	발파진동속도, 변위, 가속도, 폭풍압, 소음도, 주파수			
제작회사	CANADA Instantel INC.	에스브이(주)	(주)홍림	PMT
사 진				

7.2 계측기의 특성

■ Minimate Plus

항 목	구 분	내 용
진동	최대측정범위	254 mm/sec 까지 자동 범위 설정
	최소분석가능치	0.0159 mm/sec
	Trigger Level	0.13~253.9 mm/sec의 범위 내에서 0.01mm/sec 단계로 설정
	가속도	0.01~30gal 범위 내 진동 가속도 계산 가능
	변위	0.0001"~1.5" 범위 내 진동 변위 계산 가능
	주파수 분석	최고치의 주파수 및 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분석
	정확도	B & K Reference accelerometer @15Hz의 1% 내에서 검정
소음도 "A"형	측정범위	55~110dB
	최소분석가능치	0.2 dB
	Trigger Level	55.0~110.0dB 범위 내에서 0.2dB 단계로 Level 설정 가능
	주파수 응답	0.5~8kHz, 기록시간에 독립적 임펄스 필터링
주파수	샘플 추출율	모든 채널, 모든 기록 방식에 대해 1,024 sample/sec
	주파수 응답 (-3 dB Point)	기록시간에 독립적으로 1.5~250Hz의 진동과 선형폭압, 정밀한 주파수 측정을 보장하는 하드웨어 "Anti-alias"필터

■ 에스브이(주), SV-1

항 목	구 분	내 용
진동속도	측정범위	100 mm/sec 까지 자동 범위 설정
	최소분석가능치	0.01 mm/sec
	Trigger Level	0.1 ~ mm/sec의 범위
	주파수범위	1Hz ~ 50Hz
	Storage sample rate	514 samples/sec
진동레벨	측정범위	35 ~ 120dB(V)
	측정값	시간율 레벨(L ₅ , L ₁₀ , L ₅₀ , L ₉₀ , L ₉₅), 최대치(L _{max}), 최소치(L _{min}), 등가(L _{eq})
	주파수범위	1Hz ~ 80Hz
	진동센서	3방향 가속도 센서
소음도 “A”형	측정범위	30 ~ 130dB(A)
	측정값	시간율 레벨 최대치(L _{max}), 등가(L _{eq})
	주파수범위	20Hz ~ 6KHz
	소음센서	IEC 60651:1979 Type 2
공통	Triggering 기능	진동감지 Triggering 으로 진동·소음 동시측정
	측정시간	1s, 2s, 3s, 10s, 1min, 5min, 30min, 1hr, 24hr
	저장용량	SD 메모리카드

■ (주)홍림 HLVS-04

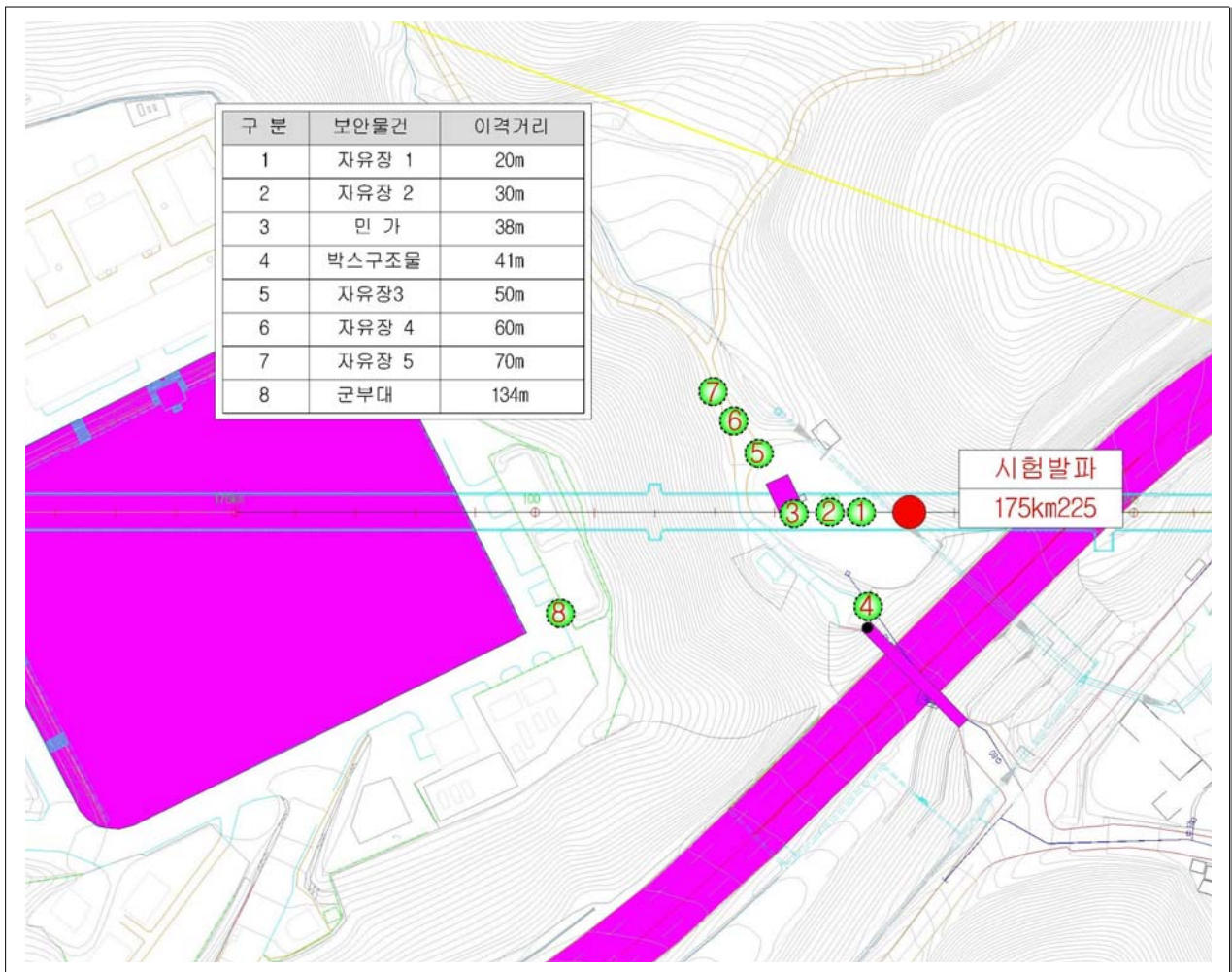
항 목	구 분	내 용
진동속도	측정범위	80 mm/sec 까지 자동 범위 설정
	최소분석가능치	0.01 mm/sec
	Trigger Level	0.3 ~ mm/sec의 범위
	주파수범위	3Hz ~ 250Hz
	진동센서	3방향 속도 센서
진동레벨	측정범위	40 ~ 120dB(V)
	측정값	시간율 레벨(L ₅ , L ₁₀ , L ₅₀ , L ₉₀ , L ₉₅), 최대치(L _{max}), 최소치(L _{min}), 등가(L _{eq})
	주파수범위	1Hz ~ 90Hz
	진동센서	3방향 가속도 센서
소음도 “A”형	측정범위	30 ~ 130dB(A)
	측정값	시간율 레벨(L ₅ , L ₁₀ , L ₅₀ , L ₉₀ , L ₉₅), 최대치(L _{max}), 최소치(L _{min}), 등가(L _{eq})
	주파수범위	10Hz ~ 20KHz
	소음센서	ICE61672 Class 2 (정밀급)
공통	측정시간	1s, 2s, 3s, 10s, 1min, 1hr, 24hr
	저장용량	그래프 포함 데이터 200개

7.3 계측기 설치 위치

구 분	보안물건	시험발파 위치에서 이격거리	현 황
1	자유장 #1	20m	Minimate Plus SV-1 HLVS-04 eXAD-8
2	자유장 #2	30m	
3	수양개유적로23-16 (민가)	38m	
4	박스구조물	41m	
5	자유장 #3	50m	
6	자유장 #4	60m	
7	자유장 #5	70m	
8	군부대	134m	

* 계측기 이격거리는 사거리를 기준으로 작성함

■ 시험발파 및 계측 위치도



7.4 배경소음 측정

- 배경소음은 일상소음(日常騒音)의 크기로서 평상시 사람 또는 동물이 접하는 소음(차량소음, 바람소리, 사람의 이동 및 대화소리 등)의 크기를 말하며, 계측주변에서 발생하는 배경소음을 측정하였다.
- 본 현장의 민가 에서 배경소음을 측정하는 이유는 평상시 접하고 있는 소음의 크기를 파악할 뿐만 아니라 발파 소음과 중첩현상 여부를 확인하여 발파소음 보정여부를 판단한다.
- 일반적으로 사람이 일상생활에서 느끼는 배경소음의 크기는 표 7.1과 같다.

