

❖ 굴착 및 지보 기술위원회

Annual Technical Report

2022. 12



사단
법인 **한국터널지하공간학회**
Korean Tunnelling and Underground Space Association

꺾 굴 착 및 지 보 기술위원회

Annual Technical Report

Part 1. 대단면 수직구 시공방법 개선사례

Part 2. Pipe Umbrella Support의 연결부

2022

터 널 지 하 공 간 학 회

굴 착 및 지 보 기술위원회

Annual Technical Report(Part 1)

“대단면 수직구 시공방법” 개선사례

2022

터 널 지 하 공 간 학 회
굴 착 및 지 보 기 술 위 원 회

■ 목 차 ■

1. 개요.....	1
2. 현황.....	1
3. 설계변경 검토.....	2
4. 시험발파.....	3
4.1 시험발파의 목적.....	3
4.2 시험발파 위치 및 적용공법.....	3
4.3 시험발파 패턴 및 제원.....	4
4.4 시험발파 계측 결과.....	5
4.5 시험발파 결과 분석.....	7
4.6 발파진동 영향평가.....	9
4.7 제안 발파패턴.....	10
3. 결론.....	11

■ 표 목 차 ■

<표 2.1> 실시설계 발파진동 허용기준.....	1
<표 2.2> 실시설계 발파진동 추정식.....	1
<표 2.3> 실시설계 발파공법 적용 현황.....	1
<표 3.1> 시험발파 산출추정식.....	2
<표 3.2> 시험발파 진동추정식 적용 굴착공법 검토.....	2
<표 4.1> 시험발파 현황.....	3
<표 4.2> 보안물건 이격거리 현황.....	3
<표 4.3> 시험발파 발파패턴.....	4
<표 4.4> 시험발파 설계 제원.....	4
<표 4.5> 시험발파 계측기 설치 현황.....	5
<표 4.6> 발파 진동속도 계측결과	5
<표 4.7> 발파 진동레벨 계측결과.....	5

<표 4.8> 발파 소음 계측결과	5
<표 4.9> 자동화 진동계측 결과.....	6
<표 4.10> 발파 후 파쇄 상태.....	6
<표 4.11> 발파진동 추정식 산출.....	7
<표 4.12> 발파진동 영향범위 검토.....	8
<표 4.13> 발파진동 영향을 고려한 굴착공법 검토.....	8
<표 4.14> 굴착공법 검토결과.....	8
<표 4.15> 보안물건에 따른 발파진동 영향분석.....	9
<표 4.16> 기계굴착+미진동 전자발파 제안패턴도.....	10
<표 4.17> 미진동 전자발파 제안패턴도.....	10

■ 그림 목 차 ■

[그림 4.1] 발파진동 영향평가.....	9
-------------------------	---

1. 개요

무진동 암파쇄 굴착공법은 진동 및 소음으로 인한 민원을 최소화 할 수 있는 공법이지만, 암반 강도 증가에 따른 시공효율이 급격하게 감소하며, 공사기간 및 공사비용을 증가의 원인으로 작용하기 때문에, 미진동 전자발파공법을 적용하여 설계변경이 이루어지고 있다. 그러나 건설현장에서 발파작업으로 인해 발생하는 공해는 안락한 시민생활과도 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 발파공해로 인한 주변 시설물의 재산상 피해 또한 큰 문제로 대두되고 있다. 발파 작업으로 인한 피해는 발파진동으로 인한 구조물의 피해, 발파폭음으로 인한 인체와 가축의 피해, 발파 비산석으로 인한 인체 및 구조물의 피해를 들 수 있다

따라서 무진동 암파쇄 굴착공법의 시공성을 개선하고, 발파로 인한 민원을 최소화 할 수 있는 기계굴착+미진동 전자발파 공법의 시공사례를 참고하여, 대단면 수직구 미진동 전자발파 공법을 검토함

2. 현황

<표 2.1> 실시설계 발파진동 허용기준

구분	진동속도(cm/sec)	진동레벨(dB(V))	소음레벨(dB(A))	비고
철도시설	0.3	75	75	설계보고서 (3편-7장-p257)
상업시설	0.3	75	75	

<표 2.2> 실시설계 발파진동 추정식

구분	발파진동 추정식(자승근, 95%)	비고
편마암 추정식	$V = 144.19 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.58}$	과업구간 시추공 시험 결과

