

Tunneling Technology

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(II)



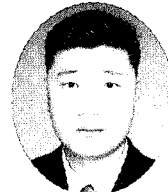
민형동
(주)한화
화약기술팀 팀장



정민수
(주)한화
화약기술팀 차장



송영석
(주)한화
화약기술팀 과장



박윤석
(주)한화
화약기술팀 대리

1. 발파 설계법

서론에서 언급한 것과 같이 암 발파 공법은 크게 노천 발파(Surface Blasting), 터널발파(Tunnel Blasting), 수중발파(Underwater Blasting)로 나눌 수가 있다. 이러한 분류는 발파를 하는 형태에 따라 나누어진 분류이며 공통적으로 발파의 대상인 암반에 의해서 그 설계가 변경되어야 한다. 그러나 일반적으로 암반이라 하면 그 지역에 따라 각기 특성이 존재하기 때문에 획일화된 설계 공법이 존재하는 것이 아니고 수차례의 경험에 의해 만들어진 경험식에 의해서 그 설계를 실시하여야 한다. 이러한 경험식에 의한 설계 후 시험발파를 통해서 적당한 발파패턴을 선정하는 것이 보편적이다. 따라서 암 발파 공법의 발파 패턴의 경험식을 노천발파, 터널발파, 수중발파로 구분하여 정리를 하였다.

1.1 노천 발파 (Surface Blasting)

노천 발파는 일반적으로 2자유면의 벤치 형식으로 발

파를 시행한다. 벤치발파에 의한 암반 굴착공법은 굴착 대상지에 평탄한 암반(岩盤)을 형성한 후 천공장비로 70°~90°로 천공 후 계단식으로 굴착하는 공법으로 중요한 인자로는 벤치 높이, 폭, 길이 등을 고려하여야 한다. 벤치발파설계를 위한 가장 기초는 저항선을 선정하는 것이며, 저항선을 산출하는 변수는 매우 다양하게 나타난다. 발파 설계에서 저항선 선정을 중요시 하는 이유는 벤치발파설계의 재원은 저항선의 선정에서 시작되며 각 재원은 저항선과 특정 함수관계를 가진다. 보통 최소저항선을 구하는 방법에 따라 표 1과 같이 4가지 경험식으로 분류할 수 있다.

일반적으로 국내 암반의 경우는 Langefors, Konya의 경험식이 보편적으로 적용되고 있으며 상기의 경험식을 통해서 최소저항선을 산출하며 천공장, 공간격, 장약량 등의 세부적인 항목에 대한 설계는 일반 계산식에 의해서 실시한다.

그림 1의 계단식 발파에서의 천공단면도를 가지고 기타 항목에 대한 부분에 대해서 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 최소저항선 산출 경험식

제안자	제안 공식	범례	비고
O.Andersen	$B = \sqrt{dL}$	B = 저항선(ft) d = 천공직경(in) L = 천공장(ft)	
Langefors	$V = \frac{d_b}{33} \sqrt{\frac{P_s}{cf(\frac{E}{V})}}$	V = 저항선(m) db = 천공경(mm) P = 장전도(kg/m ³) s = 폭약중량강도 c = 암석계수 f = 파쇄도 E = 공간격	P : 1.0~1.6 s : 1.3(G/D) c : 0.45 f : 1(수직공) E : 1.25V C. J. Konya
C. J. Konya	$B = 3.15 De \sqrt[3]{\frac{SGe}{SGr}}$	B = 저항선(ft) De = 폭약경(in) SGe = 폭약비중 SGr = 암석비중	
S. O. Olofsson	$B_{max} = 1.47 \sqrt[3]{b}$ (1) $B_{max} = 1.45 \sqrt[3]{b}$ (2) $B_{max} = 1.36 \sqrt[3]{b}$ (3)	b = 장약집중도 (kg/m)	(1) : Dynamite (2) : Emulsion (3) : ANFO

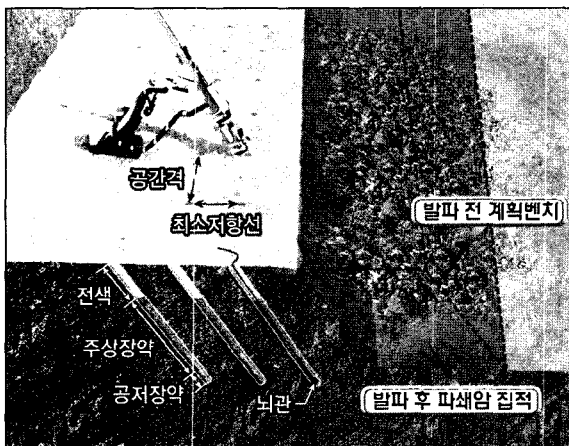


그림 1. 계단식 발파에서 천공단면도

이 산출한다. 따라서 실질적인 저항선 B는 식(5)과 같다.

$$E = \frac{D}{100} + 0.03 \times L \quad (4)$$

$$B = B_{max} - E \quad (5)$$

1.1.2 계단 바닥선의 아래부분의 천공깊이 (Sub-drilling, U)

뿌리깎기를 잘하기 위해서 보조천공(U)은 필수적으로 필요하며 식(6)과 같이 산출한다. 혹은 천공장이 긴 경우 최소 U=10D(D=천공경) 정도 유지하는 것도 좋다.

$$U = 0.03B_{max} \quad (6)$$

1.1.1 실질적인 저항선(Burden, B)

천공오차보정(E)은 착점오차(D/100)와 천공오차(0.03×L)를 고려하며, 착점오차는 일반적으로 천공경(cm)과 같고, 천공오차는 천공장의 단위m당 0.03m로 식(4)과 같

1.1.3 계단 높이(Bench Height, H)

계단높이(H)는 이미 형성되어 있는 지형을 이용하거나

목적에 따라 식(7)과 같이 천공경(D_e)에 60배를 한 높이로 형성하기도 한다.

$$H = 60D_e \quad (7)$$

1.1.4 천공장(Hole Depth, L)

천공장(L)은 수직 천공일 때 계단높이(H)와 보조 천공장(Sub-drilling(U))을 더한 값이며, 천공방향이 수직 방향과 θ 의 각을 이룬 경사 천공일 때 상기의 식(8)과 같이 산출한다.

$$L = (H + U) / \cos\theta \quad (8)$$

1.1.5 실제 천공간격(Practical Hole Spacing)

일반적으로 실제 천공간격(S)은 1.25B정도가 보편적이거나 계단높이(H)대 저항선(B)의 비(강성비), 제발 및 지발 발파로 구분하여 나타내며 표 2와 같다.

표 2 강성비와 기폭방법에 따른 공간격

구 분	H/B<4	H/B≥4
제 발 발 파	S=(H+2B)/3	S=2.0B
지 발 발 파	S=(H+7B)/8	S=1.4B

1.1.6 무장약 부분의 길이

(Uncharge Section, Stemming Length)

무장약 부분의 길이(h_0)는 메지길이와 동일한 의미이며 저항선과 일반적으로 같게 설계한다.