< 표 7.1 > 사람이 일상생활에서 느끼는 배경소음의 크기

구 분	배경소음의 크기 dB(A)
조용한 밤의 공원	20 ~ 30 dB(A)
자동차 통행이 없는 조용한 거리	50 ~ 60 dB(A)
승용차가 통행하는 거리	65 ~ 75 dB(A)
국유철도(200 m 떨어진 지점)	70 dB(A)

■ 배경소음 측정 전경

구 분	수양개유적로 23-16 (민가)		
측정 구분	인접도로 차량 소음		
측정시간	2015. 12. 07 16:12:36 ~ 16:17:36		
배경소음치	L_{eq} 48.21 dB(A)		
최고소음치	L_{max} 67.60 dB(A)		
가측 율음 소음			
측정방법	대상 소음원(발파 소음)의 가동이 중지한 상태에서 측정 장비의 샘플주기를 1초 이내에서 결정하고 5분 이상 측정하여 자동 연산 기록한 등가 소음도를 그 지점의 배경소음도로 한다.		

■ 배경소음 측정결과 분석

수양개유적로 23-16(민가) 에서 배경소음을 측정한 결과 등가소음은 48.21 dB(A)이며, 최고소음의 경우 인접도로 운행중인 차량 소음으로 인해 67.60 dB(A) 으로 측정되었다.

7.5 발파진동 · 소음 측정 결과

■ 발파진동 계측 데이터

계측기종	계측위치	지발당 장약량 (kg)	발파진동속도 (cm/sec)				계측거리 (m)
			Transverse	Vertical	Longitudinal	P.P.V	
Minimate Plus BE5457	자유장 #1	0.225 ~ 0.250	0.0508	0.1060	0.1070	0.1070	20
Minimate Plus BE10493	자유장 #2		0.0508	0.0984	0.0762	0.0984	30
SV-1 14154	수양개유적으로 23-16 (민가)		0.0660	0.1190	0.0550	0.1190	38
HLVS-04 41201046	박스구조물		0.0510	0.0830	0.0240	0.0830	41
eXAD-08 K08091013	자유장 #3		0.0320	0.0390	0.0270	0.0390	50
Minimate Plus BE15245	자유장 #4		0.0127	0.0206	0.0111	0.0206	60
Minimate Plus BE15014	자유장 #5		0.0143	0.0048	0.0191	0.0191	70
SV-1 14155	군부대		Trigger Level 0.01cm/sec 미만				134

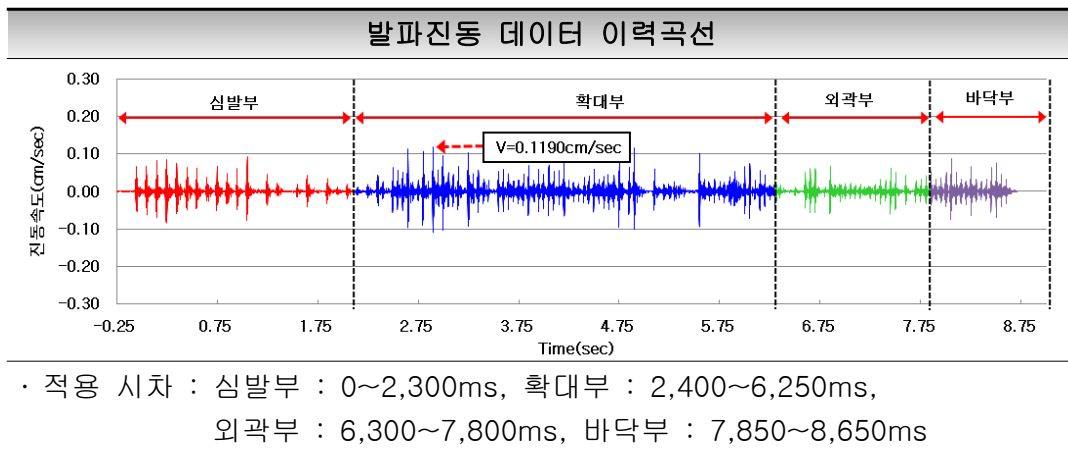
■ 발파 진동레벨 및 소음 계측 데이터

지발당 장약량 (kg/delays)	수양개유적으로 23-16 (민가)		군부대	
	75dB(A)	75dB(V)	75dB(A)	75dB(V)
0.225 ~ 0.250	63.19	68.65	-	-

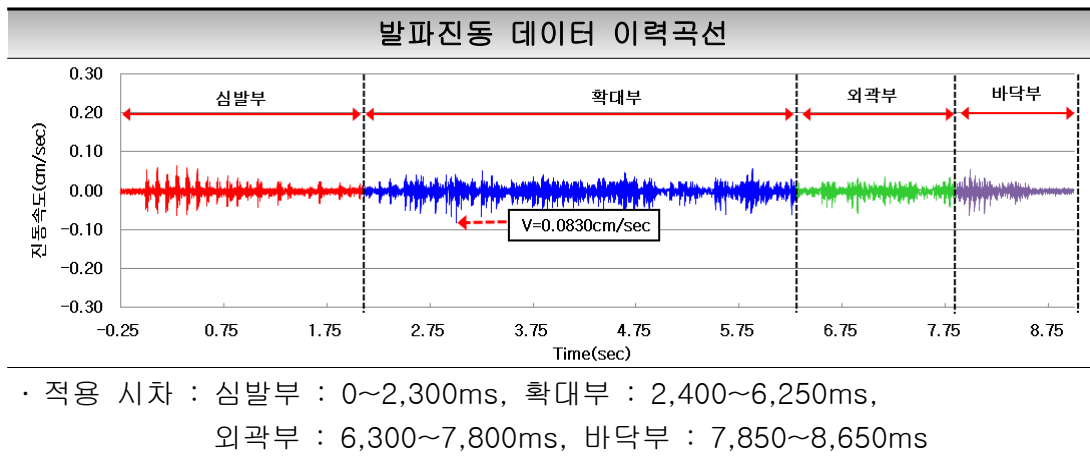
7.6 발파진동 이력곡선 분석

- 터널 발파는 심발부, 확대부, 외곽부, 바닥부로 구분되어 발파가 이루어지며 각각의 특성에 따라 측정되는 진동이 다르게 나타난다. 대부분 심발부에서 가장 크게 진동이 발생되는데, 심발부 발파는 1자유면 상태로 발파가 이루어져 구속압이 크게 적용되기 때문이다.
- 발파진동 이력곡선 분석은 『Advance Module Program』을 이용하여 발파진동이 가장 크게 발생하는 시간 및 지점을 분석하였다.

◆ 수양개유적로 23-16 (민가)



◆ 박스구조물



- 본 시험발파 이력곡선 분석결과 발파진동이 확대부에서 최대치가 발생되었다
- 다단평행 분산장약 심발공법을 적용한 결과 무장약공 및 분산장약으로 인하여 장약밀도가 감소하여 심발부의 진동제어가 가능한 것으로 판단된다.
- 또한, 시차분석을 통하여 발파진동 추정식을 산출하기 위해 필요한 30개 이상의 데이터를 확보하였으며 발파진동 추정식을 산출하였다.

■ 발파진동 초시분석 데이터

계측기종	계측위치	장약공 위치	지발당 장약량(Kg)	P.P.V (cm/sec)	이격거리 (m)
Minimate Plus BE5457	자유장 #1	심발	0.250	0.0635	20
		확대	0.250	0.1060	
		외곽	0.225	0.0825	
		바닥	0.250	0.0794	
Minimate Plus BE10493	자유장 #2	심발	0.250	0.0730	30
		확대	0.250	0.0984	
		외곽	0.225	0.0635	
		바닥	0.250	0.0714	
SV-1 14154	수양개유적으로 23-16 (민가)	심발	0.250	0.0921	38
		확대	0.250	0.1187	
		외곽	0.225	0.0661	
		바닥	0.250	0.0873	
HLVS-04 41201046	박스구조물	심발	0.250	0.0635	41
		확대	0.250	0.0830	
		외곽	0.225	0.0586	
		바닥	0.250	0.0635	
eXAD-08 K08091013	자유장 #3	심발	0.250	0.0390	50
		확대	0.250	0.0342	
		외곽	0.225	0.0073	
		바닥	0.250	0.0073	
Minimate Plus BE15245	자유장 #4	심발	0.250	0.0190	60
		확대	0.250	0.0206	
		외곽	0.225	0.0190	
		바닥	0.250	0.0190	
Minimate Plus BE15014	자유장 #5	심발	0.250	0.0191	70
		확대	0.250	0.0191	
		외곽	0.225	0.0048	
		바닥	0.250	0.0048	

7.7 발파 결과 분석

■ 발파진동속도 분석

지발당 장약량 (kg/delays)	계측 위치	수양개유적으로 23-16 (민가)	군부대	박스구조물
		V=0.3cm/sec	V=0.3cm/sec	V=1.0cm/sec
0.225 ~ 0.250		0.1190	0.01 미만	0.0830
검토결과		미만	미만	미만

발파진동 계측결과 모든 보안물건에서 허용기준치 이내로 측정됨.

■ 발파소음 및 진동레벨 분석

지발당 장약량 (kg/delays)	계측위치	수양개유적으로 23-16 (민가)		군부대	
		75dB(A)	75dB(V)	75dB(A)	75dB(V)
0.225 ~ 0.250		63.19	68.65	-	-
검토결과		미만		미만	

발파 진동레벨 및 소음레벨 계측결과 모든 보안물건에서 허용기준치 이내로 측정됨.

