

Annual Technical Report(Part 3)

**터널굴착에 따른 소음/진동 기준 및
관련 공법 기술**

2016

**터널 지하 공간 학회
굴착 및 지보 기술 위원회**

■ 목 차 ■

1. 개 요	1
2. 국내 진동 및 소음기준	1
2.1 발파 진동 및 소음기준	2
2.2 조정 및 판결을 통한 진동소음기준 사례	4
3. 터널 발파굴착 공법	6
3.1 발파굴착공법	6
3.2 미진동, 무진동 굴착공법	10
4. 결론	12
참고문헌	13

■ 표 목 차 ■

Fig.

<2.1> 터널설계기준 발파진동 기준	2
<2.2> 터널표준시방서 발파진동 기준	2
<2.3> 철도설계기준 발파진동 기준	3
<2.4> 도로공사 전문시방서(2012) 및 노천발파 설계·시공 지침(2006)	3
<2.5> 고속도로 환경영향평가 작성 가이드라인(2008) 및 고속도로 환경관리 매뉴얼(2009)	3
<2.6> 서울 및 부산지하철 발파진동 허용치	3
<2.7> 생활진동 규제기준(2011, 소음진동관리법)	4
<2.8> 법원판결사례 및 환경부 발표자료	4
<2.9> 중앙환경분쟁조정위원회 기준	5
<2.10> 중앙환경분쟁조정위원회 조정사례	5
<2.11> 건설현장 가축시설 대상 소음·진동 관리기준(한국도로공사)	5
<3.1> 도로공사 노천발파 설계·시공 지침에 따른 암반굴착공법별 분류 기준	7
<3.2> 심발공법의 특징	8
<3.3> 제어발파의 종류	9
<3.4> 미진동, 무진동 굴착공법의 종류	10
<3.5> 약액주입공법(화학적) 특징	10
<3.6> 기계식 공법(물리적) 특징	11

■ 그림 목 차 ■

Table

[3.1] 터널발파설계 개요	7
[3.2] 심발공법 종류	8
[3.3] 발파진동 경감 방식	9

1. 개 요

우리나라는 지질특성상 터널공사를 시행할 때 암반굴착이 필수적이며 일반적으로 암반구간 터널 굴착 시에는 발파에 의한 굴착이 주로 적용되고 있다. ‘

최근 들어 터널공사는 도심지의 교통해결을 위해 지하도로계획(만덕~센텀 지하도로, 동부간선도로, 제물포터널 등)과 지하철(하남선, 별내선 등)가 설계 및 시공 많이 이뤄지고 있으며, 도심지 특성상 근접되어져 있는 주변 민가, 상가 및 지하 지장물(상수도, 하수도, 기존지하철) 등 보안물건에 대한 발파진동 및 소음이 허용기준을 만족하는 경우에도 관련 민원이 발생하고 증가하는 추세이다. 따라서 설계단계와 시공중에 도심지 터널굴착을 위한 발파 시에는 주변 보안물건에 대해 안전할 뿐만 아니라 환경분쟁조정위원회에서 중재하고 있는 분쟁해소 사례 등 조건을 만족하며 굴착할 수 있는 공법의 적용이 필요하다.

터널 굴착시 발파로 인한 민원 및 주변 지장물의 피해발생이 예상되는 경우에는 발파진동을 억제할 수 있는 대안공법을 적용하여야 하며, 발파진동 억제방법은 발파공법 변경, 제어발파 등 보조적인 방법을 병용하여 발파를 수행하는 방법과 폭약을 사용하지 않는 미진동 또는 무진동 굴착공법 등과 같은 비발파공법이 적용될 수 있다.

공법 결정시에는 굴착효율이 좋으며 안전시공이 가능한 공법의 적용이 바람직하다. 이에 본 위원회에서는 터널굴착시 반영되는 소음진동 기준치에 대한 기준을 소개하고 현장에서 적용할 수 있는 발파공법과 비발파공법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 국내 진동 및 소음기준

허용진동치는 진동에 의하여 구조물에 피해가 발생되지 않도록 규제하는 범위의 진동치를 말하며, 일반적으로 엄밀한 의미의 허용진동치는 구조물의 크기(층수 등), 설계구조(내진설계 유무), 재질(철근 콘크리트, 블록조, 석조, 목조 등)과 건전성(결함 유무, 노후화 정도 등)등에 따라서 구조물별로 서로 상이하게 된다. 도심지 발파공법 적용 시, 주변에 민가, 상가 및 지하 지장물 등 보호하여야 할 시설물이나 구조물이 있는 경우의 발파진동(지반진동) 허용치는 최대입자속도 측정치를 기준으로 결정하지만 공사여건에 따라 공사발주 시 별도의 특별시방을 작성하여 조정할 수 있도록 하고 있다(터널표준시방서, 2015). 발파지점 주변의 주민에 대한 피해 방지를 위한 기준으로 적용하는 발파진동 허용치는 환경부 제정 ‘진동과 소음에 관한 규정’을 준용하며 특수한 조건에서 필요한 경우에는 해당 분야 전문가의 자문을 얻어 정하여야 한다.

국내 발파진동 및 소음 관련 기준은 터널설계기준 및 터널표준시방서 등 관련 기준에서 규정하고 있으며, 이를 기본으로 해당 공사발주 기관에서도 별도 기준으로 규정하고 있는 경우도 있으므로 해당조건을 면밀히 검토하여 적용기준을 정할 필요가 있다.

