

## 비장약량 맞춤형 터널발파 설계방법

최병희<sup>1)</sup>, 류창하<sup>1)</sup>, 정주환<sup>1)\*</sup>

### Tunnel Blasting Design Suited to Given Specific Charge

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu and Ju-Hwan Jeong

**Abstract** Specific charge, also called powder factor, is defined as the total explosive mass in a blast divided with the total volume or weight of rock to be fragmented. It is a well-known fact that change in explosive consumption per ton or per cubic meter of rock is always a good indication of changed rock conditions. In mining, it is common to use explosive consumption per ton of ore as a measure of the blastability for rock. On the contrary, in civil engineering, it is common to use explosive consumption per cubic meter of rock. In this paper, we adopt the definition of the civil engineering because we are mainly concerned with tunnel blasting. Up to now, although various methods for tunnel blast design have been proposed, there are so many cases in which the proposed methods do not work well. These may be caused by the differences in rock conditions between countries or regions, and can give a serious technical difficulty to a contractor. But if we know the specific charge for a given rock, then the blast design can become much more easier. In this respect, we suggest an algorithm for tunnel blast design that can exactly produce the predetermined specific charge as a result of the design. The algorithm is based on the concept of assigning different fixation factors to various parts of tunnel section, and may be used in combination with the known methods of tunnel blast design.

**Key words** Specific charge, Powder factor, Tunnel blast design, Fixation factor

**초 록** 비장약량 또는 장약계수는 어떤 발파에서 파괴대상이 되는 암석의 총 부피 당 또는 총 무게 당 폭약 소비량으로 정의된다. 암석 톤당 또는 입방미터 당 폭약 소비량의 변화는 언제나 암질변화에 대한 좋은 지표가 된다. 광산현장에서는 통상 광석(ore) 톤당 폭약 소비량을 암석에 대한 발파 용이성의 척도로 사용하는 반면, 건설현장에서는 암석 입방미터 당 폭약 소비량을 사용한다. 본 논문에서는 터널발파를 대상으로 하므로 건설현장에서 사용하는 비장약량의 정의를 채택하였다. 지금까지 다양한 터널발파 설계방법들이 제안되어 있지만 이런 방법들을 현장에 적용하였을 때 잘 맞지 않는 경우가 많다. 그 이유는 무엇보다 각 나라나 지역별로 암질조건이 서로 상이하기 때문인 것으로 보이며, 이러한 문제는 발파의 설계자나 시공자에게 기술적으로 상당한 부담이 될 수도 있다. 그런데 만일 우리가 주어진 암석에 대한 적정 비장약량을 알고 있다면 발파설계가 매우 쉬워질 수 있을 것이다. 이런 측면에서 본 논문에서는 사전에 결정된 비장약량이 있는 경우 그 비장약량에 맞추어서 터널발파를 설계할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 터널단면 상의 다양한 영역에 서로 다른 구속도를 부여하는 개념을 토대로 하고 있으며, 기존에 알려진 터널발파 설계방법들과 조합하여 사용할 수 있는 경험적인 설계방법이다.

**핵심어** 비장약량, 장약계수, 터널발파설계, 구속도

## 1. 서 론

비장약량(specific charge (weight)) 혹은 장약계수(powder factor)는 암석을 파괴하는데 들어가는 폭약의 양을 말하며, 대개 암석 단위무게 당 또는 단위부피 당 폭약

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부

\* 교신저자 : coswin@hanmail.net

접수일 : 2009년 12월 10일

심사 완료일 : 2009년 12월 17일

게재 승인일 : 2009년 12월 24일

소비량으로 표시한다. 전통적으로 광산현장에서는 비장약량을 채굴된 광석(ore) 톤당 폭약 소비량(kg/ton)으로 정의하며, 건설현장에서는 굴착대상 암석 입방미터당 폭약 소비량(kg/m<sup>3</sup>)으로 정의한다. 비장약량의 변화는 RQD, 탄성과 속도 등과도 상관성이 좋아 여러 가지 암질조건의 변화를 잘 반영하며, 발파 용이성(blastibility)의 척도로도 많이 사용된다(Persson 등, 1994; Rustan, 1998). 또한 비장약량은 작업의 경제성과도 직접적으로 연관이 되기 때문에 광산이나 토목 현장에서 필수적으로 관리되고 있는 항목이다.

