

터널 심발부의 선균열을 이용한 발파공법의 현장시험에 관한 연구

A study on pilot Test of the Composition Presplitting Angle Cut method in tunnel blasting

황 학*¹, 이태노*²

Hwang, Hak · Lee, Tai Ro

Abstract

Composition Presplitting Angle Cut (COPA-Cut) is a newly developed blasting method for tunnel excavation. Contrary to existing methods, COPA-Cut first creates presplitting by tension crack in cut. In this study, field tests measuring the advance efficiency, noise and ground vibration were performed in order to verify the presplitting effect. To compare the economy and workability, tests were simultaneously performed by COPA-Cut and existing method on the same condition. Results show that COPA-Cut increased advance efficiency and decreased noise and ground vibration. Also, it was confirmed that COPA-Cut is superior to existing method in terms of economy, workability and quality control.

Keywords: Cut, Presplitting, COPA - Cut blasting method

요 지

터널굴착 발파기술로 새로 개발된 Composition Presplitting Angle Cut (COPA)은 기존 공법과는 달리 심발부에 먼저 인장파괴를 통하여 선균열(사전절단)을 형성시킨다. 본 연구에서는 선균열 효과를 검증하기 위하여 굴진효율과 소음 진동의 발생크기를 측정하는 현장시험을 실시하였다. 그리고 이 공법의 경제성 및 작업성(시공성)을 비교하기 위하여 동일한 조건에서 기존의 발파공법을 동시에 시험하여 그 결과를 비교하였다. 시험 결과 COPA - Cut 발파공법이 기존 발파공법보다 굴진효율이 증가하고 소음 진동이 감소되었다. 또한 경제성, 시공성 및 품질관리 측면에서 우수하다는 것을 확인 되었다.

주요어: 심발부, 선균열, COPA - Cut 발파공법

1. 서론

우리나라에서 발파공사가 시작 된지는 약 100년이 지

났으나, 대형 천공장비에 의한 발파 굴착이 터널공사에 본격적으로 도입된 것은 서울에서 지하철 공사가 시작된 80년대 중반이라고 할 수 있다. 짧은 기술역사에도 불구하고

*1 (주) 성보 E&C 기술 고문

*2 (주) 성보 E&C 상무이사

하고 우리의 발파기술은 그동안 많은 공사경험을 통하여 괄목할 만한 발전을 한 것으로 보여 진다. 그럼에도 불구하고 발파공사의 위험성 때문에 기왕의 발파패턴 및 방법이 고식적으로 사용되고 있어 새로운 기술발전이 어려울 뿐만 아니라 공사현장의 생산성을 저하시키고 여전히 안전사고가 일어나고 있다는 점이 작금의 국내 발파기술의 한계와 문제점으로 거론되고 있는 현실이다. 또한 우리의 경우에는 최대 3.0 m 정도의 단공(短孔) 발파 수준을 넘지 못하고 있는데 비하여 유럽의 경우 발파당 굴진장이 5.0 m ~ 7.4 m 에 달하는 장공(長孔) 발파가 이루어지고 있다. 최근에 국내에서도 최신 장비들이 생산 또는 도입되어 정밀한 천공이 가능해졌고 발파작업의 후속 공정인 버력의 신속한 처리와 지보기술의 발달로 인하여 보강작업이 원활하게 이루어짐을 감안 한다면 굴진장의 증대는 향후 국내 터널공사의 비용절감과 공기단축을 꾀할 수 있는 새로운 도약이 될 것으로 예상된다. 최근에 들어 각종 터널공사에서는 발주기관에 따라 발파당 굴진장을 시공자의 기술능력에 따라 자율적으로 결정하도록 함으로써 굴진장의 증대를 허용하는 추세이다.

본고에서는 최근에 국내에서 개발되어 신기술로 인증 받은 COPA-Cut (Composition Presplitting & Angle Cut) 발파공법을 소개하고 국내 터널 현장에서 많이 사용하고 있는 기존의 터널발파 굴착방법과 비교하여 기술 특성의 분석과 각종 시험결과를 분석하였다.

2. 발파기술의 목표와 조건

일반적으로 터널 굴착을 위한 발파기술은 1 자유면인 막장면을 심빼기를 통하여 2 자유면으로 만들어 암반의 파쇄저항을 인위적으로 저감시켜 확대공의 파괴효과를 최대화하는 기술이다. 암반의 파쇄는 먼저 암반에 천공하여 폭약을 장전하고 이를 폭발시키는 세 가지 과정 즉, 천공, 장약, 기폭의 단계를 거쳐 이루어진다. 암반의 파쇄조건은 폭발시에 발생하는 기폭력이 암반이 갖고 있는 파쇄 저항력보다 클 경우에 암반이 파쇄된다 즉, 장약의 기폭력 > 암반의 파쇄저항력. 기폭력을 크게 하기 위해서는 장약량을 증가시켜 굴진효율을 높일 수 있으나 장약량이 많을수록 소음·진동은 크게 발생한다. 따라서

기술적인 관점에서 볼 때 발파기술의 목표는

- 굴진효율의 최대화
- 소음·진동의 최소화

로 설정할 수 있으며, 이 두 가지를 동시에 달성해야 하는 이율배반적인 목표를 갖고 있는 셈이다.

한편 이러한 기술적인 관점 외에도 현장운영 등의 관리적인 관점에서 볼 때 발파기술이 터널굴착 발파공법으로써 갖추어야 할 조건은

- 경제성: 소요장약량의 절감, 천공수의 감소 등
- 공기단축: 천공시간의 단축, 1회 굴진장의 확대
- 작업성: 정밀천공의 가능성, 천공작업의 용이, 버력 처리의 용이
- 안전성: 잔류화약의 최소화, 진동여파로 발생하는 여굴의 최소화

등으로 요약할 수 있다.

상기한 목표와 조건은 터널굴착 발파기술을 판단하는 기준으로도 적용할 수 있다. 그러나 이러한 목표와 조건의 우선순위를 정하는 것은 쉽지 않다. 이것은 현장특성과 여건에 따라 다르게 적용될 수 있으며 또한 운용 기술자의 선호도에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 국내외를 막론하고 대부분의 터널발파공법은 앞서 언급한 데로 심빼기(심발부의 굴착)로부터 시작하여 전단면의 굴착으로 이어지는데, 초기의 심발부 굴착은 터널발파의 성공 여부를 결정하는 가장 중요한 관건이다. 따라서 위의 목표와 조건을 위하여 심발부의 천공종류, 배열형태(길이, 방향), 장약량, 장약방법, 기폭시스템에 따른 메카니즘의 설정이 터널발파기술의 핵심이다.