■ 발파 파쇄석 분석

파쇄석 사진	
	
발파시 파쇄석은 전체적으로 균일하며 파쇄 되었으나 막장면 좌우측의 경우 III등급 이상의 암질로 일부 미굴이 발생함	

7.8 발파진동 추정식 산출

■ 발파진동 추정식 산출방법

측정된 발파진동치는 최소자승법에 의한 회귀분석(Regression analysis)을 실시하여 발파진동 추정식을 산출한다.

발파진동산출을 위한 회귀분석은 단순회귀분석과 다중회귀분석으로 나눌 수 있다. 여기서 진동 상수를 추정하기 위하여 사용된 분석법은 단순회귀분석으로 한 개의 독립 및 종속변수 간의 선형관계(Linear relation)에 관한 분석법을 말한다.

이는 진동 관계식 $v = K(\frac{D}{\sqrt{W}})^n$ 을 이용하여 표본회귀식으로 변환하고, 이 때 양변에 Log를 취하면

$$\log v = \log K + n \log(D/\sqrt{W})$$

여기서 $\log v = Y$, $\log K = a$, $\log(D/\sqrt{W}) = X$, $n = b$ 라 하면 $Y = a + bX$ 가 된다.

이 식을 모회귀직선(표본회귀식)이라 하며, 모회귀 직선을 생성할 때 발생하는 오차들의 자승합을 최소로 하는 방법을 최소자승법(Least Square Method)이라고 하며, 이 방법을 사용하여 발파진동상수를 산출한다. 최소 자승법에 의하여 구해지는 a , b 를 최소 자승 추정량이라 한다.

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n}, \quad b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$n = b, \quad K = 10^a$$

안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 95% 수준의 발파진동식을 산출하며, 위에서 구해진 회귀 직선식의 기울기 b 를 동일하게 한 상태에서 y 절편을 이동시켜 새로운 절편을 계산하여 구한다.

절편 a 의 표준편차 (SE)는

$$SE(a) = \left(\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right) \times \delta$$

$$\text{여기서 } \delta^2 = \left(\sum X^2 \right) - \frac{\sum Y^2}{n} - \frac{(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n} \times \frac{1}{n-2} \quad \text{이고}$$

절편 a 는 t 분포에 따르며 95% 수준 값은 $a(95\%) = a \times t_a \times SE(a)$ 이다.

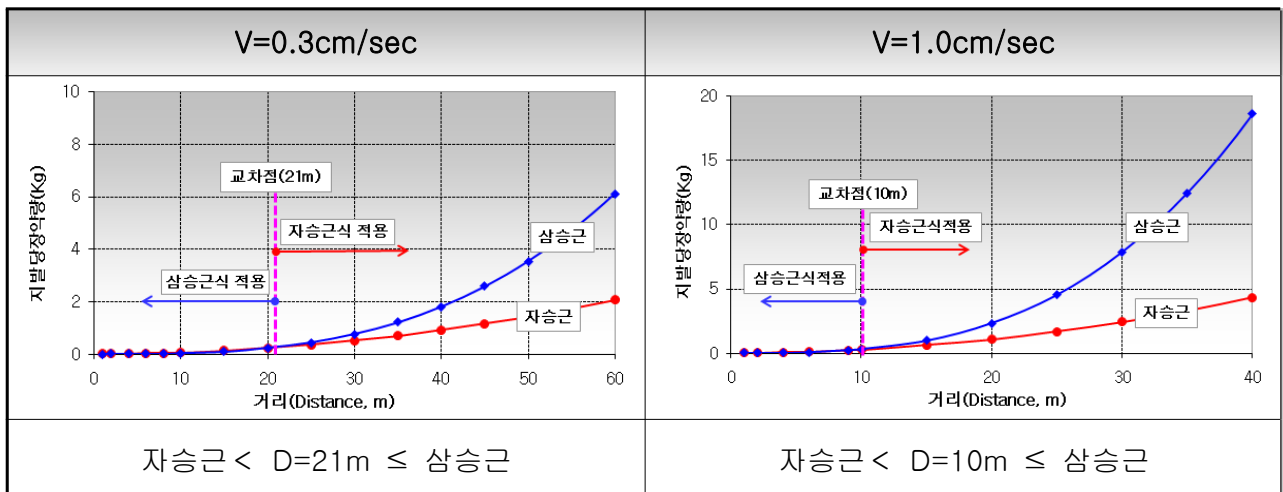
■ 초시분석을 이용한 진동추정식 산출

본 현장에서 측정된 발파진동 데이터를 확대공, 바닥공, 외곽공으로 세분하여 초시분석을 이용하여 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

< 표 7.2 > 산출된 발파진동 추정식

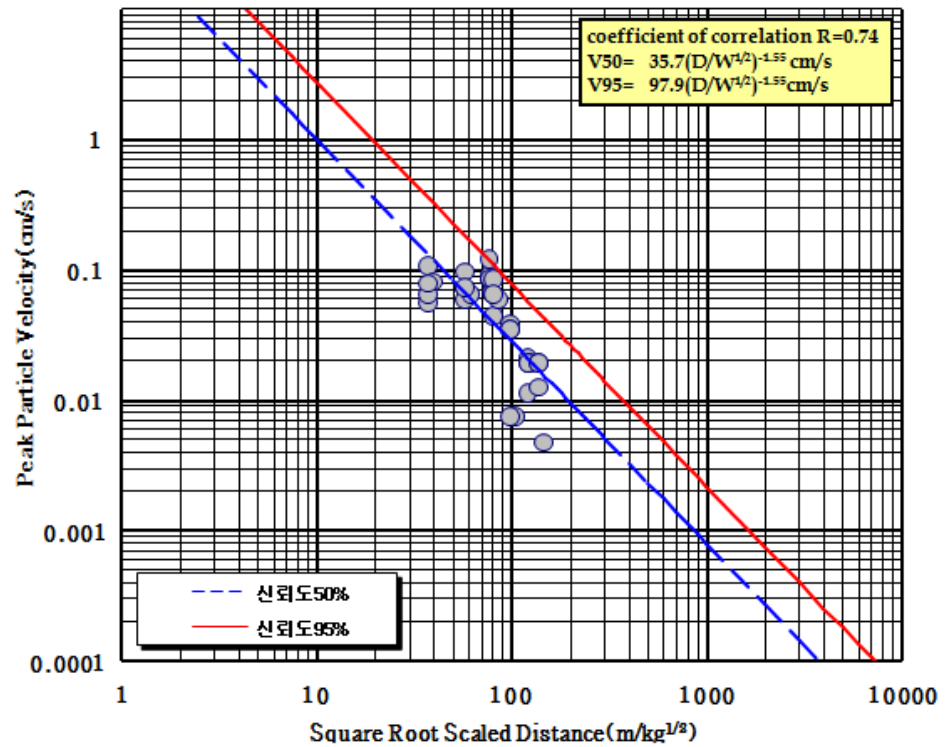
구 분	자승근:장약지수(b)가 ½일 때 (Square Root Scaled Distance)	삼승근:장약지수(b)가 ⅓일 때 (Cube Root Scaled Distance)
평균 발파 진동추정식 (50%)	$V = 35.7 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55}$	$V = 24.4 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55}$
설계적용 발파진동 추정식(95%)	$V = 97.9 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55}$	$V = 67.2 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55}$
상관계수	0.74	0.72
선정	<ul style="list-style-type: none"> · 상관계수는 국토교통부 지침의 0.7 이상으로 적합함 · 시험발파 계측치를 회귀분석 프로그램을 이용하여 분석 · 시험발파 결과로부터 도출된 발파진동 추정식을 교차 분석하여 근거리에서는 삼승근 추정식을 원거리에는 자승근 추정식을 적용하여 보수적으로 평가함. 	