어떤 현장이나 지역에서 여러 차례에 걸친 발파작업으로부터 얻어진 비장약량은 특정 암종을 굴착하는데 필요한 최적 장약량에 대한 정보를 제공하기 때문에 어떤 의미에서는 가장 효율적인 발파설계의 기준이 될 수 있다. 예를 들어, 그림 1(a)와 같은 벤치발파에서 비산의 제어를 위해 저항선(B)을 변경하는 경우 대상 암석에 대한 비장약량을 알고 있으면 쉽게 저항선을 조절할 수 있다. 즉, 그림 1(a)는 벤치발파에서 이상적인 자유면 상태를 보여주지만 실제 현장에서는 선행발파의 영향으로 그림 1(b)와 같이 벤치의 법면이 들쭉날쭉한 상태인 경우가 많다. 이처럼 저항선이 일정하지 않으면 저항선이 짧은 발파공에서는 비산의 위험이 높아진다. 이런 경우에는 그림 1(c)와 같이 전체적인 비장약량은 동일하게 유지하면서도 비산의 위험이 있는 제1열의 저항선을 B에서 1.2B로 증가시킬 수 있다. 그러면 어

는 정도의 파쇄도의 차이는 있겠지만 비산문제를 완벽하게 해결하면서도 전체적인 파괴량은 그대로 유지할 수가 있다.

근래에 들어 발파작업의 효율성을 향상시키고 발파공해를 제어할 목적으로 대상 암반에 최적화된 발파공법을 발굴하는 과정에서 발파암 분류법이 많이 개발되고 있다. 이와 같이 새로운 발파암 분류법을 개발하는 근본적인 이유는 지금까지 주로 외국의 연구자들에 의해 많이 제안되어 온 터널발파 설계방법을 국내의 현장에 적용하였을 때 잘 맞지 않는 경우가 많았기 때문이다. 이런 차이는 무엇보다 각 나라마다 암질조건이 서로 상이한 데 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 새로이 개발되는 발파암 분류법들에서는 암종별로 적절한 비장약량을 설정해두고, 설정된 비장약량을 근거로 발파를 설계하도록 권고하고 있는 경우가 많다. 본 연구에서는 이와 같은 점에 착안하여 비장약량을 미리 알고 있는 상황에서 발파를 설계할 때 원하는 비장약량을 얻을 수 있는 경험적인 터널발파 설계방법을 제안하였다.

## 2. 비장약량 맞춤형 터널발파 설계방법

### 2.1 설계 알고리즘

비장약량 맞춤형 발파설계 알고리즘이란 주어진 조건에서 발파를 설계하였을 때, 설계결과로부터 얻은 비장약량이 사전에 설정된 비장약량과 일치되도록 하는