3. 기존 터널 발파공법의 특성

3.1 발파공법별 특성

터널발파 굴착기술의 발파공법별 특성은 심발부의 발파 메카니즘으로 구분된다. 즉, 심발부 부위에서의 천공

종류, 천공배열형태, 길이, 방향, 장약량, 장약방법, 기폭시스템 등이 조합되어 심빼기가 이루어진다. 국내 터널현장에서 일반적으로 적용하고 있는 발파공법의 종류는 심발부 발파의 특성에 따라 경사공 심발 (Angle Cut), 평행공 심발 (Parallel Cut)과 이를 조합한 발파공법이 있다.

1) V - Cut 발파공법

이 공법은 심발부 중심을 대칭축으로 하여 막장면에서 65° 내외 각도로 좌우에 경사공을 천공하며, 경사공 간의 공저간격을 약 15 cm~20 cm 간격으로 유지한다. 이 공법에서는 경사공의 공저부분을 집중시켜 썸기형의 파괴효과를 얻기 위해서 경사공에 집중적으로 장약하여 압축 및 전단파괴의 원리에 의하여 심빼기가 이루어진다. 이 공법은 심발공 패턴이 단순하기 때문에 터널현장의 발파 기술자들이 가장 선호하는 발파공법으로서 국내에 가장 먼저 도입된 발파기술이다. V 형태의 썸기형 심빼기 발파공법은 장약량 및 천공수는 암질상태, 천공직경, 천공길이 및 폭약의 종류에 따라 결정되지만, 근본적으로 공당 장약밀도, 경사공의 천공각도, 경사공의 공저간격은 반드시 원리에 맞게 설계되고 시공되어야 높은 굴진효율을 유지할 수 있다.

2) L.C - Cut (Large Hole Cylinder) 발파공법

이 발파공법은 심발부에 대구경 무장약공과 장약공을 일정한 간격으로 평행 천공한 후 장약하여 심빼기 작업이 이루어지는 발파공법이다. 이 발파공법은 기존의 Burn-Cut 발파공법을 개량한 발파공법으로서, 대구경의 무장약공을 천공하여 이를 자유면으로 활용할 뿐만 아니라 파쇄암석이 분출되는 공간으로 활용된다. 이러한 메카니즘의 특성으로 천공장을 늘리고 발파효율을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 발파진동 또한 상당히 제어할 수 있다. 이 발파공법은 대형 천공장비인 Jumbo Drill을 이용하여 천공하므로 천공 작업자의 천공능력에 따라 발파효율이 좌우된다.

L.C-Cut 발파공법의 심발공 천공장은 무장약공 직경에 의해서 결정되는데 무장약공의 공경이 작으면 심발공 천공장은 짧아지고, 무장약공의 공경이 크면 심발공 천공장은 늘어난다. 예를 들면 무장약공의 직경이 102 mm

일 경우, 스웨덴에서 제시하고 있는 경험식에 따르면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= 0.15 + 34.1\phi - 39.4\phi^2 \\ &= 0.15 + 34.1 \times 0.102 - 39.4 \times 0.102^2 \\ &= 3.2 \text{ m} \end{aligned}$$

여기서, H: 천공장 (m), ϕ : 무장약공의 직경 (m)

즉, 무장약공의 직경을 102 mm로 하여 가장 효과적인 발파효율을 얻기 위해서는 천공장을 최대 3.2 m로 해야 한다.

3.2 기존 발파공법의 문제점

1) 작업성 및 경제성의 문제점

- V-Cut 발파공법에서는 경사공의 공저간격을 일정하게 유지하기 어려울 뿐만 아니라 매우 좁기 때문에 천공의 오차로 공과 공이 관통 되거나, 너무 벌어져 굴진 효율이 떨어질 수 있다.
- V-Cut 발파공법의 경사공 경사각이 65° 내외로 유지해야 하기 때문에 터널폭이 좁은 구간에서는 장공천공이 어렵고, 천공작업자가 공각도를 정확히 설정하여 천공하기가 힘들다.
- 경사공의 공각도 및 심발공간의 공간격으로 장공천공이 어렵다.
- V-Cut 발파공법의 경우 장공 발파시 보조 심발공이 필요하여 심발공의 천공수가 많아진다.
- L.C-Cut 발파공법의 심발공과 무장약공과의 공저간격이 최소 15cm 이므로 천공길이가 길 때에는 공저부분의 간격을 일정하게 유지하기가 어렵다.
- 대구경의 무장약공을 사용하기 때문에 천공시간이 상당히 오래 소요되고 리빙비트의 비용이 부담된다.
- L.C-Cut 발파공법 심발공의 적정 장약밀도를 유지하지 않을 경우 소결현상이 발생하거나 파쇄효과가 떨어져 발파효율이 저하된다.
- 최초로 진행되는 심발공의 암반파괴 원리는 압축과 전단파괴 원리를 이용하기 때문에 파쇄효과가 크지 않고 장약량이 많이 소요된다.

표 1. 기존 발파공법과 COPA - Cut과의 파괴 메카니즘원리 비교

| 구 분 | 기존 발파공법 | COPA - Cut 발파공법 | |
|--------|--|-------------------|----------------|
| | | 선 (先) | 후 (後) |
| 심발공 배열 | · V-Cut : 경사공 · L,C-Cut : 무장약공, 수직공 | · 무장약공 · 균열유도공 | · 경사공 · 수직공 |
| 기 능 | 심빼기/확대 | 사전절단 | 심빼기/확대 |
| 파괴이론 | 압축 및 전단파괴 | 인장파괴 | 압축 및 전단파괴 |
| 특 징 | 단 순 파 괴 | 조 합 파 괴 | |

- 국내 화약류의 제원 및 성능상 경사공의 적정 장약밀도를 맞추기가 어렵다.