2.1. 발파진동 및 소음기준

소음·진동 규제법에는 건설소음 규제방법으로 건설 소음·진동 규제기준의 적용과 특정 공사의 신고의무를 규정하고 있어 건설 소음·진동 규제지역에서 특정 공사를 하고자 하는 자는 규제기준을 준수하여야 한다. 구조물의 경우에는 발파진동에 대한 허용치가 법규로 명시되지 않기 때문에 관련기관의 고시 기준에 의존하여 사용되고 있다.

일반적으로 발파진동 허용치는 관련기관 고시 기준 외에 법원의 판례기준 및 중앙환경분쟁조정위원회의 조정사례를 기초로 하여 설정하며 인체에 대한 발파진동 및 발파소음 허용기준은 환경부에서 제정 소음진동관리법 기준치를 적용하되, 발파작업의 특수성을 고려하여 보정값을 반영하여 허용치를 설정한다.

2.1.1 발파진동 기준 및 시방서

발파진동 기준 및 시방서 내용을 살펴보면 발주처별로 나름대로 유사한 기준을 제시하고 있으며 내용은 아래와 같다(표 2.1~2.6 참조).

(1) 터널설계기준 : KDS 27 20 00 터널 굴착 (2016)

<표 2.1> 터널설계기준 발파진동 기준

구 분	문화재 및 진동에민 구조물	조적식(벽돌, 석재 등) 벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물	철근콘크리트 또는 철골골조 및 슬래브를 갖는 대형건물
최대입자속도 (cm/sec)	0.2~0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(2) 터널표준시방서 (2015)

<표 2.2> 터널표준시방서 발파진동 기준

구 분	문화재 및 진동에민 구조물	조적식(벽돌, 석재 등) 벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물	철근콘크리트 또는 철골골조 및 슬래브를 갖는 대형건물
최대입자속도 (cm/sec)	0.2~0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(3) 철도설계기준 발파진동 기준(2013, 노반편)

<표 2.3> 철도설계기준 발파진동 기준

구 분	구조물 형식	문화재 및 지반진동 예민 구조물	조적식 벽체 (벽돌, 석재)와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식건물	철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건물	철근콘크리트, 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형건물
	구조물 종류	문화재 등	재래가옥, 저층일반가옥 등	저층양옥, 연립주택 등	중·저층아파트, 중소상가 및 공장	내진구조물, 고층아파트, 대형건물 등
주파수 대역별 허용치 (cm/sec)	50Hz 이상	0.75	1.5	2.5	4.0	5.0
	50Hz 미만	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(4) 도로공사 전문시방서(2012) 및 노천발파 설계·시공 지침(2006)

<표 2.4> 도로공사 전문시방서(2012) 및 노천발파 설계·시공 지침(2006)

구 분	가축	문화재	주택	공업용 건물		철골 구조
				조적	RC	
진동속도 (cm/sec)	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	5.0

(5) 고속도로 환경영향평가 작성 가이드라인(2008) 및 고속도로 환경관리 매뉴얼(2009)

<표 2.5> 고속도로 환경영향평가 작성 가이드라인(2008) 및 고속도로 환경관리 매뉴얼(2009)

구 분	가축 (소, 돼지, 개, 닭, 염소)	건축 및 구조물				
		문화재	조적	RC	공업용 건물	철골 구조
진동속도 (cm/sec)	0.09, 70dB(V)	0.2	0.2~0.3	0.5	1.0	5.0

(6) 서울지하철 및 부산지하철 발파진동 허용치

<표 2.6> 서울 및 부산지하철 발파진동 허용치

구 분	I	II	III	IV
건물기초에서의 허용진동치 (cm/sec)	유적, 문화재, 컴퓨터 시설물	주택, 아파트 (실금이 있는 정도)	상가 (Crack이 없는 상태)	철근콘크리트 빌딩 및 공장
	0.2	0.5	1.0	1.0~5.0

2.1.2 발파 소음 설계기준

발파 소음 설계기준은 환경부에서 생활과 관련된 법령을 적용하고 있다(표 2.7참조).

(1) 소음진동관리법(2011)

<표 2.7> 생활진동 규제기준(2011, 소음진동관리법) (단위 : dB(A))

대상지역	시간대별		조식 (05~07,18~22)	주간 (07~18)	야간 (22~05)	
	소음원					
주거지역, 녹지지역, 학교, 병원 및 공공도서관 등	확성기	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하	
		옥내 ⇒ 옥외	50 이하	55 이하	45 이하	
	사업장	공 장		50 이하	55 이하	45 이하
		동일 건물		45 이하	50 이하	40 이하
		기타		50 이하	55 이하	45 이하
		공사장		60 이하	65 이하	50 이하
그 밖의 지역	확성기	옥외설치	70 이하	80 이하	60 이하	
		옥내 ⇒ 옥외	60 이하	65 이하	55 이하	
	사업장	공 장		60 이하	65 이하	55 이하
		동일 건물		50 이하	55 이하	45 이하
		기타		60 이하	65 이하	55 이하
		공사장		65 이하	70 이하	50 이하

- 주) 1. 소음의 측정방법과 평가단위는 소음·진동공정시험방법에서 정하는 바에 따른다.
 2. 대상지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한다.
 3. 규제기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상지역을 기준으로 하여 적용한다.
 4. 옥외에 설치한 확성기의 사용은 1회 2분 이내로 하여야 하고, 15분 이상의 간격을 두어야 한다.
 5. 공사장의 소음규제기준은 주간(07~18)의 경우 특정 공사의 사전신고대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 2시간 이하 일 때는 +10dB을, 2시간 초과 4시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
 6. 발파소음의 경우 주간(07~18)에 한하여 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.
 7. 공사장의 규제기준 중 다음 지역은 공휴일에 한하여 -5dB를 규제기준치에 보정한다.
 가. 주거지역
 나. 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교 및 「도서관 및 독서진흥법」에 따른 공공도서관의 부지경계로부터 직선거리 50m 이내의 지역

2.2 조정 및 판결을 통한 진동소음 기준 사례

주거 밀집지역이나 보안물건이 인접할 경우에는 법원의 판례사례를 참고하여 적용하고 있다(표 2.8~2.11 참조).

