

## 다단장약에 의한 V-cut 발파공법의 진동제어효과와 발파효율증대에 관한 연구

두준기<sup>1)</sup>, 양형식<sup>2)</sup>, 김형건<sup>3)</sup>, 김용국<sup>1)</sup>

### The Method of Tunnel Blasting for the Vibration Control by Deck Charge and Multiple Cut

Joon-Kee Doo, Hyung-Sik Yang, Hyung-Kun Kim, Yong-Kook Kim

**초 록.** 터널굴착발파공법의 하나인 V-cut 발파공법은 터널굴착기술이 발전되는 과정에서 초기에 개발되어진 기술이나 작업의 간편성과 효율성으로 인하여 많은 터널굴착공사에서 이용되고 있는 발파공법이다. V-cut 발파공법은 일자유면 상태에서 V형으로 심발공을 발파하고 심발공에 의해 형성된 자유면을 이용하여 확대공으로 굴착공간을 넓히는 발파 방법이며 심발발파의 굴진장에 의해 단일발파당 굴진장이 결정된다. V-cut 발파법이 개발된 이래 V-cut 발파의 굴진장을 증대시키기 위한 방법으로 심발발파공의 구속저항을 감소시키기 위해 보조심발공을 발파하여 형성된 자유면에 의해 심발공의 최소저항선거리를 줄여 발파하였으나 심발공의 구속저항이 감소되지 않아 발파효율이 증대되지 않았으며 발파진동 또한 가장 크게 발생하였다. 이와 같은 현상은 최소저항선거리의 감소효과에 대한 발파기술상의 이론에 문제가 있기 때문이다. 본 연구에서는 V-cut 발파법의 심발공에 대한 구속저항감소효과가 발현될 수 있는 조건들을 검토하여 최소저항선거리의 감소효과가 발현될 수 있는 조건을 제시 하여 심발공의 발파효율을 증대시키고 발파진동이 적어지는 발파방법을 제안하려 한다.

**핵심어 :** 터널발파방법, 최소저항선거리, 유효자유면의 크기, 다중심발공, 다단장약심발파.

#### 1. 서 론

터널굴착을 위한 심발발파방법은 V-cut 발파법이 가장 먼저 개발되었으며 현재까지도 굴진장이 적은 터널의 발파방법으로 많이 이용되고 있다.

단일발파당굴진장을 길게 굴착할 수 있는 터널 굴착 작업조건에서는 V-cut 발파법은 단일자유면 상태에서 최초의 2자유면을 형성하는 심발발파공의 구속저항이 커서 일반적으로 38mm나 45mm의 천공경으로 발파할 수 있는 단일 발파당굴진장이 3.0m 이하로 제한되기 때문에 단일 발파당굴진장을 증대시킬 수 있는 Cylinder-cut 발파법을 적용하여 터널을 굴착하는 것이 더 경제적이다. 그럼에도 우리나라에서는 Cylinder-cut 발파법을 적용하여 발

파할 수 있는 산악터널발파에서 까지 V-cut 발파법을 가장 많이 적용하여 터널을 굴착하고 있는 가장 중요한 이유는 대부분 터널굴착현장의 기술자들이 발파기술에 대한 능력부족으로 Cylinder-cut 발파법으로 3.0m 이상을 발파하는 경우 발파효율이 낮아져서 천공시간이 길어지고 비용이 증가하기 때문이다.

발파기술의 전문성이 낮은 터널발파현장에서 V-cut 발파법은 발파기술에 대한 난이도가 낮아서 작업이 용이하고 작업시간이 짧으며, 단일 발파당 굴진장을 적게하고, 작업 Cycle 수를 늘리면 정상적인 Cylinder-cut 발파법에 비해서는 경제성이 낮으나 비정상적인 Cylinder-cut 발파법에 비해서는 경제적인 터널굴착작업이 가능하기 때문에 선호하는 것이라고 할 수 있다.

그러나 현재까지 개발되어진 터널발파공법은 단일발파당 굴진장을 3.0m 이상으로 발파하기 위해서는 V-cut 발파법 보다는 Cylinder-cut 발파법을 적용

1) 휴먼테크기술사무소  
2) 전남대학교  
3) 서울시 건설안전관리본부  
접수일 : 2003년 8월 15일

해야 더 경제적으로 터널을 굴착을 할 수 있다고 알려져 있다.