■ 허용기준치별 교차지점 분석

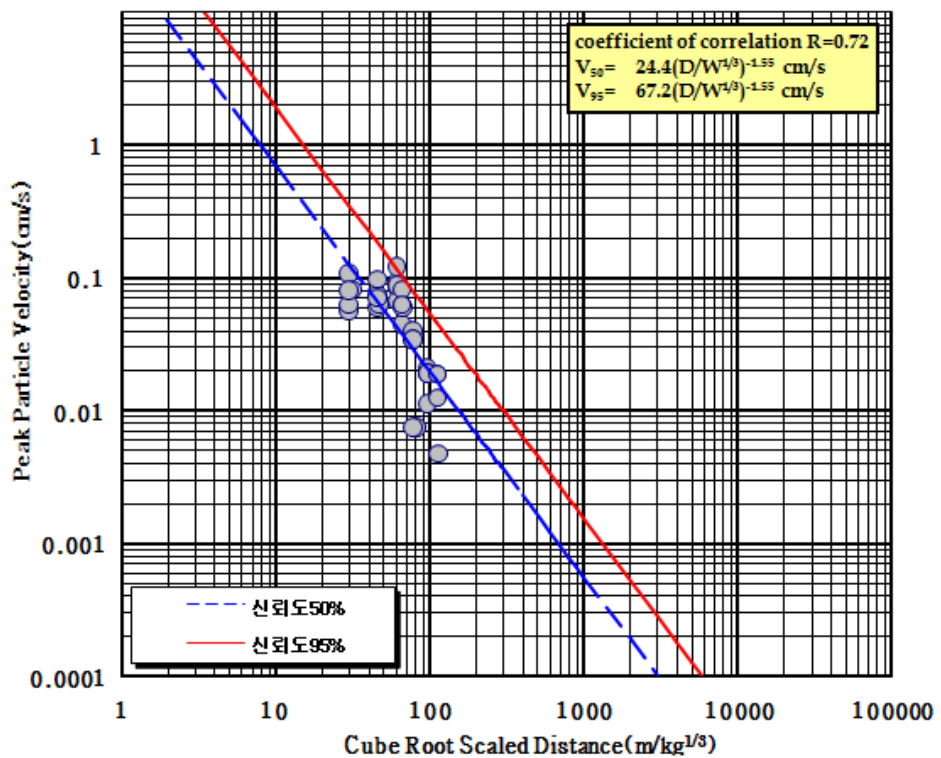


■ 다단평행 미진동 전자발파 회귀분석 결과 그래프

자승근
진동추정식
그래프



삼승근
진동추정식
그래프



■ 다단평행 미진동 전자발파 초시분석을 이용한 허용 지발당 장약량

발파진동 예상식 분석결과 근거리에서는 삼승근 추정식을 원거리에서는 자승근을 적용하여 본 현장의 진동추정식을 구한다. 발파 진동추정식

$$V = 97.9 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55} = 97.9 (SD)^{-1.55}$$

$$V = 67.2 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55} = 67.2 (SD)^{-1.55}$$

에서 허용 진동수준을 민가 및 군부대 0.3 cm/sec, 도로 및 박스구조물 1.0 cm/sec로 할 때 허용 환산거리(Scaled Distance, SD)는

$$\text{자승근 SD} = \left(\frac{V}{K} \right)^{n^{-1}} = \left(\frac{0.3}{97.9} \right)^{(-1.55^{-1})}, \quad \left(\frac{1.0}{97.9} \right)^{(-1.55^{-1})},$$

$$\text{삼승근 SD} = \left(\frac{V}{K} \right)^{n^{-1}} = \left(\frac{0.3}{67.2} \right)^{(-1.55^{-1})}, \quad \left(\frac{1.0}{67.2} \right)^{(-1.55^{-1})}$$

를 구하면 자승근은 41.8 m/kg^{1/2}, 19.2 m/kg^{1/2} 이고 삼승근 33.1 m/kg^{1/3}, 15.2 m/kg^{1/3}이며 거리별 허용 지발당 장약량은 표 7.3과 같다.

< 표 7.3 > 거리별 허용 지발당 장약량

장약량 (kg/delay)	민가, 군부대 V=0.3cm/sec		박스구조물, 도로 V=1.0 cm/sec	
	자승근	삼승근	자승근	삼승근
거리(m)				
16	0.15	0.12	0.69	1.19
18	0.18	0.16	0.87	1.69
20	0.23	0.23	1.08	2.32
22	0.28	0.30	1.31	3.09
24	0.33	0.39	1.55	4.02
26	0.39	0.50	1.82	5.11
28	0.45	0.62	2.12	6.38
30	0.51	0.76	2.43	7.84
32	0.58	0.93	2.76	9.52
34	0.66	1.11	3.12	11.4
36	0.74	1.32	3.50	13.6
38	0.82	1.55	3.90	15.9
40	0.91	1.81	4.32	18.6
42	1.01	2.09	4.76	21.5

8. 굴착공법 및 발파패턴 선정

8.1 시험발파에 의한 발파영향권 분석

■ 발파진동 영향 검토

본 현장에서 시험발파 결과 산출된 발파진동 추정식에서 감쇠계수가 1.55로 우리나라의 평균 진동감쇠계수 1.4~1.7 수준이며, 지형적 특성상 발파진동 감쇠가 평균 진동감쇠와 비슷한 수준으로 발생할 것으로 판단된다.

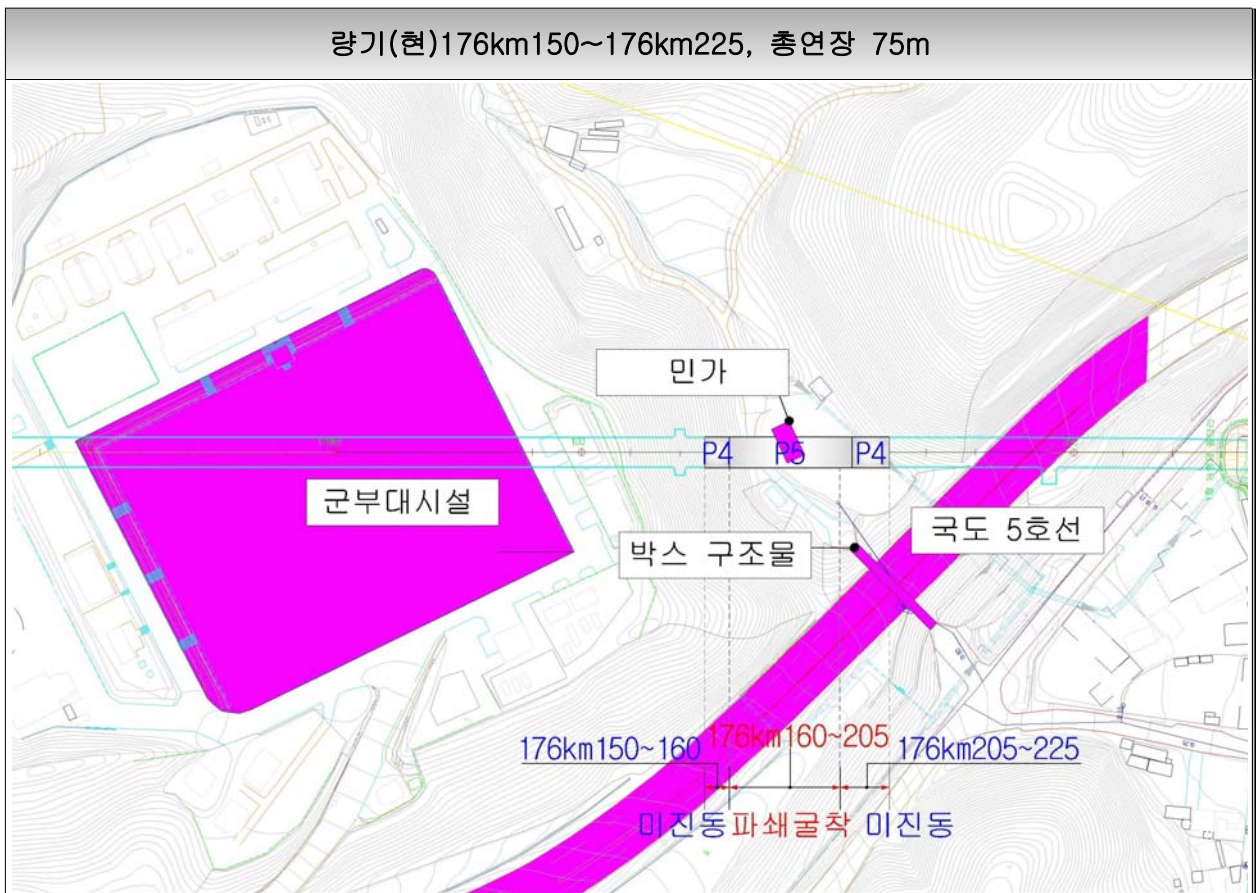
발파진동레벨을 측정한 결과 보안물건에서 모두 허용기준치보다 낮게 측정되었다.

■ 발파소음 영향 검토

보안물건에서 발파소음을 측정한 결과 보안물건에서 허용기준치보다 낮게 측정되었다.