(1) 발파진동·소음에 따른 법원 및 중앙환경분쟁조정위원회 조정사례

① 법원판결사례 및 환경부 발표자료

<표 2.8> 법원판결사례 및 환경부 발표자료

구 분	조정사례
서울 민사지법 판례	<ul style="list-style-type: none"> • 서울민사지법 합의 50부(1995년) • 발파진동속도는 초당 0.3cm, 소음은 주간에는 80dB(A), 심야에는 65dB(A)을 넘지 않는 한도에서 발파작업을 실시하라”고 판결함
환경피해 구체기준	<ul style="list-style-type: none"> • 중앙환경분쟁조정위원회(2006년), •인체 피해 : 충격진동 : 86dB(V) • 건물피해 : 진동 : 0.2~2.0cm/sec, •가축 피해 : 소음 : 60dB(A)
환경분쟁피해 배상액 산정기준	<ul style="list-style-type: none"> • 중앙환경분쟁조정위원회(2008년) • 소음 기준 신설 및 강화 : 발파 소음 : 75dB(A) • 진동 기준 강화 : 충격진동(발파) : 75dB(V) • 가축피해 기준 강화 : 진동 : 57dB(V) ≒ 0.02cm/sec

② 중앙환경분쟁조정위원회 (2002)

<표 2.9> 중앙환경분쟁조정위원회 기준

구 분	문화재 (역사적으로 매우 오래된 건물)	주택 및 상가		
		1등급 (건축 후 15년 이상의 노후건물)	2등급 (건축 후 5년 이상이며, 작은 균열은 지닌 건물)	3등급 (건축 후 5년 미만, 균열이 없는 새 건물 철근콘크리트 건물 포함)
충격진동시의 인과관계 판단기준 (cm/sec)	0.2 이상	0.3 이상	0.5 이상	1.0 이상
	연속진동시의 인과관계 판단기준	0.07 이상	0.1 이상	0.17 이상

<표 2.10> 중앙환경분쟁조정위원회 조정사례

오리~수원간 지하철공사 (12.12.30)	인천지하철 211공구 (12.05.10)	충남 국가산업단지 1공구 (13.02.26)
<ul style="list-style-type: none"> 진동으로 인한 건물 피해 평가 - 인정수준 : 0.21~0.35cm/sec - 평가진동도 : 최대 0.725cm/sec 건물피해 배상액 - 건물소재지 18개동 : 약3천만원 	<ul style="list-style-type: none"> 진동·소음으로 인한 피해 평가 - 인정기준:1.05cm/sec, 80dB(V) - 평가진동도:0.8cm/sec, 66dB(V) 발파로 인한 건물 및 정신적 피해의 개연성이 인정되지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 진동으로 인한 건물 피해 평가 - 인정수준 : 0.5cm/sec - 평가진동도 : 최대 0.6cm/sec 건물피해 배상액 - 건물소재지 1개동 : 약4백만원
발파진동 피해 인정수준은 최소 0.21cm/sec이며, 초과(0.6~0.7cm/sec)시 보상액은 가구당 약 4백만원으로 분석		

(2) 건설현장 가축시설 대장 소음·진동 관리기준 수립(한국도로공사, 녹색환경처-82, 2011)

<표 2.11> 건설현장 가축시설 대상 소음·진동 관리기준(한국도로공사)

소음, 진동 관리기준
<ul style="list-style-type: none"> 가축관련 법령 및 국토해양부 기준이 부재한 소음 및 건설기계 진동은 『환경분쟁 피해배상액 산정기준(2008)』 준용 소음·진동 관리기준 강화 : 소음(70→60dB(A)), 진동(70→57dB(V)) 진동 관리기준 : 발파진동은 국토해양부 지침(0.1cm/sec)에 규정하고 있으나, 지침 개정 전까지 『환경영향평가 가이드라인(0.09cm/sec)』 적용 적용방안 → 설계 및 환경영향평가 중 노선은 본 방침 적용, 시공 및 설계완료 후 미발주 노선은 기 완료된 환경영향평가 협의내용을 이행 → 향후대책 : 국토해양부 지침을 『환경분쟁 피해배상액 산정기준』에 맞게 개정 건의 (0.1→ 0.02cm/sec)

② 터널설계시 발파진동·소음에 대한 허용기준 고려사항

- 터널설계 시 발파진동·소음에 대한 허용기준은 터널설계기준에서 규정한 허용값 또는 발주기관에서 규정한 값을 적용하였으나, 실제 시공 시에 민원발생이 빈번하여 현장 발파진동·소음 허용값의 결정 시 법적 면책기준이 될 수 있는 중앙환경분쟁조정위원회의 피해조정 사례를 준용하고 있다. 이와 같은 현실에서 환경관련 민원의 절반이상을 차지하는 건설 소음·진동민원을 예방하기 위해서는 시공 중 소음·진동을 최소화하고 억제할 수 있는 별도의 제어발파 및 각종 미진동·무진동 굴착공법을 적용되어지고 있다.