본 연구는 종래의 발파기술이론에 대한 견해를 달리하는 최근에 발표된 발파기술이론을 토대로 V-cut발파법에서 심발발파공의 구속저항으로 인하여 단일발파당굴진장이 짧았던 문제점을 개선하여 V-cut발파법의 단일심발공으로 굴착이 가능한 최대굴진장의 2배 또는 3배로 단일발파당굴진장을 늘려서 V-cut발파를 할 수 있도록 "다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법"이라는 새로운 심발발파공법에 관한 연구를 수행하였다.

새로운 발파방법의 특징은 다중 심발 V-cut발파법의 보조심발공과 심발공이 최초로 발파가 이루어지는 보조심발공의 최소저항선거리와 같거나 유사한 조건에서 모든 보조심발공과 심발공이 발파되게 하여 유효 자유면에 의한 최소저항선거리 감소효과가 발현되도록 발파공을 다단으로 장약하고, 기폭순서를 조절하여 발파하면, 최초 보조심발공에서 발생하는 발파진동의 크기로 보조심발공과 심발공을 발파하여 진동을 제어하고 최초 보조심발공으로 굴착이 가능한 깊이의 2배 또는 3배의 깊이로 V-cut의 단일발파당굴진장을 늘려 발파할 수 있으므로 Cylinder-cut에 비하여 기술적인 난이도가 낮으면서도 단일 발파당굴진장을 늘려 발파할 수 있는 경제적인 발파방법이다.

터널에서 진동이 가장 크게 발생하는 것은 심베기 부분으로 알려져 있다. 자유면이 제한되어 구속이 크기 때문이며 폭약의 잔여 에너지가 진동을 유발하기 때문으로 설명된다.

본 연구에서는 다단 장약에 의한 터널 진동제어 발파법(두 외, 2003)을 수치해석적으로 검증하였다. 수치해석은 개별요소법 상용 프로그램인 PFC 2D(Particle Flow Code)와 파괴역학을 고려한 유한요소해석법을 이용하여 파쇄의 양상과 진동의 감쇠를 시뮬레이션 하였다.

## 2. V-cut발파방법과 심발공의 구속저항

경암구간의 터널발파에서 천공경이 38mm이고 장약경이 25mm일때의 단일발파당 최대 굴진장은 약 2.0m 이내이고 발파진동의 크기에 제한을 받는 경우에는 굴진장을 1.0m 이내로 줄여서 발파해야 하고, 발파진동의 영향을 고려하지 않는 산악터널 발파인 경우 천공경이 45mm이고 장약경이 32mm일때 최대굴진장을 약3.0m 이내로 굴진장을 결정하게 된다. 이와같이 Cylinder-cut에 비하여 V-cut 발파의 굴진장을 짧게 결정하는 이유는 V-cut 발파의 굴착방향으로 최초의 자유면을 형성하기 위하여 경사천공을 하는 보조심발공과 심발공은 단일 발파당굴진장이 길어질수록 최소저항선거리가 길어지기 때문이다. 심발공의 최소저항선거리를 감소시키기 위하여 보조심발공을 발파하였는데 보조심발공에 의해 형성된 자유면이 심발공의 자유면으로 이용할 수 없는 부적합한 자유면으로 형성되어 최소저항선거리는 감소시켰으나 구속저항의 감소효과가 발현되지 못하여 두 번째 발파되는 심발공의 발파구속저항을 줄여주지 못하기 때문이다.

최소저항선거리는 천공경에 따른 폭약의 종류와 폭약의 직경 및 폭약량에 의해 암반을 경제적으로 파괴할 수 있는 최대의 거리이다. 발파공의 폭력에 비하여 저항선거리가 길어지면 발파공이 효과적으로 암반을 파괴하지 못하여 잔류공이 길어지거나 공발현상으로 발파효율이 낮아져서 단일발파당굴진장을 길게 하면 비경제적인 발파가 이루어진다.

## 3. 유효자유면과 최소저항선거리

심발공이나 이중 보조심발공의 최소저항선거리를 감소시켜 구속저항을 줄이기 위해서는 어떤 형상의 자유면이 만들어져야 유효자유면으로 이용되어 최소저항선거리의 감소효과가 발현되는지를 알아보자.

그림1.은 발파공의 파괴상태를 나타내는 Livingston의 완전크레이터 모식도이다.

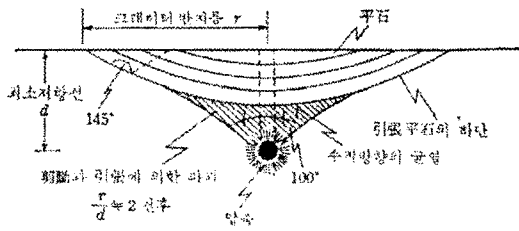


그림 1. Livingston의 완전크레이터 모식도

그림 2는 보조심발공이 없는 단일 심발공으로 발파할 때 V-cut발파의 암반파괴양상을 탄성파에 의해 인장평석이 일어나는 부분과 압축전단파괴가 일어나는 부분으로 구분하여 표시하였다.

