

## 선대구경 수평보링 발파공법(PLHBM)의 설계 연구

백중현<sup>1)</sup>, 백상현<sup>1)</sup>, 한동훈<sup>1)</sup>, 원아람<sup>1)</sup>, 김창섭<sup>1)\*</sup>

### A Study on the Design of PLHBM

Jong-Hyun Beak, Sang-Hyun Beak, Dong-Hun Han, Ah-Ram Won and Chang-Seop Kim

**Abstract** Blasting technology aims to maximize digging efficiency as well as minimize vibration and noise. So, it is key point of blasting technology to raise blasting effect as much as possible and reduce vibration and noise and the design of PLHBM that is the tunnel blasting method having such merit was studied in this paper. PLHBM has the excellent blasting efficiency as it drills the empty hole with high caliber of 250~1,000mm at centre cut, contributes to blasting vibration reduction effect much and can be usefully applied to tunnel blasting sites. So it is judged that it enables the development of tunnel blasting method to be advanced one more step by studying and suggesting the design method of PLHBM.

**Key words** PLHBM, Blast, Vibration, Design

**초 록** 발파기술은 굴진효율의 최대화와 동시에 진동, 소음을 최소화 해야하는 목적을 가지고 있다. 따라서 발파효과를 최대한 높이며 진동, 소음을 줄이는 것이 발파기술의 핵심이며 이러한 장점을 가진 터널발파공법인 PLHBM의 설계에 대해 연구하였다. PLHBM은 250~1,000mm의 대구경 무장약공을 심발부에 천공하여 발파효율이 우수하다. 또한 발파진동 저감효과에 크게 기여하고 있으며 터널발파현장에서 유용하게 적용할 수 있다. 이에 따라 PLHBM의 설계방법을 연구, 제시함으로써 터널발파공법의 발전에 한걸음 더 나아갈 수 있다고 판단된다.

**핵심어** PLHBM, 발파, 진동, 설계

## 1. 서 론

안전이 무엇보다 중요한 터널발파공사의 특수성 때문에 보수적인 발파패턴 및 공법이 관습적으로 적용되고 있어 새로운 기술의 개발과 적용을 어렵게 하고 있다. 최근 환경문제에 대한 관심이 높아졌으며, 발파에 의한 진동 및 소음에 대한 규제가 더욱 심해지고 있는 현실이다. 따라서 기존 발파공법을 고수하는 것은 현장의 생산성을 낮추고 불필요한 비용증가를 발

생시킨다. 이와 같은 문제점은 현재 국내 발파기술의 한계와 문제점이라 할 수 있다.

최근의 발파기술은 굴진효율의 최대화와 동시에 현장에서 발생하는 소음, 진동의 최소화를 동시에 달성해야 하는 목표를 갖고 있다. 일반적으로 표준장약보다 과장약을 함으로써 발파효율이 커지는 반면 진동, 소음은 증가하는 추세를 보인다. 따라서 발파효과를 높이면서 진동, 소음을 줄이는 것이 발파기술의 핵심이며 이와 같은 장점을 가진 터널발파공법이 바로 선대구경공법(이하 PLHBM)이다. PLHBM의 특징 및 설계방법을 제시하여 터널발파공사의 발전에 한걸음 더 나아갈 수 있다고 판단된다.

<sup>1)</sup> 신발파기술사사무소

\* 교신저자 : newblast2@naver.com

접수일 : 2012년 12월 5일

심사 완료일 : 2012년 12월 19일

게재 승인일 : 2012년 12월 24일

## 2. PLHBM 정의

PLHBM(Pre Large Hole Horizontal Boring & Blasting Method)은 굴착면 전방으로 10~60m정도 선진 보링한 직경 250~1,000mm의 대구경 수평보링공을 심발 발파시 무장약공으로 활용하는 최신 터널발파공법이다.

PLHBM은 현재까지 여러 터널발파 현장에서의 시공 결과 및 데이터 분석, 서울대학교를 통해 수행한 연구 결과를 통해 암반상태나 주변 상황이 다른 많은 국내의 터널발파 현장이나 일부 발파구간, 미진동 발파공법이 반드시 요구되는 현장의 여러 문제점들을 해결할 수 있는 경제성, 시공성, 친환경성을 갖춘 터널발파공법으로 활용될 수 있다.

## 3. PLHBM 특징

### 3.1 공학적 원리

#### PLHBM의 발파효율 증대 효과

그림 1은 Cylinder-Cut에서 무장약공의 직경과 한 발파당 천공깊이에 따른 발파효율을 나타낸 그림으로 한 발파당 천공장이 길수록 발파효율은 떨어지며 같은 천공장에 대해 무장약공의 직경이 클수록 발파효율은 커지는 것을 확인할 수 있다.

그림 1에 제시된 결과가 비록 1st square 심발공의 발파시 자유면의 역할을 하도록 천공되는 무장약공의 직경이 약 200mm 이하인 경우에 적용할 수 있는 자료이지만, 무장약공의 직경이 PLHBM에서와 같이