1.1.7 공저장약장(Height of Bottom Charge), 주상장약장(Height of Column Charge)

발파공 뿌리부분의 암석을 느슨하게 하거나 파쇄 시키기 위한 공저장약장(h_b)는 식(9)과 같으며, 생산을 위한 주상장약은 총 천공길이(L)에서 메지길이(h_0)와 공저장약장(h_b)을 고려한 식(10)과 같이 산출한다.

$$h_b = 1.3B_{max} \quad (9)$$

$$h_c = L - (h_b + h_0) \quad (10)$$

1.1.8 공저장약량(Weight of Bottom Charge), 주상 장약량(Weight of the Column Charge)

공저장약량(Q_b)은 공저장약장(h_b)에 공저 장약밀도(I_b)를 곱하여 식(11)과 같이 선정하며 주상장약량(Q_c)은 주상장약장(h_c)에 주상장약밀도(I_c)를 곱하여 식(12)과 같이 산출한다.

$$Q_b = I_b \times h_b \quad (11)$$

$$Q_c = h_c \times I_c \quad (12)$$

상기 식은 일반 대규모 노천발파에서 저항선, 공간격 및 장약량 등을 구하는 일반적인 방법이며, 상부 및 하부 장약량을 구분해서 계산을 하였지만 보통 현장에서 사용하는 이러한 구분 없이 장약량을 동일하게 하는 것이 보통이다. 또한, 진동절감 및 제어 발파기술인 NPS, NLD, 다단식 발파기를 이용한 다단식발파, 이완식 발파, 이분위 발파등 신공법이 발파기술자들에 의하여 개발되어 사용되는 사례도 있다.

1.2 터널 발파 (Tunnel Blasting)

계단발파는 2 자유면에서 행해지는 반면에 터널발파는 단일 자유면에서 행해진다는 것이 두 발파의 중요한 차이점이다. 터널발파는 암석이 상당히 구속된 상태이고 2차 자유면을 형성하면서 암석이 파쇄되어 자유면으로 부터 암석이 멀리 비산한다.

터널발파 영역은 심발영역, 확대영역, 외곽영역으로 그림 2와 같이 나눌 수 있으며, 터널 발파의 특징은 다음과 같다.

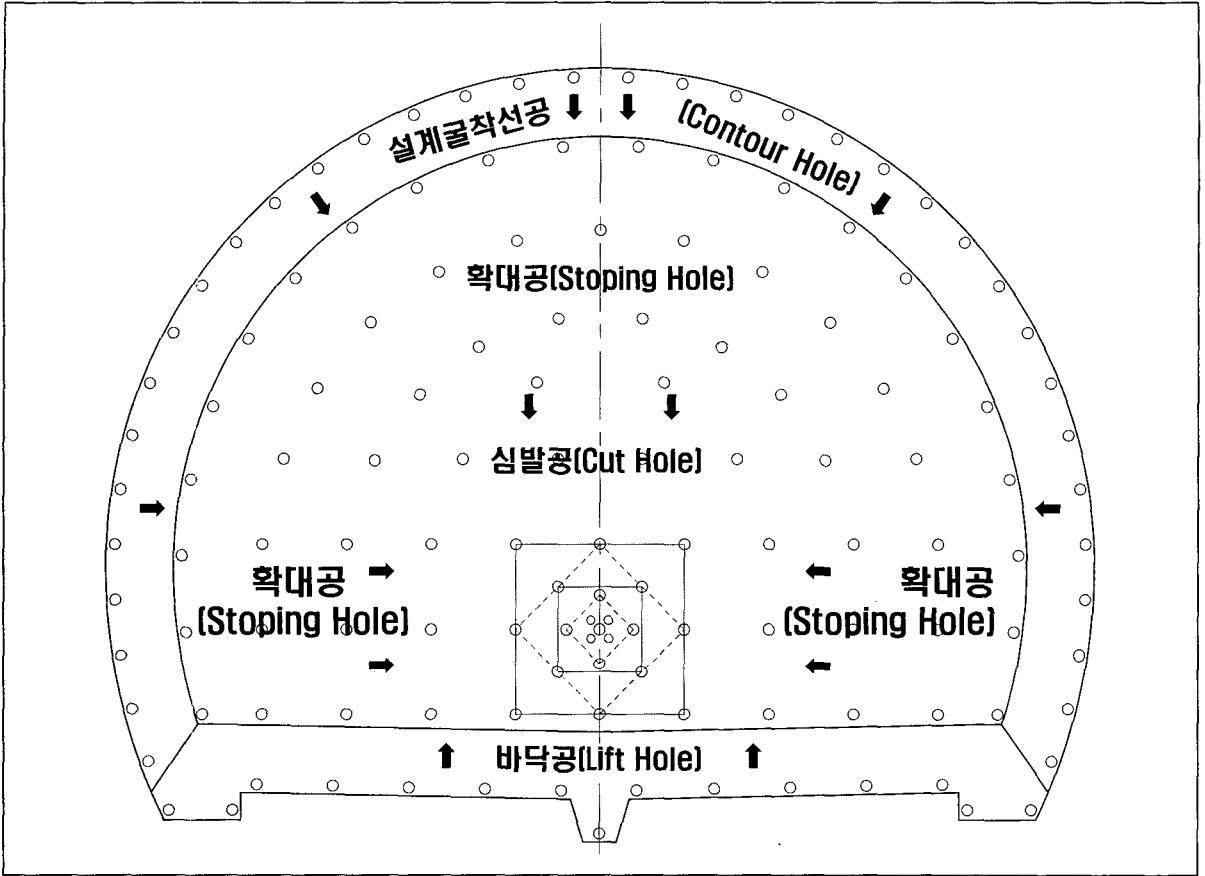


그림 2. 터널 발파 Layout

- 단일 자유면을 가진다.
- 심발발파(심빼기발파)를 통해 신규 자유면을 형성하여야 한다.
- 터널발파는 장약을 많이 하고 최소화항선이 짧다.
- 심발발파의 실패는 잔여부위 발파에 절대적으로 영향을 준다.
- 주변공(설계굴착공) 발파의 성패에 따라 터널의 안정성 및 경제성에 큰 영향을 미친다.
- 1회 굴진깊이는 발파능력 측면보다는 암반 고유의 지보능력에 따라 제한을 받는다.

1.2.1 심발공법의 개요 및 분류

발파에 의한 암석굴착시 가장 중요한 요소는 적절한 자유면(Free Surface) 확보이며 자유면 확보를 위하여 최초 발파하는 것을 심빼기 발파라고 하며 터널굴착의 성패 여부(굴진율, 파쇄도, 진동발생 수준 등)를 좌우한다. 터널 진행방향 중심축에 대한 천공각도 유무에 따라 경사심발(Angle cut)공법과 평행심발(Parallel Cut)공법으로 구분되며, 평행 심발공법은 다시 무장약공과 장약공의 천공 직경 크기에 따라 Burn cut과 Cylinder cut으로 세분된다. 또한 경사 심발공법은 암석강도, 설계 굴진장 및 진동

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(II)

표 3. 심발공법 특징




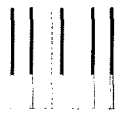
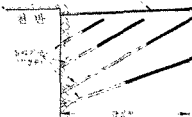