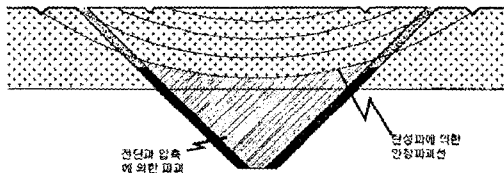


그림 2. 단일심발공의 파괴양상

그림 3은 V-cut심발발파에 보조심발공을 배열한 그림이다. 보조심발공의 파괴영역이 심발공의 인장 파괴영역과 중복되고 V형자유면의 하단은 압축전단파괴영역에 위치한다.

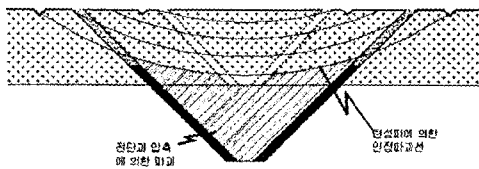


그림 3. 단일심발공의 파괴영역과 보조심발공의 위치

그림 4는 보조심발공에 의해 형성된 V형의 자유면이 심발공의 최소저항선거리를 감소시켰을 때의 발파패턴이다. 보조심발공에 의해 형성된 자유면이 최소저항선거리를 감소시켜 발파효과를 나타내기 위해서는 심발공의 폭발로 발생하는 탄성파가 V형자유면의 정점에서 반사되어 인장파괴력이

발생되어야 하고 파쇄된 암편이 저항을 받지 않고 배출되어야 하는데 V형의 자유면은 좁은 면적을 형성하고 있어서 인장파괴면으로 이용하기에 부적합하고 새로 형성된 자유면의 양쪽에 남아있는 암반이 심발공의 발파 시 파쇄된 암편의 배출을 방해하여 심발공의 구속저항이 커지므로 정상적인 발파가 불가능하다.

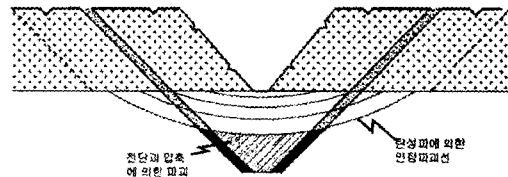


그림 4. 보조심발공에 의한 V형의 자유면과 이론적 심발발파

그림 5는 보조심발공으로 V형의 자유면을 만들어 최소저항선거리를 감소시켰을 때 V형 자유면의 양쪽에 남아있는 부분(㉠)이 심발공이 파괴되어 팽창하는 것을 방해하기 때문에 최소저항선거리의 감소효과가 나타나지 않으므로 실제 발파작업에서는 보조심발공을 발파하지 않은 원래의 최소저항선거리와 유사한 발파를 해야하기 때문에 보조심발공이 없을 때의 심발발파와 거의 동일하게 심발공의 폭약량을 증대시켜 발파하는 그림이다. 이와 같은 발파는 천공경에 비하여 장약장이 지나치게 길어져서 발파효율이 낮아진다.

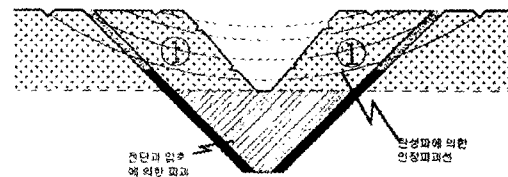


그림 5. 보조심발에 의한 V형의 자유면과 실제적인 심발발파

#### 4. 신공법의 발파원리

경사천공심발발파에서 심발공의 최소저항선거리를 감소시켜 구속저항을 낮게 하기 위해서는 심발공의 최소저항선거리를 결정하는 자유면이 일정한 크기의 공간을 형성해야 최소저항선거리의 감소효과가 정상적으로 발현된다. “다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”에서는 그림 6.과 같이 보조심발공과 같은 깊이로 심발공과 확대공을 다단장약하여 먼저 보조심발공을 발파하면 그림 7.과 같이 형성되고 이 자유면을 이용하여 그림 7.의 심발공상부(①)를 확대발파하여 심발공의 자유면을 확대시키면 그림 8.과 같이 심발공의 최소저항선거리를 결정하는 자유면이 넓게 형성되므로 심발공하부의 파괴가 용이하여 최소저항선거리의 감소효과가 정상적으로 발현된다.

