다단 천공 평행 심빼기에 의한 터널발파공법 소개

원연호[1] · 이 효[2]

1. 서 론

터널발파는 1자유면 발파로서 발파효율이 낮아 자유면을 증가시킬 목적으로 실시되는 것이 심빼기 발파이며 심빼기 발파는 발파효과의 성패를 좌우한다. 심빼기발파는 평행천공에 의한 Cylinder-Cut와 경사천공에 의한 V-Cut가 가장 많이 적용되고 있으나 V-cut는 대칭 경사천공에 의한 터널단면적에 제한을 받으며 고밀도 집중장약에 따른 초기진동을 억제할 수 없다. 그리고 평행심빼기는 모두 막장면에 직각으로 평행천공을 함으로서 모양상은 단순하게 되고 단면 크기에 관계없이 적용할 수 있으나 소구경의 발파공으로 둘러싸여 있는 1-2개의 무장약 대구경 공공(Ø102mm)을 자유면으로 이용하기 때문에 장공발파에서는 좁은 공간격으로 인하여 장약량의 과잉이나 폭약의 위력이 너무 강하면 파쇄된 암석이 막장면으로 밀려나오지 않고 소결현상을 일으킬 수 있다. 따라서 V-cut 심빼기에 의한 터널굴착단면적의 제약과 고밀도 집중장약에 의한 초기진동 상승, 평행 천공 심빼기에 의한 소결현상 등을 방지하면서 굴진효율을 향상시키고 진동과 소음을 저감시킬 수 있는 다단천공 평행심빼기(Double drilling Parallel cut / D.P-cut)에 의한 터널발파공법을 소개하고자 한다. 『다단평행심빼기에 의한 터널발파공법』은 특허 제10-0751729호로서 오늘날 국내외적으로 가장 널리 사용하고 있는 기존의 평행천공에 의한 Cylinder-Cut 공법의 시공 편의성을 최대한 활용하면서 다만 심발공의 길이만을 서로 다르게 단공과 장공을 교차 천공하고 단계적으로 기폭하여 공당장약량을 감소시키고 최소저항선의 거리를 축소하여 심빼기공에서 발생하는 초기진동을 억제하고 심발공에서 완전한 2자유면을 확보해줌으로서 굴진율을 향상시키는 터널진동제어발파공법이다.

2. D.P-cut(Double-Drilled Parallel cut) 공법 소개

2.1 기존의 심빼기 공법의 문제점

V-cut(경사공 심빼기)

V-Cut는 자유면에 대하여 통상 60-70(°) 정도의 경사를 가지고 대칭으로 천공하여 공저를 20cm 간격 정도로 집중시키고 공저에는 폭약을 될수록 고밀도로 집중 장약하여 발파하는 방법이다. 그러나 V-cut 심빼기는 어느 각도를 유지하고 천공하는 관계상, 어떻게 하여도

1) 원앤비기술사사무소
2) SK건설

굴진길이는 터널굴착단면에 의해 제약을 받고, 터널 폭의 0.6~0.7배 정도가 한도이다. 따라서 소단면 터널에서는 굴진길이를 신장시키는 것은 어렵고 굴착단면이 큰 경우라도 V-cut로 장공발파를 실시하는 것은 곤란하며 집중장약에 따른 초기진동을 억제할 수 없다.

Parallel-cut(평행공 심빼기)

평행공 심빼기는 오늘날 천공장비의 발달과 함께 가장 일반화된 공법으로 모두 막장면에 직각으로 평행천공을 함으로서 모양상 단순하게 되고 단면크기에 관계없이 적용할 수 있다. 평행 대구경 심빼기는 소구경의 발파공으로 둘러싸여 있는 1-2개의 무장약 대구경 공공으로 이루어지며 암석파쇄는 대구경 공공을 향하여 실시되고 차차 확대해 가는 방법이다. 따라서 대구경 심빼기는 대구경 공공(Ø102mm)을 자유면으로 이용하기 때문에 장공발파에서는 좁은 공간격(약 15cm)으로 인하여 장약량의 과잉이나 폭약의 위력이 너무 강하면 파쇄된 암석이 막장면으로 밀려나오지 않고 소결현상을 일으킬 수 있다.