구분	경사공 심빼기(Angle cut)	평행공 심빼기(Parallel cut)		
장점	<ul style="list-style-type: none"> 굴진장 2.0m 내외에서 평행심발공법 대비천공시간 단축효과 발휘 보조심발(Baby cut)적용으로 진동저감 가능 심발부 파쇄압편의 크기가 크므로 비산거리 단축 천공이 용이하여 천공기사 선호 	<ul style="list-style-type: none"> 1 발파당 굴진장 증대 및 터널 폭에 제한받지 않음(장공발파 및 소단면터널 유리) 장공발파나 경암발파에 효율성 증대 천공위치 선정 시간 단축 확대공 발파시 저항선 설정 용이 무장약공 및 1공씩 지연발파시행으로 발파진동 경감 파쇄압편의 크기가 작으며 버력이 막장주위에 집중 집적되어 버력처리 효율 증대 		
단점	<ul style="list-style-type: none"> 각도천공에 의해 실굴진장 단축으로 천공효율 저하 장공 발파시 대형 공간거리가 멀어 저항증대로 대과발생 및 진동관리에 불리 지발당 장약량 증대 (대칭공 제발발파) 터널규격에 제한을 받으나 대단면 터널에서는 무관 	<ul style="list-style-type: none"> 정밀 천공기술 요구 (심발공 천공간격 좁음) 심발부 천공수 증가에 따른 천공시간 증대 심발공 채석용적이 적어 전체 폭약 사용량 증대 단공에서는 경사공심빼기 보다 효율저하 심발영역 잔류공에 의해 차기 천공위치 설정 제한 강력한 폭약 사용시 소결현상 발생 		
개요도				
	Double V-Cut	V-Cut	Cylinder-Cut	Burn-Cut
특징	<ul style="list-style-type: none"> V-cut와 동일하나 진동 감소, 굴진 효율 증대, 심빼기 신뢰성 향상을 위해 소규모 보조 Cut 추가 	<ul style="list-style-type: none"> 가장 오랜 공법 중심선 기준 대칭 천공각도: 60~70° 천공장은 터널 폭에 영향받음 	<ul style="list-style-type: none"> Burn-cut에서 진보된 공법 진동제어 유리 고속 장공발파 적합 숙련공 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 자유면에 수직천공 소단면터널에서 소형, 경량 착암기로 장공발파를 위해 개발된 공법

표 4. 신기술 심발공법 특징

구분	경사공 + 평행공 심빼기 (Supex-Cut)	대구경 무장약공들과 선균열에 의한 터널의 심빼기 방법	선균열과 상부심빼기를 이용한 환경 친화적 터널발파공법	다중 심발공에 의한 V-Cut 다단장약발파방법
개요도				
특징	<ul style="list-style-type: none"> 심발부 최소저항선 다단계 분할 발파 터널축에 평행천공 + 각도공 천공 (천공길이 다양) 	<ul style="list-style-type: none"> 대구경 무장약공을 동심원으로 배열하고 심빼기 공에서 선균열을 이용 지름이 650mm되는 대구경 공으로 시추를 실시하여 인공적으로 자유면을 형성 심발부에서 선균발파에 의한 진동 감소 및 굴진 효율을 증대시키는 방법. 	<ul style="list-style-type: none"> 심빼기부분 천반부 위치 시키고, 심빼기부분 주변 선균열 (Pre-splitting) 발파 후 설계굴착선공 선균열 발파를 실현하여 일(-)방향 영역분할방법 적용한 공법으로 진동, 소음·발파풍 발생억제 및 소멸시키는 발파 메커니즘 	<ul style="list-style-type: none"> 보조심발공과 같은 깊이로 심발공과 확대공을 다단장 약하여 먼저 보조심발공을 발파하여 신자유면을 형성 자유면 상태를 넓게 유지한 후 암반 구속력이 큰 심부에서 최소저항선이 짧게 되어 발파 효율이 증대

제어 수준에 따라 보조심발공(Baby cut)적용이나 3열 4열 경사 천공법으로 구분된다. 표 3은 일반적인 심발공법별 특장을 소개하였다.

최근 심발공법의 중요성이 대두되어 국내에서 발파효율을 극대화하며, 진동, 소음을 줄이는 새로운 심발공법이 개발되어 소개되어지고 있다. 표 4는 국내 새로 개발되어진 심발공법의 신기술을 간략히 소개하였다.

1.2.2 심발공법 선정 방법

터널발파설계는 우선적으로 심발공법을 선정한다. 심발공법은 암반 등급 및 터널의 형상, 단면과 밀접하게 관련 되며 표 5와 같이 암반과 터널의 폭에 따라 선정한다.

또한 주요 고려 사항은 시공성 및 발파효율을 극대화 할 수 있는 공법과 환경성을 감안하여 선정을 하여야 한다. 앞에서 기술한 바와 같이 최근 효율적인 신기술 심발공법이 적용되는 경향도 있으나 본 자료에서는 표 6과 같이 일반적으로 암반등급별 적용되는 심발공법인 평행공과 경사공 심발공법으로만 적용하는 예를 기술하였다.

1.2.3 확대공 영역의 발파설계

최초 단일 자유면에서 심발 발파에 의한 신자유면을 확보하여 2자유면 상태에서 터널의 확대를 위한 부분으로 세부적으로는 심발확대영역, 하부확대영역, 상부확대영역으로 구분된다. 지발단수는 주변현황에 따른 발파공해

표 5. 암반등급 및 터널 형상, 단면의 구분에 의한 심발공법 선정

구분	평행 심발공법	경사 심발공법
암반 등급	<ul style="list-style-type: none"> •막장 암반이 경암 이상인 구간 •천공장이 2.4m 이상인 구간 •발파 Type - 1, 2 	<ul style="list-style-type: none"> •막장 암반이 보통암 이하인 구간 •불연속면이 발달되고 파쇄대가 존재하는 구간 •천공장이 2.4 m 미만의 굴착패턴 구간 •발파 Type - 3, 4, 5, 6
터널의 형상	<ul style="list-style-type: none"> •터널 폭에 제한이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> •경사천공을 위한 터널 폭 확보가 요구

표 6. 암반등급별 심발공법 적용 (예)

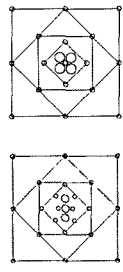
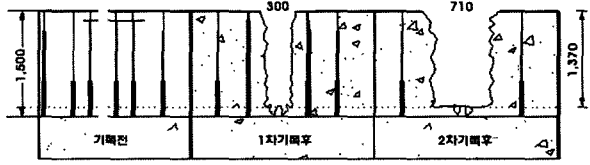
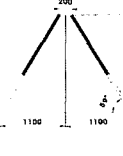
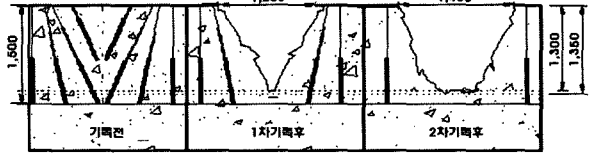
암반등급	천공배치도	단면 A-A
Type - 1		
Type - 2		
Type - 3		
Type - 4		
Type - 5,6		

표 7. 확대공 영역의 장약량 계산

구분	계산	구분	계산
S_s (공간격)	$0.5W_{last}$	h_b (하부 장약길이)	$1/3 H$ (천공길이)
B_s (저항선)	$1/1.1 S_s$	h_0 (전색길이)	$0.5B_u$
B_u (저항선)	B_s	h_c (상부 장약길이)	$H - (h_b + h_0)$
S_u (공간격)	$1.2B_u$	Q_b (하부 장약량)	$L_b \times h_b$
L_b	공저 장약 밀도(kg/m)	Q_c (상부 장약량)	$L_c \times h_c$
L_c	주상 장약 밀도(kg/m)	Q (총 장약량)	$Q_b + Q_c$

확대공의 장약량 : 심발공 마지막 사각형의 한 변의 길이와 관계하여 장약밀도를 계산

s : 심발부 측면 (side)

u : 심발부 상부 (upper)

의 영향권분석으로 허용 지발당장약량으로 조합단수가 결정되나, 일반적으로 양쪽이 대칭되게 하는 박스형 기폭 시스템이나, 동심원 기폭시스템으로 적용한다. 상부확대 영역은 평행 천공으로 자중에 의한 파쇄를 나타낼 수 있으므로 구속성이 심발영역 보다는 적게 작용하며 약 20% 정도의 적은 비장약량이 적용된다. 심발확대영역은 심발 공법에 따라 평행 천공 및 경사 천공이 이루어지며 하부 확대영역은 암석을 상부로 들어올려 확개를 원활히 하기 위하여 비 장약량은 상부확대영역 보다 약15%정도 증가 된다. 따라서 Konya 및 Ash 제안식 (13)과 같이 최소저항선을 선정하여 표 7과 같이 심발확대공의 장약량 계산을 한다.

$$W_{last} = 0.12 \cdot \left(\frac{D}{100}\right) De \quad (13)$$

여기서, SGe : 폭약의 가비중이고, SGr : 암석의 비중이며, De : 폭약의 직경이다.