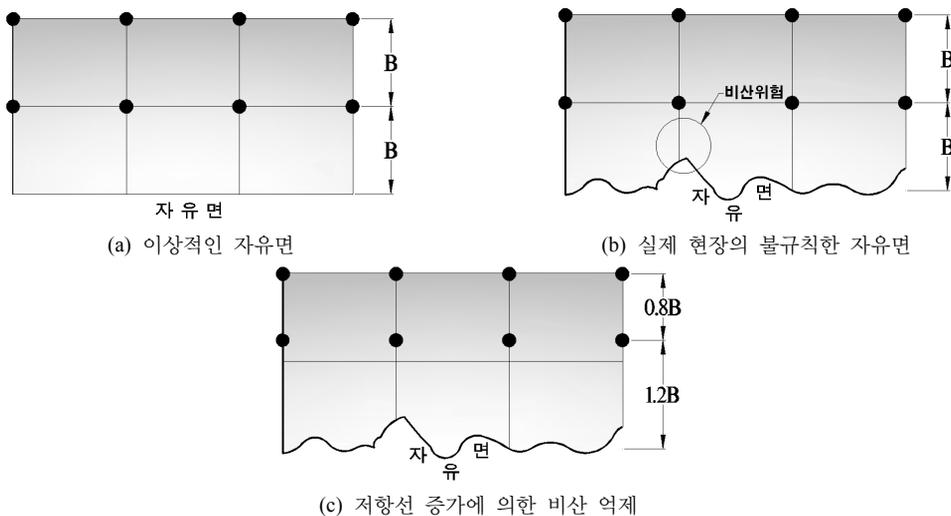


그림 1. 벤치발파에서 비산 억제를 위하여 전체적인 비장약량은 그대로 유지한 채 제1열의 저항선만 20% 증가시킨 설계.

설계방법을 말한다. 먼저, 편의상 터널단면을 그림 2와 같이 단순화하면 터널단면은 통상적인 발파설계에서와 마찬가지로 크게 바닥공(lifters), 외곽공(wall holes; contour holes), 심발공(cut holes), 수평 확대공(horizontal stoping holes), 하향 확대공(downward stoping holes) 등의 5개 영역으로 나눌 수 있으며, 심발부는 다시 그림 2(b)와 같이 안쪽 사각형부터 제1심발, 제2심발, 제3심발, 제4심발 등으로 세분할 수 있다. 이와 같은 영역분할은 발파를 할 때 장약공의 위치, 기폭순서 등에 따라 파괴에 저항하는 암반의 구속도(fixation factor)가 영역별로 크게 차이가 나기 때문이다. 본 논문에서는 심발부에 4개의 사각형과 대구경의 무장약공을 사용하는 실린더컷(cylinder cut)을 고려하고 있으므로 터널단면은 총 8개 영역(바닥공, 외곽공, 제1심발, 제2심발, 제3심발, 제4심발, 수평 확대공, 하향 확대공) 정도로 구분한다. 전체 비장약량을 어떤 값에 맞추는 문제는 주어진 비장약량을 터널단면상의 각 영역별로 어떻게 배분하느냐의 문제라 할 수 있다. 즉, 전체 비장약량이  $C$ 로 설계될 수 있도록 그림 2의 각 영역에 적절한 크기의 비장약량  $C_i$  ( $i = L, W, 1, 2, 3, 4, H, D$ )를 할당하는 문제이며,

따라서 구하고자 하는 미지수는 바로 영역별 비장약량  $C_i$ 가 된다.

전체 비장약량  $C$ 는 미리 주어지는 것으로 기지의 값이며, 다음 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sum Q_i}{\sum V_i} = \frac{V_L C_L + V_W C_W + \dots + V_D C_D}{V_L + V_W + \dots + V_D} = \frac{\sum V_i C_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

식 (1)에서  $Q$ 는 총장약량,  $V$ 는 총암석량,  $Q_i$ 는 영역별 장약량,  $V_i$ 는 영역별 암석량이다. 영역별 암석량  $V_i$ 는 기존에 알려져 있는 터널발파 설계방법들을 적용하면 모두 알 수 있는 값이므로 남아 있는 미지수는 영역별 비장약량  $C_i$ 이다.

한편, 다음의 그림 3은 다양한 질량  $m_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )를 가지는 물체들이 거리 축  $x$  상의 좌표  $X_i$ 에 위치하고 있는 모습이다. 그러면 이 물체들의 질량중심(center of mass)의 좌표  $X_{cm}$ 은 다음 식 (2)에 의해 결정된다.