2.2 D.P-Cut의 원리

터널발파공법에서 초기진동이 크게 발생된 이유는 막장면이 단일자유면 상태로서 심발공 부분에서 가장 구속력이 크게 작용하여 동일 발파조건의 최소저항선이라 하여도 암반항력에 따른 구속도로 더 큰 폭약량이 요구되므로 폭약량 증가에 따른 초기진동이 발생된다. 그리고 발파공의 구속저항은 발파에 의해 암반이 파쇄되는 조건(암질, 절리성, 최소저항선 거리 등)과 파쇄된 암편이 배출되는 조건(자유면의 수, 자유면의 크기)에 의해 결정된다.

따라서 D.P-Cut는 기존 터널발파공법들의 심발공에서 크게 발생하는 발파진동과 단일자유면 상태의 구속도에 따른 2차 자유면 확장의 문제점을 보완하기 위해 기존의 수평 천공방법(대구경, 실린더 등)에서 심발공의 길이만을 서로 다르게 교차 천공하여 지발당장약량 감소시키고 최소저항선의 거리를 축소시키어 심빼기 부분에서 초기진동을 억제하고 완전한 2자유면을 확보해주어 굴진율을 향상시킬 수 있도록 하였다.

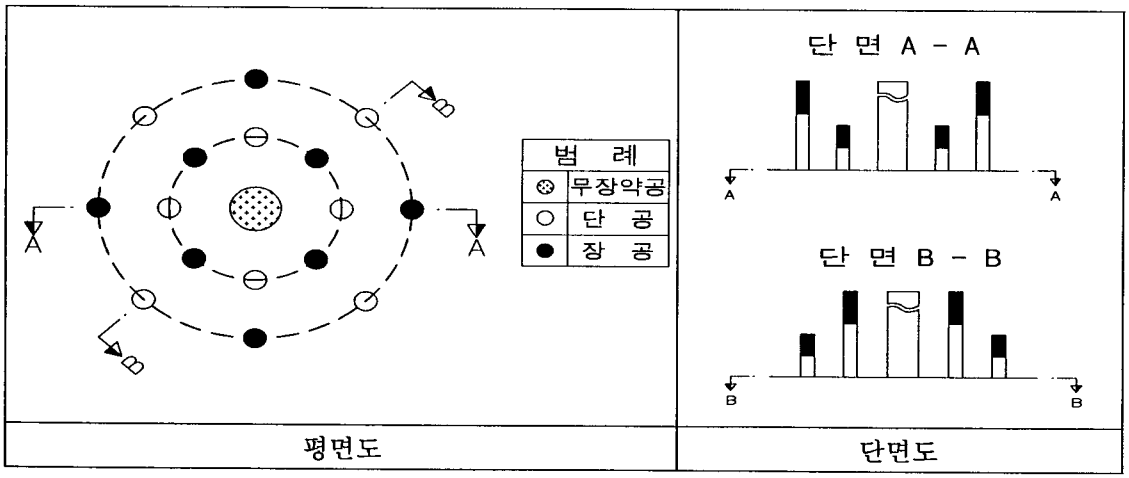
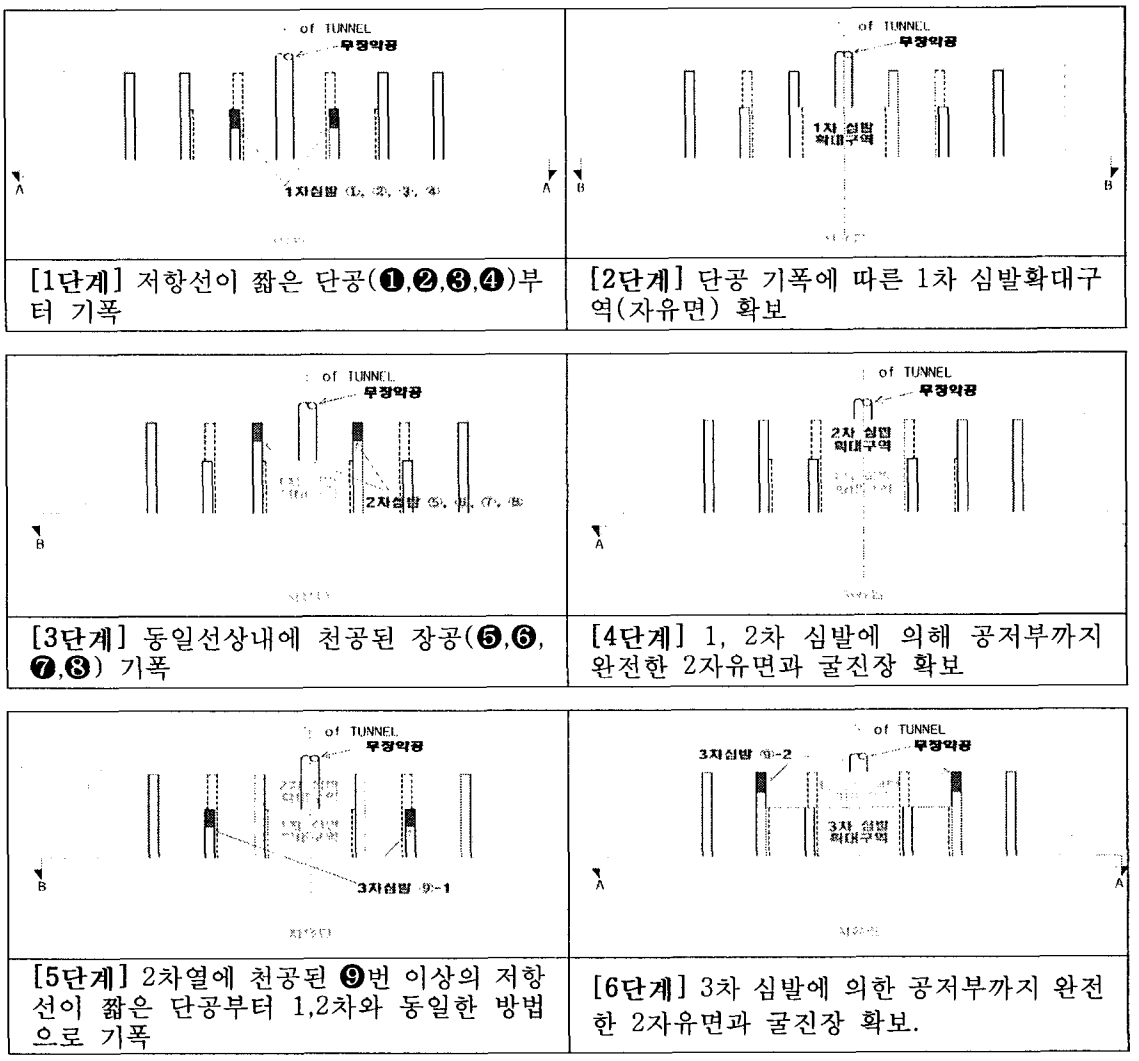