1.2.4 외곽공 영역의 발파설계

외곽영역은 터널의 단면을 미려하게 파단 시키기 위하여 조절발파 전용 폭약인 정밀폭약(FiNEX)을 사용하여 스무스블라스팅(Smooth Blasting)공법을 적용한다. 일반적으로 외곽공과 외곽전열공의 저항선과 공간격비는 0.8로 되며 그림 3과 같이 나타낸다. 지발단수는 발파공

해의 영향권분석에 따라 허용 지발당장약량에 따라 단수가 결정되나, 일반적으로 미려한 단면을 얻기 위해서는 제발발파를 적용하는 것이 좋다. 암반등급에 따라 암반이 완영역을 고려하여 저항선과 공간격을 적절하게 설계를 하여야 하며, 매끈한 파단면을 얻기 위하여 인장파괴이론과 접목을 한 Giorgio 식(Lelio Stragiotti(Millino1990))를 사용하여 공간격은 식(14)으로 저항선은 식(15)으로 비장약량은 식(16)과 같이 구한다.

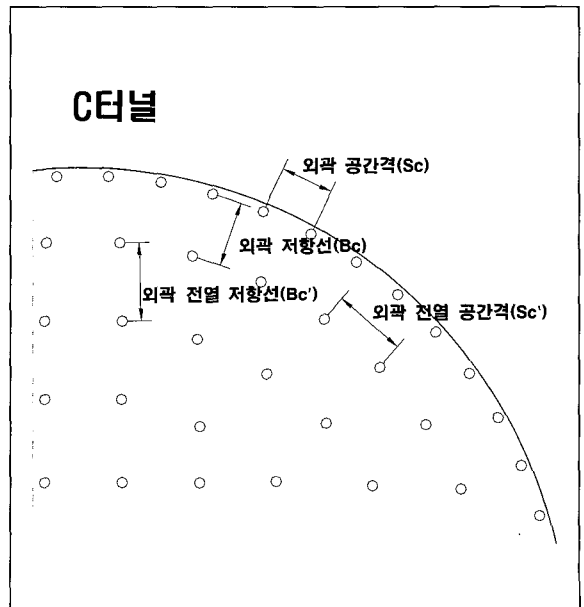


그림 3. 외곽공 및 외곽 전열공의 공간격과 저항선

표 8. 암반등급에 따른 외곽공 설계 제원(예)

구분	암반 등급					
	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4	Type-5	Type-6
천공장(m)	3.8	2.7	2.2	1.6	1.3	1.1
외곽공간격(m)	0.65	0.65	0.6	0.6	0.55	0.55
외곽공수	36	36	39	29	33	33
외곽저항선(m)	0.8	0.8	0.75	0.75	0.7	0.7
외곽전열공수	22	22	24	20	22	24
공간격비	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
외곽공 장약량(kg)	1.35	0.9	0.525	0.45	0.325	0.225
외곽전열 장약량(kg)	2.25	1.5	1.0	0.5	0.375	0.225

$$S_c = \Phi_r + \left[\frac{(\Phi_e) \rho_e P_s \Phi_r}{\sigma_{tr}} \right] + 0.03 \times L \quad (14)$$

$$B_c = 0.8 S_c \quad (15)$$

$$C''' = \frac{PPF}{S_c B_c} \quad (16)$$

여기서, P_s 는 발파 하중(kg/cm^2)이며, σ_{tr} 은 암반의 인장 강도(kg/cm^2)이고, Φ_r 는 천공경 Φ_e 는 장약경이고, ρ_e 는 화약의 비중이다. 비장약량 (C''')에서 PPF는 FiNEX의 선형 장약량으로 0.22로 적용을 한다.

설계된 면적을 보유하여 다음 Round의 천공장비 운용을 위해 공간을 충분히 허용하기 위하여 주변공은 Look out이 필수적으로 발생하는데 "look-out"의 기준 값으로서 천공장 1당 3을 더한 값을 초과하지 않아야 하며, 이는 터널의 설계단면이 좁아지는 것을 방지하기 위하여 외곽공을 약 2°~4° 정도 경사지게 천공하여 발생하는 것이다. 이때의 실천공 길이(H)와 Look out에 의한 천공 길이(L_o)는 식(17)과 같다.

$$L_o = 0.1 + H(\tan (2^\circ)) \quad (17)$$

여기서, L_o는 실 천공길이(m) 이며, H는 가천공장(m)

이다.

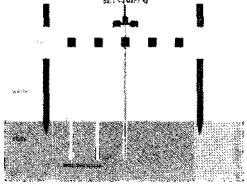

일반적으로 외곽공에서 RMR 분류에 의한 암반등급에 따른 발파제원은 표 8과 같다.

1.3 수중 발파 (Underwater Blasting)

수중 발파 방법에는 표 9와 같이 크게 수중천공발파 (Drilling & Blasting Method)와 수중부착발파(Delaying Method)로 구분된다. 앞으로의 수중 발파로서 주력을 차지하는 것은 수중천공 발파법이며, 가장 효과적인 발파도 물론 천공발파법이다. 수중발파의 경우 충분한 파쇄와 전색계수를 보완하기 위해서 비장약량을 수정하여 사용하며, 1자유면 발파의 경우에는 비장약량을 수정치에 약 40~50% 증가 시켜야 한다. 그리고 수심이 5.0이상일 경우 한 공당 뇌관을 2개 결선하여 불발을 줄여야 한다.

- 공간격이 짧은 수중발파에서 사압으로 불발 잔류약 발생이 예상되므로 예멸전 폭약을 사용하지 말고 사압의 영향이 적은 다이너마이트 폭약을 방수 처리하여 사용 함
- 일반적으로 계단식 발파에서 경암의 경우 충분한 파쇄를 위해서 비장약량이 0.5kg/m³ 정도 필요하나 수중발파의 경우 두공 중 하나 정도 불발이 발생할 것

표 9. 수중발파 공법별 구분

구분	수중천공발파 방법	수중부착발파 방법
개요도		
개요	Barge를 이용하여 천공 및 장약작업 수면위에서 주 작업	암반에 화약을 부착 후 발파 수중에서 주 작업
장점	동일 약량으로 1회 발파 파쇄량 증대	깊은 심도구간 및 조류가 빠른 곳에서 적용가능
단점	천공의 조절과 오차조절 난이 천공시간 길어질수록 발파공 유지 불리	높은 비장약량 요구 10kg폭약으로 연암에서 0.9m 굴착