8.2 발파진동 영향분석에 따른 굴착공법 선정

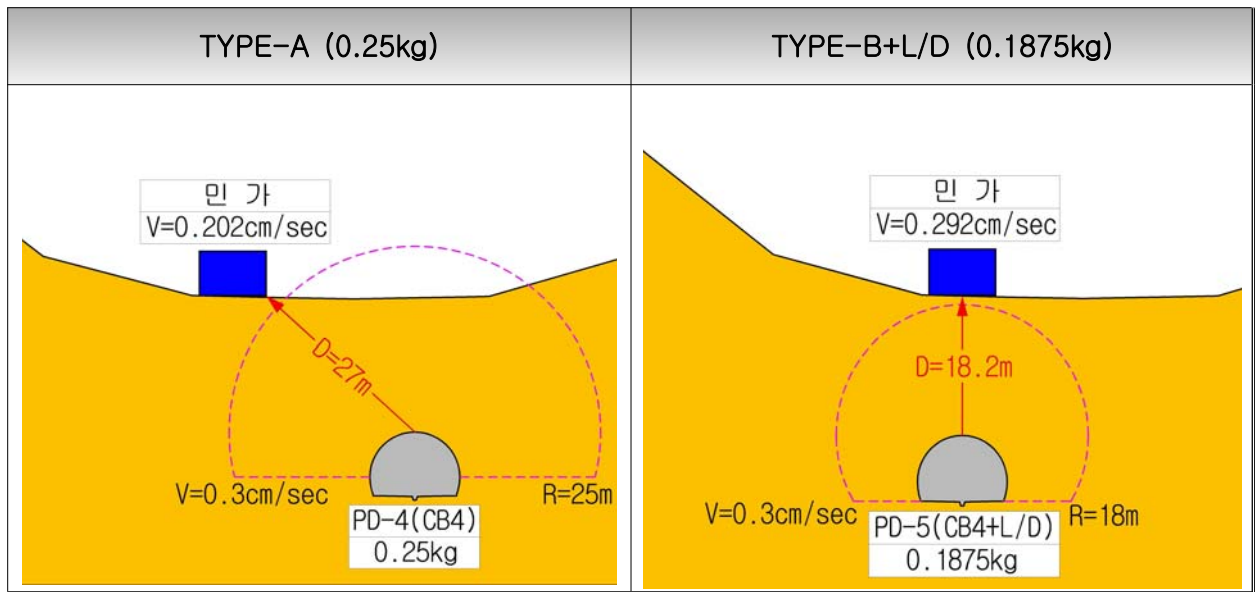
■ 발파진동 영향검토 구간



■ 다단평행 미진동 전자발파 영향범위

진동추정식		굴착공법	지발당 장약량 (kg/delay)	영향범위
자승근	삼승근			0.3cm/s
$V = 97.9 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55}$	$V = 67.2 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55}$	TYPE-A	0.250kg	25m
		TYPE-B+L/D	0.1875kg	18m

■ 보안물건에 따른 발파진동 영향분석



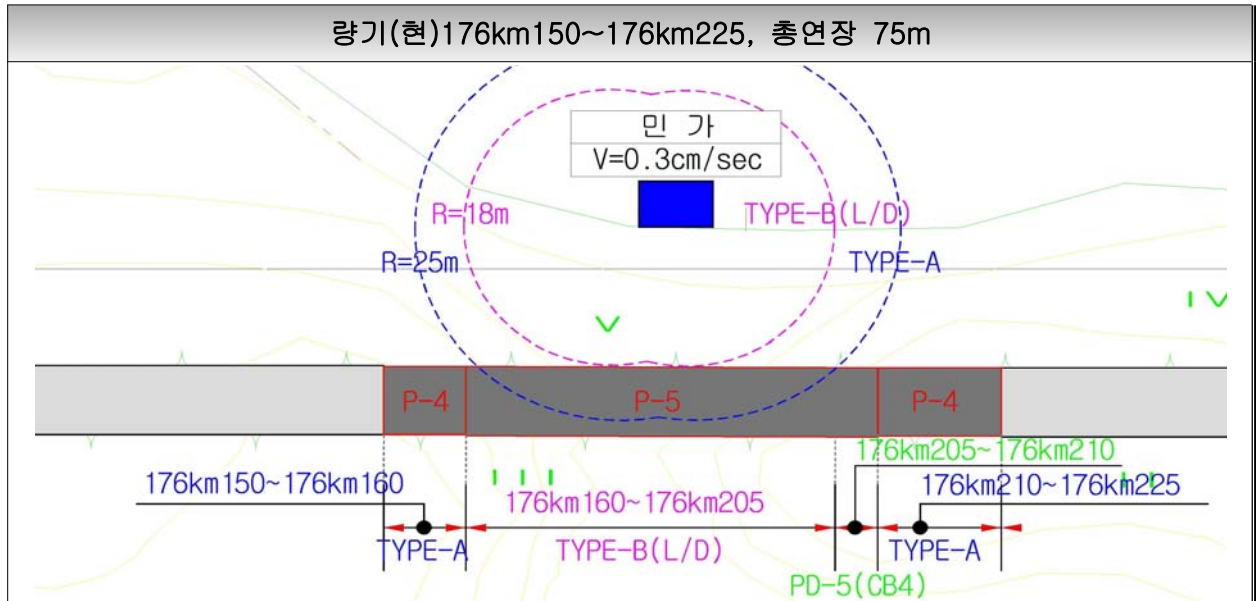
발파 패턴	보안 물건	발파패턴 현황				이격 거리	영향분석(cm/sec)		검토 결과
		적용 공법		굴진장 (m)	화약량 (kg)		허용기준	예측진동	
PD-4	수양개유적 로 23-16 (민가)	다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	27.0m	0.3	0.202	O.K
PD-5			TYPE-B +L/D		0.1875	18.2m		0.292	O.K

■ 평가결과

시험발파를 통하여 산출된 추정식으로 발파진동 영향평가 결과 다단평행 미진동 전자발파 적용시 민가에서 허용진동 기준치(V=0.3cm/sec) 이내로 예측됨.

9.3 굴착공법 선정

■ 제어발파 적용구간



굴착공법 변경(안)					
STA. 176km150		160	205	210	225
	구 분	PD-4	PD-5		PD-4
실시설계	연장	10m	45m	20m	
	굴착 공법	미진동 전자발파	무진동 암파쇄공법		미진동 전자발파
시험발파 결과 변경안	연장	10m	45m	5m	15m
	변경 (안)	TYPE-A	TYPE-B (L/D)	PD-5 (CB4)	TYPE-A
		다단평행 미진동 전자발파 적용			

■ 굴착공법 선정결과

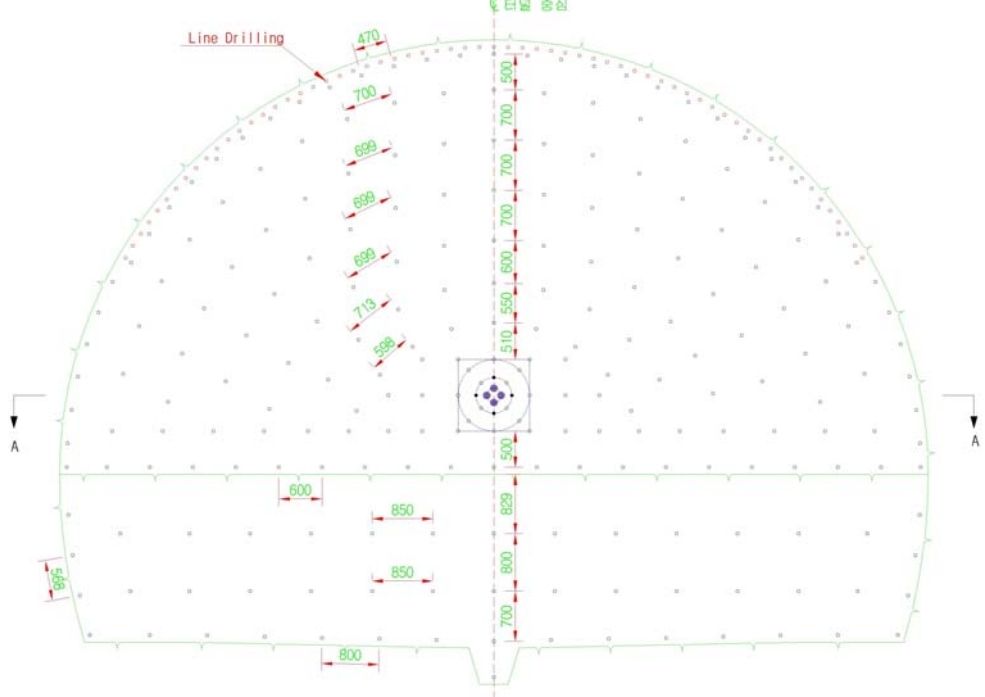
발파 공법	패턴	굴진장 (m)	화약량 (kg)	적용구간	총연장 (m)
다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	176km150~176km160	10
	TYPE-B(L/D)		0.1875	176km160~176km205	45
	PD-5(CB4)		0.250	176km205~176km210	5
	TYPE-A		0.250	176km210~176km225	15

■ 검토결과

시험발파를 통하여 산출된 추정식으로 검토 결과 다단평행 미진동 전자발파 적용시 민가에서 허용진동 기준치 이내로 예측되어 변경이 가능할 것으로 판단됨.

- 터널막장 암질에 따라 최소저항선 및 공간격을 조정하여 적용할 수 있음.

■ PD-5(CB4+L/D) (다단평행 미진동 전자발파)

구 분	다단평행 미진동 전자발파 (Type-B)	
	PD-5(CB4+L/D)	
패턴도		
발파제원	상반	하반
굴착단면적	57.685 m ²	28.501 m ²
굴진장/천공장	1.0 m / 1.1 m	1.0 m / 1.1 m
심발공법	다단평행 분산장약	-
적용 뇌관	전자 뇌관	전자 뇌관
뇌관수량	188EA	48EA
총 천공수	188(+4)공	48공
Line Drilling	63공(1열)	-
지발당 장약량	0.1875kg	0.250kg
총장약량	36.713kg	11.850kg
비장약량	0.636 kg/m ³	0.416 kg/m ³

- 터널막장 암질에 따라 최소저항선 및 공간격을 조정하여 적용할 수 있음.