표 1. PLHBM 장비 사진 및 시공전경

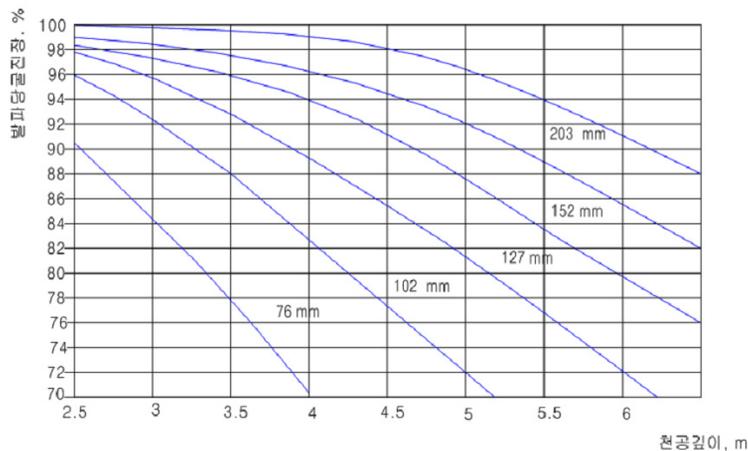
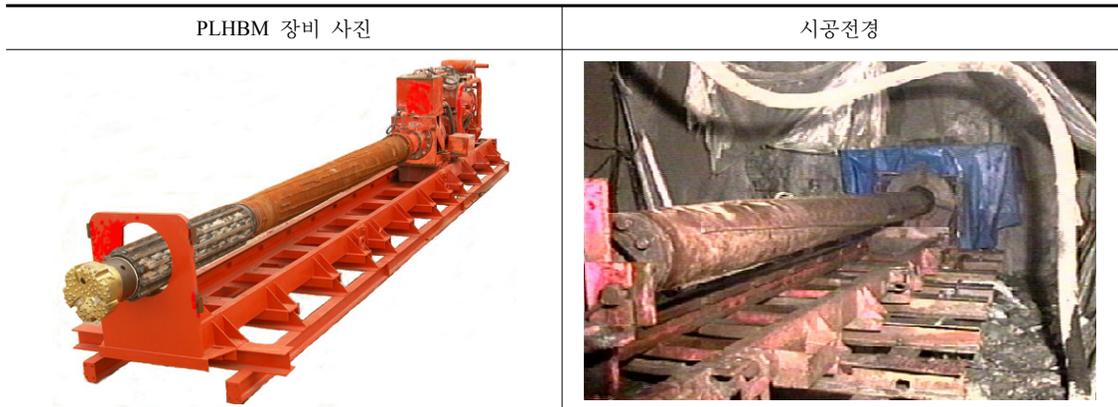


그림 1. 천공깊이 및 무장약공의 직경에 따른 발파효율(강추원, 2005).

250mm 이상이 될 경우 더 높은 발파효율을 가질 것으로 예상된다.

두 공 이상의 무장약공을 천공하여 자유면으로 활용하는 경우 식(1)을 이용해 동일한 효과를 보이는 무장약공 한공의 환산직경으로 계산할 수 있다(강추원, 2005).

$$D = d\sqrt{n} \tag{1}$$

- 여기서, D : 무장약공의 환산직경
- d : 무장약공의 직경
- n : 무장약공의 수

이 환산식을 이용하면 102mm 직경의 무장약공을 3공 천공하는 것은 약 177mm 직경의 무장약공 1공을 천공하는 것과 심발부분에서의 같은 자유면 효과를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 환산직경도 PLHBM에 보통 사용되는 직경인 Ø362mm보다는 작은 직경임을 알 수 있다.

**Ø362mm 공경을 주로 사용하는 배경**

수평 보링작업은 수직 보링과는 다르게 보링경과 연결되어지는 로드(ROD)의 경이 비슷하거나 로드(ROD)의 경이 수 mm 정도 작을 때 보링작업 시 중력의 힘을 고려한 처짐을 최소화 할 수 있다(실제 작업 시 처짐을 고려하여 경험에 의한 보정을 하여 작업을 하고 있다/약 50M단위로 500공 이상).

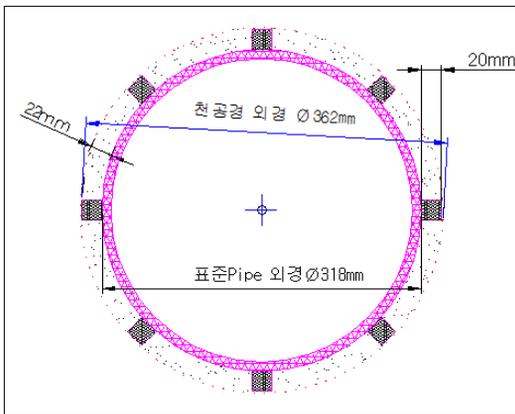


그림 2. 천공경 및 표준 Pipe의 외경(백중현, 2010).

초기에는 Ø445mm경을 사용하였으나 경암 이상의 암반에서는 1일(24시간) 내에 50m를 작업하기에는 많은 문제점이 발생했으므로 공경을 낮추어 Ø362mm경으로 작업을 함으로써 1일 이내에 시공이 가능하다.

Ø254mm경의 작업을 시도하여 좀 더 빨리 작업을 시도할 경우 작업 시간은 감소하지 않고 작은 Hammer에서 해머의 동력인 Air(고압공기)의 양을 증가 시켜도 속도는 비슷하다( Ø362mm경 작업에서는 컴프레샤 2~3대를 사용하지만 1대 정도의 공기만 필요하다). 따라서 효율성 측면에서 큰 공이 필요함으로 Ø362mm경을 적용하였으며 시간적으로 만족한 범위 내에 들어오게 되었다. 그림 2와 같이 일반적인(표준 크기) 300mm 파이프의 외경(318mm)에서 파석의 출구 공간인 20mm두께인 철판피스를 붙였으며 줄대의 모서리와 대칭인 줄대 모서리의 길이가 362mm가 되어서 Ø362mm경으로 주로 보링을 하여 왔다. 수평 보링작업에서 대체적으로 Ø200mm경 이하에서는 대상 암반의 구조적 결합인 암반의 불균질성(연약한 부분과 강한 부분의 절리, 경계면 등)에 의하여 방향성이 심하여 로드 무게에 의한 하향성을 무시할 정도로 방향이 바뀌지만, 큰 공일수록 방향성보다 로드 무게의 방향성이 대부분 커버를 한다.

**발파시 무장약공 방향으로 파괴형태 및 파괴각 우수**

그림 3은 대구경무장약공발파에서 첫번째 발파공 발파시의 공간격과 파괴각도를 보여주는 그림이다. 기하학적으로 공간격이 Ø0.7인 경우는 완전한 2자유면 발파와 같은 90°, 공간격이 Ø1인 경우는 60°, 공간격이 Ø1.5인 경우는 39°가 된다.