<표 2.3> 실시설계 발파공법 적용 현황



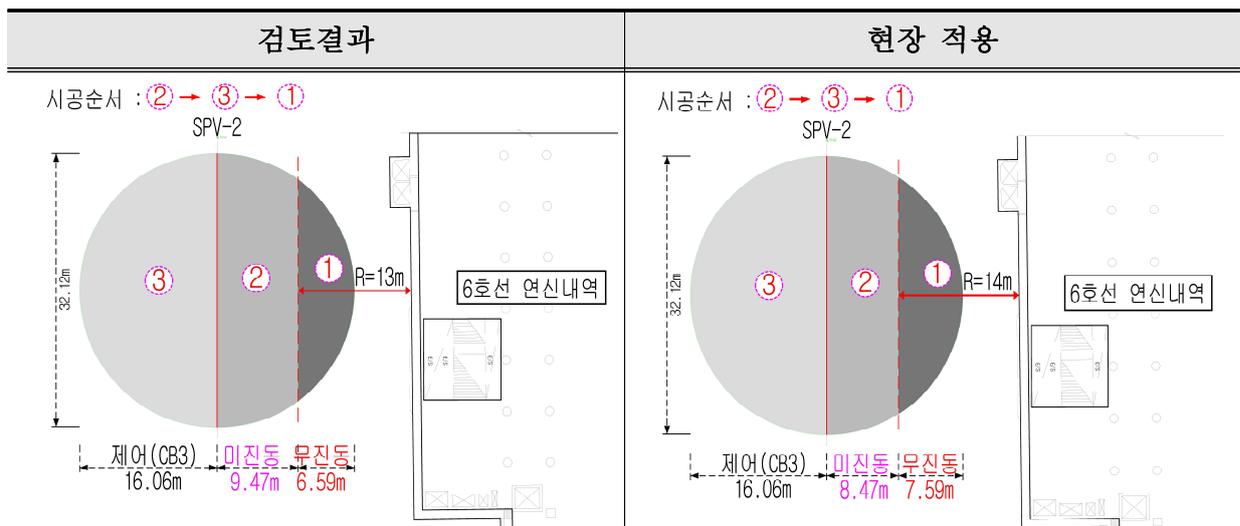
3. 설계변경 검토

현장 시험발파 산출추정식에 따른 굴착공법 검토결과 설계굴착선에서 6.59m 까지 무진동 굴착공법을 적용하면 되나 주변 보안물건의 안전성을 확보하기 위해 안전율을 적용하여 7.59m 까지 무진동 굴착공법을 선정함

<표 3.1> 시험발파 산출추정식

구 분	발파진동 추정식		비 고
	자승근 95%	삼승근 95%	
진동추정식	$V = 201.0 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$	$V = 112.4 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$	수직구 전자뇌관 시험발파

<표 3.2> 시험발파 진동추정식 적용 굴착공법 검토



구 분	적용구간	연 장	적용공법
SPV-2	EL 104.6~96.2	8.4m	무진동 암파쇄 + 미진동 전자발파(0.16kg)
SPV-1B	EL 96.2~81.7	14.5m	무진동 암파쇄 + 미진동 전자발파(0.16kg)
	EL 81.7~76.7	5.0m	미진동 전자발파(0.16kg)
	EL 76.7~73.96	2.74m	미진동 전자발파(0.25kg)