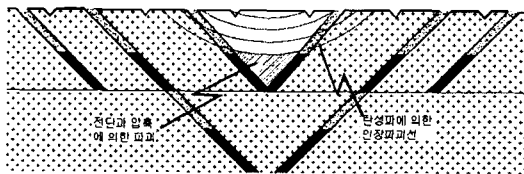


그림 6. 보조심발공과 심발공 및 확대공의 다단장약

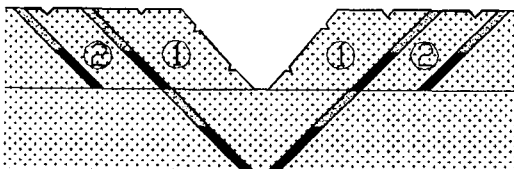


그림 7. 보조심발공에 의한 자유면과 심발공 및 확대공의 다단장약

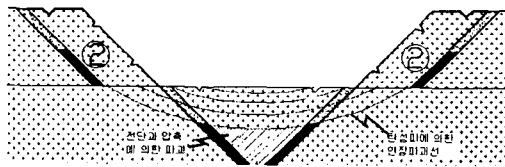


그림 8. 다단장약심발발파에 의해 형성된 자유면과 심발발파

V-cut발파에서 보조심발공이나 기타 발파공으로 새로운 자유면을 만들어서 심발공의 최소저항선거리를 줄여 구속저항을 최소화하기 위해서는 심발공의 인장파괴선 외측부분까지 새로운 자유면이 형성되어야 심발공의 구속저항이 가장 적어져서 최소저항선거리의 감소효과가 최대로 크게 나타난다.

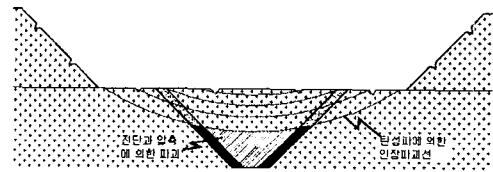


그림 9. 다단장약에 의한 심발 및 확대발파로 형성된 자유면과 심발발파

#### 5. 신공법의 진동제어 효과

발파진동을 제어하는 방법은 지발단수를 늘려 모든 발파공을 각각의 지발단으로 발파하여 진동을 제어하는 기술과 심발공과 같이 발파공의 구속저항이 커서 진동이 크게 발생하는 발파공의 진동을 제어하는 기술로 구분할 수 있다. 지발단수를 늘리는 방법은 비전기식뇌관을 사용하거나 전기식 다단발파기를 사용하는 기술이 널리 알려져 있다.

“다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”은 그림 6.과 같이 장약하여 그림 7, 8, 9.와 같이 발파하면 동일한 지발당장약량인 경우에도 발파공의 구속저항이 감소되어 발파효율이 향상되고 진동이 낮아진다.

경암에서 그림 5.와 같은 V-cut발파법을 적용하는 경우 심발공의 천공경이 38mm이고 천공장이 1.2m일때 공당장약량은 25mm 직경의 에멀전폭약 0.5kg(다이나마이트폭약 0.5kg)으로 설계하여 발파해야 하는데, 동일한 발파조건에서 그림 7.과 같이 심발공의 장약을 다단장약발파방법으로 설계하면 심발공의 장약량을 2등분하여 하부장약을 0.25kg, 상부장약을 0.25kg으로 장약하여 그림 5.와 그림 8.

에서 공당장약량과 지발당장약량을 동일하게 발파하면 그림 5.에서는 심발공에서 발파진동의 최대값이 나타나고, 그림 8에서는 그림 10에서와 같이 심발발파진동이 70%로 적어져서 표 1과 같이 확대공에서 최대값이 발생된다.

지발당장약량과 거리에 따른 발파진동값은 일정한 값으로 나타난다는 미광무국에서 발표한 진동 추정식  $V=K(D/Wb)^n$ 의 K값이 상수가 아니고 발파공의 구속저항에 따라 변수로 작용하여 동일한 지발당장약량에서 발파진동의 크기가 약 30%정도 차이가 발생하는 것으로 나타나기 때문이다.

“다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”에서 다단장약부분의 지발당장약량을 줄이기 위하여 지발단수를 늘려 발파하면 심발발파의 진동은 더욱 적어지므로 “다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”의 심발발파진동은 확대공의 발파진동 보다 항상 적게 발생된다.

발파진동의 제어기술은 발파공의 구속저항을 적게하여 발파진동을 제어하는 방법이 더 능률적이고 경제적인 방법이므로 발파기술을 고도화하여 발파공의 구속저항을 감소시키는 발파기술을 개발하고 적극적으로 활용하여 경제적인 터널발파가 이루어져야한다.