그림 1. D.P-cut의 원리

D.P-Cut의 원리는 그림 1과 같이 심발공의 구속저항을 줄이기 위해 무장약공을 중심으로 배치된 동일선상 심발공의 천공길이를 단공과 장공으로 교차 천공하여 1차적으로 최소저항선이 짧은 단공을 기폭하여 자유면을 형성하고 형성된 자유면이 2차적인 후발공인 장공에 양호한 자유면과 짧은 최소저항선을 제공하는 원리이다.

그림 2는 D.P-cut의 단계별 메카니즘이다.



[1단계] 저항선이 짧은 단공(❶,❷,❸,❹)부터 기폭

[2단계] 단공 기폭에 따른 1차 심발확대구역(자유면) 확보

[3단계] 동일선상내에 천공된 장공(❺,❻,❼,❽) 기폭

[4단계] 1, 2차 심발에 의해 공저부까지 완전한 2자유면과 굴진장 확보

[5단계] 2차열에 천공된 ❾번 이상의 저항선이 짧은 단공부터 1,2차와 동일한 방법으로 기폭

[6단계] 3차 심발에 의한 공저부까지 완전한 2자유면과 굴진장 확보.

그림 2. D.P-cut의 단계별 메카니즘

※단, 천공장이 1.5m 이내로 짧거나 1,2차 심발에 의해 진동의 영향이 없을 때에는 3차 심발은 적용하지 않고 일반 확대공과 동일하게 기폭.