4. 시험발파

4.1 시험발파의 목적

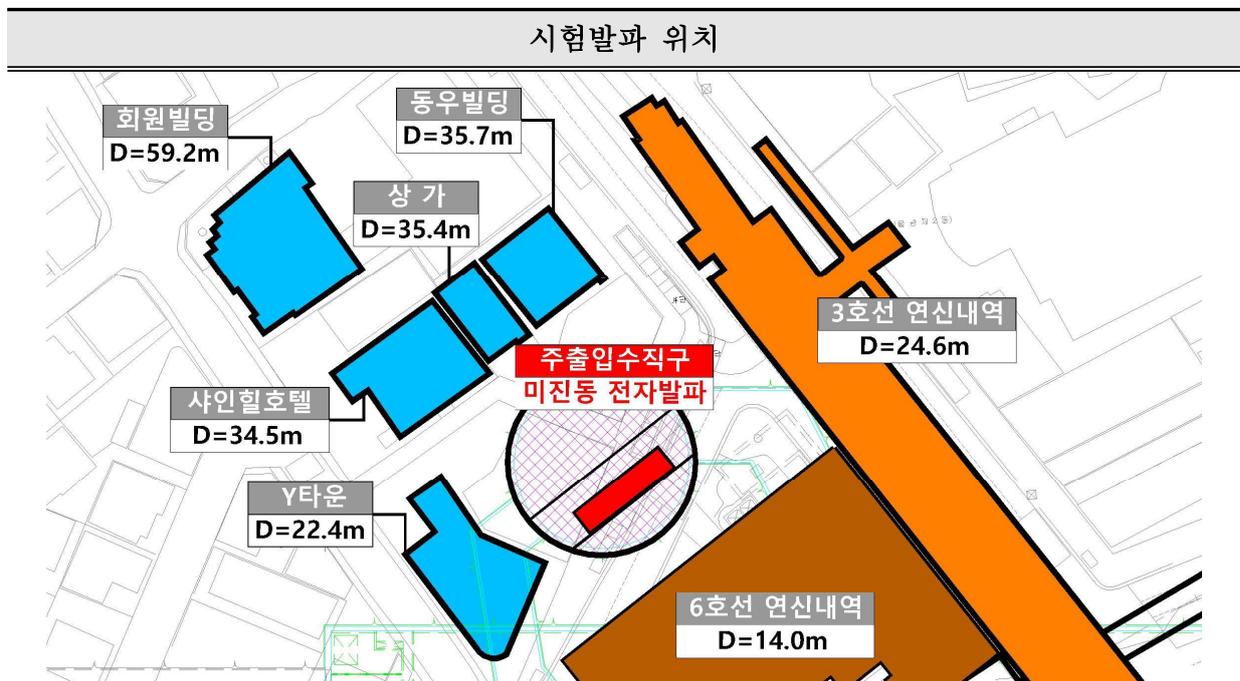
“수도권 광역급행철도 건설공사”의 대단면 수직구 터널 주변에 운행중인 지하철 구조물 및 상업시설 등이 근접하여 위치하고 있으며, 설계단계에서 반단면 무진동 암파쇄 굴착공법과 제어발파로 구분되어 있다

인접한 수직구에서 수행한 시험발파 산출 추정식으로 발파영향 검토를 수행한 결과 미진동 전자발파 공법 적용이 가능할 것으로 판단되어 제안패턴으로 시험발파를 수행하고, 주변 보안물건에 대한 발파 영향권을 분석하여 현장 시공성 및 경제성을 고려한 굴착공법 검토를 수행함