2) 안전 및 품질상의 문제점

- 심발부 발파는 1자유면 발파작업이기 때문에 공당 장약량 및 장약밀도를 증대시켜야 하므로 발파진동 및 소음이 크게 발생한다.
- 저조한 발파효율로 인하여 잔류공이 많이 발생하기 때문에 후속적인 천공작업과 장약 작업시 잔류약 확인이 어렵고 작업 중에 폭발사고가 발생할 우려가 있다.
- 발파진동이 크게 발생하여 주변암반에 손상을 많이 주기 때문에 터널 천반부에서 낙반사고가 발생할 수 있다.
- 파쇄암중 대괴가 많이 발생하여 버력을 처리할 때 소할작업이 부수적으로 이루어져야 한다.
- 심발공의 집중장약과 좁은 공간적으로 비산이 발생하여 안전사고가 우려된다.

4. 터널 심발부 선균열 발파공법 (COPA - Cut)의 소개

4.1 발파공법의 원리 및 메카니즘

COPA-Cut (Composition Presplitting & Angle Cut) 발파공법은 터널 심발부에 무장약공, 균열유도공, 경사공 및 수직공을 배열하고, 심발부 중심선에 따라 천공된 무장약공과 균열유도공의 Presplitting 효과를 이용하여 인장파괴로 심발부 암반을 사전 절단한 후 경사공과 수직공을 순차적으로 기폭시켜 심발부를 확대시키는 발파공법이다.

기존의 발파공법이 압축파괴와 전단파괴를 이용하여 암반을 파쇄시키는 메카니즘으로 구성되어 있는데 반하여 본 발파공법은 Decoupling장약 되는 균열유도공을 새롭게 도입하여 Decoupling 효과와 Presplitting 효과를 통한 인장파괴 원리를 이용하여 사전에 암반을 절단 시킨 후 주변에 배열된 경사공으로 파쇄암석을 분출시키고 수직공으로 암반을 파쇄하여 확장시키는 <선절단 (先切斷) 후파쇄 (後破碎)> 발파공법이다. 표 1에서는 기존 발파공법과 COPA-Cut 발파공법과의 메카니즘 원리를 비교하였다.

4.2 COPA-Cut 발파공법별 작동 메카니즘

본 발파공법은 그림 1 COPA - Cut 발파공법의 심발부 발파패턴도에서 보는 바와 같이 균열 유도공과 경사공의 배열상태에 따라 2가지 형태로 분류 되는데, 하나는 심발부 중심부에 상하 일자형으로 사전절단 시키고 설형 (Wedge Type)으로 경사공을 설치하는 COPA-w Cut 발파공법이다. 다른 하나는 심발부 중심점을 대칭으로 십자형으로 사전절단을 시키고 피라미트형 (Pyramid Type)의 경사공을 설치하는 COPA-p Cut 발파공법이다.

표 2는 발파공법별 작동 메카니즘이며, 이에 따라 COPA-Cut 발파공법의 파괴순서 및 파괴형태는 그림 2에 나타나 있다.

4.3 COPA-Cut 발파공법의 특징과 효과

1) 선균열 (Presplitting)

선균열은 폭약을 장전하지 않은 무장약공과 약장약을 한 균열유도공을 이용하여 암반을 절단하여 심발부 암반

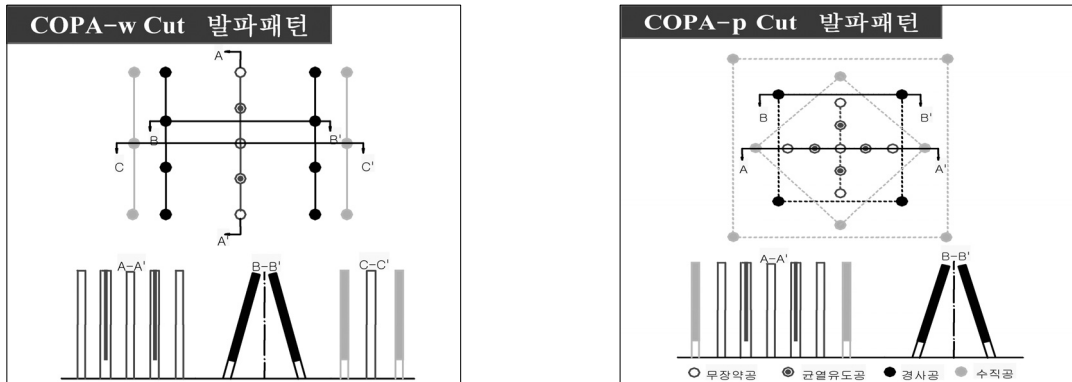


그림 1. COPA - Cut 발파공법의 심발부 발파패턴도

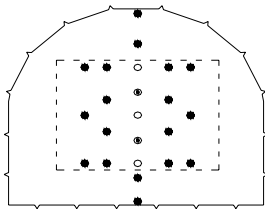
표 2. COPA-Cut 발파공법별 작동 메카니즘

| 단 계 | 내 용 | COPA-w Cut | COPA-p Cut |
|------|--------------|---|---|
| 1 단계 | 무장약공 및 균열유도공 | -심발부 중심축에 일자형으로 무장약공 천공 -무장약공 직경은 45 mm으로 천공하고 공간격은 400 - 900 mm 유지 | -심발부 중심축에 십자형으로 무장약공 천공 -무장약공 직경은 45 mm으로 천공하고 공간격은 600 mm 유지 |
| 2 단계 | 경사공 | -심발부 중심축 좌우 양방향에서 일자형의 경사공 설치 -경사공 공저간격은 400 - 800 mm로 하고 경사각은 70°-80° 유지 | -심발부 중심점을 향하여 피라미트 형태의 경사공 설치 -경사공 공저간격은 400 - 800 mm로 하고 경사각은 70°-80° 유지 |
| 3 단계 | 수직공 | -경사공 외곽에 일자형 수직공 설치 -수직공의 간격은 533 - 800 mm으로 함 | -사각형태의 2단 수직공 설치 -수직공의 간격은 1,500 - 2,000 mm 으로 함 |
| 4 단계 | 장약 | -균열유도공은 부분장약하며, 장전밀도는 0.3 - 0.5 Kg/m -경사공의 장전밀도는 0.8 Kg/m -수직공의 장전밀도는 0.7 Kg/m | -균열유도공은 부분장약하며, 장전밀도는 0.3 - 0.5 Kg/m -경사공의 장전밀도는 0.8 Kg/m -수직공의 장전밀도는 0.7 Kg/m |
| 5 단계 | 기폭 | -균열유도공을 동시에 기폭 -경사공 및 수직공을 순차적으로 기폭시킴. | -균열유도공을 동시에 기폭 -경사공 및 수직공을 순차적으로 기폭시킴. |