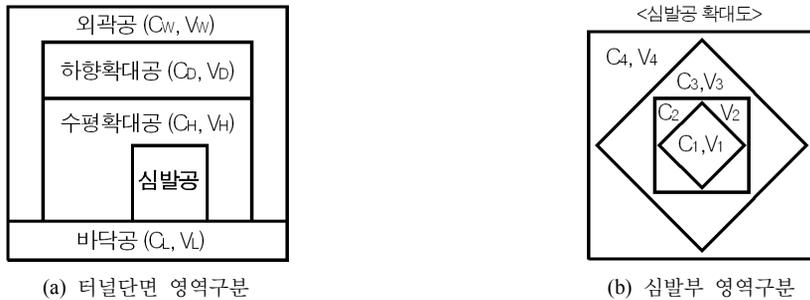


그림 2. 터널단면을 사각형으로 단순화하고, 발파 시에 예상되는 구속도의 차이에 따라 단면을 보다 세부적인 영역으로 구분한 모델.

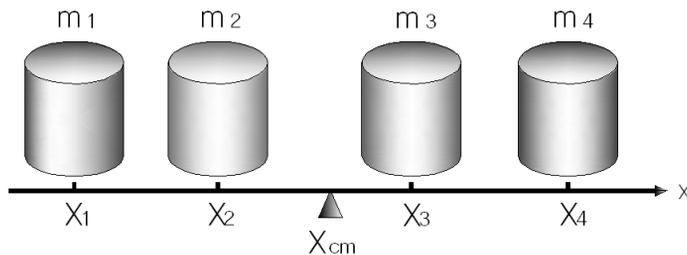


그림 3. 일차원 직선 축( $x$ ) 상에 놓인 다양한 질량( $m_i$ )의 물체들과 그 질량중심( $X_{cm}$ ).

$$X_{cm} = \frac{\sum m_i X_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

식 (2)를 앞의 식 (1)과 비교하면 상호간에 유사성을 발견할 수 있는데, 이를 좀 더 구체화하기 위해 다음의 그림 4와 같이 서로 다른 체적  $V_i$ 을 가지는 물체들이 비장약량 축  $c$  상의 좌표  $C_i$ 에 위치하고 있다고 가정한다. 그러면 이들 물체들의 ‘체적중심(center of volume)’의 좌표  $C_{cv}$ 는 다음 식 (3)에 의해 결정된다.

$$C_{cv} = \frac{\sum V_i C_i}{\sum V_i} \quad (3)$$

이제 식 (3)과 식 (1)을 비교해보면 전체 비장약량  $C$ 는 비장약량 축 상에서 영역별 비장약량  $C_i$ 들의 ‘체적중심’인  $C_{cv}$ 에 해당함을 알 수 있다. 즉,  $C = C_{cv}$ 가 성립한다. 따라서 질량중심  $X_{cm}$ 이 각 물체의 위치  $X_i$ 를 질량  $m_i$ 으로 가중하여 위치를 평균한 값이라면 ‘체적중심’  $C_{cv}$ , 곧 전체 비장약량  $C$ 는 각 영역의 비장약량  $C_i$ 를 체적  $V_i$ 로 가중하여 비장약량을 평균한 값이라고 할 수 있다. 결국 비장약량 맞춤형 설계는 식 (2)에서 물체들의 질량  $m_i$ 와 그 질량중심의 좌표  $X_{cm}$ 을 알고 있을 때 각 물체의 좌표  $X_i$ 를 구하는 문제와 마찬가지로 된다.

이제 다시 식 (1)로 돌아가면, 찾고자 하는 미지수는 영역별 비장약량  $C_i$ 로서 총 8개이다. 하지만 주어진 관계식은 식 (1) 하나뿐이어서 이대로는 해를 구할 수 없으므로 우선 식 (1)의 양변을  $C_L$ 로 나누어 비장약량들을 정규화(normalization)시킨다.

$$\begin{aligned} \frac{C}{C_L} &= C_{NORM} \\ &= \frac{V_L \left( \frac{C_L}{C_L} \right) + V_W \left( \frac{C_W}{C_L} \right) + \dots + V_D \left( \frac{C_D}{C_L} \right)}{V_L + V_W + \dots + V_D} = \frac{\sum V_i C_{i,NORM}}{\sum V_i} \quad (4) \end{aligned}$$