3. 터널 발파굴착 공법

굴착방법에는 기본적으로 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착, 파쇄굴착 등이 있으며, 2가지 이상의 방법을 혼용하는 경우도 있다. 굴착방법 선정시에는 기본적으로 지반조건을 우선 고려하고 터널단면 및 연장에 따라 경제성을 검토한 후 주변 시설물과 환경영향을 고려하여 선정하는 것을 원칙으로 한다. 기계굴착은 브레이커, 굴착기, TBM 등을 이용하여 굴착하는 방법으로 모암 손상방지, 여굴 방지, 소음 및 지반진동을 억제하는 경우에 주로 적용한다.

발파굴착은 화약류 등의 폭발력을 이용하여 암반을 굴착하는 방법으로 소음 및 지반진동을 억제하여야 할 경우에는 조절발파를 적용할 수 있다. 최근에는 발파공법 적용 시 발파진동이 건물이나 시설물에 피해를 끼치지 않더라도 인체 감응정도에 따라 민원을 제기하여 적극적인 보상 등을 요구하고 있는 경우가 있으며 민원인의 강력한 저항으로 사업수행에 막대한 차질을 초래하기도 하는 실정이다.

파쇄굴착은 발파굴착 구간 중 조절발파로 진동저감 효과가 부족한 경우에 적용되고 있으며 유압장비, 가스, 팽창성 모르타르, 특수 저폭속화약 등을 이용하여 암반을 파쇄할 때 적용하며 필요한 경우에는 브레이커를 이용한 기계굴착을 적용하기도 한다. 최근에는 주거지 주변에서는 민원발생을 최소화하고 굴착공사를 원활하게 수행할 수 있도록 일반발파보다 소음진동을 억제할 수 있는 미진동 및 무진동 굴착공법을 적용하는 공사현장이 점차 증가하고 있는 추세이다.

3.1. 발파굴착공법

3.1.1 발파공법 개요

터널 발파공법은 주변 암반에 대한 손상을 최소로 하고 암반과 화약의 성질을 조화시켜 최적의 발파 효과를 얻을 수 있으며, 발파계획을 수립하는 데 있어서는 사전에 조사된 지반조건과 자립시간 등을 기초로 하여 미리 정해진 굴착공법과 지보형식 및 간격 등을 고려하여 발파굴진장, 심발공의 형태, 발파공의 배치, 기폭방법, 장약량 등의 발파패턴을 계획하게 된다. 발파설계에는 가장 적합한 심발공법, 굴착면 주변공 배치 및 장약량, 지발당 최대 장약량 등이 제시되어야 하며 실제 시공 시 시험발파를 실시하여 보완하여야 할 사항을 명확히 제시하여야 한다. 또한 발파로 인한 소음, 진동 등 주변 환경에 미치는 영향을 고려하여 필요한 경우에는 그 대책을 강구하여야 하며 발파결과가 당초 계획과 상이할 경우에는 그 원인을 규명하여 후속 발파작업에 반영하여야 한다.

3.1.2 암반굴착공법별 분류 및 발파설계 개요

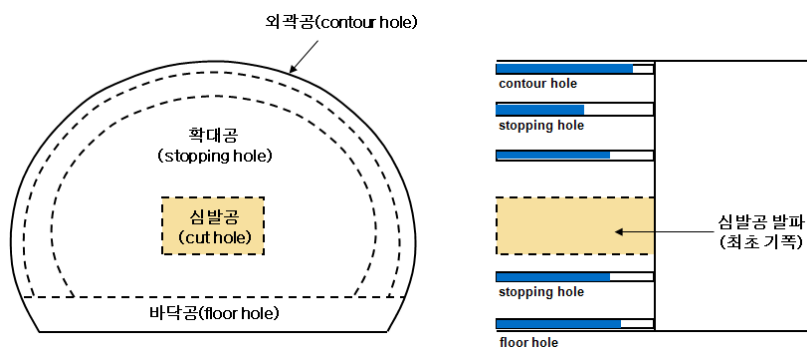
국내에서는 일반적으로 도로공사 노천발파·시공 지침에 따른 암반굴착공법을 제시하고 있으며 용어에 따른 공법개요 및 특성은 표 3.1과 같다.

<표 3.1> 도로공사 노천발파 설계·시공 지침에 따른 암반굴착공법별 분류 기준

구분	일반발파	진동제어발파	정밀진동 제어발파	미진동 굴착공법
공법개요	•1공당 최대 장약량이 발파 규제 기준을 충족시킬 수 있을 만큼 보안물건과 이격된 영역에 대해 적용하는 공법	•발파영향권 내에 보안물건이 존재하는 경우 “시험발파” 결과에 의해 발파설계를 실시하여 규제기준을 준수할 수 있는 공법	•소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시킨 후, 대형 브레이커에 의한 2차 파쇄를 실시하는 공법	•보안물건 주변에서 정밀진동 제어발파 이내 수준으로 진동을 저감시킬 수 있는 공법으로서 대형 브레이커로 2차 파쇄를 실시하는 공법
주 사용폭약 또는 화공품	에멀전 계열 폭약	에멀전 계열 폭약	에멀전 계열 폭약	최소단위미만폭약 미진동파쇄기 미진동파쇄약 등
지발당장약량 (kg)	5.0~15.0	0.5~5.0	0.125~0.5	폭약기준 0.125 미만