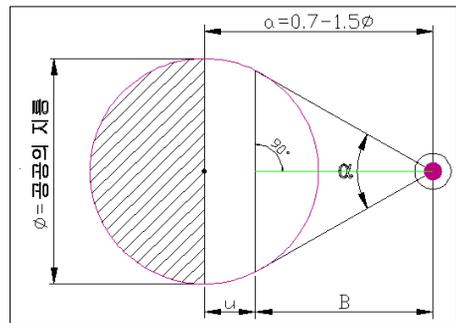


그림 3. 대구경 무장약공 방향으로의 파괴 형태 및 파괴각도 (이기표, 2000).

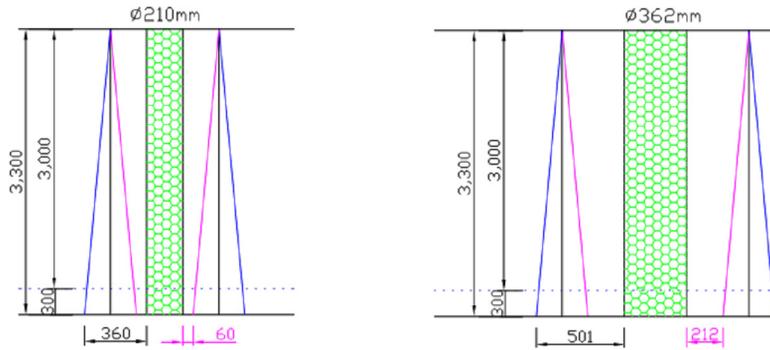


그림 4. 발파공의 천공오차와 무장약공 직경에 따른 기하학적 모식도(백중현, 2010).

그러나 실제로 모르타르에 대한 시험발파 결과 이 파괴각도는 발파공의 중심으로부터 무장약공을 연결하는 두 접선이 이루는 각도보다 작게 나타나고 있다.

이상의 공간격과 파괴각도에 대한 기하학적 분석은 굴착면에서 실제 발파작업시 예상되는 것이며 실제 발파작업을 위한 천공작업에서는 어느 정도의 천공오차가 발생하므로 이를 고려해야 한다. 그림 4는 발파공과 무장약공의 공간격이  $\phi 1.5$ 이고 1회 발파당 천공장이 3.3m일 때 무장약공의 직경에 따라 발파공 천공오차의 영향을 검토한 그림이다.

무장약공의 직경이 커질수록 천공오차로 인해 심발부분의 발파가 불완전하게 이루어질 확률이 줄어드는 것을 알 수 있는데, 특히 천공장이 길어질수록 천공오차가 더 커진다는 점을 감안할 때 장공발파시 무장약공을 이용하여 잔류공 길이가 적고, 발파의 실패율을 획기적으로 감소하기 위한 확실한 심발발파를 위해서 직경이 250mm 이상인 무장약공을 이용하는 것이 효과적이다.

**PLHBM을 통한 효율적인 음의 구조줄 형성**

그림 5의 터널굴착 전후의 응력상태를 참고하여 PLHBM 천공 후 자유면의 응력변화를 알아보았다. 그림 5의 A입자의 터널 굴착 후 응력변화는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{연직응력} : \sigma_{vo(A)} &\rightarrow \sigma_{v(A)} = 0 \\
 \Delta\sigma_{v(A)} &= \sigma_{v(A)} - \sigma_{vo(A)} = -\sigma_{vo(A)} \\
 \text{수평응력} : \sigma_{ho(A)} &\rightarrow \sigma_{h(A)} = 3\sigma_{ho(A)} - \sigma_{vo(A)} \quad (2) \\
 \Delta\sigma_{h(A)} &= \sigma_{v(A)} - \sigma_{ho(A)} = 2\sigma_{ho(A)} - \sigma_{vo(A)}
 \end{aligned}$$

A입자는 터널굴착으로 인하여 연직응력은 0이 되며 PLHBM이 천공되는 경우 PLHBM의 아래 터널단면의  $\Delta\sigma_{v(A)}$ 는  $\neq 0$ 이다. 따라서  $\Delta\sigma_{v(A)}$ 에 해당하는 추가적인 폭발에너지(장약량)가 필요하다. 그러나 PLHBM을 천공할 경우 보링공 위의 단면  $\Delta\sigma_{v(A)}$ 는 0이 되므로 추가적인 폭발에너지(장약량)가 불필요하다.

또한 A입자의 수평응력은 터널굴착으로 인하여 집중되어 커진다. PLHBM이 천공되는 경우에 수평에너지가  $\Delta\sigma_{h(A)} = 2\sigma_{ho(A)} - \sigma_{vo(A)}$ 와 같이 증가된다. 그러나 PLHBM 보링공 아래의  $\sigma_{vo(A)}$ 의 값은 0이 아닌 (+)의 값이므로  $\Delta\sigma_{h(A)}$ 의 증가는 미미하다 할 수 있다. 이에 비해 PLHBM이 천공될 경우 수평에너지 산정식은  $\Delta\sigma_{h(A)} = 2\sigma_{ho(A)} - \sigma_{vo(A)}$ 와 같으나  $\sigma_{vo(A)} = 0$ 이므로  $\Delta\sigma_{h(A)}$ 의 크기 증가된다. 그리고 PLHBM이 높게 시공되는 경우와 비교하여 PLHBM이 낮게 시공될수록 더 적은 장약량을 장약하더라도  $\Delta\sigma_{h(A)}$  증가에 의한 응력의 증가분으로 같은 발파효율을 나타낼 수 있다.