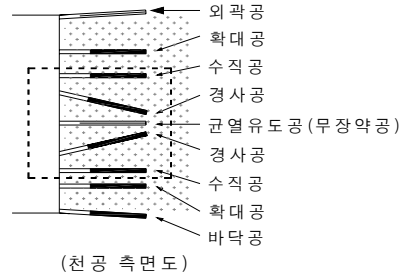
을 일자형 또는 십자형으로 사전절단 하는 것이다. 즉, 천공경보다 작은 약경을 가진 폭약을 장약할 경우 장약공과 폭약사이에 공간이 존재하는데, 이 공간에 의해 폭약이 폭발할 때 발생하는 충격압은 공기층의 폭굉 임피던스 (Impedance)의 차이에 의한 충격의 감쇠효과가 커져서 장약공 공벽을 파쇄시키는 효과가 적어지면서 무장약공과 균열유도공 사이에 균열선을 발생시키는 원리이다. 이러한 균열 발생을 위하여 다음의 두 가지 조건이 필요하다.

- 균열유도공내의 폭발압력 (p)의 크기는 공벽을 파쇄하지 않는 범위에서 균열만을 유발시킬 정도라야 한다. 즉, 균열유도공내에 발생한 폭발압력의 크기가 암석의 인장강도 보다는 크고 압축강도 보다는 작아야 한다. 즉, $\sigma_t < p < \sigma_c$.
- 이때 발생하는 균열범위 크기는 최소한 인접 무장약공에 도달하여야 한다.

기존의 발파공법 원리인 압축 및 전단파괴는 영역 또는



(천공 배열도)



(천공 측면도)

1단계 : 균열 유도공 발파



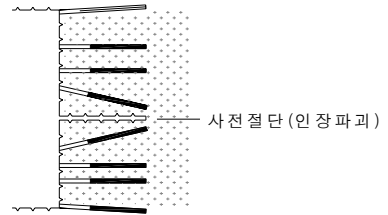
2단계 : 경사공 발파



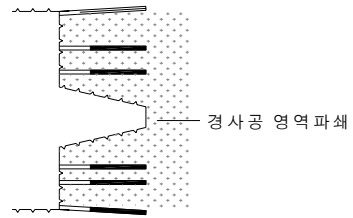
3단계 : 수직공 발파



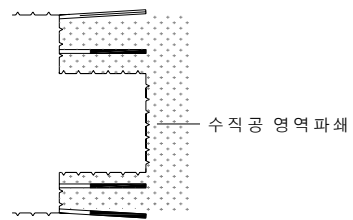
4단계 : 기타공 발파



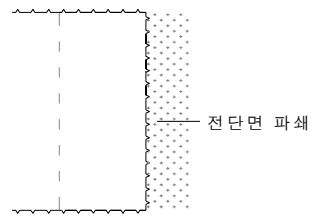
사전절단 (인장파괴)



경사공 영역 파쇄



수직공 영역 파쇄



전단면 파쇄

그림 2. COPA-Cut 발파공법의 파쇄순서 및 파괴형태

면(面)형태의 파괴인데 비하여 본 발파공법의 사전절단 원리인 인장파괴는 대(帶) 또는 선(線)형태의 파괴이다. 이렇게 형성된 균열로 말미암아 암반은 이완되고, 이는 곧 암반이 갖고 있는 파쇄저항력이 감소됨을 의미한다. 이러한 암반 파쇄저항력의 감소는 발파에 있어 다음과 같은 효과를 예상할 수 있다.

- 일반적으로 암반의 인장강도는 압축강도의 10 % 정도 밖에 되지 않아 기존 발파공법의 전단 및 압축파괴방법보다 COPA-Cut 발파공법의 인장파괴는 적은 화약으로 큰 파쇄효과를 얻을 수 있다.
- 심발부 암반의 파쇄저항력이 감소되어 경사공과 수직공의 후속 폭발의 효과가 극대화 되며, 결국 터널 전 단면의 굴진효율을 높일 수 있고, 이로 인하여 경제성을 꾀할 수 있다.
- 파쇄저항력이 감소된 심발부 암반의 파괴에 있어 발파로 인하여 발생하는 소음·진동이 감소되어 도심지 발파 등에 환경 친화적으로 적용할 수 있다.

2) 경사공의 경사각 확대

경사공의 천공 경사각은 천공길이를 결정하는 직접적인 요인이다. 왜냐하면 천공경사각이 작을 경우 천공장비가 터널 측벽에 간섭되어 천공작업이 어렵기 때문이다. COPA-Cut 발파공법에서는 경사공의 경사각을 70°~80°로 설정하여 V-Cut 발파공법보다 1.5 ~2.0 배의 천공길이를 확보할 수 있다. 이러한 경사각의 확대로 말미암아 다음과 같은 효과를 예상할 수 있다.

- 작업공간이 커져 천공작업이 수월하다.
- 장공천공으로 인하여 장공발파가 가능하다.
- 공기단축

5. 발파공법별 현장 시험발파

5.1 개요

본 시험발파에서는 앞에서 설명한 기존의 발파공법과 COPA-Cut 발파공법을 비교하고자 실시하였다. 발파

공법 간의 비교시험은 각 공법의 정확한 천공이 전제되어야 하며, 대상암질이 동일하고, 또한 다수의 시험횟수가 필요하고, 다양한 암질에서 시험이 이루어져야하는 등 여러 가지의 객관적인 자료가 필요하다. 그러나 경험적으로 볼 때 동일한 조건에서 발파를 하여도 매번 동일한 결과가 나타나지는 않는다. 그 이유는 그 만큼 많은 영향요인이 있기 때문을 추정된다. 예를 들어 발파 기술자마다 발파공법별 선호도와 숙련도가 다를 뿐만 아니라 동일한 터널이라 하더라도 적용대상 암질이 막장마다 다르다. 이러한 이유에서 본 비교시험은 향후에 더욱 다양한 암반조건하에서 지속적으로 보완되어야 한다. 따라서 여기에서는 COPA-Cut 발파공법의 특징인 선균열(사전절단)의 효과를 현장시험을 통하여 확인하고자 한다. 국내의 터널 암반은 대부분 보통암 내지 경암으로 구성되어 있다. 본 고에서는 표 3에서 보는 바와 같이 발파공법별로 대표적으로 보통암과 경암 터널에서 실시한 시험발파를 소개하고자 한다.