※ 천공깊이, 최소저항선, 천공간격 치수 등은 평균적으로 제시한 수치이며, 공사시행 전에는 시험발파에 따라 현장별로 검토, 적용하여야 함

발파설계는 터널이 굴착되는 암반 및 지질의 특성, 지장물의 위치 및 종류, 환경에 대한 영향 등 현장여건에 따라 제한조건이 발생하며, 터널의 발파패턴은 심발공, 확대공, 외곽공, 바닥공으로 구분하여 공의 배치, 경사, 길이 장약량 및 기폭순서의 조정을 통해 설계되며, 이중 심발발파는 가장 먼저 기폭되어 자유면을 형성하는 역할을 하는 것으로 굴진효율과 발파진동·소음 발생에 중요한 영향을 미치며 발파설계개요는 그림 3.1과 같다.

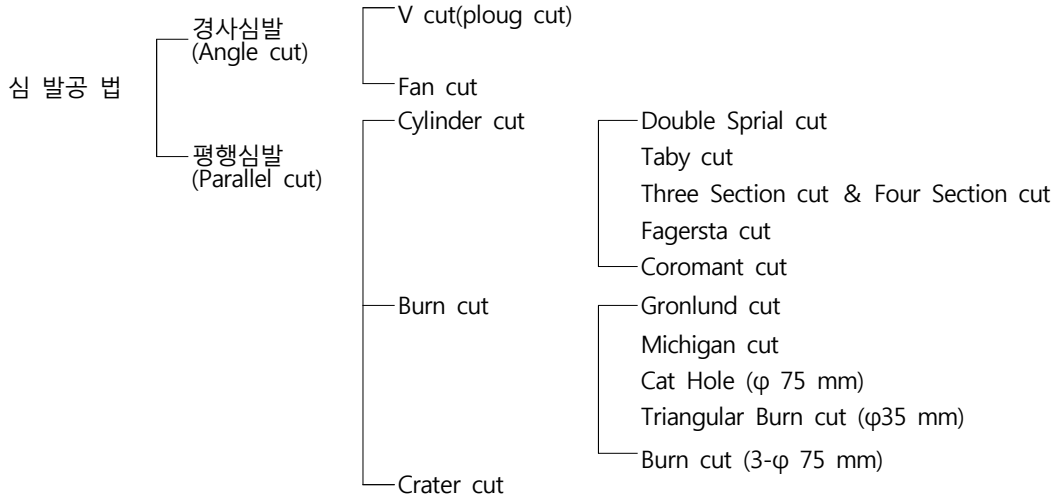


- 심발공(Cut hole) : 터널막장을 1자유면에서 2자유면으로 확대시키는 발파공
- 확대공(Stopping hole) : 터널에 벤치발파 개념을 도입한 2자유면 발파공
- 외곽공(Counter hole) : 매끄럽고 평활한 굴착면 확보를 위해 공과 공 사이를 절단하는 발파공
- 바닥공(Floor hole) : 발파암이 쌓여 구속력이 매우 크므로 화약량을 증가시킨 발파공

[그림 3.1] 터널발파설계 개요

3.1.3 심발공법의 공법별 특징

국내에서 많이 적용되는 심발공법은 V-cut(경사심발), Burn-cut, Cylinder-cut(평행심발)이 있으며 대표적인 제어발파는 스무스블라스팅(Smooth blasting)과 라인드릴링(Line drilling) 등의 공법이 있다(표 3.2, 그림 3.2참조).



[그림 3.2] 심발공법 종류

<표 3.2> 심발공법의 특징

구 분	개요도	특징 및 장점
V-CUT		<ul style="list-style-type: none"> • 천공패턴이 단순 • 단공발파나 연암발파에서 효율적 • 압축 및 전단파괴, 대칭된 경사공으로 썰기파괴
Cylinder-CUT		<ul style="list-style-type: none"> • 압축 및 전단파괴, 대구경 무장약공을 자유면으로 활용 • 굴진장 증대 가능 • 심발부 진동 제어 가능 • 장공발파나 경암발파에 이용됨
SUPEX-CUT (신기술 제14호) (특허 제119982호)		<ul style="list-style-type: none"> • 압축 및 전단파괴, 경사공 1차 발파후 수직공 2차 발파로 파쇄 • 암중과 막장의 단면적 또는 천공장과 관계없이 적용 가능 • 비장약량이 적고 발파효율 좋음 • 굴진작업이 개선되고 굴진시간이 줄어 경제적임
COPA-CUT (신기술 제341호) (특허 제0443578호)		<ul style="list-style-type: none"> • 인장파괴 후 압축 및 전단파괴, Pre-splitting 효과 도입 • 심발부 선균열로 발파진동 및 소음 저감 • 선균열로 발파효과 증대되며 천공수 감소 • 선균열 발파로 비장약량이 작으며 굴착비가 저렴함
다단평행발파 (특허 제0751729호)		<ul style="list-style-type: none"> • 심발공을 단공과 장공으로 천공으로 저항선을 축소 단계별 발파 • 저항선이 축소되어 발파효율이 증대되며, 발파진동·소음이 저감됨 • 천공수 증가로 화약량 및 뇌관 사용량이 증가됨 • 전자뇌관을 이용한 미진동 발파로 전환이 용이함
HTB-CUT (신기술 제459호)		<ul style="list-style-type: none"> • 선단발파공에 의해 형성되는 자유면이 후발파공의 자유면으로 파쇄 • 심발발파의 자유면이 완전하여 발파효율 증대 • 발파진동 및 소음감소로 공해가 적게 발생 • V-CUT 발파패턴 이용하며 진동감소로 공해 최소화