B입자의 터널 굴착 후 응력변화는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{연직응력} : \sigma_{vo(B)} &\rightarrow \sigma_{v(B)} = 3\sigma_{vo(B)} - \sigma_{ho(B)} \\
 \Delta\sigma_{v(B)} &= \sigma_{v(B)} - \sigma_{vo(B)} = 2\sigma_{vo(B)} - \sigma_{ho(B)} \\
 \text{수평응력} : \sigma_{ho(B)} &\rightarrow \sigma_{h(B)} = 0 \quad (3) \\
 \Delta\sigma_{h(B)} &= \sigma_{h(B)} - \sigma_{ho(B)} = -\sigma_{ho(B)}
 \end{aligned}$$

B입자의 경우 PLHBM이 낮게 천공될수록 연직응력의 증가에 의한 효율을 받는 단면적은 증가하며 이에 따라 PLHBM이 높게 시공되는 경우에 비해 적은

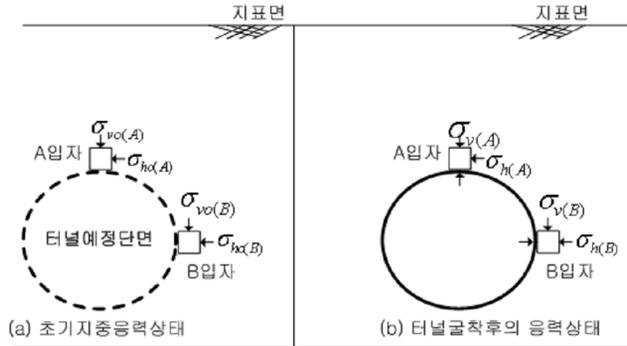


그림 5. 터널 굴착 전후의 응력상태(이인모, 2001).

장약량을 이용하여도 같은 효율을 가질 수 있다.

PLHBM을 높게 시공하는 경우에 비해 낮게 시공하는 경우에 더욱 발파효율이 좋다는 것을 A입자와 B입자의 응력의 변화를 통해 확인할 수 있다. 특히 터널단면이 크거나 터널의 길이가 클수록 PLHBM의 효율성은 늘어날 것이다.

### 3.2 발파효율

그림 6의 터널 굴진방향으로의 심발부분 단면도를 통해 PLHBM 천공시 심발부분에서 천공장보다 굴진장이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 1st square 공에 장약된 화약의 기폭시 공저부분에 장약된 화약의 폭력은 자유면 역할을 하는 대구경 무장약공 방향으로 작용하며 이 때 파괴는 천공장과 동일한 깊이로 (A)방향이 아니라 (B) 또는 (C)방향으로 이루어지므로 심발부분에서는 천공장보다 오히려 굴진장이 더

크게 나타난다.

전체 터널발파의 발파효율을 심발부분의 발파효율만으로 규정할 수는 없으나, 심발부분의 발파효율이 높을수록 전체 터널발파의 발파효율이 높게 나타난다. 따라서 PLHBM의 경우 일반적인 심발발파공법에 비해 높은 발파효율을 가지는 것을 알 수 있다.

PLHBM은 굴진효율이 심발공에서 100% 이상 나타나고 있다. 설계시 약 10%의 잔류길이를 고려하여 천공장과 굴진장의 효율을 90% 정도로 하는 것이 일반적이나 PLHBM을 적용하여 설계할 경우 100% 이상의 효율을 적용해도 된다.

### 3.3 발파진동의 영향인자

#### 무장약공의 직경

PLHBM은 심발부분의 발파시 발생하는 발파진동을 주변공의 발파시 발생하는 발파진동 이하로 안전하게 제어할 수 있는 공법이다. “선 대구경 수평보링공을 이용한 터널발파공법에 관한 연구”(이기표 외, 2000)에 제시되어 있는 내용을 보면, 무장약공에서 발파공까지의 최단거리(두 공 벽면 사이의 거리)가 같고, 발파공에 장약된 화약량이 같을 경우 무장약공의 직경이 클수록 발파진동이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 최근에 발표된 “선대구경 공법을 적용한 터널의 진동, 소음저감 사례”(김창섭 외 2012)에서 PLHBM 1공 천공할 경우 최대 30.4%, PLHBM 3공 천공할 경우 최대 42.8%의 진동감소율을 확인하였다.

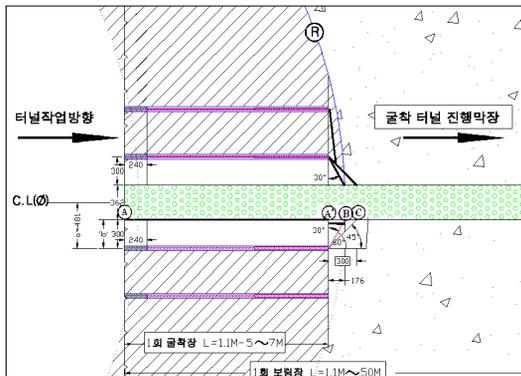


그림 6. 362mm 직경의 수평보링공을 활용하는 PLHBM의 심발발파 모식도(백중현, 2010).

#### 최소저항선의 길이와 자유면의 수

최소저항선이 길면 장약량이 증가하여 지반진동이

크게 발생되고 짧아지면 지반진동이 적게 발생된다. PLHBM의 경우 최소저항선의 길이가 짧으므로 지반 진동이 적게 발생된다. 자유면의 수가 많고 크기가 크면 발파지반진동이 적고, 자유면의 수가 적고 작으면 크게 발생된다(이효, 2001).

**진동측정결과**

서울 000의 시공사례는 그림 7과 같으며 V-Cut과 PLHBM의 진동속도를 측정하여 진동·소음에 대한 효과에 대해 표 2와 같이 비교해 보았다.

발파시 굴착면으로부터 14m 떨어진 지점에서 측정한 발파진동자료를 표 2에 정리하였다.