으로 가정하여 비 장약량을 1.0kg/m³로 함

- 경사공의 경우는 비장약량을 1.0kg/m³로 하나, 수직공의 경우는 파쇄가능성을 높게 하기 위해서 비장약량을 10% 증가시킴
 - 수압을 보정하기 위해서 수심 m당 0.01kg/m³의 비장약량을 증가시킴
 - 진흙으로 암반이 덮여있는 경우, 진흙층의 두께 m당 0.02kg/m³의 비장약량을 증가시킴
 - 암석층을 보정하기 위해서 계단높이 m당 0.03kg/m³의 비장약량을 증가시킨다. 따라서 비장약량은 경사공과 수직공에 따라 식(17), (18)과 같이 계산할 수 있다.
- 경사공 = 1.00+0.01×수심(m)+0.02×진흙두께(m)+0.03×계단높이(m) (18)
- 수직공 = 1.10+0.01×수심(m)+0.02×진흙두께(m)+0.03×계단높이(m) (19)
- 공간격(S)과 저항선(B)은 같고 초과천공장(U)은 저항선과 같거나 최소한 0.8m되어야 함
 - 천공깊이(L)는 계단높이(H)+초과천공장(U)이고 전색부분은 저항선의 1/3정도 하며 최소한 0.5m 이상은 되어야 함
 - 수중작업의 특성상 누전에 의한 오폭방지를 위하여

전기적 안전성이 상대적으로 떨어지는 전기뇌관보다 비전기뇌관을 적용 함

- 각선 절단에 따른 불폭 잔류약 방지를 위하여 1공에 2개의 기폭약포를 적용 함

2. 발파설계를 위한 시험발파방법

2.1 시험발파 개요

발파설계 단계에서 문헌이나 자료조사에 의한 정성적인 데이터 확보보다 정확한 설계인자를 산출하기 위하여 시험발파를 실시한다. 시험발파는 설계인자를 정확히 확보하여 발파현장 특성을 반영하고 공사비 절감과 효율적인 발파를 설계하기 위하여 실시한다. 시험발파로 얻어진 DATA는 진동 및 소음으로 인한 피해영향권분석과 대상암반에 적합한 적정화약량 산출을 위한 계수 선정과 발파공법의 적합성 판단 등의 자료로 활용한다. 따라서 발파목적에 맞는 적절한 시험방법을 계획, 수립하여 실시하여야 한다.

2.2 시험발파 분류

시험발파는 표 10과 같이 분류되며 진동의 영향권을 분

석하기 위한 시추공발파(Bore-hole blasting test), 대상 암반에 대한 표준 장약량을 산출할 수 있는 누두공발파(Crater test), 대상 암반과 동일한 암종에서 동일한 case로 발파공법을 선정하기 위한 실 규모 발파(Actual dimensions blasting test), 특정한 목적(설계제원 및 인자)을 선정하기 위한 요소발파(Important factor blasting test)등으로 구분할 수 있으며 구조물의 용도 및 중요도에 따라 시험방법을 선택적으로 적용한다.

2.3 시추공 발파(Bore Hole Blasting Test)

2.3.1 시험 개요

시추공을 대상으로 암반의 상태에 따라 진동 전파 특성을 얻기 위하여 발파를 실시하여 암반의 특성(암종, 강도)과 발파 특성(발파 형식, 자유면수)에 따른 발파진동 상수 (k, n)를 산출하여 발파진동 추정식에 따른 영향권 분석을 하기 위한 시험방법이며 수행 절차 및 작업현황

은 표 11과 같다.

2.3.2 결과 분석 및 설계 적용

시추공발파는 무자유면에서 시행하는 발파로 자유면수에 따른 발파 진동 수준의 보정이 요구되며, 적용 화약류에 따른 진동 수준의 보정과 필요시 암종 변화에 따른 진동 수준의 보정을 하며, 통계적인 이론에 근거하여 R2 값이 0.8이상인 회귀분석을 적용하여 표 12와 같이 추정식을 선정하여 영향권 분석을 한다.

2.4 누두공 발파(Crater Test)

2.4.1 시험 개요

현지 계획 노선상에 위치하는 암종을 대상으로 누두공 발파를 실시하여 누두 반경을 계측하여 누두지수에 따른 표준 장약을 선정하고, 이때 암반의 등급에 따른 암석 수 정계수를 선정하고, 장약 집중도에 따른 암반 손상 범위

표 10. 시험발파 종류 및 용도

구분	시추공 발파	누두공 발파	요소 발파	실규모 발파
방법	계획노선 상에 천공된 시추공을 이용하여, 장약량과 심도를 달리하여 수회의 발파를 실시, 진동을 측정, 분석하여 진동상수 획득	계획노선 상의 노출된 암반을 이용하여 암반에 파괴 시킬 수 있는 정도의 폭약량을 기폭시켜 표준장약량을 산정	계획노선 주변의 채석장 또는 공사현장에서 동일한 암종을 대상으로 실 설계에 적용할 요소 시험을 실시	계획노선 주변의 채석장을 대상으로 실규모 발파를 실시하여 파쇄도 및 진동·소음 등을 측정, 분석
발파 심도	수십m 이내	1m 이내	1~2m 이내	3~12m 이내
파쇄효과 확인	불가	가능	일부가능	가능
소음감쇠 경향	분석곤란	가능	가능	가능
용도	진동영향 상수 획득	표준장약 상수 획득	계획의 적합성 분석	진동, 소음, 파쇄도, 비장약량 등 전반적인 발파설계 인자획득
문제점	<ul style="list-style-type: none"> 시추공내에서 발파가 실시되므로 화약의 에너지가 전부 진동치로 변환되어 나타날 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 비산방지대책 수립 암반 노출부가 없으면 시험 곤란 풍화정도에 따라 상수가 달라질 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 비산방지대책 수립 계획노선과 동일한 암반 조건을 찾아야 됨 설계 전 적용계획을 확정해야 됨 	<ul style="list-style-type: none"> 시험대상지 섭외곤란 시험비용 과다
적용	터널 및 노천	터널 및 노천	터널 및 노천	터널 및 노천

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(II)

표 11. 시추공 발파 수행 절차 및 작업 현황(예)

발파심도의 암반조건 / 1th BLAST(Depth 33.0m)														
지층명	주상도	심도 (m)	두께 (m)	S.P.T (N/cm) T.C.R (%)	기술	암질				절리간격			시험발파 Emulsion EXP. Ø 50mmX0.2kg	
						RQD (%)	D'	S'	F'	그림	CM.			AVG
										MAX	MIN	AVG		
경암	+ + + + + +	32 33	2.0	100	경암(24.0~36.0m) - 화강암질편마암 - 암녹색-암회색 - 조립질 - 산선-매우강암 - 괴상-약간균열 - 부분적으로염수변질작용(흑니석화)	82	1	1	2	32	98	3	60	
			2.0	100	98	1	1	2	33	90	1	50		

개요도 실시현황 계측기 설치 현황



- 사용 계측기 대수
- Blastmate: 6대
- 계측기간 설치거리(B)
- 10m / DATA 분산을 위해 계측기간 설치거리를 순차적으로 조절하여 설치함
- 계측기간 설치거리, 심도를 고려하여 수진기 까지의 거리 L을 산출

표 12 회귀분석에 의한 진동 추정식 산출

진동 추정식		분석내용	발파영향권 분석
50% 신뢰도	$V = 160.13 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.63}$		
95% 신뢰도	$V = 213.70 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.63}$		
표준편차(Se)	0.231		
결정계수(R2)	0.86		

추정식을 산출한다.

이에 따라 누두공 발파는 계획부지내의 현지 암반이 노출된 노두를 대상으로 발파를 실시하여 발파설계에 필요한 암석항력계수(g)를 얻는다.

2.4.2 누두공 시험발파에 대한 기초 이론

누두공(Crater)은 폭파로부터 생기는 원추형의 구멍으

로, 누두공 반경을 R(m) 최소화항선은 W(m)이라 할 때 R/W를 누두지수(n)라 하며, 표 13과 같이 누두지수 n이 1보다 큰 경우를 과장약이라 하고 1과 같은 경우를 표준 장약이라 하며, 1보다 적은 경우를 약장약이라 한다.