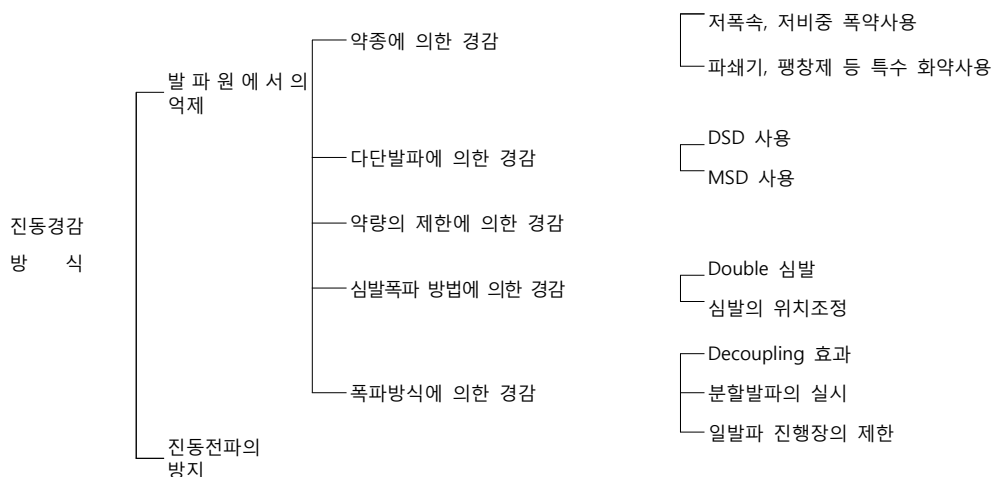
3.1.4 제어발파 및 발파진동 경감방법

국내에서 많이 적용되고 있는 제어발파 공법은 스무스 블라스팅(Smooth blasting)과 프리 스플리팅(Pre-splitting) 공법이 있다(표 3.3참조).

<표 3.3> 제어발파의 종류

구 분	Smooth blasting	Wing hole blast	Line drilling	Pre-splitting
개요도				
개요	<ul style="list-style-type: none"> 외곽공을 최후에 기폭 외곽공을 평행 접근배치 공경보다 훨씬 적은 직경 폭약 사용(DI≥2.0) 저항선(B)과 공간격(S)의 비 ⇒ S/B≤0.8 	<ul style="list-style-type: none"> SB공법의 일종 여굴감소, 이완영역 축소 목적 폭발력 방향성 부여 특수 rod 및 bit 사용 (일본 특허기술) 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착예정선에 다수의 무장약공을 근접 천공하여 진동차단과 굴착선을 따라 파단이 이루어지도록 하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> 외곽공을 먼저 기폭하여 미리 파단면을 생성한 후에 굴착면을 굴착 천공경은 대략 30~64 mm 이고 대부분의 천공공에 폭약을 장전
특징	<ul style="list-style-type: none"> 천공 효율성 우수 신뢰성 우수 전용폭약 생산 (정밀폭약) 천공수 증가로 시간이 많이 소요됨 	<ul style="list-style-type: none"> 천공완료 후 Wing hole 형성 (천공시간 증대) 연암 이하 효과 저하 현장적용사례 빈약 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착예정선에 다수의 무장약공을 근접 천공하여 진동차단과 굴착선을 따라 파단이 이루어지도록 하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 터널의 경우에 파단면에 수직으로 작용하는 편압압 구간에 적용 천공의 장밀도 및 천공간격의 영향이 큼
용도	<ul style="list-style-type: none"> 노천 절취비탈면, 채석장 터널 등 진동제어 	<ul style="list-style-type: none"> 노천 절취비탈면 터널 	<ul style="list-style-type: none"> 노천 절취비탈면 터널 	<ul style="list-style-type: none"> 노천 절취비탈면

시험발파나 발파진동 측정결과로부터 발파진동의 피해가 예측되는 경우 다음에 열거된 진동경감방법 중 발파효과 및 경제성 등을 검토하여 최적의 방법을 선택하여야 하며 경감방법은 진동의 발파원에서의 억제방법과 진동전파의 방지로 대별할 수 있으며 아래와 같이 요약할 수 있다(그림 3.3참조).



[그림 3.3] 발파진동 경감 방식

3.2. 미진동, 무진동 굴착공법

3.2.1 미진동, 무진동 굴착공법의 분류

소음과 진동 억제를 고려한 미진동 굴착공법은 크게 약액주입에 의한 화학적 파쇄공법을 의미하며 기계장비를 이용한 물리적 파쇄공법은 무진동 굴착공법으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 발파진동 억제를 위한 미진동, 무진동 암파쇄공법의 적정성 검토를 위해 적용 가능한 공법들에 대한 비교·검토를 정리하면 다음 표 3.4과 같다.