표 2에 제시된 두 현장의 발파진동자료의 경우 기존 V-Cut 심발에서는 대부분 진동허용 한계치인 0.5 cm/sec 이상의 높은 값을 보여 도심지 터널발파에 적용하는데 무리가 있으나 PLHBM을 적용한 경우 대부분의 최대진동속도가 허용한계치 이하의 값을 보이고 있다. 서울 000 현장의 경우 V-Cut 발파의 진동 자료는 PLHBM을 적용했을 때에 비해 최대 10배 가

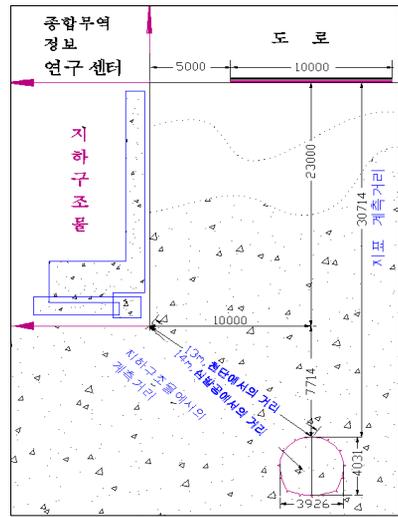


그림 7. 서울 000 현장 시험발파위치 단면도(백종현, 2010).

가이 크게 나타난 경우도 있었다. 따라서 PLHBM은 건물과 사람이 밀집되어 발파진동에 매우 민감한 도심지 터널공사에서는 친환경적이며 효율적인 터널발

표 2. 발파진동계측자료

| V-CUT |       |                |               | PLHBM |       |                |             |
|-------|-------|----------------|---------------|-------|-------|----------------|-------------|
| 계측 일자 | 계측 지점 | 최대진동속도(mm/sec) |               | 계측 일자 | 계측 지점 | 최대진동속도(mm/sec) |             |
|       |       | 1회 발파 (상단/하단)  | 2회 발파 (상단/하단) |       |       | 1회 발파 (전단면)    | 2회 발파 (전단면) |
| 01.15 | 14m   | 12.0/3.64      | 11.50/6.49    | 02.20 | 14m   | 3.06/3.41      | 3.75/5.8    |
| 01.16 | "     | 17.0/4.78      |               | 02.21 | "     | 4.22/3.41      | 1.57/4.94   |
| 01.17 | "     | 4.49/7.25      | /3.98         | 02.22 | "     | 2.41/5.06      | 4.25/4.38   |
| 01.18 | "     | 17.3/7.76      | /4.81         | 02.23 | "     | 4.25/5.40      |             |
| 01.19 | "     | 7.40/21.1      | 10.2/3.65     | 02.24 | "     | 3.02/5.38      |             |
| 01.20 | "     | 12.8/5.86      | 18.1/7.29     | 02.25 | "     | 3.62           |             |
| 01.21 | "     | 19.8/13.8      |               | 02.26 | "     | 4.19/2.70      |             |
| 01.23 | "     | 10.9/6.71      | 10.4/         | 02.27 | "     | 5.75/2.79      | 2.81/4.84   |
|       |       |                |               | 02.28 | "     | 3.49/3.21      | 5.29/3.54   |
|       |       |                |               | 03.01 | "     | 5.60/4.87      | 4.94        |
|       |       |                |               | 03.02 | "     | 4.41/3.73      | 4.11        |
|       |       |                |               | 03.04 | "     | 4.02/5.00      |             |
|       |       |                |               | 03.05 | "     | 3.57           |             |
|       |       |                |               | 03.06 | "     | 4.05/5.06      |             |
|       |       |                |               | 03.10 | "     | 3.56/2.44      |             |
|       |       |                |               | 03.11 | "     | 3.98/4.59      |             |
|       |       |                |               | 03.12 | "     | 3.64/3.14      |             |

하루에 2회 발파.

V-CUT : 매 발파시 2단면 분할 계측기 1대로 진동측정.

PLHBM : 전단면발파 계측기 2대로 진동측정.

파 공법임을 확인할 수 있다.

### 4. PLHBM 발파설계방법

#### 4.1 천공위치 결정

그림 8과 같이 암석은 인장력에 대해 제일 약하고 그 다음으로 전단력이며 압축력에 대하여는 가장 강하다. PLHBM의 시공이 낮게 될수록 자유면에 대하여 인장력이 적용되는 단면이 넓어지며 적은 장약량으로 효율적인 발파가 이루어지게 된다.

PLHBM의 천공이 낮게 될수록 적은 장약량을 사용함으로써 소음, 진동을 예방할 수 있으며 민원을 조기 차단하여 공사의 지연을 막을 수 있어 시공성을 확인할 수 있다.

PLHBM의 장비의 특성인 낮게 천공할 수 있다는 장점을 이용하여 그림 9와 같이 터널의 바닥면으로부터 비트 하단까지의 높이는 0.3~1.7m인 것을 특징으로 하는 구조로 설계한다. 대구경의 보링공을 터널의 중앙부 낮은 위치에 형성하고 발파작업을 진행할 수 있도록 하여 우수한 발파 효율을 얻도록 한다.

#### 4.2 암질의 종류

그림 10은 PLHBM의 시험 시공 및 연구개발과정

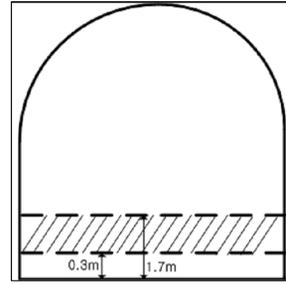


그림 9. PLHBM의 천공범위.