식 (4)에서  $\frac{C}{C_L} = C_{NORM}$ 은 정규화된 전체 비장약량,

$\frac{C_i}{C_L} = C_{i,NORM}$ 은 정규화된 영역별 비장약량이다. 이와

같이 본 알고리즘에서는 영역별 비장약량  $C_i$  상호간에 어떤 상대적인 크기가 있는 것으로 설정함으로써 정규화 기법을 적용하여 문제를 단순화시킨다. 즉, 어떠한 방법을 통해 식 (4)에서 영역별 비장약량  $C_i$ 의 상대적인 크기인 정규화된 영역별 비장약량  $C_{i,NORM}$ 만 결정할 수 있다면 곧바로  $C_{NORM}$ 을 알 수 있으므로 다음의 식 (5)와 (6)을 통해 영역별 비장약량  $C_i$ 를 모두 구할 수 있게 된다.

$$C_L = \frac{C}{C_{NORM}} \quad (5)$$

$$C_i = C_{i,NORM} C_L \quad (6)$$

### 2.2 정규화된 영역별 비장약량 결정법

영역별 비장약량  $C_i$ 는 앞 절의 알고리즘을 통해 모두 계산할 수 있지만 이를 위해서는 반드시 정규화된 영역별 비장약량  $C_{i,NORM}$ 이 먼저 결정되어야 한다. 즉, 터널단면을 구성하는 8개의 영역별로 비장약량의 상대적인 크기가 먼저 결정되어야 하며, 이 값만 결정된다면 찾고자 하는 미지수  $C_i$ 는 앞의 식 (4)~(6)에 의해 모두 결정될 수 있다. 따라서 본 절에서는 정규화된 영역별 비장약량  $C_{i,NORM}$ 을 결정하는 알고리즘만을 기술하였다.

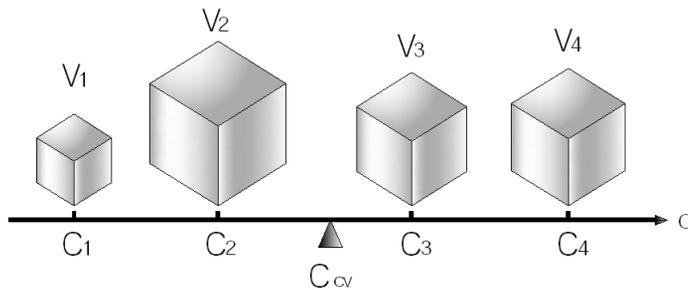


그림 4. 일차원 비장약량 축(c) 상에 놓인 다양한 체적( $V_i$ )의 물체들과 그 ‘체적중심’( $C_{cv}$ )

Persson 등(1994)에 의하면 다른 조건이 일정할 때 저항선  $B$ 는 구속도  $f$ 와 다음의 관계가 있다고 보고하였다.

$$B \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (7)$$

식 (7)에서 구속도  $f$ 는 벤치의 경사와 같은 암반의 기하학적 조건에 따라 달라지며, 터널의 경우에는 발파공의 위치, 기폭순서 등에 따라 달라지는 암반의 구속 정도를 표현하는 상수이다. 그런데 식 (7)은 다른 조건이 일정할 때 저항선  $B$ 와 구속도  $f$ 의 관계를 표시하고 있으므로 마찬가지로 생각하면 다른 조건이 일정할 때 공간격  $S$ 나 굴진장  $I$ 도 식 (7)의 관계를 만족한다고 볼 수 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 다음 식 (8)과 (9)가 성립하는 것으로 가정한다.

$$S \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (8)$$

$$I \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (9)$$

한편, 어떤 발파에서 전체 비장약량이  $\rho$ 이고 영역별로 구속도의 차이가 없다면 각 영역의 발파공에 대해 다음 식 (10)이 성립할 것이다.