<표 3.4> 미진동, 무진동 굴착공법의 종류

약액주입 공법 (화학적)	기계식 공법 (물리적)
1. 미진동 파쇄기 (CCR)	1. 분착 균열파쇄 공법
2. 플라즈마 공법 (PLAZMA)	2. 유압절개 공법 (HRS, GNR, PRS, DARDA)
3. 팽창성 파쇄재	3. 슈퍼웨이 공법
4. CARDOX 공법	4. 대형 브레이커 / 다공천공 + 대형브레이커 공법

3.2.2 약액주입공법(화학적) 종류 및 특징

약액주입공법은 크게 미진동 파쇄기, 플라즈마, 팽창성 파쇄재 CARDOX로 구분할 수 있으며 그 원리와 특징은 표 3.5와 같다.

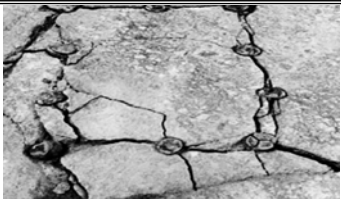
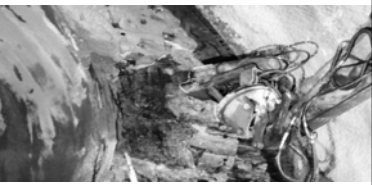

<표 3.5> 약액주입공법(화학적) 특징

구 분	미진동 파쇄기(CCR)	플라즈마 공법	팽창성 파쇄재	CARDOX
개요도				
개요	<ul style="list-style-type: none"> 고열을 이용한 가스팽창으로 암반에 균열을 발생시키는 화공품으로 압축응력에 의한 파쇄하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 암반 내 금속산화물의 전력충격셀 전기에너지로 플라즈마의 팽창에 의해 발생하는 충격파와 고열로 암반을 파쇄하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 생석회(산화칼슘, CaO)의 수화반응에 의한 고온고압의 팽창력을 이용하여 균열발생 후 파쇄하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> 탄산가스를 기화시키는 과정에서 순간적으로 발생하는 에너지를 활용하여 암을 파쇄방법
특징	<ul style="list-style-type: none"> 도심지 현장에서 널리 사용되고 있으나 압축강도 1,200kg/cm² 이상의 경암에서는 적용효과가 떨어지는 단점 	<ul style="list-style-type: none"> 저항선이 적절치 못할 경우에는 비산 및 철포현상이 발생되어 방호대책이 필요 단일공만 작업이 가능하여 작업효율이 떨어지고 공사비가 고가 	<ul style="list-style-type: none"> 주입에서 양생까지 최소 6시간 정도가 소요되고 재료비 및 파쇄비가 비교적 고가 시공경험이 풍부한 전문 기술자 확보가 어렵 	<ul style="list-style-type: none"> 단발파쇄만 가능하고 보통암 이상의 암반에서는 굴착효율이 저하 불가피하게 발생하는 유독성 가스로 인하여 사용이 기피

3.2.3 기계식 공법(물리적) 종류 및 특징

기계식 방법에는 절개하는 이용하는 압력 방법에 따라 크게 분착균열파쇄공법과 유압절개공법, 슈퍼웨지 공법, 대형 브레이커를 이용하는 방법이 있으며, 그중에서 유압절개공법은 유압을 적용하는 방식에 따라 HRS, GNR, PRS, DARDA 등으로 분류된다(표 3.6 참조).

<표 3.6> 기계식 공법(물리적) 특징

구 분	분착 균열파쇄	슈퍼웨지	대형 브레이커
개요도			
개요	<ul style="list-style-type: none"> •일반 천공 공 사이에 30~40% 짧은 분착공을 추가 천공하여 압축 집중 응력을 완화하고 전단 및 인장응력 만으로 암반을 파쇄하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> •슈퍼웨지(SUPER WEDGE)공법은 기존 인력으로 운용하던 유압 활암방식을 탈피하여 무진동 암반파쇄기를 굴삭기에 장착한 기계화 공법 	<ul style="list-style-type: none"> •굴착기 선단에 대형브레이커를 설치하여 암반에 균열을 발생시키는 방법
특징	<ul style="list-style-type: none"> •일반 화약발파와 작업방법이 유사하여 전용장비가 불필요 •굴착 싸이클이 짧은 장점이 있어 근래에도 노천 암파쇄 현장에서 주로 적용. 	<ul style="list-style-type: none"> •백호에 장착하여 파쇄작업을 하기 때문에 이동 및 파쇄작업 속도가 빨라 공사시간이 짧음. •장비특성 상 천공을 길게 해야 하므로 천공비가 증가 	<ul style="list-style-type: none"> •현장에서 굴착기를 활용하여 손쉽게 빠르게 굴착이 가능 •강도가 높은 연경암에서는 시공성이 떨어짐.

구 분	유압절개공법			
	HRS	GNR	PRS	DARDA
시공 장비				
개요	<ul style="list-style-type: none"> •천공 Hole에 원형 활암봉을 삽입한 후 고무튜브에 유압을 발생시켜 활암봉 팽창으로 암반을 파쇄 	<ul style="list-style-type: none"> •자동제어 작동으로 암반강도에 제한받지 않고, 적은 구경의 암반 천공홀을 무진동으로 암반을 파쇄하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> •천공된 구멍에 유압으로 작동되는 소형 피스톤이 박힌 활암봉을 넣은 후 유압을 작동시켜 암을 강제로 파쇄하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> •유압으로 두 개의 날개 wedge에 가압하여 파쇄대상을 양쪽으로 벌려서 파쇄하는 공법
특징	<ul style="list-style-type: none"> •안정성 및 시공성이 우수하고 계절에 관계없이 시공이 가능하며 분진 피해가 없음. •보통암 이상의 암반에서는 작업효율이 떨어짐 	<ul style="list-style-type: none"> •유압제어로 작업자 안전 확보가 용이하며, 절개깊이 및 활암폭이 적음. 소음, 비석, 분진 피해가 없음 •화약발파 대비 시공성이 떨어지고 단가가 높음 	<ul style="list-style-type: none"> •균등한 팽창력 발생으로 절취선이 정확함. •보통암 이상의 암질에서 효율이 저하되고, 부속장비 소모가 많으며, 자유면의 형성이 필요. 	<ul style="list-style-type: none"> •소량 및 소규모 현장 파쇄에 유리하고, 절개방향이 정확하고 자유롭게 조절가능. •자유면이 필요하고, 1일 작업량이 많으며, 작업속도가 늦은 편함.