표 3. 발파공법별 시험발파 사례

| 적용 발파공법 | V-Cut, COPA w-Cut, COPA p-Cut | V-Cut, L,C-Cut, COPA p-Cut |
|----------|-------------------------------|----------------------------|
| 암반상태 | 보통암 | 경 암 |
| 공학적 암반분류 | R,M,R : 73 | R,M,R : 80 |
| 천 공 장 | 3.5 m | 4.3 m |

5.2 보통암에서의 현장 시험발파

국내 터널현장의 굴착패턴은 보통암 기준이 가장 많은 비중을 차지하고 있어 본 연구에서는 보통암 수준의 막장에서 발파공법별 시험발파를 실시하였다. 시험발파는 경춘선 복선공사 ○○ 공구 현장에서 이루어 졌는데, 공사현황은 표 4와 같다.

표 4. 시험발파 현장 공사현황

| 구 분 | 내 용 | 비 고 |
|---------|-----------------------|------------|
| 터널규모 | 10.95 × 8.53 | 최대폭 × 최대높이 |
| 터널 단면적 | 85,488 m ² | |
| 시험발파 위치 | 갱구로부터 2.7 Km 지점 | |

1) 대상암반 특성

암 판정 분류기준에 따라 본 현장의 막장을 관찰한 결과는 표 5과 같고, 막장암반은 공학적 암반분류 기준으로 볼 때 보통암 수준 암반으로 분류 할 수 있다.

표 5. 막장암반의 공학적 암반분류 결과

| 분류기준 | 분류점수 | 암 판 정 |
|------------|------|-------|
| R,M,R | 73 | 우 수 |
| Q - system | 9,3 | 보 통 |

2) 시험발파 패턴 및 방법

현장시험은 터널 입구로부터 약 2.7 Km 굴착 진행된 막장에서 실시되었으며 터널 전단면발파로 이루어 졌다. 본 현장에서는 V - Cut 발파공법으로 시공되고 있어 여기에서 데이터를 수집 하였으며, COPA - Cut 발파공법은 객관적인 비교를 위하여 동일한 천공장을 사용하였다. 본 시험발파는 발파공법별로 각각 2회씩 실시하였으

며, 수집데이터는 평균값을 택하였다. 천공은 점보드릴 3 - Boom 장비를 사용 하였으며, 천공의 오차를 최소화 하기 위해서 천공작업 전에 막장에 장약공 배열패턴을 마킹 (Marking)을 실시한 후 천공토록 하였다. 또한 기 폭뇌관은 비전기식 뇌관을 사용하여 초시의 정밀도를 높 이고 미류전류에 의한 안전사고를 방지 하였다. 표 6은 보통암에서 실시한 발파패턴을 나타낸 것이다.

그림 3과 그림 4는 각각 COPA-w Cut 및 COPA-p Cut 발파공법의 천공 배열도이다.

3) 시험발파 결과분석

- 발파효율 비교분석

발파효율은 각 발파공법별로 천공장에 대한 잔류공장의 비로 산출하였는데, 심발부의 모든 장약공에 대한 잔류공의 깊이를 조사한 후 평균값을 산출한 것이다. 발파공법별 발파후 측정된 잔류공의 깊이를 측정하여 발파효율을 비교분석한 결과는 표 7과 같다.

표 6. 보통암에서 실시한 발파패턴

| 구 분 | 단 위 | 발파공법 | | | |
|-----------|--------|-----------------|--|------------|-------|
| | | V-Cut | COPA-w Cut | COPA-p Cut | |
| 수직공 천공장 | mm | 3,500 | 3,500 | 3,500 | |
| 경사공 천공장 | mm | 3,860 | 3,600 | 3,600 | |
| 경사공 천공각도 | ° | 65 | 75 | 75 | |
| 경사공 공저간격 | mm | 200 | 400 | 400 | |
| 무장약공 | 공 | - | 3 | 4 | |
| 심발공수 | 균열유도공 | 공 | - | 2 | 5 |
| | 경사공 | " | 22 | 8 | 4 |
| | 수직공 | " | | 6 | 8 |
| | 계 | " | 22 | 16 | 17 |
| 공당 장약량 | 균열유도공 | Kg/공 | - | 1,375 | 1,375 |
| | 주경사공 | " | 3,0 | 2,625 | 2,625 |
| | 보조 경사공 | " | 1,125 | - | |
| | 주변경사공 | " | 2,625 | - | - |
| | 수직공 | " | - | 2,625 | 2,625 |
| 심발부 총 장약량 | Kg | 51,75 | 39,5 | 38,375 | |
| 사용폭약 | | Megamite- I Φ32 | 균열유도공 Megamite- I Φ25 기타공 Megamite- I Φ32 | | |
| 사용뇌관 | | 비전기식 뇌관 | 비전기식 뇌관 | 비전기식 뇌관 | |



그림 3. COPA-w Cut 발파공법의 천공 배열



그림 4. COPA-p Cut 발파공법의 천공 배열

표 7. 발파공법별 발파효율 비교

| 발파공법별 | V - Cut | COPA-w Cut | COPA-p Cut |
|--------|---------|------------|------------|
| 잔류공 깊이 | 90 cm | 25 - 30 cm | 20 - 30 cm |
| 발파효율 | 74 % | 92 % | 93 % |

이와 같이 COPA - Cut 발파공법이 V - Cut 발파공법보다 심발부 화약량이 적게 사용 되었음에도 발파효율이 높게 나타난 이유는 심발공의 주장약공 (경사공 및 수직공)이 기폭되기 전에 균열 유도공을 통하여 암반을 사전에 이완시켜 암반의 파쇄저항을 감소시켰기 때문으로 추측된다. 그림 5는 V - Cut 발파공법의 잔류공의 모습이며, 그림 6은 COPA - Cut 발파공법의 잔류공의

모습이다.