$$Q_i = \rho V_i \quad (10)$$

그러나 실제로 각 영역은 발파공의 위치나 기폭순서에 따라서 구속의 정도가 서로 다르기 때문에 식 (10)과 같이 모든 영역에 대해 동일한 비장약량  $\rho$ 를 배정한다면 적절하게 발파가 되지 않을 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 식 (10)에 식 (7)~(9)의 관계를 적용하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} Q_i &= \rho V_i = \rho B_i S_i I \\ &= C_i \frac{B_i}{\sqrt{f_i}} \frac{S_i}{\sqrt{f_i}} \frac{I}{\sqrt{f_i}} = C_i \frac{V_i}{f_i^{1.5}} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서  $\rho = \frac{C_i}{\sqrt{f_i} \sqrt{f_i} \sqrt{f_i}}$ 로 치환하였다. 그러면 식 (11)로부터 영역별 비장약량  $C_i$ 는 이제 다음 식 (12)와 같이 새롭게 결정된다.

$$C_i = f_i^{1.5} \frac{Q_i}{V_i} = f_i^{1.5} \rho \quad (12)$$

이제 식 (12)의 영역별 비장약량  $C_i$ 를 임의의 영역의 비장약량  $C_j$ 로 정규화하면 다음 관계가 성립한다.

$$C_{i,NORM} = \frac{C_i}{C_j} = \frac{f_i^{1.5} \rho}{f_j^{1.5} \rho} = \frac{f_i^{1.5}}{f_j^{1.5}} \quad (13)$$

그러므로 터널단면의 각 영역별로 구속도  $f_i$ 만 적절히 설정해 준다면 정규화된 영역별 비장약량  $C_{i,NORM}$ 는 식 (13)을 통해 쉽게 계산할 수 있다.

### 3. 비장약량 맞춤형 설계의 계산방법

제안된 알고리즘에 따라 실제로 터널발파를 설계하는 방법을 예시하였다. 계산의 편의상 터널단면은 그림 2의 단순화된 모델을 사용하였다. 심발부는 대구경의 무장약공을 사용하는 실린더 컷을 채택하였고, 외곽공에는 스무스 발파를 적용하였다. 폭약은 에멀전 폭약  $\phi 32\text{mm}$ 와 정밀폭약  $\phi 17\text{mm}$ 를 사용하는 것으로 가정하였다. 물론, V 컷이나 다른 심발법을 사용하는 경우에도 실린더 컷의 경우와 마찬가지로 각 발파공의 위치나 기폭순서를 고려하여 영역을 구분하고, 각 영역별로 적절한 구속도를 부여한다면 이 알고리즘을 그대로 적용할 수 있다.

비장약량 맞춤형 설계는 크게 기하학적 설계와 영역별 패턴설계의 두 가지 과정으로 이루어진다. 기하학적 설계과정에서는 영역별 패턴설계 과정에서 도출된 저항선, 공간격 등의 기하학적 자료들을 참조한다. 반면, 영역별 패턴설계 과정에서는 기하학적 설계과정에서 도출된 영역별 장약량을 발파공에 적절히 배분하는 역할을 한다. 아래의 예는 주어진 암석량이  $67.5\text{m}^3$ 일 때 비장약량을  $1.8\text{kg/m}^3$ 으로 맞추고자 하는 경우인데, 계산된 총장약량이  $121\text{kg}$ 이므로 설계 비장약량은  $(121\text{kg}) / (67.5\text{m}^3) = 1.79\text{kg/m}^3$ 이 되어 의도했던 비장약량과 같아짐을 알 수 있다. 그림 5는 설계된 최종 패턴도이다. 한편, 본 계산 예에서는 영역별 패턴설계 과정에서 바닥공의 최대저항선( $B_{L,MAX}$ )을 발파공 직경( $d$ )의 20배로 설정하여  $0.9\text{m}$ 로 설계하였으나 이와 같은 저항선이나 공간격 등은 각 설계자가 선호하는 방법에 따라 적절히 설계하면 된다.