2.3 D.P-Cut의 작업방법

천공

D.P-cut 천공은 일반적으로 적용되는 대구경 또는 Cylinder-Cut의 발파패턴과 동일하나 심빼기공의 천공방법은 다음과 같다.

가) 심빼기 천공은 적용되는 발파패턴(번컷트, 대구경, 실리더 등)에 따라 무장약공을 중심으로 일정간격으로 단공과 장공을 교차 평행 천공한다. 그리고 그 외의 확대공 및 외곽공, 바닥공은 통상적인 발파설계 방법에 의한다.
나) 심빼기 장공의 천공길이(천공장)는 적용되는 설계패턴과 동일하게 천공한다.
다) 심빼기 단공의 천공길이(천공장)는 적용된 설계패턴의 천공장 길이에 따라 적용되며 통상적으로 장공의 50-70(%) 수준으로 설정한다. 그리고 심빼기공 외의 확대공 및 외곽공, 바닥공의 천공길이는 통상적인 발파패턴과 동일하게 천공한다.
라) 심빼기공의 천공간격 및 최소저항선은 무장약공의 크기에 따라 적용하며, 이들 제원은 무장약공에 의한 환산직경을 기준한다(예, 102mm / d=1.5).
마) 심빼공의 배열은 천공장이 1.5m 이내로 짧거나 1열 심빼기에 의해 진동의 영향이 없을 때에는 1열은 적용하나 천공장이 1.5m 이상으로 진동우려구간에서는 2열 이상의 심빼기공을 적용할 수 있다.

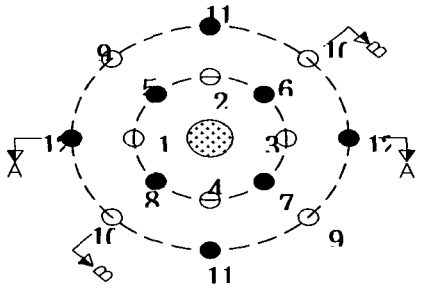
장약

장약방법은 적용된 발파패턴의 천공장에 따라 결정되나, 장약방법은 단공과 장공을 구분하여 단공의 장약량은 장공의 1/2~2/3 수준으로 한다. 천공장의 길이가 클 경우에는 약실의 투사면적(A)을 크게 하여 전압력(P)의 범위를 확장하기 위해 약경이 작은 화약류(정밀폭약 등)를 적용할 수 있다.

그 외 확대공 부터는 일반 평행천공에 의한 대구경 발파공법 등과 동일하게 적용한다.

기폭

기폭순서는 그림 3과 같이 무장약공을 향하여 동일선상에 설치된 단공(短孔)부터 1공씩 기폭시키며, 단공 기폭 이후 장공(長孔)순으로 1공씩 기폭시킨다.

기폭시차는 천공장에 따라 파쇄된 암편이 외부로 추출될 수 있는 시간차를 고려하여 기폭시차를 달리하여야 하며, 그 외 확대공 이상에서는 일반 발파패턴과 동일하게 적용한다. (※일반적으로 파쇄된 암편이 외부로 추출되는 시간은 m당 15~30ms이다.)	 그림 3. 기폭순서

2.4 D.P-Cut의 발파패턴 구분

다단평행 천공에 의한 심빼기는 그림 4와 같이 대표단면으로 굴진장 1.5m를 기준으로 단공과 장공 패턴 2가지로 구분된다. 기폭 시스템은 동일하며, 굴진장 1.5m를 초과하는 발파패턴에서는 무장공을 중심으로 2열까지 단공과 장공을 교차 천공하여 기폭한다.