- 발파비용 비교분석

발파공법별 심발부 발파비용은 파쇄된 암반의 단위용적당 비용으로 산출하였다. 이러한 방법으로 비용을 산출하기 위하여 먼저 심발부의 파쇄용적과 비장약량을 산

표 8. 발파공법별 발파비용 비교

| 발파공법별 | V - Cut | COPA-w Cut | COPA-p Cut |
|---------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 발파당 화약비 | 142,720 원 | 107,160 원 | 106,920 원 |
| 파쇄 용적량 | 10.38 m ³ | 15.45 m ³ | 14.55 m ³ |
| 화약비용 | 13,740 원/m ³ | 6,930 원/m ³ | 7,340원/m ³ |



그림 5. V - Cut 발파공법 적용후 측정된 잔류공 깊이의 모습

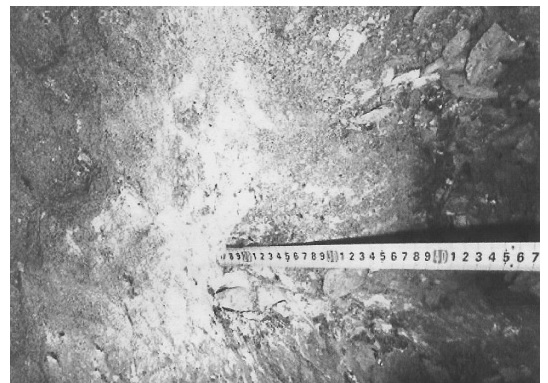


그림 6. COPA-p Cut 발파공법 적용후 측정된 잔류공 깊이의 모습

출한다. 발파공법별 파쇄용적은 발파효율과 심발부 파쇄 형태를 고려하여 산출하였다. 표 8은 발파공법별 심발부에 투입된 화약비(화약 + 뇌관)를 중심으로 발파비용을 분석한 결과이다.

- 발파진동 비교분석

발파공법별 발파진동의 크기를 분석하기 위해서 매 발파시 발파지점으로부터 100 m 후방지점의 터널 바닥에 보호망을 설치한 후 발파진동측정기를 설치하여 발파진동을 측정 하였다. 이때 사용된 발파진동기는 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 Instanetel 사 제품인 Mini-mate Plus 장비로서 진동 측정기에 3축 방향(L, T, V)의 센서가 내장된 제품이다. 각 공법별 수집된 발파진동값은 터널 바닥면에서 수집된 접선(Transverse), 수직(Vertical), 진행(Longitudinal)의 지반진동 크기를 합성한 값으로 하였으며, 발파진동 단위는 Kine(cm/sec) 으로 측정 되었다. 그러나 금번 시험발파시 발파소음은 터널내부에서 측정한 결과 발파진동 측정기에서 수집 가능한 최대 소음치가 110 dB(A) 이상을 초과하는 것으로 나타나 비교할 수 없었다. 표 9는 발파공법별 측정된 발파진동값 이다.

5.3 경암에서의 현장 시험발파

여기에서는 COPA - Cut 발파공법외에 국내 터널현장에서 일반적으로 적용하고 있는 V- Cut과 L,C- Cut 발파공법을 적용하였다. 또한 경암에서의 시험발파는 천공장을 4.3 m로 하여 발파공법별 장공발파에 대한 발파효과를 검증하기 위한 것이다. 국내에서는 아직 장공발파에 대한 기준이 정립되어 있지 않다. 그러나 노르웨이 등에서는 일반적으로 굴진장이 5.0 m 이상을 장공발파(Long Hole Blasting)로 하는 경우가 있지만 명확하게

학술적으로 또는 기술적으로 규명된 것은 없다. 본 시험은 서울 근교의 ○○ 시공사가 공사하는 편도 3차선 도로 현장에서 이루어 졌다. 표 10은 금번 장공발파 시험발파를 수행하게 된 기준을 나타낸 것이다.

표 10. 장공천공 시험발파 공사현황

| 구 분 | 내 용 | 비 고 |
|---------|------------------|-----|
| 터널규모 | 3차선 도로 | |
| 터널 단면적 | 170㎡ | |
| 시험발파 위치 | 갱구로부터 0.14 Km 지점 | |

1) 대상암반 특성

본 현장 터널 막장의 암반상태는 지표에서 약 30 m 하부에 위치하고 있으며, 갱구부에서 140 m 내외에 존재하기 때문에 기반암으로 구성되어 있는 화강암이 신선하게 보호되어 있다. 공학적 암반분류를 통해서 평가된 암반은 양호하여 전형적인 극경암 내지 경암구간의 막장상태를 유지하고 있다. 특히, 본 현장의 암반은 북한산과 더불어 우리나라 산악지대 중 매우 단단한 화강암 지대로 알려져 있다. 따라서 발파 굴착에는 상당한 어려움이 있다. 특히, 본 현장의 설계기준은 경암구간인 표준패턴 - I Type 에서는 굴진장이 3.0 m로 설정되어 있기 때문에 장공발파시 발파패턴 및 천공상태에 따라 발파효과가 상당히 다르게 나타날 것으로 예상된다. 표 11은 터널 막장의 Face Mapping을 통해 공학적으로 분류된 종합적인 암반평가이다.

표 11. 장공발파 시험시공 막장의 공학적 암반평가

| 분류기준 | 분류점수 | 암 판 정 |
|------------|------|-------|
| R,M,R | 80 | 우 수 |
| Q - system | 10.5 | 양 호 |

표 9. 발파공법별 발파진동 비교

| 발파공법별 | 측정거리 (m) | 지발당장약량 (Kg) | 발파진동 (cm/sec) | | | |
|------------|----------|-------------|---------------|-------|-------|-------|
| | | | T | V | L | Sum |
| V - Cut | 100 | 6.0 | 1,010 | 1,650 | 0,735 | 1,650 |
| COPA-w Cut | 100 | 5,25 | 0,999 | 0,910 | 0,427 | 1,010 |
| COPA-p Cut | 100 | 5,25 | 0,772 | 0,705 | 0,456 | 0,775 |

2) 시험발파 패턴 및 방법

발파공법의 특성에 따른 발파효과와 한계성을 도출하기 위해서 발파공법별 고유의 메카니즘과 원리를 기초로 하여 발파패턴을 설계하고 장약량을 산출하게 되었다. 표 12는 금번 시험발파에 적용된 발파공법별 종합적인 발파패턴이다.