4. 결론

터널 굴착공법 설계 및 시공 시에는 주변 민가, 상가 및 지하 지장물 등 보안물건에 대한 진동 및 소음 영향을 검토하여 이로 인한 민원이 발생하지 않도록 하여야 하며 주변환경 피해가 최소화 되도록 구간별로 적절한 공법을 적용하여야 한다. 도심지 터널 굴착 시 소음·진동의 허용기준은 환경피해 측면에서 더욱 엄격해지는 추세이므로 발파공법의 적용은 줄어들고 미진동 또는 무진동 굴착공법을 적용하는 시공이 늘어나고 있다. 따라서 터널 굴착 대상 지반조건이 경암, 보통암으로 양호한 경우에 발파굴착 적용 시 진동 및 소음이 허용기준을 초과하는 경우에 적용 가능한 무진동 굴착공법에 대한 특성 파악 및 적용성에 대한 검토가 필요하다.

발파공법 적용 시 발파진동저감을 위해서는 지반조건, 지장물 현황, 구조물 중요도 등을 고려하여 최적의 제어발파 공법을 적용하는 것이 바람직하며 제어발파 등 발파진동저감 대책을 적용한 경우에도 발파진동으로 인한 민원이 예상되는 경우에는 미진동 또는 무진동 굴착공법의 적용이 필요하다.

진동억제를 고려한 미진동, 무진동 굴착공법은 약액주입에 의한 화학적 파쇄공법과 기계장비를 이용한 물리적 파쇄공법으로 분류할 수 있으며 공법 선정 시에는 현장 여건에 따라 적합한 공법을 검토하여 선정하는 것이 바람직하다. 또한 공법 적용의 효과는 공법적용 시의 진동 및 소음여부, 이로 인한 민원 발생여부와 2차 파쇄 등으로 인한 시공공기, 장비의 고장 및 교체 등 다양한 조건을 종합적으로 고려하여 검증하는 것이 바람직하다.

최근 들어 도심지 교통난 해결을 위한 지하철 증설과 지하도로 건설로 도심지 터널 공법이 증가하고 있으나 그중 지장물 근접시공과 주거지역 등의 보완건물로 인한 환경과 관련된 공사비가 증가 하고 있고 터널공정에서도 민원과 관련된 발파공정의 공사비가 제어발파나 미진동, 무진동 발파공법적용으로 공사비 증액 요인이 늘고 있다. 따라서, 위에 상기된 공법들을 활용하되 공사비 절감을 위한 경제적이고 시공성이 좋은 공법개발과 더불어 공사전 지역주민들과 함께 협업할 수 있는 시스템 도입도 고려해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국토지공사(1993), 암발파 설계기법에 관한 연구
2. 김대원(1994), 발파진동의 주변에의 영향과 대책
3. 김영근 등(2005.03), 미진동파쇄기를 이용한 표준암반파쇄굴착에 관한 연구,
대한화약발파공학회, Vol 23 No.1
4. 박주연 등(2002.09), 미진동 발파공법 적용사례에 관한 연구,
대한화약발파공학회, Vol 20 No.3
5. 장창훈(1996), 건설공사와 관련된 소음·진동 기준 해설,
대한토목학회지 PP.43~49
6. 추용범 등(2008.12), 노천발파 공법의 설계 및 시공 특성에 대한 고찰,
유신기술화보 제15호
7. 고평국 등(2010.12), 환경영향 저감을 위한 미진동/무진동 굴착공법 적용성 고찰,
유신기술화보 제17호
8. 쌍용건설(주), (주)백양eng, 장대썰기와 브라켓으로 구성된 암반파쇄기를 이용한 무진동
암반파쇄공법(SUPER WEDGE 공법), pp.1~86
9. 도로설계요령_9편 터널(2009년)
10. 한국도로공사, “터널설계실무자료집”, 1995
11. 도로설계편람, 터널편(2010년)
12. 터널표준시방서(2015)
13. 터널설계기준(2007)

○ 관련 자료 홈페이지

- 플라즈마 공법 : 스웰테크 (<http://www.swelltech.co.kr>)
- 팽창성 파쇄재 : 세진인터네셔널 (<http://www.sejininternational.co.kr/>)
- GNR 공법 : 기술나라 (<http://www.gnr.co.kr/>)
- PRS 공법 : 수호산업개발 (<http://www.rock-splitter.com/>)
- DARDA 공법 : DARDA (<http://www.darda.de/home.html>)
- 슈퍼웨이 공법 : 백양이엔지 (<http://bycsw.co.kr/>)
- 슈퍼웨이 공법 : 백양이엔지 (<http://bycsw.co.kr/>)