4.2 시험발파 위치 및 적용공법

<표 4.1> 시험발파 현황

일시	시험발파 위치	시험발파 패턴
2022. 07. 11	연신내정거장 주출입수직구	SPV-2

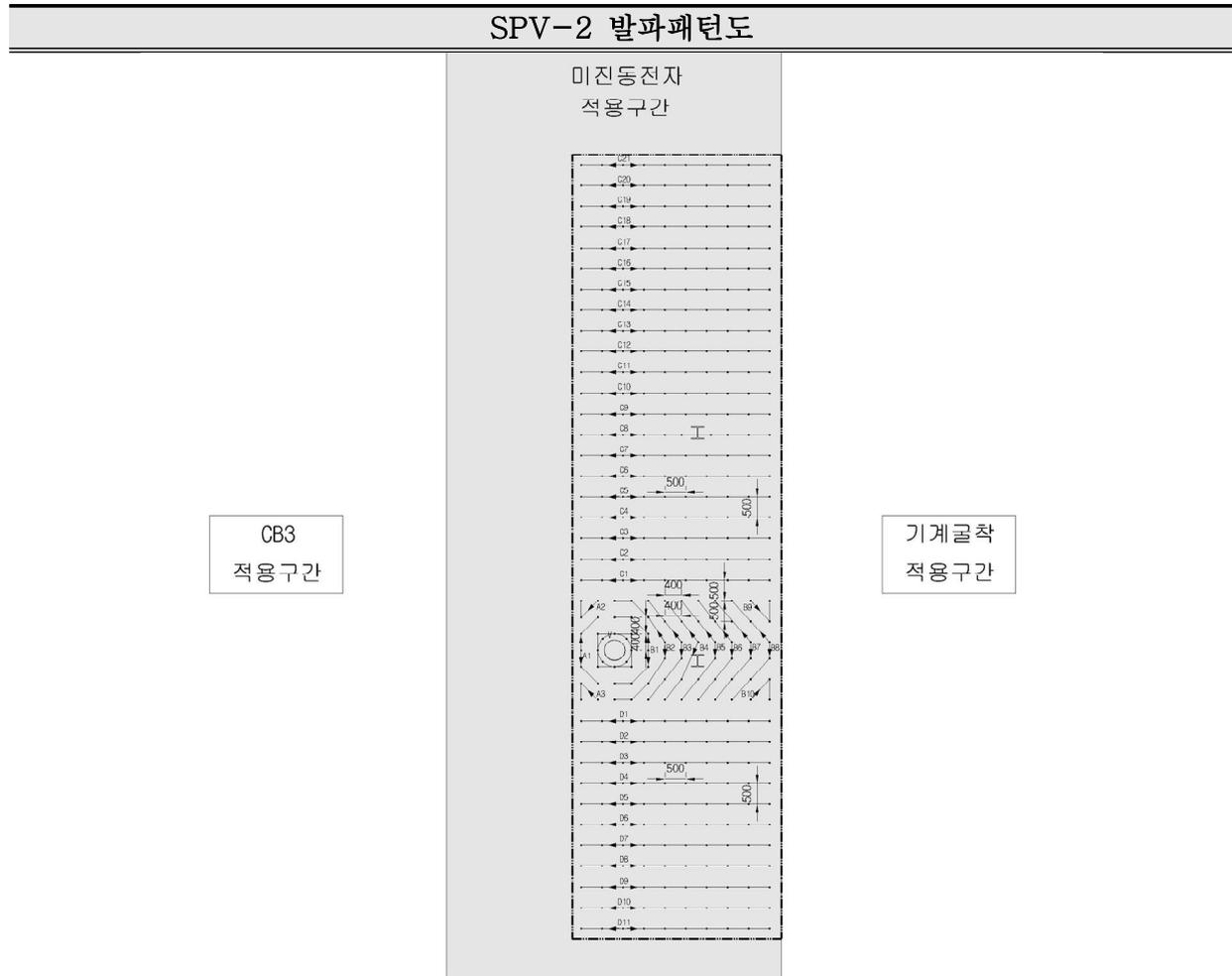


<표 4.2> 보안물건 이격거리 현황

6호선 연신내역	3호선 연신내역	Y타운	샤인힐호텔	상가
14.0m	24.6m	22.4m	34.5m	35.4m
철도시설			상업시설	

4.3 시험발파 패턴 및 제원

<표 4.3> 시험발파 발파패턴



<표 4.4> 시험발파 설계 제원

구 분		굴착 제원
굴착단면적 (m ²)		94.501
파쇄량 (m ³)		194.501
굴진장/천공장 (m)		1.0 / 1.2
천공수		399
지발당장약량 (kg/delay)	심발부	0.16
	확대부	0.16
총화약량 (kg)		63.84
비장약량 (kg/m ³)		0.676
사용 폭약 및 뇌관		에멀전 폭약, 전자뇌관

4.4 시험발파 계측 결과

보안물건에 7개소, 발파진동 추정식 산출을 위한 자유장 3개소에서 발파진동, 진동레벨 및 발파소음을 측정 하였으며, 발파 계측결과 모든 보안물건에서 허용기준치 이내로 측정되어 안전성을 확인함

<표 4.5> 시험발파 계측기 설치 현황

NO.	계측 위치	계측 거리	계측 기종
1	6호선 연신내역	14.0m	SV-1
2	3호선 연신내역	27.7m	
3	Y타운	22.4m	
4	샤인힐호텔	34.5m	
5	상가	35.4m	
6	동우빌딩	36.3m	
7	자유장 #1	39.8m	
8	자유장 #2	50.1m	
9	자유장 #3	58.1m	
10	회원빌딩	68.1m	

<표 4.6> 발파 진동속도 계측결과

구 분	진동속도 허용기준 : $V=0.3\text{cm/sec}$				
	6호선	3호선	Y타운	샤인힐호텔	상가
W=0.16kg	0.183	0.038	0.226	0.127	0.052
측정 결과	미 만	미 만	미 만	미 만	미 만