### 6. 신공법의 굴진장 증대 효과

종래의 V-cut발파법으로는 경암에서 3.0m이상의 단일발파당 굴진장으로 굴착이 곤란하였으나 “다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”은 단일 심발발파가 가능한 굴진장의 2~3배로 심발발파를 할 수 있는 발파방법이므로 보조심발공으로 굴착이 가능한 굴진장의 2~3배의 단일발파당굴진장으로 발파가 가능하여 장공발파에 의한 굴진율 증대와 경제적인 터널굴착이 가능하다.

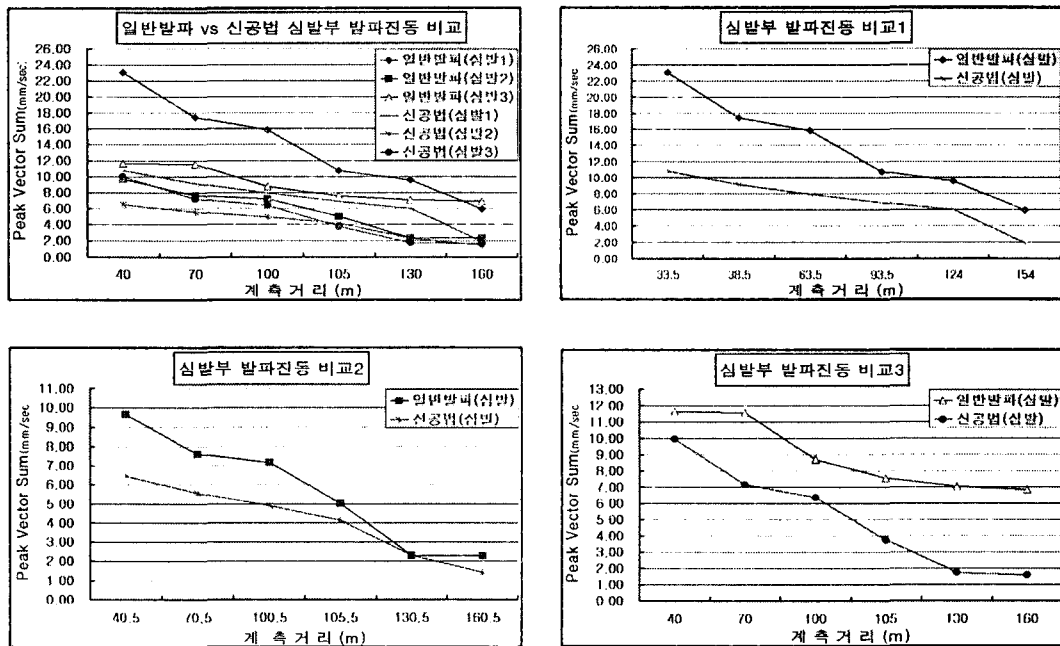
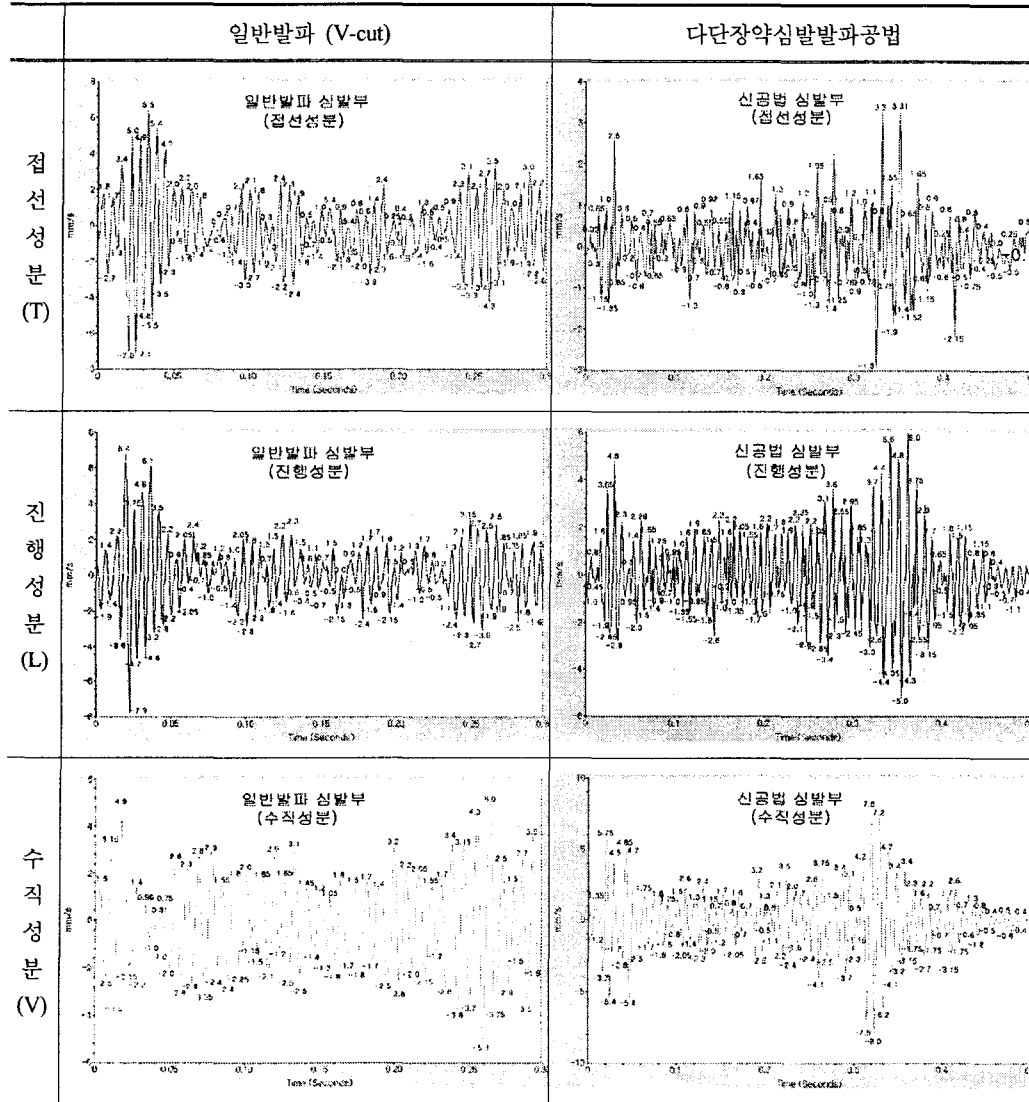