9. 결론 및 제언

하괴터널 176km225 지점(PD-4)에서 실시한 시험발파를 통하여 인근 보안물건에 미치는 발파영향권을 분석하여 굴착공법을 선정 한 결과는 다음과 같다.

1) 발파진동 및 소음 허용기준

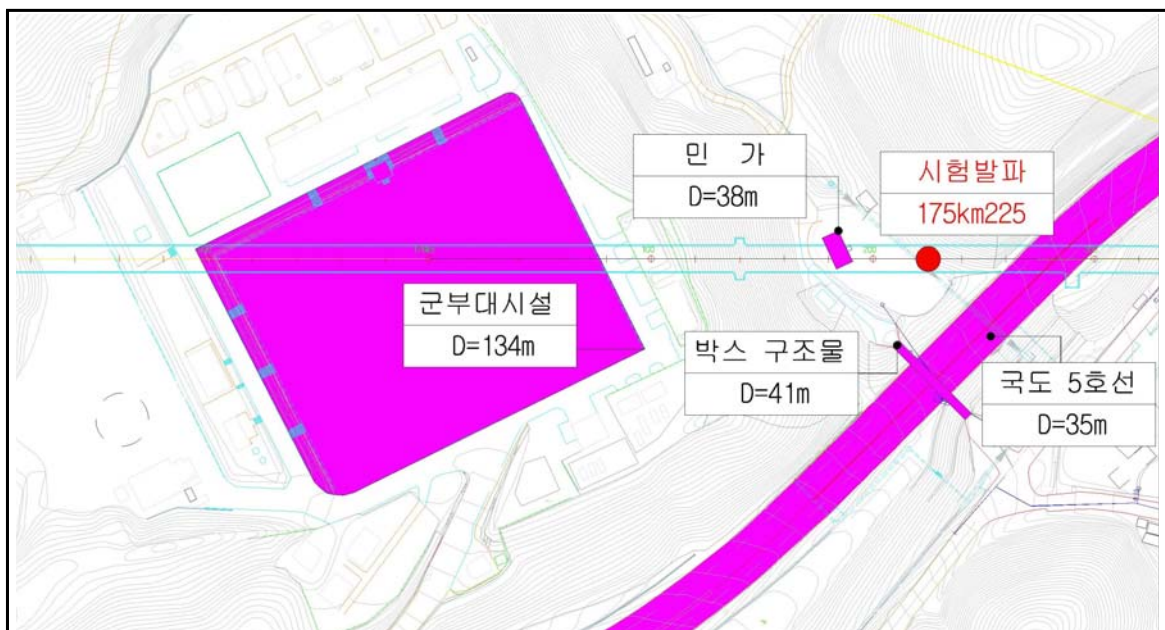
구 분	발파진동 cm/sec	발파소음 dB(A)	비 고
민가	0.3	75	- 소음진동 관리법 - 실시설계보고서 - 유사현장 및 연구사례적용
군부대	0.3	75	
도로, 박스구조물	1.0	-	

2) 인근 보안물건 현황

구 분	보 안 물 건	이격거리	현 황
1	도로	35m	기존 지방도로
2	수양개유적으로 23-16 (민가)	38m	주거시설
3	박스구조물	41m	콘크리트 구조물
4	군부대	134m	군사시설

3) 시험발파 위치 및 적용공법

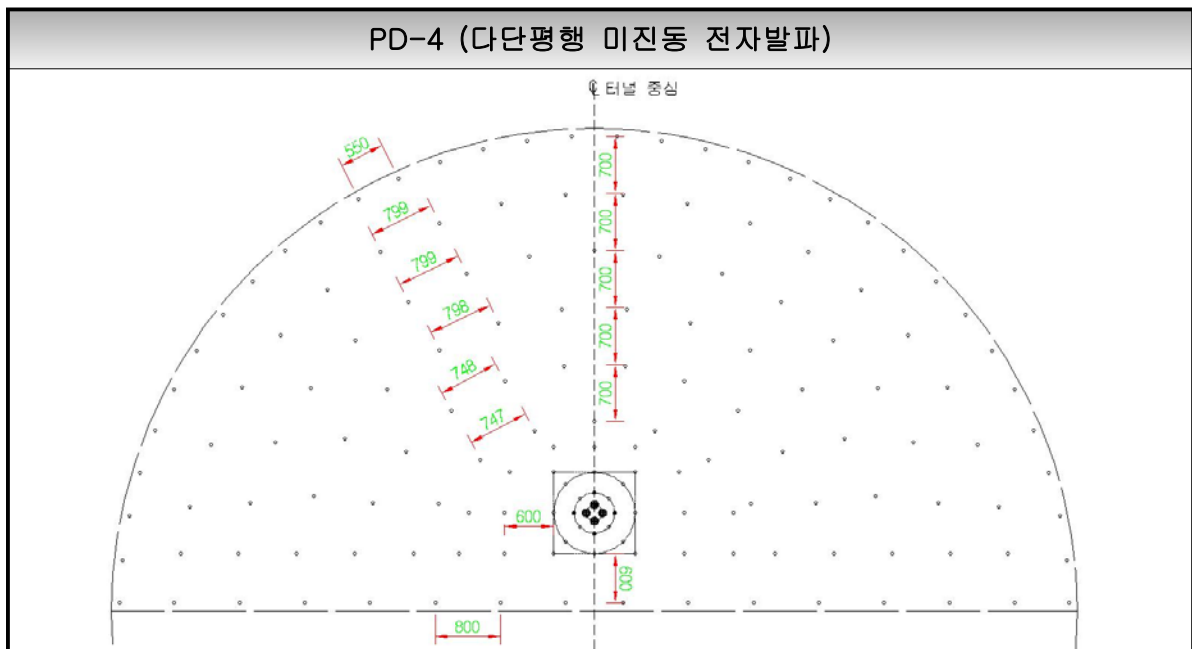
구 분	시험발파 위치	적용 공법	일 시
시험 위치	176km225	다단평행 미진동 전자발파	12월 07일



4) 시험발파 제원

구 분	수 량
굴착단면적(㎡)	55.051
굴진장/천공장(m)	1.0 / 1.1
천공직경(mm)	45
지발당장약량(kg/delay)	0.250
총화약량(kg)	37.450
비장약량(kg/㎡)	0.680

5) 시험발파 적용 패턴도



6) 시험발파 계측

구 분	계측 위치	계측 거리(m)	계측기종
1	자유장 #1	20m	Minimate Plus SV-1 HLVS-04 eXAD-8
2	자유장 #2	30m	
3	수양개유적로23-16 (민가)	38m	
4	박스구조물	41m	
5	자유장 #3	50m	
6	자유장 #4	60m	
7	자유장 #5	70m	
8	군부대	134m	

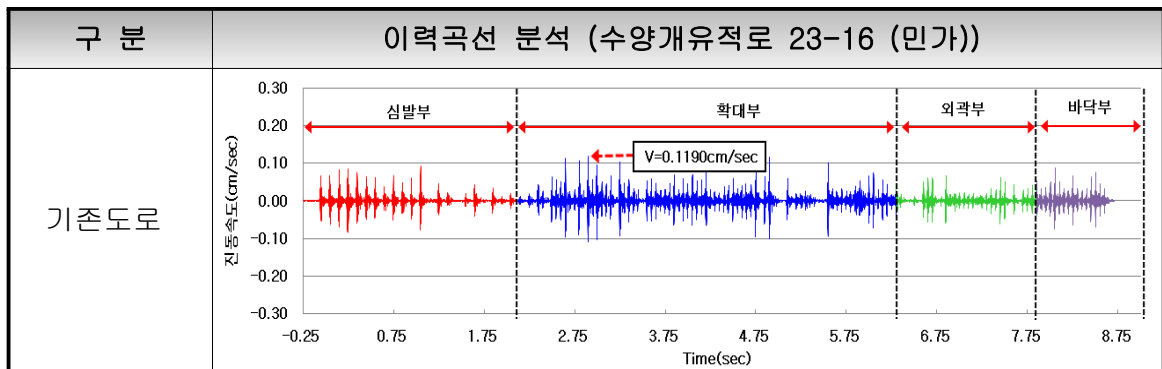
7) 시험발파 결과 발파공해 계측치

계측위치 지발당장약량 (kg/delays)	발파진동				
	민가 (V=0.3cm/s, 75dB(V))		군부대 (V=0.3cm/s, 75dB(V))		박스구조물 (V=1.0cm/s)
	cm/sec	dB(V)	cm/sec	dB(V)	cm/sec
0.225~0.250	0.1190	68.65	0.01미만	-	0.0830
검토결과	미만	미만	미만	미만	미만

계측위치 지발당장약량 (kg/delays)	발파소음 (dB(A))	
	민 가 (75dB(A))	군부대 (75dB(A))
0.225~0.250	63.19	-
검토결과	미만	미만

- 시험발파 결과 모든 보안물건에서 허용기준치 이내로 측정됨.