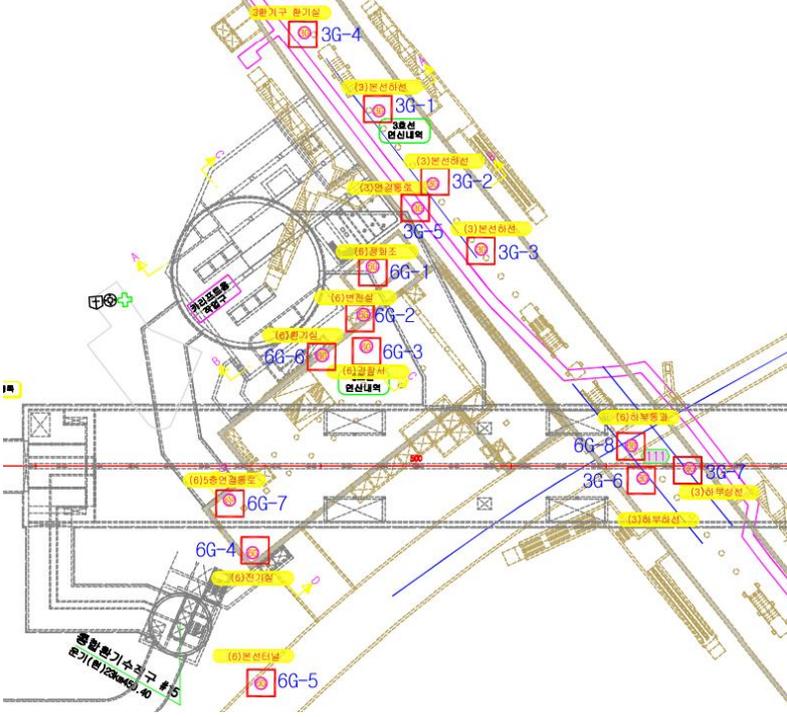
<표 4.7> 발파 진동레벨 계측결과

구 분	진동레벨 허용기준 : $VL=75\text{dB(V)}$				
	6호선	3호선	Y타운	샤인힐호텔	상가
W=0.16kg	63.41	56.30	60.99	60.66	61.86
측정 결과	미 만	미 만	미 만	미 만	미 만

<표 4.8> 발파 소음 계측결과

구 분	소음레벨 허용기준 : $SL=75\text{dB(A)}$				
	6호선	3호선	Y타운	샤인힐호텔	상가
W=0.16kg	67.82	62.43	64.61	63.93	66.21
측정 결과	미 만	미 만	미 만	미 만	미 만

<표 4.9> 자동화 진동계측 결과

설치 위치	계측 결과	
	3호선 정거장 (3G-1~7)	PPV = 0.006~0.064 cm./sec
	6호선 정거장 (6G-1~8)	PPV = 0.010~0.255 cm./sec

•시험발파중 지하철 구조물 내부에서 자동화 계측을 수행하였으며 3·6호선 터널 및 정거장내 설치한 자동화 계측기에서 발파진동 계측데이터 확인 결과, 허용기준치(V=0.3 cm/sec) 이내로 계측됨

<표 4.10> 발파 후 파쇄 상태

파쇄석 사진	
	

•발파시 파쇄석은 전체적으로 균일하며 파쇄석 크기도 양호하게 파쇄 됨

4.5 시험발파 결과 분석

설계도에 준해 장약작업을 실시하고 계측측점을 달리하여 측정함으로써, 거리에 따른 감쇠지수를 파악한다. 계측기는 4대 이상을 일정한 보안물건에 대해 일직선상으로 거리를 달리하여 설치하거나, 주변 보안물건에 배치하여 측정한다

터널발파는 대부분 1회의 발파로 끝나기 때문에 노천발파와 같이 30점 이상의 계측결과치를 얻기가 용이하지 않다. 따라서 초시분석 프로그램을 이용하여 계측 결과치에서 뇌관기폭 초시별로 데이터를 얻어 30개 이상의 결과치에 대한 분석을 실시해야 한다. 또한 각 발파위치별로 구속력이 달라 진동속도의 차이가 있기 때문에 심발공, 확대공으로 구분하여 각각의 진동추정식을 산출해야 정확한 발파패턴을 설계할 수 있다

시험발파 결과치 분석방법은 측정된 결과치를 거리별, 장약량별로 정리한 후에 측정된 진동값에 대한 회귀분석을 실시하기 위해 로그-로그 그래프에 나타내면, 직선관계가 성립되어 K값과 n값이 최종적으로 결정되며, 당 현장에 알맞은 진동추정식을 얻게 된다. 이에 대한 결과치가 많으면 수계산이 복잡해지므로 정확도를 높이기 위해 회귀분석 전산프로그램을 이용하여 분석해야 한다