에서 많은 시행착오를 거치면서 구해진 많은 자료들을 종합한 것으로 무장약공의 직경이  $\varnothing 250\sim 350\text{mm}$ 인 경우와  $\varnothing 350\sim 450\text{mm}$ 인 경우로 구분하여 첫번째 발파공 중심에서 무장약공 중심까지의 거리를 제시한 것이다. 예를 들어  $\varnothing 400\text{mm}$  직경의 무장약공이 보링된 보통암질의 터널현장에서는 첫번째 발파공을 무장약공 중심에서 무장약공 직경의 1.1배 떨어진 위치에 천공하고, 인성이 강한 경암구간에서는 1.05배 떨어진 위치에 천공하면 된다. 현장의 암반상태에 따라 그림 10에 제시된 공간격이 조금씩 수정될 수 있으나 PLHBM에 의한 발파 작업시 심발부분 1st square 발파공의 천공위치를 결정하는 기준자료로 활용될 수 있다.

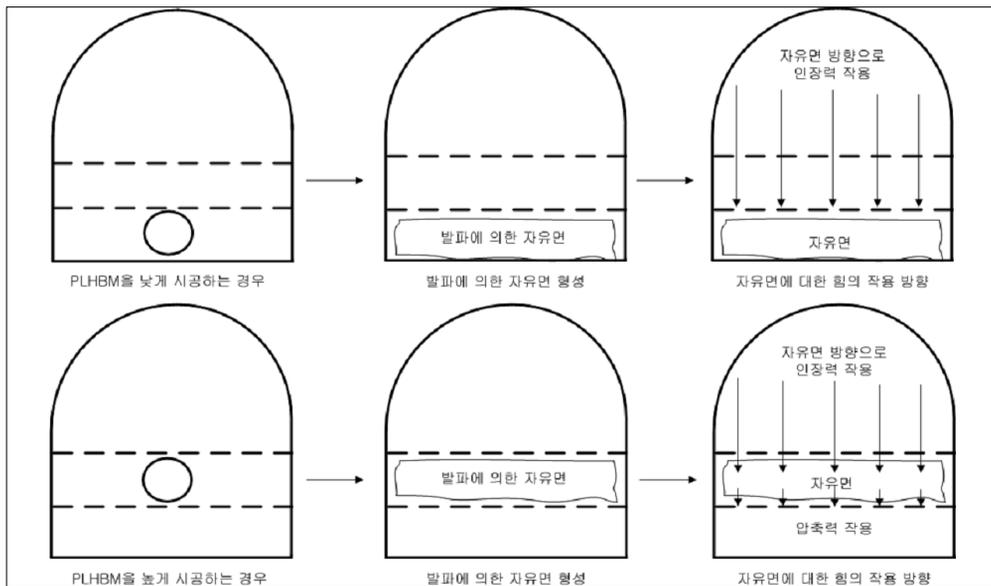


그림 8. PLHBM 천공높이 따른 자유면의 힘의 방향.

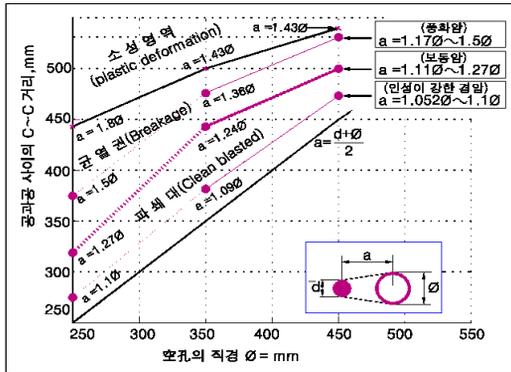


그림 10. PLHBM 에서의 심발부분 발파공의 천공위치(강추원, 2005).

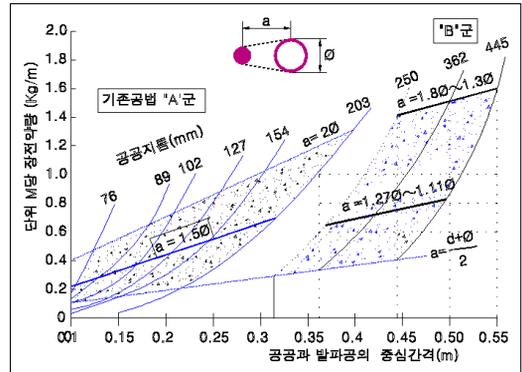


그림 11. 무장약공과 발파공의 중심간격에 따른 지발당장약량(강추원, 2005).

### 4.3 장약방법

#### PLHBM과 발파공의 중심간격에 따른 지발당장약량

대구경 공공간의 수 개의 사이에 있는 공들은 MS 단차의 뇌관배열을 하며 주변 일반 천공장보다 20cm 이상 더 천공하여 굴진장의 100%를 유도한다. 확실한 인장파괴로 절단을 하도록 간격을 좁히고, 디커플링 장약, 즉 Smooth Blasting 장약을 한다.

그림 11은 무장약공과 발파공의 중심간격과 단위 천공장에 따른 화약량(지발당장약량)의 관계를 무장약공의 직경에 따라 보여주는 그래프이다. 무장약공의 직경이 약 200mm 이하의 자료는 기존에 제시되어 있는 자료이고 무장약공의 직경이 Ø250mm 이상인 자료는 대구경 무장약공의 현장 적용을 통해 구해진 자료들을 정리하여 해석한 결과이다.

그림 11의 결과가 암반의 상태에 따른 변수가 배제되어 있어 모든 현장상황에 적용하기에는 무리가 있지만 1st Square 발파공의 지발당장약량을 결정하는데 있어 참고할 자료로 판단된다. 무장약공과 발파공의 중심 간격이 커질수록 1st Square 발파공의 발파시 파쇄시켜야 할 암반의 부피가 커지므로 지발당장약량은 증가한다. 그러나 직경이 약 Ø38~Ø45mm 정도인 발파공에 장약할 수 있는 지발당장약량에도 한계가 있는 것을 감안해야 한다. 실제로 직경 Ø362mm의 무장약공을 사용한 PLHBM 적용시 현장에서 발파공에 사용가능한 최대 화약량을 장약하더라도 공간격은 대부분 무장약공 직경의 1.3배 이하인 것으로 나타났다. 일반적으로 현장에서 적용되고 있는 폭약은 기성제품으로써 지발당장약량이 결정된 상황에서 무

장약공의 직경을 증가시킴으로 무장약공과 발파공의 중심간격을 증가시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 따라서 무장약공의 공경확대는 장약공과의 공간격 확대 및 발파효율을 증대할 수 있는 장점이 있다.