8) 발파진동 이력곡선 분석



- 시험발파 이력곡선 분석결과 발파진동은 확대부에서 최대치가 발생되었고, 다단평행 분상장약 심발공법은 심발부의 진동제어가 가능한 것으로 분석됨.

9) 발파진동 추정식 산출

구 분	발파진동 추정식	
	자승근 95%	삼승근 95%
발파진동 추정식	$V = 97.9 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.55}$	$V = 67.2 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.55}$

10) 보안물건을 고려한 이격거리별 지발당 장약량(kg/delay)

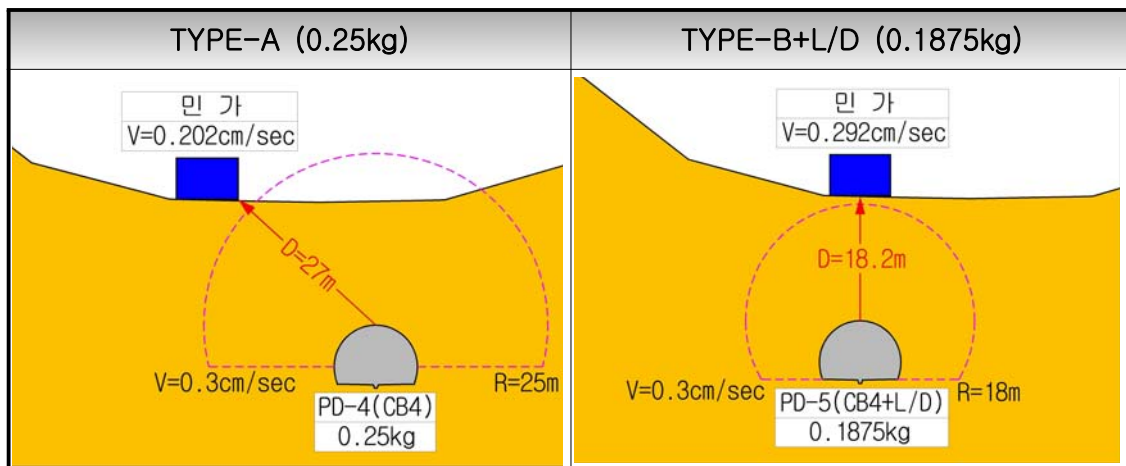
장 약 량 (kg/delay)	민가, 군부대 V=0.3cm/sec		박스구조물, 도로 V=1.0 cm/sec	
	자승근	삼승근	자승근	삼승근
거리(m)				
18	0.18	0.16	0.87	1.69
20	0.23	0.23	1.08	2.32
22	0.28	0.30	1.31	3.09
24	0.33	0.39	1.55	4.02
26	0.39	0.50	1.82	5.11
28	0.45	0.62	2.12	6.38

11) 발파진동 영향을 고려한 발파진동 영향권 범위

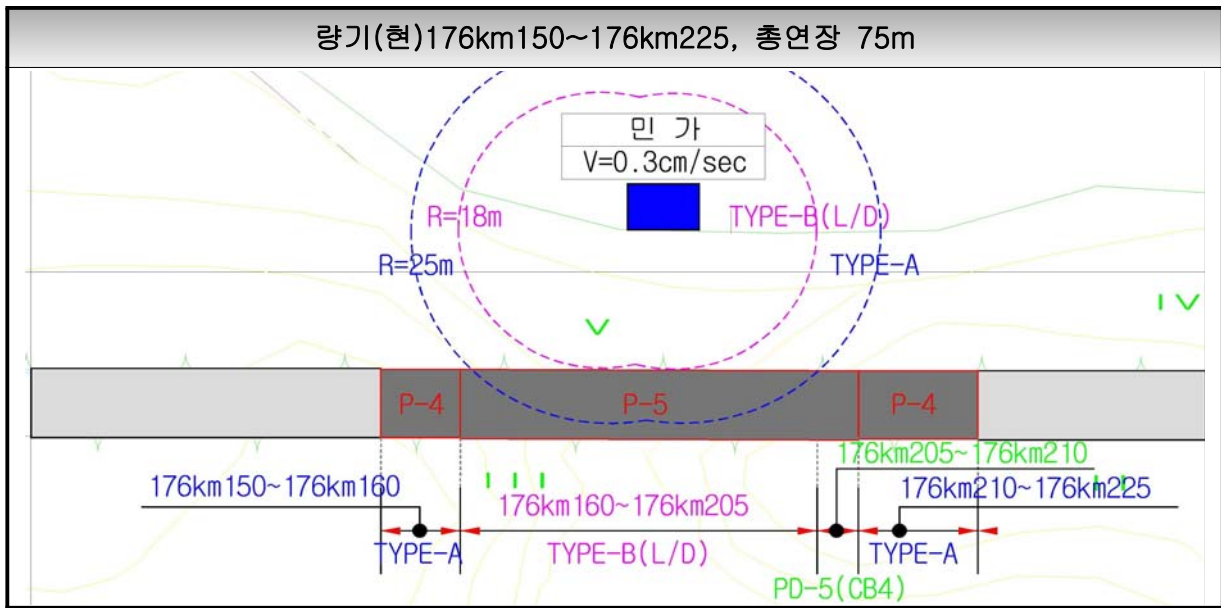
구 분		굴진장 (m)	지발당장약량 (kg/delay)	발파진동 영향범위(m)
				V=0.3cm/sec
다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250kg	25m
	TYPE-B(L/D)		0.1875kg	18m

12) 발파진동 추정식에 따른 보안물건 영향검토

보안 물건	발파패턴 현황				이격 거리	영향분석(cm/s)		검토 결과
	적용 공법		굴진장 (m)	화약량 (kg)		허용 기준	예측 진동	
수양개유적로 23-16 (민가)	다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	27.0m	0.3	0.202	O.K
		TYPE-B +L/D		0.1875	18.2m		0.292	O.K



13) 발파진동 추정식에 따른 굴착공법 선정결과



14) 굴착공법 선정(안)

굴착공법 선정(안)					
STA. 176km150		160	205	210	225
구 분		PD-4	PD-5	PD-4	
실시설계	연장	10m	45m	20m	
	굴착 공법	미진동 전자발파	무진동 암파쇄공법	미진동 전자발파	
시험발파 결과 변경안	연장	10m	45m	5m	15m
	변경 (안)	TYPE-A	TYPE-B (L/D)	PD-5 (CB4)	TYPE-A
다단평행 미진동 전자발파 적용					

발파 공법	패턴	굴진장 (m)	화약량 (kg)	적용구간	총연장 (m)
다단평행 미진동 전자발파	TYPE-A	1.0	0.250	176km150~176km160	10
	TYPE-B(L/D)		0.1875	176km160~176km205	45
	PD-5(CB4)		0.250	176km205~176km210	5
	TYPE-A		0.250	176km210~176km225	15

- 시험발파를 통하여 산출된 추정식으로 검토 결과 다단평행 미진동 전자발파 적용시 민가에서 허용진동 기준치 이내로 예측되어 다단평행 미진동 전자발파 적용이 가능할 것으로 판단됨.

15) 발파패턴 재원표

① PD-4(CB4) (다단평행 미진동 전자발파, TYPE-A)

발파제원(상부)		발파패턴도(PD-4(CB4))
굴착단면적	55.051 m ²	
굴진장/천공장	1.0m/1.1m	
심발공법	다단평행 분산장약	
적용 뇌관	전자뇌관(153EA)	
총 천공수	153(+4) 공	
지발당장약량	0.25 kg	
화약량	37.450 kg	
비장약량	0.680 kg/m ³	

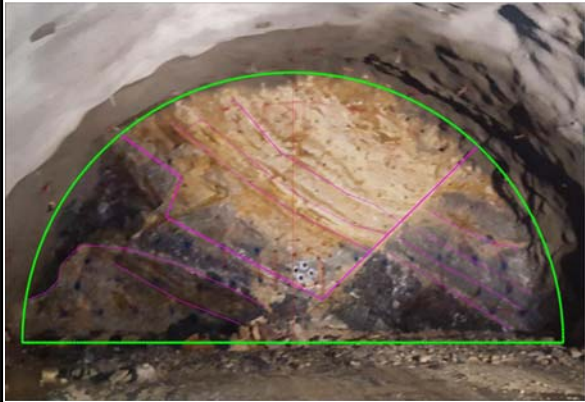
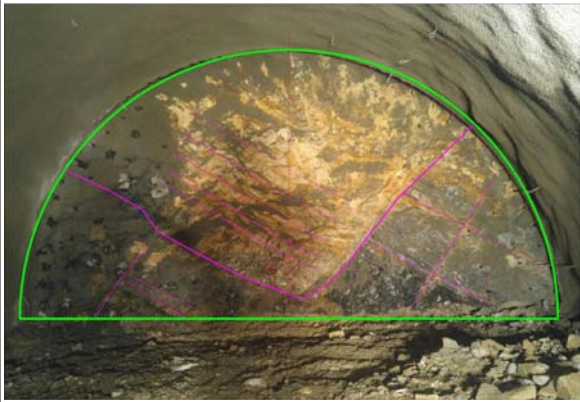
② PD-5(CB4) (다단평행 미진동 전자발파)