그림 10. V-cut 심발공의 일반발파와 신공법의 발파진동값 비교

표 1. V-cut 심발공의 일반발파와 다단심발발파의 진동파형 비교



7. 신공법의 장약 및 기폭방법

“다중 심발공에 의한 V-cut 다단장약발파방법”을 적용하여 터널을 발파하려면 종래의 단일보조심발을 이용한 V-cut발파법과 동일하게 천공하거나 다중보조심발에 의한 V-cut발파가 가능하다.

7.1 단일 보조심발공에 의한 V-cut발파방법

보조심발공의 굴착 깊이를 단일발파당굴진장의 1/2 위치에서 발파가 이루어지도록 천공하여 전체 천공깊이의 1/2 부분까지 장약하고 나머지 부분은 전색을 해야한다. 심발공의 하부장약은 공저부분에서부터 보조심발공의 장약량과 동일한 장약량을

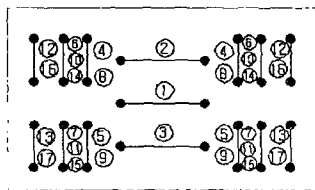
장전하고 전체굴진장의 1/2지점까지 전색을 해야 하고 심발공의 상부장약은 하부장약의 전색이 완료된 전체굴진장의 1/2 지점에서 부터 보조심발공 장약량의 80~100%를 장전하고 나머지 공구부분까지 전색을 해야 한다. 보조심발공과 심발공의 기폭 순서는 다단장약의 형태에 따라 달라지는데 심발공 만을 다단장약한 경우에는 보조심발공을 먼저 기폭하고 다음에 심발공의 상부장약, 심발공의 하부장약, 확대공 순으로 발파하고, 확대공까지 다단으로 장약한 경우에는 보조심발공, 심발공의 상부장약, 확대공의 상부장약, 심발공의 하부장약, 확대공의 하부장약 순으로 기폭 해야 한다.

7.2 다중심발발파에 의한 V-cut발파방법

이중 보조심발에 의해 3단으로 발파하기 위하여 심발공까지 다단으로 장약하는 경우에는 제1보조심발공, 제2보조심발공의 상부장약, 심발공의 상부장약, 제2보조심발공의 하부장약, 심발공의 중간장약, 심발공의 하부장약순으로 기폭하고, 3단으로 발파하되 확대공까지 다단으로 장약하는 경우에는 제1보조심발공, 제2보조심발공의 상부장약, 심발공의 상부장약, 제2보조심발공의 하부장약, 심발공의 중간장약, 확대공의 상부장약, 심발공의 하부장약, 확대공의 하부장약 순으로 기폭 해야 한다.