시험발파 결과분석에 의해 발파진동 추정식을 얻게 되면 시험발파에 따른 발파설계 패턴의 적합성을 판단하고, 주변 보안 물건에 미치는 피해 영향 등을 검토하여 현장에 알맞은 지발당 장약량을 구할 수 있다

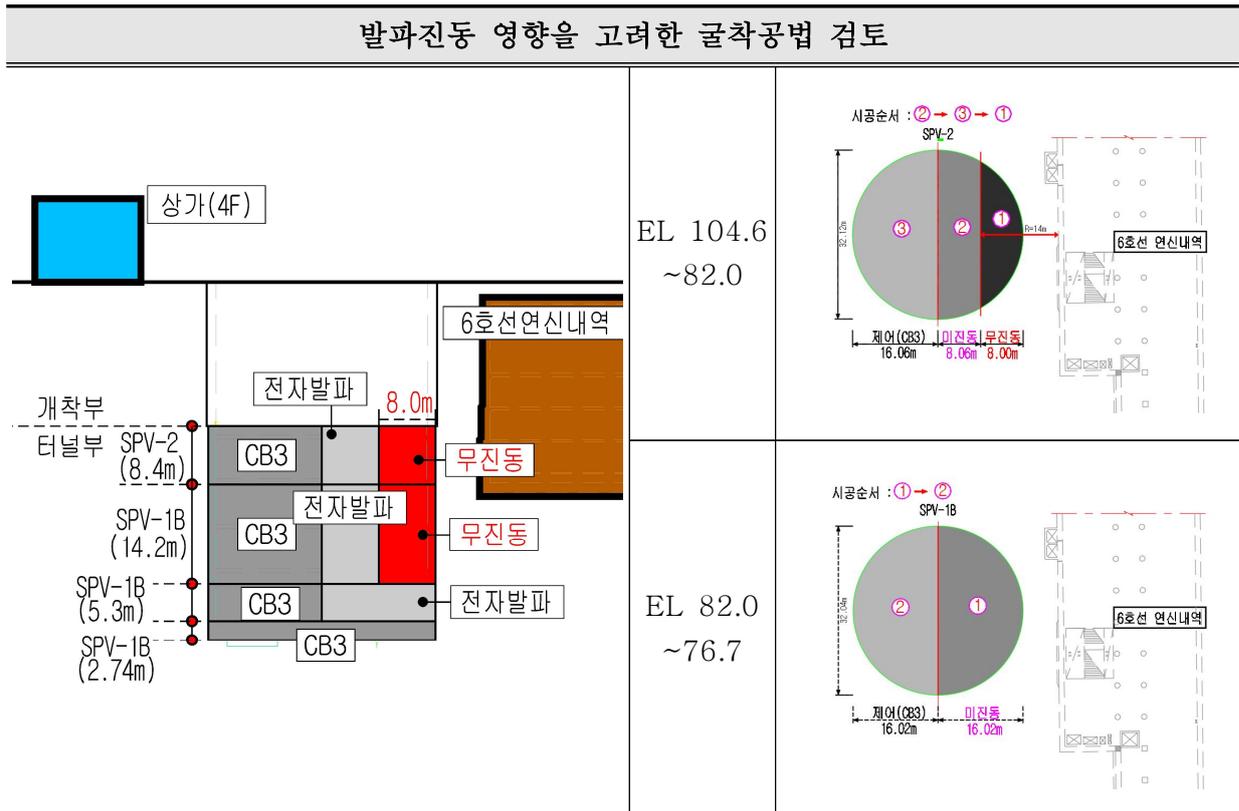
<표 4.11> 발파진동 추정식 산출

구 분	자승근 회귀분석, 95%	삼승근 회귀분석, 95%
회귀분석 그래프		
추정식	$V = 22.5 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.22}$	$V = 15.5 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.22}$
상관계수	R=0.85	R=0.84