발파제원(상부)		발파패턴도(PD-5(CB4))
굴착단면적	57.685 m ²	
굴진장/천공장	1.0m/1.1m	
심발공법	다단평행 분산장약	
적용 뇌관	전자뇌관(156EA)	
총 천공수	156(+1) 공	
지발당장약량	0.25 kg	
화약량	37.175 kg	
비장약량	0.644 kg/m ³	

③ PD-5(CB4+L/D) (다단평행 미진동 전자발파, TYPE-B)

발파제원(전단면)		발파패턴도(PD-5(CB4+L/D))
굴착단면적	57.685 m ²	
굴진장/천공장	1.0m/1.1m	
심발공법	다단평행 분산장약	
적용 뇌관	전자뇌관(188EA)	
총 천공수	188(+4) 공	
Line Drilling	63공(1열)	
지발당장약량	0.1875 kg	
화약량	36.713 kg	
비장약량	0.636 kg/m ³	

16) 암질 변화에 따른 발파패턴 적용 방안

시험발파 막장면	시험발파 시행후 막장면
	
<ul style="list-style-type: none"> - 시험발파 막장면 상태는 중앙부 석회암층과 절리가 발달되어 있으며 좌우 측면은 III등급 이상의 암반형태를 보임 - 시험발파후 막장면 상태는 시험발파 전과 거의 유사한 형태를 보임 - 설계 발파패턴은 전체 터널단면을 석회암구간으로 적용하여 천공수 및 장약량을 산정하였으나 시험발파 결과 굴진에 따른 막장면의 상태가 수시로 변경될 것으로 예상됨 - 따라서 발파후 정밀한 FACE MAPPING을 시행하여 막장면 상태를 고려하여 천단부 석회암 구간은 천공간격을 늘리고 좌우측 견고한 암반은 천공간격을 좁혀 천공 작업을 수행하여 막장면 상태에 따른 유동적인 천공패턴을 적용하는 것이 발파효율을 최적화 할수 있을 것으로 판단됨. 	

17) 결론 및 제언

- ① 하괴터널 STA.176km150 ~ 176km225(L=75m) 구간은 대상 지장물에 대한 발파진동 영향을 고려하여 실시설계 단계에서는 다단평행 미진동 전자발파 및 암파쇄 공법으로 계획되었다.
- ② 공사비 절감 및 공사기간 단축을 위해서 다단평행 미진동 전자발파 공법 시험발파를 실시하여 이에 따른 발파효과와 발파공해를 분석하여 터널 주변 보안물건에 안전하고 효율적인 굴착공법을 선정하고자 시험발파를 실시하였다.
- ③ 하괴터널 STA.176km225에서 PD-4(미진동 전자발파) 패턴으로 시험발파를 수행한 결과 모든 보안물건에서 발파진동 허용기준치 이내로 측정되었다.

- ④ 실시설계 단계에서 STA.176km150 ~ 176km160(L=10m), STA.176km205 ~ 176km225(L=20m) 구간에 적용된 다단평행 미진동 전자발파 적용이 가능하며, STA.176km160 ~ 176km205(L=45m) 구간에 적용된 암파쇄 굴착공법은 공사비 절감 및 공사기간 단축을 위하여 다단평행 미진동 전자발파공법으로 변경 시공하여도, 민원발생 억제와 경제성 및 시공성 측면에서 효율적이라 판단된다.
- ⑤ 설계 발파패턴은 전체 터널단면을 석회암구간으로 적용하여 천공수 및 장약량을 산정하였으나 시험발파 결과 굴진에 따른 막장면의 상태가 수시로 변경될 것으로 예상되며, 발파후 정밀한 FACE MAPPING을 시행하여 막장면 상태를 고려하여 유동적인 천공패턴(공간격, 저항선 조정)을 적용하는 것이 발파효율을 최적화 할 수 있을 것으로 판단된다.
- ⑥ 민원발생 억제 및 경제성, 시공성, 안정성이 우수한 다단평행 미진동 전자발파공법 적용구간은 민가를 기준으로 176km150~225(L=75m) 구간으로 분석 되었다.
- ⑦ 발파진동 전파속도는 대상현장의 지형·지질적 특성 및 발파위치에 따라 변화되므로 지속적인 발파진동 모니터링을 실시하여 현장 지반의 발파진동 전파특성이 반영된 진동식을 재산정하여 시공관리가 이루어져야 한다.

■ 참고문헌

1. 김재극, 1988, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, p. 401
2. 양형식, 1997, 암 발파에서의 소음·진동 규제기준과 저감 방안, 한국소음진동공학회지, 제7권 제4호, pp. 555~560
3. 김남수, 양형식, 1998, 발파 소음·진동 수준의 변환 연구, 한국소음진동공학회 1998년도 춘계학술대회논문집, pp. 377~380
4. 양형식, 김남수, 1998, 소음·진동 규제법의 문제점, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제8권 제3호, pp. 178~183
5. 양형식, 김남수, 전양수 외, 1999, 발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준 평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제9권 제1호, pp. 72~77
6. 양형식, 김남수, 1999, 소음진동 규제법을 고려한 발파설계, '99 암반공학회 발파기술 세미나 논문집, pp. 21~27
7. 김남수, 1999, 건설소음·진동의 예측기법과 그 적용에 관한 연구, 전남대학교 대학원 박사학위논문, p. 111
8. 김남수, 양형식, 2000, 발파소음의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구, 대한 화약기술학회지, Vol. 18, No. 2, pp. 14~22
9. 김남수, 김보현, 양형식, 2000, 다꾸치법에 의한 암반물성의 발파진동 영향요소 분석, 한국암반공학회 2000년 추계 심포지엄, pp. 29~234
10. 김남수, 양형식, 2001, 발파진동의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 11, No. 1, pp. 14~19
11. 임한욱, 이정인 외, 1993, 암발파 설계기법에 관한 연구(보고서), 한국토지개발공사
12. 정일록, 1997, 소음·진동학, 신광출판사, p. 361
13. Dowding, C. H., 1996, Construction Vibrations, Prentice-Hall Inc., p. 610
14. Langefors, U., and Kihlstrom B., 1973, The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & sons
15. Stig O Olofsson, 1988, Applied Explosive Technology for Construction and Mining, Nora Boktryckeri AB, pp. 236 ~241
16. DIN 4150 Teil 3, 1992, Erschütterungen im Bauwesen-Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
17. Du Pont, 1977, Blasters Handbook, Technical Services Division, E.I. Du Pont, pp. 434~446

18. Siskind, D.E., Stachura, V.J., Stagg, M.S., and Kopp, J.W., 1980, Structures Response and Damage Produced by Airblast from Surface Mining, USBM RI 8485
19. 대한 주택공사, 1992, 택지조성에서의 암 발파진동 저감방안 연구
20. 소음진동 규제법, 제정 1990.8.1, 법률 제 4259호(최신개정 2000.5)
21. 도로공사 노천발파 설계·시공 지침, 2006.12, 국토해양부
22. 발파소음·진동 허용기준검토(안), 2002.5, 국토해양부 감사관실
23. 한국 소음·진동 공학회, 1995, 소음·진동 편람
24. 환경부, 중앙환경분쟁조정위원회, 1996, 진동으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구, 한국자원연구소
25. 소음·진동규제법시행규칙, 2004.1, 환경부
26. 최미진, 김남수, 양형식 외, Kinecker 암발파의 진동발생 특성 연구, 2006, 한국암반 공학회 창립 25주년 기념 특별심포지엄
27. 최병희, 김남수, 시험발파 및 계측지침, 2006, 대한화약발파공학회 추계학술발표회 논문집
28. 양형식, 강추원, 김남수 외, 도로공사 노천발파 설계·시공지침, 2006, 대한화약발파 공학회
29. 김남수, 양형식, 진동속도와 진동레벨의 변환기법 연구, 2007, 제4회 한화발파기술심포 지엄
30. 김남수 외, 석회암 터널에서의 발파설계 기준 및 시공사례 연구, 2008, 한국터널 공학회 2008년 춘계 심포지엄
31. 김남수, 개정된 표준품셈에 따른 발파일위대가의 분석과 개선방안, 2009, 대한화약 발파공학회 춘계학술발표회 논문집
32. 스코리아층을 포함한 암반 발파 특성 연구, 대한화약발파공학회
33. 스파크 기폭장치를 이용한 비전기식 뇌관의 기폭시스템, 대한화약발파공학회
34. 폭파충격에 의한 시설물과 인체의 방호대책, 대한민국 공군, 서울대학교
35. 제주도 현무암에서 파쇄도 향상을 위한 최적 발파 설계 연구, 대한화약발파공학회
36. 교량기초 터파기 공사를 위한 고심도 수중발파 설계사례, 대한화약발파공학회
37. 도로공사 터널발파 설계기준 개선 사례, 대한화약발파공학회
38. 최근 발파진동 허용기준 적용 사례 고찰, 대한화약발파공학회
39. 고속도로 터널 갱구부 발파시 상부 이완된 암괴의 안전성 검토 연구, 한국암반공학회