이는 발파의 목적에 따라 과장약이 설계 되어야 할 때가 있으며 약장약 또는 표준 장약으로 설계가 되는 경우가 있다.

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(Ⅱ)

표 13. 누두지수에 따른 장약 상태 분류와 발파 목적별 형태

구분	과장약 n > 1	표준장약 n = 1	약장약 n < 1
발파 목적 및 형태	터널발파 골재 생산 발파	일반 건설 발파 조절 발파	제어 발파 도심지 발파

표 14. 누두공 시험 결과 분석



- 누두공 시험에 따라 최소 저항선과 장약량을 알고 발파 후 누두 반경을 획득하여 누두지수를 획득하여 하우저 식에 대입하면 암석 항력 계수를 다음과 같이 계산할 수 있다



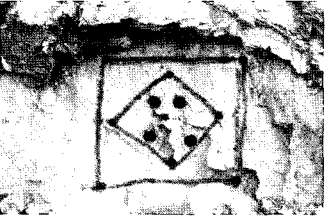

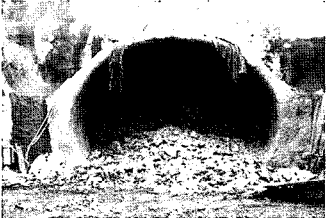

$$g' = \frac{L}{f(n) \cdot e \cdot d \cdot w^3}$$

- 이때 가장 중요한 것은 누두지수에 따라 암석항력 계수를 발파용이도(BI)에 따라 암석 수정계수를 산출하는 것이다

표 15. 여굴제어공법 선정을 위한 요소 시험발파(예)

구분	TEST - 1	TEST - 2	TEST - 3	TEST - 4
적용 공법	Smooth Blasting		Pre-Splitting	
	45mm	45mm	45mm	45mm, 75mm
시험 결과				
HCF	71.86%	61.43%	51.08%	24.89%
파쇄도	50cm 이하	50cm~80cm	50cm~60cm	50cm~90cm
보조천공	무장약공	-	45mm 무장약공	75mm 무장약공
설계적용	◎			
중점 고려사항	<ul style="list-style-type: none"> • 외곽공의 저항선과 공간격비를 0.8로 고정시키고 무장약공과 기폭방법에 따른 발파 효과를 검토함 • 퇴적암에서 기폭 방법 차이에 의한 효과를 검증하기 위하여 2개의 기폭 방법으로 시험 실시 • 무장약공의 효과 검토 • 암반등급별 요소 시험 결과에 따른 설계반영 			
선정사유	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-Splitting 기폭 방법은 퇴적암의 특징(층리)상 가스압이 전단 효과를 발생시키지 못하여 효과가 감소됨 • Test-1, 2에 의해 무장약공의 효과를 검토한 결과 무장약공 천공시 여굴제어에 탁월한 효과 발생 • HCF 조사 결과 Test-1(Smooth Blasting, 무장약공 천공)이 여굴제어에 가장 효과적인 것으로 검토됨 • 2자유면 시험발파 결과 Smooth Blasting 공법 적용과 무장약공 천공이 퇴적암 여굴제어 발파에 가장 효과가 클 것으로 검토되어 여굴제어 설계에 적용함 			

표 16. 심발공법 선정을 위한 실규모 시험발파(예)

구분	평행심발공법 (Parallel Cut)		
	2 Hole Cylinder	3 Hole Cylinder	4 Hole Cylinder
개요도			
환산 직경	144.2mm	176.7mm	204.0mm
적용 폭약	Dy 32 mm	Dy 32 mm	Dy 32 mm
천공장	2.20m	2.20m	2.20m
발파 결과			
파쇄도 max	< 30cm	< 25cm	< 20cm
굴진장	1.95m	2.03m	2.15m
평균굴진율	92 %	93%	96%
천공 시간	25 min	35 min	40 min
분석 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 굴진율 측면 : 4 Hole Cylinder cut > 3 Hole Cylinder cut > 2 Hole Cylinder cut • 파쇄도 측면 : 4 Hole Cylinder cut > 3 Hole Cylinder cut > 2 Hole Cylinder cut • 시공적 측면 : 2 Hole Cylinder cut > 3 Hole Cylinder cut > 4 Hole Cylinder cut • 경제적 측면 : 2 Hole Cylinder cut > 3 Hole Cylinder cut > 4 Hole Cylinder cut • 암반등급 3 TYPE에서 심발공법 적용은 계획 굴진율90%를 달성하며 시공성 경제성에 만족하는 2 Hole Cylinder cut 을 적용 		

하우저의 폭발식 $L = CW^3$ 에서 발파 계수 C 는 $f(n) \cdot g \cdot e \cdot d$ 표시되며, 여기서 $f(n)$ 은 누두지수 함수는 덤브럼(Dambrum)식으로 $f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3$ 이며, g 는 암석 항력계수, d 는 전색계수, e 는 폭약의 위력계수로 나타낸다.

2.4.3 누두공 시험발파에 따른 결과 분석

누두지수(n)와 누두지수함수(f(n))와 누두지수함수의

역수(1/f(n))와의 상관관계는 표 14와 같으며 누두공 시험을 통하여 암석 항력계수를 산출한다.

2.5 요소 시험발파

(Important Factor Trial Blasting)

2.5.1 시험 개요

실규모 스케일이 아닌 소규모 스케일로 발파설계를 위

한 기초제원 및 발파설계 인자를 획득하기 위하여 특정 요소 항목(기폭방법선정, 화약선정, 최적 발파공법 선정, 발파에 따른 암반의 이완범위계측 등)을 정하여 시험을 실시하는 발파를 말한다.

2.5.2 화약 선정을 위한 요소 시험 발파

퇴적암반에서의 여굴 제어공법 선정을 위해 저항선을 고정시키고 공간격에 변화를 주어 저항선 공간격비에 따른 발파 효과를 확인하고, 기폭 방법을 변화시켜 최적 공법을 선정하기 위하여 요소 시험발파를 시행하여 설계 계획 노선과 동일한 인근 지역에서 표 15와 같이 시험을 시행하여 최적 여굴 제어공법을 선정한다.

2.6 실규모 시험발파 (Actual Dimension Trial Blasting)

2.6.1 시험 개요

실규모 시험발파(Actual Dimensions Trial Blasting)란 설계시 가정한 굴착공법의 타당성 여부를 판단하기 위하여 현지암반을 대상으로 설계도에 준한 천공 및 장약을 하여 발파결과(심패기공법의 적정성, 여굴발생 상태, 계획 굴진장 달성 여부, 파쇄암편의 크기 및 비산거리, 천공수의 적정 여부, 폭약량의 과소 등) 및 발파공해의 영향권을 분석하여 현장조건에 적합한 발파공법을 선정하기 위해 실시하는 발파를 말한다.

2.6.2 심발 공법 선정을 위한 실규모 시험발파

소정의 굴진율(90% 이상) 확보를 위해서는 최적 심발 공법 선정 여부가 최대 관건이므로 실규모 시험발파를 통한 효과 검증 및 과다설계 방지하기 위하여 지반조건을 고려하여 설계 계획 노선과 동일한 인근 지역에서 표 16과 같이 시험을 시행하여 최적 심발공법을 선정한다.