<표 4.12> 발파진동 영향범위 검토

지보패턴	적용공법	굴진장	지발당 장약량	영향범위
				V=0.3cm/sec
SPV-2	미진동 전자발파	1.0 m	0.16 kg	14.0 m

<표 4.13> 발파진동 영향을 고려한 굴착공법 검토



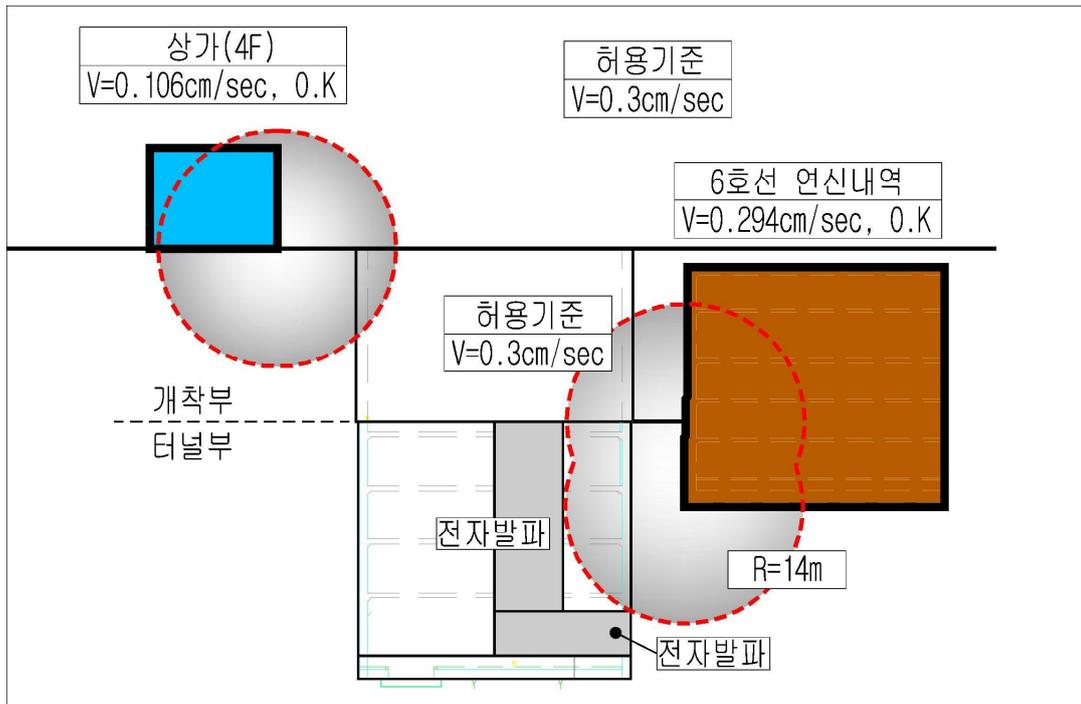
•무진동 암파쇄 구간(EL. 104.6~76.7)에 대해 현장 시험발파 산출추정식에 따른 굴착공법 검토결과, EL.104.6~82.0 구간은 설계굴착선에서 무진동암파쇄(8.0m) + 미진동 전자발파로 적용 가능하고 EL.82.0~76.7 구간은 미진동 전자발파 적용 가능한 것으로 분석됨

<표 4.14> 굴착공법 검토결과

구분	적용구간	연장	적용공법
SPV-2	EL 104.6~96.2	8.4m	무진동 암파쇄 + 미진동 전자발파(0.16kg)
SPV-1B	EL 96.2~82.0	14.2m	무진동 암파쇄 + 미진동 전자발파(0.16kg)
	EL 82.0~76.7	5.3m	미진동 전자발파(0.16kg)

4.6 발파진동 영향평가

시험발파를 수행하고, 진동 측정결과를 이용하여 산출된 추정식을 적용하여 미진동 전자발파공법에 대한 영향평가를 수행한 결과 허용기준치 이내로 예측되어 제안공법 적용이 가능할 것으로 평가됨



[그림 4.1] 발파진동 영향평가

<표 4.15> 보안물건에 따른 발파진동 영향분석

발파패턴	보안물건	지발당 장약량 (kg/delay)	검토구간에서 최근접거리 (m)	진동 영향평가(cm/s)		검토 결과
				허용치	예측치	
SPV-2 (미진동 전자발파)	6호선 연신내역	0.16	14.0m	0.3	0.294	O.K
	3호선 연신내역	0.16	18.7m	0.3	0.207	O.K
	Y타운	0.16	20.9m	0.3	0.180	O.K
	샤인힐호텔	0.16	31.6m	0.3	0.109	O.K
	상 가	0.16	32.4m	0.3	0.106	O.K
	동우빌딩	0.16	32.7m	0.3	0.104	O.K
	회원빌딩	0.16	55.7m	0.3	0.055	O.K