7.3 단일 및 다중보조심발공의 다단장약도

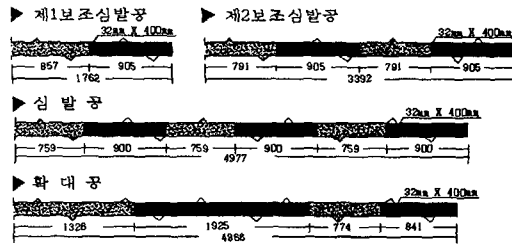
(1) 천공경-45mm, 굴진장-4.2m, 천공장-4.5m



(a) 정면도

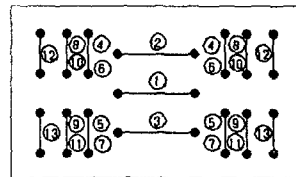


(b) 단면도



(c) 장약상세도

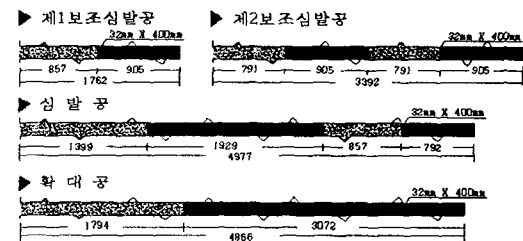
그림 11. 제2보조심발공, 심발공, 확대공의 다단장약도(4.5m)



(a) 정면도



(b) 단면도



(c) 장약상세도

그림 12. 제2보조심발공, 심발공의 다단장약도(4.5m)

7.4. 기폭 순서도

(1) 천공경-45mm, 굴진장 4.2m, 천공장-4.5m

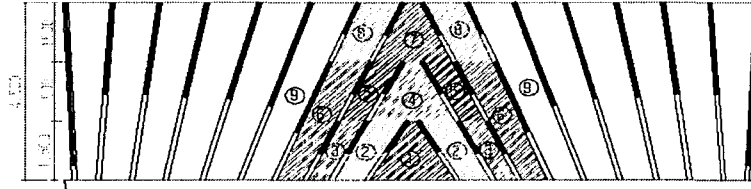


그림 13. 제2보조심발공, 심발공, 확대공의 다단장약 기폭순서도(4.5m)

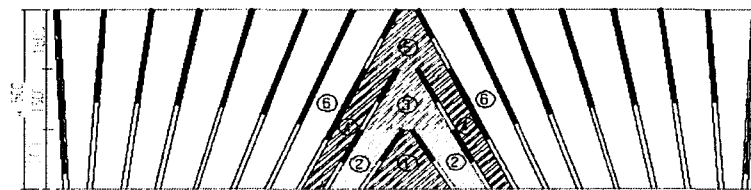


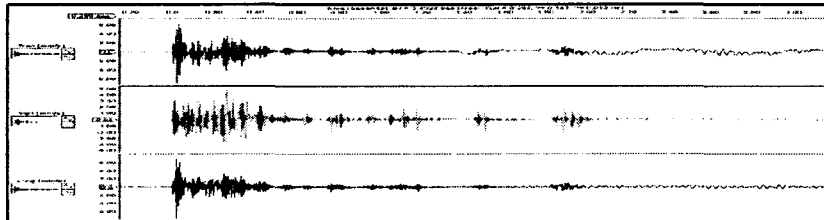
그림 14. 제2보조심발공, 심발공의 다단장약 기폭순서도(4.5m)