3. 발파 현장별 문제점에 따른 개선사항

3.1 발파현장 기술지원 사례분석

발파 설계 시 발파설계조건인 현장의 암질이나, 주변여건 등을 고려하여 설계를 실시하여야 하나, 충분한 발파설계 조건이 고려되지 않아 설계 후 발파시공현장에서 민원 발생에 따른 공사기간지연과 굴착 효율 저하가 발생하고 있다. 이에 따라 경제적인 손실을 초래하여 발파 공법 및 패턴에 대한 설계 변경이 빈번히 발생되고 있는 실정이다. 실례로서 발파현장에서의 문제점을 당사에서 실시한 지난 2004년부터 2005년 5월까지 현장 기술지원 사례를 통하여 표 17과 같이 분석한 결과 발파공법 및 패턴설계의 기초가 되는 폭약류 및 뇌관류의 부적절한 선정에 의한 사례가 전체의 55%로 절반이상을 차지하였다. 따라서 발파설계에서 발파현장 특성이 고려된 화약류 선정이 가장 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

3.2 발파 현장별 개선사례

터널, 노천, 수중 발파에서 수행한 발파현장 기술지원 사례를 바탕으로 화약류의 부적절한 선정과 부적절한 발파공법 및 패턴 선정, 화약류 사용상 문제 및 기타 문제점에 따른 개선 사항 중 대표적인 사례를 선정하여 발파설계 시 현장 특성을 반영한 최적 발파설계를 실시할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

3.2.1 터널 발파현장 개선사례

① 00터널 공사현장

터널구간의 대부분이 경암(1,121~1,800kg/cm³) 이상의 암반(석영반암)으로 형성되어 있으며 일부구간 피압대수층을 이루고 있는 구간이 존재하여 다량의 갱내 용수와 토사의 유출로 인한 문제가 제기된 현장이나, 발파설계는

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(II)

표 17. 발파현장 기술지원 사례 분석

구분	사례	세부사항	건수	(%)	구분 항목별 분포도
A	폭약류 부적절한 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 암반특성에 적합하지 못한 폭약 선정 • 취급 및 사용이 용이하지 못한 경우 • 파쇄효과 및 입도 분포가 불량 • 잔류암반의 손상영역이 과도한 경우 • 내수성 및 안전성에 문제가 있는 장소 	21	34	
B	뇌관류 부적절한 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 낙뢰발생 빈도가 높은 지역 • 수중발파시 전기뇌관 사용 • 소음문제가 야기되는 장소 • 터널내 용출수가 문제되는 장소 • 경제성을 고려하지 않은 경우 	13	21	
C	암파쇄 공법의 부적절한 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 시공성 및 공기등을 고려치 않은 경우 • 현장 암질을 고려치 않은 경우 	8	13	
D	화약류 사용상 문제	<ul style="list-style-type: none"> • 작업자들 사용상의 문제 • 화약류에 대한 이해 부족(불발원인) 	12	19	
E	기타 천공등 문제	<ul style="list-style-type: none"> • 과도한 천공오류 등에 의한 문제 • 후가스 문제 • 작업 Cycle 개선 등 	8	13	
합계			62	100	

표 18. 문제점 및 개선 사항

구분	현황 현황 및 문제사항	개선사항
폭약 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 주폭약 ANFO 적용(ANFO : 66%) • 용수발생 상황시 수압으로 ANFO폭약을 장전공에서 밀어내는 현상과 내수성이 약해 물에 녹아 불폭현상 발생 • 전용장전기 적용 및 장약량 조절 곤란 • 후가스(CO, NOx) 과다발생으로 작업환경 저해 	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 총 연장중 발파패턴 2,3이 차지하는 비율은 86.8%(원안기준)로서 전단면 경암터널에 ANFO폭약을 적용시 굴진을 저하를 초래하므로 경암구간의 경우 MegaMITE I 적용 • 보통암 이하 발파패턴 4~6Type의 경우 NewMITE I 적용
뇌관 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 터널작업의 특성상 전기적 위험성 상존. • 당 지역의 낙뢰 및 뇌운(雷雲)발생 비율이 전국 평균치를 상회하고 있으나, 전기뇌관사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 미주전류 및 전기적 충격에 안전한 비전기 뇌관으로 변경 • 무한 단차로 진동 제어 가능 및 결선작업시간 단축

ANFO와 Emulsion 폭약의 혼합 장전과 전기뇌관이 주요 기폭시스템으로 되어, 굴진효율 및 시공성이 저하된 현상이다. 표 18과 같이 1~3Type(경암 이상)구간에는 MegaMITE를 적용하고, 4~5Type(보통암 이하)은 NewMITE을 적용하였으며 기폭시스템은 전기뇌관에서 비전기 뇌관으로 변경하였다. 변경결과 굴진효율증대 및 작업 Cycle 개선에 따라 경제성(총 굴착비용)은 15% 절감

하였으며, 시공성은 25% 개선되었으며, 미주(누설)전류 안전성을 중점사항으로 판단하여 비전기뇌관을 적용하여 결선작업시간을 단축하였다.

② 00터널 도로공사 공사 현장

산악지역에 위치한 터널이고, 안산암과 응회암이 주를 이루는 지역으로 암반 강도(300~1100kg/cm²)에 따라 화약

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(Ⅱ)

의 종류를 고려하지 않고 일괄적으로 MegaMITE I을 적용하여, Type3~6(연암 이하)의 암반에서 여굴 발생, 진동 증가 등의 문제가 표 19와 같이 제기되었다. 따라서 암반의 강도에 따라 NewMITE I 폭약으로 변경 적용한 결과 여굴 방지 및 평활한 굴착선이 확보되어 슛크리트 타설량은 12% 감소되었으며, 총 굴착비용은 13% 절감되었다.

③ 00-00 건설공사현장

대상지역의 암반(화강암)의 역학적 특성중 일축압축강도가 1,100kgf/cm² 이고 절리가 발달하지 않은 경암지역에서, 심발공법은 경사형인 V-Cut과 주폭약은 NewMITE Plus I으로 설계가 되어있는 현장이다. 그러나 절리가 없는 암반의 특성으로 천공의 오차가 발생되면 심발영역에서 2자유면을 제대로 형성시키지 못하여 굴진효율이 떨어졌다. 따라서 천공의 오차를 줄이기 위하여 천공 전 마킹 작업과 각도 유지를 하기 위하여 각도 지시작업자를 배치

하였음에도 지속적으로 굴진효율이 저하되어 심발부에 주폭약을 MegaMITE I으로 변경하여 천공오차가 있더라도 최대한의 굴진이 되도록 하였다. 따라서 굴진효율 증가로 인한 경제성이 표 20과 같이 개선되었다.