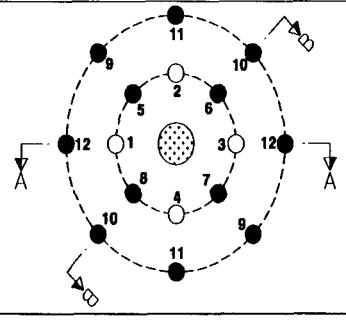
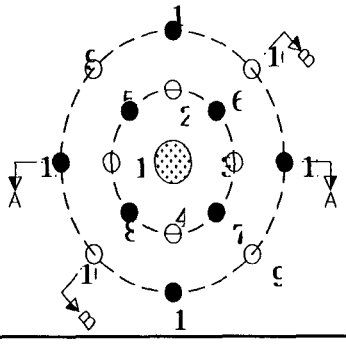
구분	평면도	특징	적용암반
단공발파 패턴		·무장공을 중심으로 1열까지 단공과 장공으로 교차 천공하여 기폭	·굴진장 : 1.5m 이하 ·적용표준단면 : Ⅲ,Ⅳ, Ⅴ,Ⅵ
장공발파 패턴		·무장공을 중심으로 2열까지 단공과 장공으로 교차 천공하여 기폭	·굴진장 : 1.5m 이상 ·적용표준단면 : Ⅰ,Ⅱ, Ⅲ

그림 4. 발파패턴의 구분

2.5 D.P-Cut 발파공법의 효과

발파진동 저감

D.P-Cut는 심발공의 구속저항을 줄이기 위해 무장약공을 중심으로 배치된 동일선상 심발공의 천공길이를 단공과 장공으로 교차 천공하여 1차적으로 최소저항선이 짧은 단공을 최소의 장약량으로 기폭한다.

따라서 D.P-cut의 최초 심발공의 지발당장약량은 기존 Cylinder-cut의 50-60(%), V-cut의 15-20(%) 수준으로 장약량 비례하여 진동과 소음을 저감시킬 수 있다. 표 1은 단순하게 발파상수(K값)에 의한 천공장 및 지발당장약량을 적용하여 예상진동치을 비교하였다.

표 1. 발파상수(K값)에 의한 심빼기 공법의 진동비교

구분	D.P -cut	Cylinder -cut	V-cut
천공장	1.6m	1.6m	1.6m
공당장약량	0.475kg	0.75kg	1.25kg
지발당장약량	0.475kg	0.75kg	3.5kg
예상진동	0.211cm/sec	0.304cm/sec	1.042cm/sec
비고	공당장약량을 실린드컷의 60%로 설정 진동비교시 이격거리 50m에서 예상 K=200, n=-1.6 적용		

굴진효율 증대

터널발파는 1자유면 발파로서 발파효율이 낮아 자유면을 증가시킬 목적으로 실시되는 것이 심빼기 발파이며 굴진효율 증대를 위해서는 단일자유면 상태의 구속도에 따른 심빼기 발파공의 충분한 파괴에 의한 2차 자유면이 확보되어야 한다.

따라서 D.P-Cut는 기존 터널발파공법들의 심발공에서 크게 발생하는 단일자유면 상태의 구속도에 따른 2차 자유면 확장의 문제점을 보완하기 위해 기존의 수평 천공방법(대구경, 실린더 등)에서 심발공의 길이만을 단공과 장공으로 서로 다르게 교차 천공하여 최소저항선의 거리를 축소시키어 심빼기 부분에서 완전한 2자유면을 확보될 수록 하였다. 표 2는 현장실험에 의한 천공장 비례 굴진장에 의한 굴진효율이다.

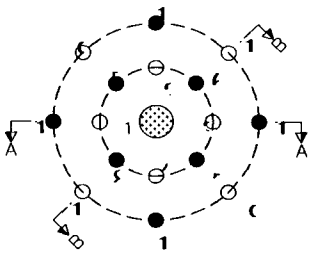
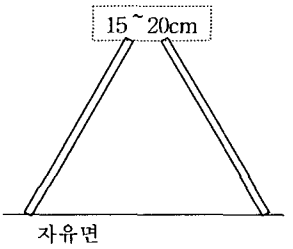
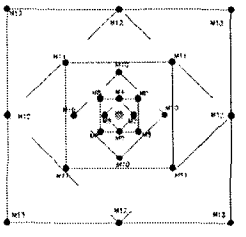
표 2. 현장실험결과

구분	D.P -cut	Cylinder -cut	V-cut
천공장	1.6m	1.6m	1.6m
굴진장	1.55m	1.45m	1.4m
효율(%)	96	90	87
비고	본 DATA는 현장실험을 통하여 획득한 자료이나 암질조건이나 작업방법에 따라 다소 차이가 있을 것으로 사료됨.		