#### PLHBM의 1st Square 장약방법

그림 12는 PLHBM에서 1st square 발파공의 장약 방법이며 공저부분에 장약하는 기저장약은 파괴각도가 90° 이상인 완전한 2자유면 발파인 주변공과 비슷한 수준의 약량을 사용하고 기저장약 윗부분의 주상장약은 최외곽공에 사용되는 조절용 화약을 사용하여 충분한 장약길이를 가지면서 디커플링 효과를 이용한 발파가 이루어지도록 한다.

또한 굴착면측으로의 파괴가 아니라 무장약공 방향으로의 파괴를 유도하기 위해 전색길이는 무장약공과 발파공 중심간격의 0.6배 이하가 되도록 하고, 공입구 쪽으로의 공발을 예방하기 위해 0.6a 길이(보통 30cm 전후)에 완전 전색을 실시한다.

1st square 발파공들이 발파된 이후에 기록되는 2nd, 3rd square 발파공들은 대구경의 수평보링공을 자유면으로 활용하는 PLHBM에서 파괴각도가 2자유면 발파에서와 같이 90°이므로 장약 길이만 적절히 확보된다면 주변공에 사용되는 화약량이 장약되었을 때, 주변공 발파보다 오히려 더 원활한 발파가 이루어진다.

#### 기록초기의 설계

PLHBM의 대구경 방향으로 원활한 파괴를 위해서는 1st square 발파공의 천공위치와 장약량뿐만 아니

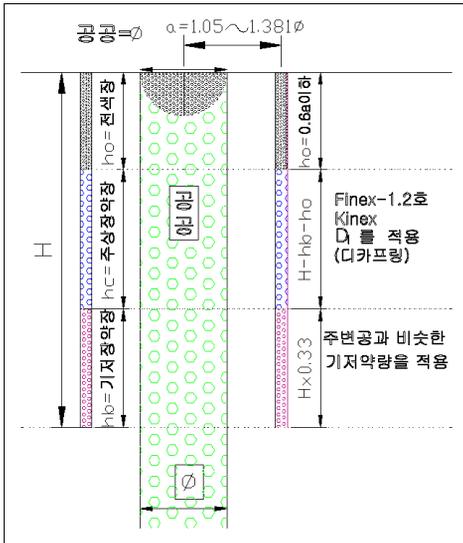


그림 12. PLHBM 1st square 발파공에 대한 장약방법(강추원, 2005).

라 기폭초시도 적절히 설계되어야 한다. 1st square 발파공 4공은 발파진동을 최소화하기 위한 목적일 경우에는 한 공씩 기폭하는 것으로 설계하고, 터널현장의 상황을 고려하여 각 발파공간 지연시차는 20~40ms 정도를 유지하도록 한다. 발파후 암반의 이동속도가 40~60m/sec 정도인 것으로 알려져 있으므로 파쇄된 암반이 1m 이동하는 데는 약 17~25ms 정도의 시간이 필요하게 되고, 따라서 무장약공 내부에서의 파쇄된 암석에 의한 소결현상이 발생하지 않을 정도로 암반의 인성에 따라 적당한 시차를 두고 발파공간의 지연시차를 결정한다.

4.4 PLHBM의 발파패턴

그림 13은 터널발파 현장의 암반조건에 따라  $\phi$  362mm 직경의 수평보링공을 이용하는 PLHBM 심발부분의 발파공 위치와 기폭순서를 보여주고 있다.

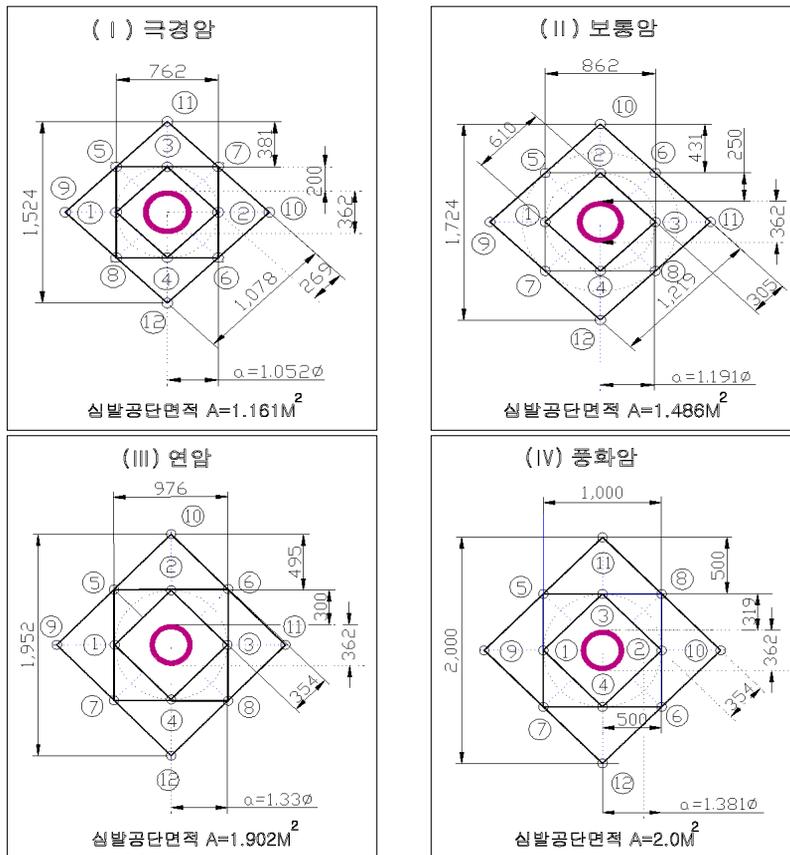


그림 13. 암반 상태에 따른 PLHBM 심발부분 천공위치 및 기폭순서(백중현, 2010).