시험발파는 심발부를 제외하고는 모든 발파공법이 동일한 발파패턴으로 진행 되었다. 이러한 발파패턴은 현장의 터널 시방기준 및 발파패턴 설계도면을 기초로 하

여 이루어 졌는데, 천공장이 4,300 mm 이기 때문에 공당 장약량, 공간격 및 최소 저항선은 당초 설계도면과 다르게 이루어 졌다. 그림 7은 실제 천공장을 4,300 mm 길이로 천공된 모습이다.

또한, 터널의 주벽면 보호와 발파진동 저감을 위해서 외곽공은 Smooth Blasting의 제어발파를 실시하였다. 모든 발파공법은 천공 전에 정확한 천공을 위해서 Jumbo Drill 의 운전공 (Operator)의 완벽한 천공을 위해서 시험발파의 취지와 천공패턴을 숙지 시켰다. 또한 현재 국내 터널에서는 대부분이 V - Cut 발파공법을 사용하고 있기 때문에 천공 작업원이 다른 발파공법은 처음 내지는 미숙하여 천공도면을 반드시 숙지를 한 후 천공토록 하였다. 금번에 사용된 천공장비는 최첨단 기능을 갖춘 Jumbo Drill 장비로서 컴퓨터 기능이 부착된 완전자동 장비이다. 그림 8은 금번 시험발파에 사용된 발파패턴이 액정화면에 나타나고 있는 컴퓨터 장치 모습이다.

사용화약을 고품성 다이너마이트를 사용한 이유는 본 현장의 막장암석이 화강암으로서 탄성파속도(P파)가 5,000m/sec 이상이기 때문에 암석을 파괴시키기 위해서는 그 이상의 폭발속도를 가지는 화약류를 사용해야 하기 때문이다. 사용 뇌관은 비전기식 뇌관을 사용 하였으며, 발파공수가 160 공 내외가 되기 때문에 8 개의 번치 (Bunch Detonator)형태를 구성한 후 8 개의 표면뇌



그림 7. 실제 천공장을 4,300 mm 길이로 천공된 모습

표 12. 발파공법별 시험발파 패턴 (심발부 기준)

| 발파공법별 | 단 위 | V-Cut | L,C-Cut | COPA-Cut |
|-----------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| 설계 굴진장 | mm | 4,000 | 4,000 | 4,000 |
| 천 공 장 | mm | 4,300 | 4,300 | 4,300 |
| 경사공 천공장 | mm | 4,740 | 4,300 | 4,570 |
| 경사공 천공각도 | ° | 65 | - | 70 |
| 경사공 공저간격 | mm | 200 | - | 400 |
| 심발공 | 무장약공수 | 공 | - | 4 |
| | 무장약공 직경 | mm | - | 45 |
| | 장약공수 | 공 | 24 | 17 |
| | 장약공 직경 | mm | 45 | 45 |
| 심발부 총 장약량 | Kg | 78 | 44.25 | 46.375 |
| 자유면 단면적 | m ² | 10.8 | 2.56 | 6.25 |
| 사용폭약 | - | Megamiteφ32 | Megamiteφ32 | Megamiteφ32 |
| 사용뇌관 | - | 비전기식 | 비전기식 | 비전기식 |



그림 8. Jumbo Drill 내부에 설치된 컴퓨터의 모습

관을 이용하여 기폭 시켰다.

3) 시험발파 결과분석

- 발파효율 비교분석

잔류공의 측정을 통해서 산출된 발파효율은 표 13에 나타나 있다.

표 13에서 보는 바와 같이 발파공법별 굴진효율이 상당히 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 막장암반이 화강암류의 경암구간에서 4.3 m의 천공장으로 발파할 경우 발파효율이 전체적으로 양호하게 나타나지 않고 있다. 특히, V - Cut 발파공법은 70% 대 수준을 나타내고 있으며, L.C - Cut 및 COPA - Cut 또한 80% 대를 나타내고 있다. 이는 국내 터널현장의 단공(短孔)발파에서 보여주고 있는 80% - 90% 대의 굴진효율과는 약 10% 대의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는, 암반의 특성에 기인한 것도 있지만, 지금까지 국내에서는 굴진장이 4.0 m 이상인 발파공사를 수행하지 않았을 뿐만 아니라 천공 및 발파 기술자들에게 장공발파는 아

직 익숙하지 않은데 주 원인이 있다고 본다. 실제 유럽에서는 발파현장에서 천공장이 5.0 m 이상인 경우 굴진효율이 90% 정도로 나타나고 있음이 보고 되고 있다.

- 발파공법별 비장약량 분석

비장약량 (Specific Charge= 총 장약량 (Kg)/굴착량 (m³))은 1회 발파당 소요된 화약량에 대한 굴착량의 비율을 말하는 것으로서 발파효율을 나타내는 요소이다. 또한 비장약량은 발파비용을 산출하는 기준으로 활용되는데, 비장약량이 적을수록 경제적인 발파가 이루어진다. 즉, 총 천공장이 적게 소요될 지라도 천공효율이 저조해 굴착량이 적을 경우에는 비장약량이 높아지며, 총 천공장이 많이 발생해도 천공효율이 좋으면 비장약량은 낮게 발생한다. 표 14는 시험발파의 전단면 터널의 발파공법별 비장약량을 나타낸 것이다.

표 14. 시험발파 후 확인된 발파공법별 비장약량 상황 (전단면 터널 기준)

| 구 분 | 단 위 | V - Cut | Cylinder-Cut | COPA p-Cut |
|-------|-------------------|---------|--------------|------------|
| 총 장약량 | Kg | 496.75 | 469.75 | 432.87 |
| 굴착량 | m ³ | 294.79 | 324.92 | 349.41 |
| 비장약량 | Kg/m ³ | 1.68 | 1.44 | 1.23 |

위의 결과를 보면, 모든 발파공법에서 비장약량이 1.0 Kg/m³ 이하로 나타난 공법은 없다. 단공발파에서는 비장약량이 1.0 Kg/m³ 이하로 산출되는데, 금번 시험발파는 장공발파일 뿐만 아니라 암반이 매우 견고하여 발파효율이 저조해서 나타난 현상으로 볼 수 있다.