2.6 D.P-Cut와 기존 심빼기 및 유사 신기술(특허)과의 비교

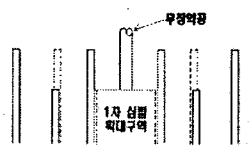
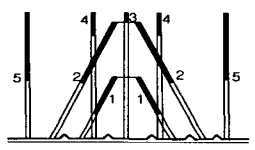
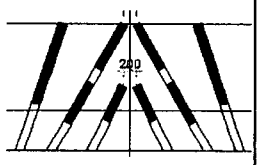
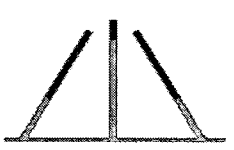
D.P-Cut와 기존 발파공법과의 비교

표 3. D.P-Cut와 기존 발파공법과의 비교

구분	다단천공 평행심빼기에 의한 진동제어 발파공법 (DP-Cut)	기존 발파공법	
		경사공(V-Cut) 발파공법	평행공(대구경,실린더) 발파공법
공법원리 및 특징	·기존 평행공(대구경, 시린더 등) 발파공법에서 심발공의 길이만을 단공과 장공으로 서로 다르게 천공하여 단공부터 순차적인 기폭. ·최소저항선 축소에 의한 소량의 장약량 적용. ·단공과 장공의 순차적인 기폭으로 구속 저항력 완화와 단계별 자유면 확보. ·심발공 초기진동 억제와 굴진장 향상.	·막장면에 중심축을 대칭으로 하여 좌우 양방향에서 경사천공하여 공저부에 집중장약 심빼기에 의한 발파공법. ·재래식공법으로 국내에서 가장많이 활용되며 보급률이 가장 높다. ·단위면적당 천공수가 적어 경제적. ·단공(천공장이 짧은) 발파에 적합 ·경사천공에 따른 터널단면적에 제한.	·막장면에 평행으로 천공하며 가운데 설치된 무장약을 향하여 장약공을 단계적으로 1공씩 기폭시킴. ·심발공의 구속도 완화와 최소저항선을 짧게함 ·천공의 용이성, 굴진장 향상, 진동저감 확보차원에서는 기존의 발파공법 중 가장 진보된 공법. ·심발공의 단위당 장약밀도가 낮아 진동이 비교적 적으며 장공발파에 주로 이용.
장점	·심발공의 초기진동이 낮음. ·협소 단면 터널에 적합. ·단계별 자유면확보로 장공발파에 적합. ·진동우려지역 미진동굴착공법 대체 가능	·단위면적당 천공수 감소. ·재래식공법으로 보급률이 높으며 시공성이 양호. ·천공장이 짧은 소단면 터널에 적합.	·심발공의 초기진동이 낮음. ·장공발파에 적합 ·파쇄암반의 입도가 균일하며 비산거리가 짧다.
단점	·경사공에 비해 단위면적당 천공수 증가. ·천공의 정확도가 요구.	·심발공의 장약밀도가 높아 진동이 큼 ·경사천공으로 터널단면적에 제한 ·버럭의 파쇄입도가 크고 비산거리 김.	·경사공에 비해 단위면적당 천공수 증가. ·천공의 정확도가 요구.
심빼기도			