발파공 위치는 1st square 공의 경우에 암반의 강도가 클수록 공간격이 좁으며, 기본적으로 심발부분의 모든 발파공들은 발파진동을 최소화하기 위해 한공씩 기폭되는 것으로 설계한다.

암반의 인성이 특히 강한지역이나 혹은 뇌관 배열상의 편의(회로/다단발파 등)에 따라서 그림 14와 같이 1st square 공의 공수를 4~8 circle식으로 설계할 수 있으며 진동의 저감보다는 발파효율의 목적으로 설계시 2~4공씩 지발공수를 설계할 수 있다.

그림 15는 심발공에서의 PLHBM을 2~4공 배열시의 간격(CTC)을 1m~3m로 보링했을 때의 대표적인 패턴으로 현장의 여건에 따라 유용하게 응용할 수 있다고 판단된다.

### 5. 결론

터널심발 발파공법 중 진동저감 대책으로 각광받고 있는 선대구경 수평보링 발파공법(PLHBM)의 특징 및 설계방법을 알아보았다.

- 1) 무장약공의 지름이 클수록 발파효율이 좋아지므로 PLHBM을 이용한 발파는 경제적이며 효율성이 좋다.
- 2) 기존 일반적인 심발발파 공법과 비교하여 PLHBM은 2자유면을 이용하며 면적이 넓으므로 진동저감에 특화된 공법이다.
- 3) PLHBM을 통해 발파에 효율적인 구조물을 형성할 수 있으며 실제 시공사례를 통해 높은 발파효

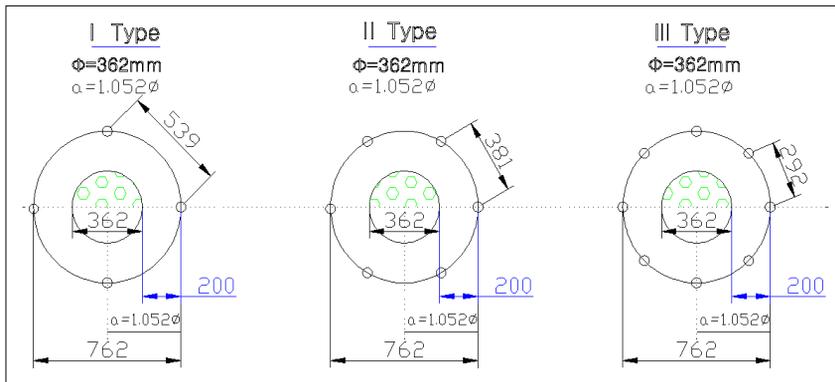


그림 14. 암반의 특성에 따라 1st square공의 circle식 배열방법(백종현, 2010).

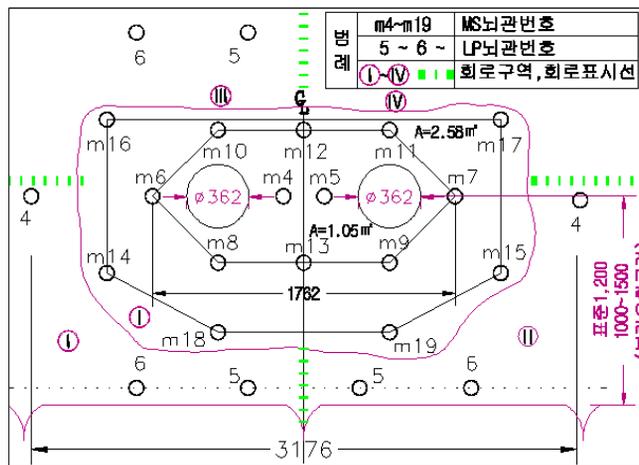


그림 15. Ø362mm공 2~4공 병렬시의 심발 부근의 표준 패턴(백종현, 2010).

올과 진동저감 사례를 확인할 수 있다.

- 4) PLHBM의 천공높이는 발파효율을 고려하여 0.3~1.7m로 설계하며 암질의 종류에 따라 발파공과 무장약공의 거리를 조절할 수 있다.
- 5) 무장약공과 발파공의 중심간격에 따라 지발당 장약량의 조절이 가능하며 PLHBM을 적용한 무장약공으로의 파괴유도가 필수적이다.
- 6) 암반의 조건에 따라 패턴설계를 다르게 할 수 있으며 PLHBM의 2공~4공 시공시 발파패턴을 제안하여 실무에서 유용하게 적용될 수 있다.

## 참고문헌

1. 강추원, 2005, 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 4-5.
2. 김창섭 외, 2012, 선대구경 공법을 적용한 터널의 진동, 소음저감 사례, 대한화약발파공학회 추계학술회, pp. 104-117.
3. 백중현, 2010, 선 대구경 수평보링 공법 보고서, 신발파기술사사무소, pp. 24-45.
4. 이기표 외, 2000, 선 대구경 수평보링공을 이용한 터널 발파공법에 관한 연구, 서울대학교 공학연구소, pp. 3-48.
5. 이인모, 2001, 암반역학의 원리, 새롭출판, pp. 63-64.
6. 이 효, 임한욱 2006, 자유면수가 발파진동의 크기에 미치는 영향, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제 21권 A호, pp. 263-271.



**백 중 현**  
신발파기술사사무소 대표



**백 상 현**  
신발파기술사사무소 전무



**한 동 훈**  
신발파기술사사무소 수석연구원



**원 아 람**  
신발파기술사사무소 대리



**김 창 섭**  
신발파기술사사무소 선임연구원

E-mail: newblast2@naver.com