3.2.2 노천 발파현장 개선사례

① 고속국도 00-00간 건설공사 현장

본 현장의 주요 검토사항은 당 현장에 소요되는 성토재를 획득하고, 주변 7~452m사이에 보안물건들이 다수 존재 하므로 발파진동의 영향을 최소화하여 시공성과 경제성이 부합된 최적의 발파설계를 하고자 하였다. 또한 대부분의 암반이 보통암 이하의 강도를 가짐을 고려하여, 표 21과 같이 기존 설계시 적용된 MegaMITE I을 NewMITE I과 미진동파쇄기로 대체하여 발파공해를 약 15~50% 저감시켰으며, 요구 파쇄입도(0.03m³이하)를 충족하는 발파패턴을 제시하였으며 민원 해소에 의한 공사

표 19. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
폭약 선정	<ul style="list-style-type: none"> 스무스 블라스팅을 적용하였음에도 외곽전열공 및 전폭 약이 MegaMITE I 이므로 여굴발생량 증가 여굴 증가에 의한 슛크리트 타설량 증대 	<ul style="list-style-type: none"> 연암 및 갱구부 패턴의 경우 발파 압력이 가장 유효하게 작용하는 NewMITE I 적용 외곽공과 외곽전열공과의 공간격/저항선비(0.7) 조정 스�크리트 타설량 12%감소 및 총 굴착비용 13%절감

표 20. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
폭약 선정	<ul style="list-style-type: none"> 심발부 천공작업 시 오차 발생에 따른 굴진효율 70%로 저하 천공전 마킹작업과 천공지시작업자 배치를 하여도 굴진 효율 증대를 못함 	<ul style="list-style-type: none"> 심발부 MegaMITE I 적용하여 천공오차에 의한 굴진 저하를 화약의 위력으로 보완함 발파효율 증대(91%)로 2.5개월 공기 단축

표 21. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
폭약 선정	<ul style="list-style-type: none"> 암반의 강도를 고려치 않고 전구간 MegaMITE I 적용 발파효율은 좋으나 발파진동 및 소음에 대한 민원 야기에 의한 공사 중단 	<ul style="list-style-type: none"> 보통암의 분포율이 많으므로 NewMITE I을 변경하여 보안물건과 발파거리별 저항선 공간격 조정 및 발파 규모 변경 보안물건 근접구간에서는 미진동파쇄기를 적용

기술강좌

발파현장 특성을 고려한 발파설계방법(Ⅱ)

표 22. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
뇌관 선정	• 비전기뇌관 적용시 표면뇌관에 의한 소음 발생	• 주변 보안물건에 대한 소음 영향을 최소화하기 위해 전 기뇌관 적용

표 23. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
공법 선정	• 기계식 굴착으로 인한 공기 증가 및 시공성 저하 • 굴착비용의 증가	• 공기 단축 및 시공성 확보를 위해 미진동파쇄기 적용 • 주변 보안물건에 영향을 미치지 않는 수준에서 공기 및 시공성 확보

표 24. 문제점 및 개선 사항

구분	현장 현황 및 문제사항	개선사항
폭약 선정	• 수압과 충격파에 의한 사암발생 미고려에 따라 불발 잔류 발생 다수	• 천공경 증가에 따른 공간격을 증가하여 사암현상 방지
뇌관 선정	• 수중 발파 작업 여건을 고려하지 못한 전기뇌관 선정으로 기폭 불량	• 비전기뇌관 적용에 따른 불발 기폭률 0% • 안전성 및 시공성 확보

기간 3개월을 단축시켰다.

② 00국도개량 건설공사 현장

당 현장은 인근에 보안물건에 대한 발파소음 전파를 억제하기 위해 현장 경계선에 고정식 방진막을 설치하였으나, 비전기 뇌관(표면뇌관)으로 설계되어 발파시 발생하는 소음으로 인한 민원이 발생되었다. 따라서 표 22와 같이 전기뇌관으로 변경하여 발파 소음 공해로 인한 민원문제를 해결한 현장이다.

③ 00철도 1-1공구 현장

당 현장은 상부에 지하철 〇〇호선이 교차하여 통과하므로 안정성에 문제가 제기되어 설계시 기계식 굴착공법 중 하나인 H.R.S를 선정하여 시공을 실시하였다. 그러나 암반의 강도(900kgf/cm²)가 경암으로 공사기간 및 시공성의 문제가 대두되어 표 23과 같이 암파쇄공법의 일종인 미진동파쇄기를 이용한 굴착공법으로 변경하여 공사기간을 5.5 개월 단축하였으며, 굴착 비용을 19% 절감시켰다.

3.2.3 수중 발파현장 개선사례

① 00항 중심 건설공사 현장

당 현장은 항로 중심을 목적으로 수중발파가 계획되어 주화약은 MegaMITE I과 전기뇌관으로 설계되었으나, 실 수중 발파시공 시 수중 작업의 시야확보와 활동의 제한에 따른 전기뇌관 각선 파손이 자주 발생되어 각선 절단에 의한 불발 잔류약의 원인이 되어 안전성이 확보되지 못하였고 누설전류에 의한 오폭사고가 우려되었다. 또한 높은 수압과 근접된 공간격(0.5m이내)으로 인해 인접공발파의 선행된 수중 충격파에 의한 MegaMITE I의 사암현상이 발생되고 굴착효율 저하되어 비용이 증가되었다. 그리하여 표 24와 같이 각선 파손을 줄이기 위하여 비전기 뇌관을 적용하였고, 또한 확실한 기폭을 위하여 공내에 2개씩 장전하였다.

수압과 근접 공간격에 따른 사암현상을 개선하기 위하여 천공경 증가에 따른 공간격을 넓혀 사암에 의한 불발 기폭이 발생되지 않도록 하여 안전성을 확보 하였다. 그 결과 공사기간을 4.5개월 단축하였다.

4. 맺음말

최적 발파설계라 함은 발파 목적, 암반상태 및 주변현황을 고려하고, 경제성, 시공성, 환경성 및 안전성을 반영하여 화약류, 천공장비 등을 선정함으로써 효율적으로 암반을 굴착하는 방법을 설계하는 것을 말한다. 이를 위한 중점 고려사항은 발파 대상 암반의 지질학적, 공학적 특성 및 주변현황에 따른 환경기준치의 선정 등을 들 수 있다. 따라서 암반 특성을 고려한 화약류 및 발파공법을 선정하고, 발파공해에 대한 영향권 분석을 통하여 친환경적인 발파공법설계가 되도록 하여야 한다. 또한 현장의 여건(발파작업시간, 천공장비, 굴착계획 등)을 검토하여 시공현장의 특성을 반영한 설계를 하여야 한다.

그러나 많은 비용을 들여 발파설계를 하였음에도 불구하고 시공현장에서 설계도에 의한 발파를 실시하지 않고 있는 사례가 빈번히 발생되고 있다. 이는 설계가 시공현장의 특성을 충분히 반영하지 않고 획일화되고 패턴화된 발파설계가 이루어지고 있음을 시사하고 있다. 이러한 원인으로는 설계 단계에서 암질의 다양한 변화를 면밀히 조사하는 것이 현실적으로 불가능하고, 설계 시점과 공사 시점의 차이로 주변 환경(보안물건 등)이 변화하며, 시공

현장의 여건을 충분히 반영하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

이로 인해 실 발파 작업시 설계변경을 하고 공기의 증가를 초래하여, 공사비용이 추가로 소요되어 국가적인 손실이 발생하고 있다. 그러므로 최적의 발파설계가 되도록 최선의 노력을 기울여야 하며 이를 위해서 발파전문기관(엔지니어링기술진흥법에 의한 용역업체(화약류관리) 또는 기술사법에 의한 화약류관리 기술사 사무소 등)을 활용하여 설계하는 것이 도움이 될 것이다.

본 고에서는 부적절한 발파설계로 인해 시공상의 문제를 초래한 사례를 들어 현장 특성과 실공사 시 발파작업을 고려한 최적 발파설계의 중요성을 표현하고자 하였으며, 최적 발파설계를 위해 설계 단계에서 검토되어야 할 고려사항 등을 제시하였다. 또한 체계적인 시험발파(시추공 탐사, 누두공 발파, 실규모 시험발파, 요소 시험발파)에 의한 설계인자 선정 및 활용방안과 품질모델 선정기법인 VE 분석기법에 의한 화약류 선정 방안 등을 소개하여 객관적인 발파설계 방안을 제시하도록 노력하였다.

마지막으로 발파설계에 종사하는 많은 엔지니어들에게 화약류에 대한 전반적인 소개를 통하여 조그마한 도움이 되고자 하였다.