4.7 제안 발파패턴

시험발파 추정식을 적용하여 굴착공법 검토를 수행한 결과 제안된 미진동 전자발파 패턴으로 본 발파를 진행하여도 될 것으로 분석되었기에 SPV-2(미진동 전자발파), SPV-1A(미진동전자발파-1,2), SPV-1B(미진동전자발파-1,2) 패턴을 제안함

<표 4.16> 기계굴착+미진동 전자발파 제안패턴도

발파 제원		기계굴착+미진동 전자발파 패턴도
굴착단면적	245.228 m ² / 245.898 m ²	
굴진장/천공장	1.0m / 1.2m	
적용 뇌관 및 수량	전자뇌관(1258EA)	
총 천공수	1258 공	
지발당 장약량	0.16 kg	
화약량	201.28 kg	
비장약량	0.819 kg/m ³	

<표 4.17> 미진동 전자발파 제안패턴도

발파 제원		미진동 전자발파 패턴도
굴착단면적	402.124 m ² / 403.130 m ²	
굴진장/천공장	1.0m / 1.2m	
적용 뇌관 및 수량	전자뇌관 (2036EA)	
총 천공수	2036 공	
지발당 장약량	0.16 kg	
화약량	325.76 kg	
비장약량	0.810 kg/m ³	

5. 결론

- ① “수도권 광역급행철도 건설공사” 대단면 수직구 굴착구간은 보안물건이 매우 인접해 있고 설계단계에서 반단면 무진동 암파쇄 굴착공법과 제어발파로 구분되어 있다. 인접현장 산출추정식으로 발파영향 검토 결과 미진동 전자발파 공법 적용이 가능할 것으로 판단되어 제안패턴으로 시험발파를 실시함
- ② 대단면 수직구에서 SPV-2(미진동 전자발파) 패턴으로 시험발파를 수행한 결과 모든 보안물건에서 허용기준치 이내로 측정되어 미진동 전자발파 공법이 가능할 것으로 판단됨
- ③ 시험발파 추정식을 적용하여 발파진동 영향평가를 실시한 결과 EL.104.6 ~ EL.82.0 (L=22.6m)는 무진동암파쇄(8.0m) + 미진동 전자발파 공법 적용이 가능하고 EL.82.0 ~ EL.76.7(L=5.3m)는 미진동 전자발파 공법 적용이 가능할 것으로 판단됨
- ④ 제안패턴을 통해 본 발파 진행시 계획된 천공수와 간격, 장약량을 유지하고 발파 저감대책을 철저히 수행하고 주변 상가 및 지하철 승강장에선 항상 발파 전에 사전 안내방송을 실시하고, 특히 지하철 승강장은 음악 등을 방송하여 지하철 이용 승객들이 발파소음에 노출되지 않도록 하여야 함
- ⑤ 그러나 대상현장의 지형·지질적 특성 및 발파위치에 따라 진동수준이 변화 하므로 지속적인 모니터링을 실시하여 발파진동이 초과할 경우 발파 패턴을 재조정 하여야 할 것으로 판단됨

참고문헌

1. 강추원, 2014, 발파공학 A to Z, 구미서관
2. 기경철, 김일중, 1999, 발파공학, 기공사
3. 강대우, 2006, “토목기술자를 위한 알기 쉬운 발파공학”, 구미서관
4. 한국철도시설공단 (2014) "KR C-12070 굴착"
5. 건설교통부 (2006) "암발파 설계 지침 연구 최종보고서"
6. ㈜엔에스비 나우이엔씨, 2007, 다단평행 천공에 의한 제어발파공법, 특허 제 10-0751729호
7. 에스케이건설(주), 2005, 전자뇌관과 비전기뇌관을 조합한 발파시스템 및 발파방법, 특허 제 10-0665880호
8. 기경철, 김일중, 2002,“(산학인을 위한) 발파공학”, 동화기술
9. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, “실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구” 한국암반공학회지 제14권 제 2호, pp.108~120
10. 신석호, 정형식. 1998. 암반굴착시 진동경감을 위한 발파 방법에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교 산업대학원
11. 이효, 김정환, 황남순, 2022, “지하철역 인접구간에서의 터널 발파굴착 사례” 화약·발파(대한화약발파공학회지) 제40권 제2호, pp.25~34