- 발파진동 비교분석

금번 시험발파시 발파공법별 발파진동의 크기를 비교

표 13. 발파공법별 굴진효율 비교

| 발파공법별 | 천공장 | 잔류공 깊이 | | | 굴진 효율 |
|------------|----------|--------|----------|----------|--------|
| | | 최 소 | 최 대 | 평 균 | |
| V - Cut | 4,300 mm | 750 mm | 1,600 mm | 1,170 mm | 72.7 % |
| L.C - Cut | 4,300 mm | 600 mm | 1,100 mm | 850 mm | 80.2 % |
| COPA - Cut | 4,300 mm | 380 mm | 800 mm | 590 mm | 86.2 % |

분석 하기 위해서 지발당 장약량을 거의 동일한 수준으로 맞추었다. 또한 발파진동 측정 거리는 발파공법별 상대적 비교를 위해서 모든 발파공법 발파시 130 m를 유지하였다. 사용된 발파진동 측정기는 국내에서 가장 많이 사용하는 InstanTel 사의 BLASMATE III 와 MINI-MATE Plus 장비를 이용 하였다. 발파진동 측정기는 지반위에 고정시켜 데이터의 오류가 발생하지 않도록 하였으며, 발파풍압에 의한 소음을 동시에 측정 하였다. 표 15 은 발파공법별 발파진동 측정 데이터를 나타내는 것이다.

발파공법별 발파진동 측정은 각각 1회에 한해서 실시하였고 지발당 최대 장약량이 약간의 차이가 있기 때문에 정확히 발파공법별 진동의 크기를 상대적으로 비교하는 것은 다소 무리는 있지만 여러 형태로 비교분석한 결과 발파공법별 공통적 특성을 파악 할 수 있다.

6. 결론 및 향후 과제

본 연구는 최근에 개발된 COPA - Cut 발파공법과 기존 발파공법의 효과를 비교하기 위하여 수행한 시험발파를 한 내용이다. 시험발파의 주요 목적은 COPA - Cut 발파공법에서 제안한 터널 심발부의 선균열(先龜裂) 또는 사전절단(事前切斷)이 발파효과에 미치는 영향을 검증하는 것이다. 즉, 심발부 암반의 사전절단으로

굴진효율을 얼마나 높이며, 또 소음·진동을 얼마나 줄이는가를 정량적으로 시험하고자 한 것이다. 그 결과 표 16에서 보는 바와 같이 보통암과 경암 터널에서 모두 기존의 발파공법보다 우수함이 입증되었다. 그러나 이 같은 우수함을 정량적으로 표기하기에는 아직 이른 감이 있다. 왜냐하면 좀더 다양한 암반조건에서 반복적인 현장시험을 통하여 보다 많은 시험치에 근거해야 하기 때문이다.

따라서 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 암반의 선균열은 암반의 파쇄저항력을 저하시킨다. 기존의 발파공법에서는 1자유면을 2자유면으로 만들어 <심빼기 공간>을 확보함으로써 터널 전단면암반의 파쇄저항력을 저하시키는데 비하여, COPA의 선균열은 심발부에 <선형균열(線形龜裂)>을 추가적으로 확보함으로써 암반의 파쇄저항력을 이중으로 저하시킬 수 있다.
2. 암반의 파쇄저항력이 저하되면 발파효율은 상승한다. 기존의 발파공법에서는 압축 및 전단파괴원리에 따라 암반을 파괴 하였으나, COPA-Cut 발파공법에서는 추가적으로 인장파괴 원리를 적용함으로써 암반파괴의 효율을 높인다. 이는 암반의 강도특성(인장강도<< 압축강도)을 암반파괴에 도입한 것이다.
3. 암반의 선균열은 소음·진동을 감소시킨다.

표 15. 발파공법별 발파진동 비교

| 구 분 | V-Cut | L,C-Cut | COPA-Cut |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| 지발당 최대 장약량 | 16.5 Kg | 16,875 Kg | 14,25 Kg |
| 발파진동 크기 (PVS) 130 m | 0.85 cm/sec | 0.92 cm/sec | 0.31 cm/sec |
| 최대 진동속도 위치 | 확대공 | 심발공 인접 확대공 | 심발부 경사공 |

표 16. 발파공법별 암종에 따른 결과 비교 (전단면 기준)

| | 단위 | 보통암터널 | | | 경암터널 | | |
|------|-------------------|--------|--------|--------|-------|------------|--------|
| | | V | COPA w | COPA p | V | L,Cylinder | COPA p |
| 굴진효율 | % | 74 | 92 | 93 | 72,7 | 80,2 | 86,2 |
| 화약비용 | 원/m ³ | 13,740 | 6,930 | 7,340 | - | - | - |
| 비장약량 | kg/m ³ | - | - | - | 1,68 | 1,44 | 1,23 |
| 발파진동 | cm/sec | 1,650 | 1,010 | 0,775 | 0,850 | 0,920 | 0,310 |

암반의 선균열을 통하여 큰 암석이 여러 개의 작은 암석으로 나누어지면, 전체 에너지가 여러개의 소규모 에너지로 분산된다. 따라서 기폭에너지에 저항하는 암석의 에너지가 작아지므로 폭발시에 부수적으로 발생하는 소음·진동에너지도 작다.

터널공법으로써의 COPA-Cut 선균열 터널굴착방법은 앞으로 경험이 쌓이게 되면, 경제성은 물론 작업성과 안전성에도 기존공법에 비하여 우수할 것으로 사료된다. 특히 COPA-Cut 굴착공법이 제안한 선균열은 향후 암반균열의 연구과제를 던져주고 있으며, 또한 선균열의 역학적인 역할의 규명이란 숙제를 남기게 되었다.

참고문헌

1. Giorgio Berta, (1990) "Explosives : An Engineering Tool", Italesplosivi, Milano, pp.96-102.
2. Rune Gustafsson, (1981) "Blasting Technique", Dynamit Nobel Wien, pp.181-182.
3. P. A. Persson, R. Holmberg, and J. Lee, (1994) "Rock Blasting & Explosives Engineering", pp. 276-278.
4. 기경철, 윤지선, (2000) "발파공학", 동화기술, pp. 162-165.
5. 한국자원연구소 류창하 외, (1997) "표준발파공법 (I)" -산학연 공동연구, 한국석유개발공사, pp.55-60.



황 학

(주) 성보 E&C 기술 고문
hhwang@sbenc.co.kr



이태노

(주) 성보 E&C 상무이사
trlee@sbenc.co.kr