D.P-Cut와 유사 신기술(특허) 공법과의 비교

표 4. D.P-Cut와 유사 신기술(특허) 공법과의 비교

구분	다단천공에 의한 진동제어발파공법 D.P-cut	분착식 다단발파공법 Supex-Cut	다단장약과 다중심발에 의한 진동제어발파공법	Stage Advace V-Cut
공법원리	·기존 평행공(대구경, 시린더 등) 발파공법에서 심발공의 길이만을 단공과 장공으로 서로 다르게 천공하여 단공부터 순차적인 기폭. ·최소저항선 축소에 의한 소량의 장약량 적용. ·단공과 장공의 순차적인 기폭으로 구속저항력 완화와 단계별 자유면 확보. ·심발공 초기진동 억제와 굴진장 향상.	·평행공과 경사공을 병행 하여 천공. ·확대공과 천공장이 동일한 경사공을 먼저 기폭시킨 후 공저부분의 수직공 기폭. ·경사공으로 최소저항선이 짧은 1차 쐐기파괴. ·수직공으로 경사공 공저 부분 암반파괴. ·경사공과 수직공을 단계 별 기폭. ·최소저항선의 축소와 단계별 기폭에 의한 자유면 확보 ·완전한 자유면 확보에 따른 굴진장 증대.	·기존 경사공(V-cut) 발파 패턴에서 심발공과 심발공에 가까운 확대공을 다단으로 장약하여 지발뇌관의 시차를 이용 심발공부터 순차적으로 기폭시킴. ·다단장약에 의한 지발당 장약량 분산으로 초기진동 억제. ·다단장약과 다중심발 적용으로 최소저항선 축소와 단계별 자유면 확보로 굴진장 향상.	·기존의 V-cut 발파공법에서 중앙공을 설치하여 선기폭하고 경사공을 순 차적으로 기폭시킴. ·부분장약과 단계적 기폭 ·장공발파 시 중앙공 2단 분할장약주 경사공 사이에 중앙공을 선기폭시키고 경사공을 순차적으로 기폭시킴. ·중앙공 선 기폭으로 공저 부분 암반 사전 취약화로 굴진장 향상. ·분할장약으로 지발당장약량 감소(초기진동억제)
				

2.7 D.P-Cut 발파공법의 특징과 기대효과

특징

(가) 다단(단공, 장공) 천공에 의한 기폭으로 심발공의 지발(공)당장약량을 분산하여 발파초기의 진동을 억제할 수 있다.

(나) 다단(단공, 장공) 천공방법으로 심발공의 최소저항선 거리를 짧게 하고 순차적인 기폭방법으로 막장면의 구속저항을 낮게 함으로서 완전한 굴진장을 확보할 수 있다.

(다) 다단(단공, 장공) 천공과 기폭으로 최소저항선과 공간격의 비가 일정하여 파쇄입도가 낮고 균일하다.

(라) 평행 천공방법으로 브이카트(V-Cut) 심빼기에 의한 천공각도가 확보되지 않은 소규모 단면(전력구, 통신구, 수로터널, 단선철도터널 등)의 터널에 적용이 매우 적합하다.

(마) 종래의 데크차지(Deck charge)에 의한 사압 및 유폭현상의 발생가능성을 완전히 차단

할 수 있다.
(바) 종래의 평행 장공발파에서 발생되는 소결현상을 방지할 수 있다.
(사) 단공과 장공의 교차 기폭으로 무장약공의 크기와 천공장에 제한을 적게 받는다.
(아) 기존의 평행 천공에 의한 Cylinder-cut 발파패턴을 이용하므로서 시공성이 매우 양호하다.

기대효과
(가) 초기진동을 저감 시킬 수 있어 진동 우려구간에서 발파공법의 적용은 물론 미진동 대체 굴착공법으로 활용도가 높다.
(나) 단계별 기폭에 의한 자유면 확보로 굴진장에 제한을 받지 않으므로 장공발파에 활용도가 매우 높다.

3. 결 론

터널발파는 1자유면 발파로서 발파효율이 낮아 자유면을 증가시킬 목적으로 실시되는 것이 심빼기 발파로서 심빼기발파는 평행천공에 의한 Cylinder-Cut와 경사천공에 의한 V-Cut가 가장 많이 적용되고 있다. 그러나 V-cut는 대칭 경사천공에 의한 터널단면적에 제한을 받으며 고밀도 집중장약에 따른 초기진동을 억제할 수 없으며 평행심빼기는 1-2개의 공공(Ø102mm)을 자유면으로 이용하기 때문에 장공발파에서는 좁은 공간격으로 인하여 소결현상을 일으킬 수 있다. 따라서 D.P-cut는 이들 문제점을 보완하여 다단천공과 기폭에 의한 시스템으로 발파진동과 굴진효율을 저감시킬 수 있었다.

본 연구는 개발단계로서 다양한 암질조건과 발파제원의 적용으로 정량적인 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 특허 제10-0751729호 (다단평행 천공심빼기에 의한 터널굴착공법).
2. 다단천공평행심빼기에 의한 터널굴착공법 시험발파보고서, 원앤비기술사사무소.
3. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술, pp. 127-140.
4. 강대우, 1995, 응용발파공학, 구미서관, pp. 140-164.
5. ISEE presents the 17th Edition of the Blasters' Handbook, 1999. pp. 445-468.