8. 신공법의 적용시험

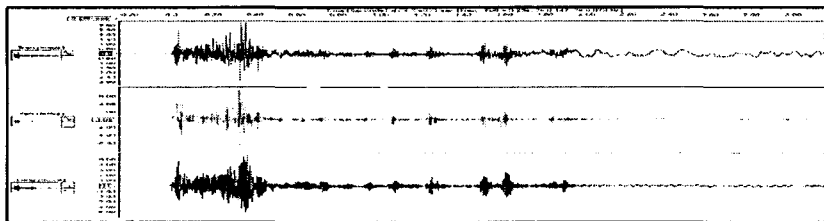
8.1 현장적용 시험결과 및 신기술 발파공법 분석 및 평가

(1) ○○우회도로 건설현장

1) 일반발파 발파진동 파형



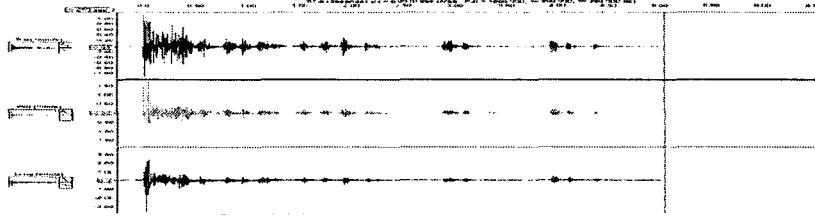
2) 신공법 발파진동 파형



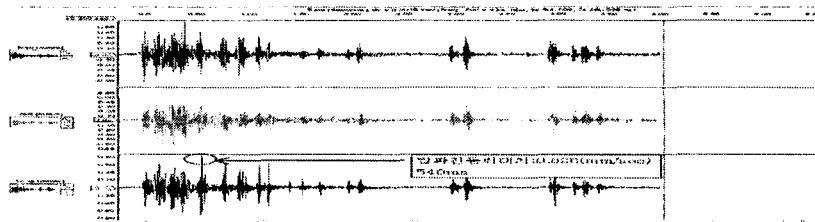


(2) 인천 00-00 전력구 건설현장

1) 일반발파 발파진동 파형

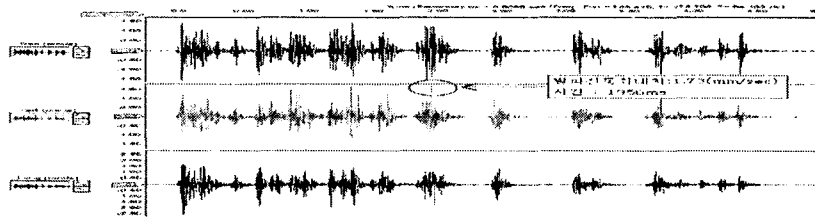


2) 신공법 발파진동 파형

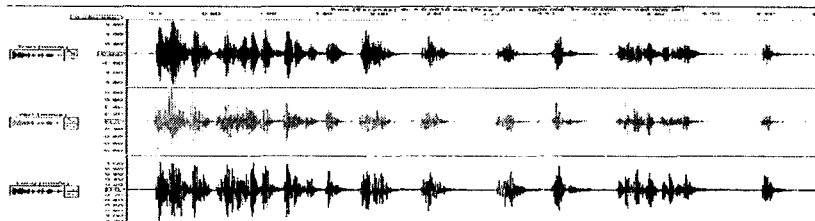


(3) 00로 건설현장

1) 일반발파 발파진동 파형



2) 신공법 발파진동 파형



### 8.2 발파효율

| 구 분                      | 여수 우회 |       | 신현 - 송현 |       | 양녕로   |       | 비고 |
|--------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|----|
|                          | 신공법   | 재래식   | 신공법     | 재래식   | 신공법   | 재래식   |    |
| 천공장(m)                   | 3.5   | 3.5   | 1.1     | 1.1   | 1.5   | 1.5   |    |
| 굴진장(m)                   | 3.3   | 3.2   | 1.0     | 1.0   | 1.35  | 1.3   |    |
| 발파효율(%)                  | 94.28 | 91.42 | 90.9    | 90.9  | 90.0  | 86.67 |    |
| 비장약량(kg/m <sup>3</sup> ) | 0.870 | 0.906 | 2.038   | 2.113 | 0.660 | 0.687 |    |

### 8.3 소결

V-cut 발파법의 심발공을 다단으로 장약하여 발파하였을 때 동일 지발당 장약량에서 심발공의 구속저항이 감소되어 진동이 감소되고, 발파효율이 향상된다.

### 9. 결론

신공법은 V-cut 발파공법의 심발공을 다단장약을 하여 선발파공에 의해 형성된 자유면이 후발파공의 완전한 자유면을 형성하여 최소저항선거리의 감소효과를 발현시키므로 동일한 지발당장약량으로 심발발파를 실시한 경우에도 심발공의 구속저항이 감소되어 발파진동이 작아지고, 발파효율이 향상된다.

### 참고 문헌

1. Cho, S.H., H.S. Yang & K. Kaneko, 2003.6, Influence of rock inhomogeneity on the dynamic strength of rock, Tunnel & Underground(J. KSRM) 13.3, pp.180-186
2. Olofson, S. O. 1988, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Applex AB, pp.131-144.
3. 두준기, 양형식, 2001, 최소저항선과 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향, 화약·발파 Vol, 19, No,3 pp.59-66.
4. 김재극, 1999, (개정판)산업화약과 발파공학, 서울대학교, pp.163-185