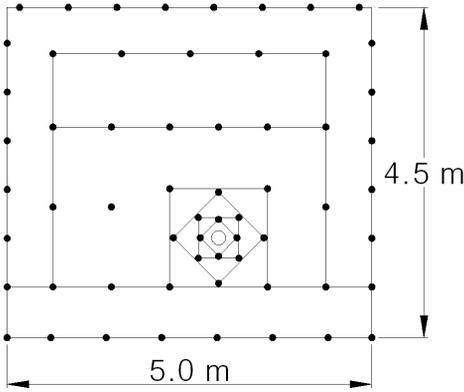


그림 5. 제안된 비장약량 맞춤형 설계방법에 따라 설계된 최종 발파패턴

3.1 입력자료

- 1) 터널 폭  $W=5.0m$
- 2) 터널 높이  $K=4.5m$
- 3) 터널 단면적  $A=22.5m^2$
- 4) 장약공 직경  $d=45mm$
- 5) 무장약공 환산직경  $\Phi = D\sqrt{n}=102mm$ 
  - 무장약공의 직경  $D=102mm$
  - 무장약공의 수  $n=1$ 공
- 6) 천공오차  $F=0.05m$
- 7) 천공장  $H = 0.15 + 34.1\Phi - 39.4\Phi^2=3.2m$
- 8) 굴진장  $I = 0.95H=3.0m$
- 9) 총 암석량  $V = IA=67.5m^3$
- 10) 비장약량  $C=1.8kg/m^3$

3.2 기하학적 설계

- 1) 영역별 암석량
  - (i) 바닥공  $V_L = IWB_L=10.35m^3$
  - (ii) 외곽공  $V_W = IB_L\{(K-B_L) + (W-B_W) + (K-B_L-B_W)\} = 21.38m^3$
  - (iii) 제1심발  $V_1 = I\left(L_1^2 - \frac{\pi\Phi^2}{4}\right) = 0.12m^3$
  - (iv) 제2심발  $V_2 = I(L_2^2 - L_1^2) = 0.27m^3$
  - (v) 제3심발  $V_3 = I(L_3^2 - L_2^2) = 0.78m^3$
  - (vi) 제4심발  $V_4 = I(L_4^2 - L_3^2) = 4.28m^3$
  - (vii) 수평 확대공  $V_H = I\{(2S_H)(W-2B_W) - L_4^2\} = 19.01m^3$

(viii) 하향 확대공

$$V_D = V - \{V_L + V_W + (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) + V_H\} = 11.32m^3$$

2) 정규화된 영역별 비장약량

(i) 바닥공  $C_{L,NORM} = \frac{C_L}{C_L} = \frac{f_L^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 1.000$

(ii) 외곽공  $C_{W,NORM} = \frac{C_W}{C_L} = \frac{f_W^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 0.289$

(iii) 제1심발  $C_{1,NORM} = \frac{C_1}{C_L} = \frac{f_1^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 28.705$

(iv) 제2심발  $C_{2,NORM} = \frac{C_2}{C_L} = \frac{f_2^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 15.625$

(v) 제3심발  $C_{3,NORM} = \frac{C_3}{C_L} = \frac{f_3^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 5.524$

(vi) 제4심발  $C_{4,NORM} = \frac{C_4}{C_L} = \frac{f_4^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 1.095$

(vii) 수평 확대공  $C_{H,NORM} = \frac{C_H}{C_L} = \frac{f_H^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 0.818$

(viii) 하향 확대공  $C_{D,NORM} = \frac{C_D}{C_L} = \frac{f_D^{1.5}}{f_L^{1.5}} = 0.570$

3) 정규화된 전체 비장약량

$$C_{NORM} = \frac{C}{C_L} = \frac{\sum V_i C_{i,NORM}}{\sum V_i} = 0.82$$

·  $\sum V_i C_{i,NORM} = 55.134m^3$

·  $\sum V_i = 67.500m^3$

4) 영역별 비장약량

(i) 바닥공  $C_L = \frac{C}{C_{NORM}} = 2.195kg/m^3$

(ii) 외곽공  $C_W = C_{W,NORM} C_L = 0.634kg/m^3$

(iii) 제1심발  $C_1 = C_{1,NORM} C_L = 63.011kg/m^3$

(iv) 제2심발  $C_2 = C_{2,NORM} C_L = 34.299kg/m^3$

(v) 제3심발  $C_3 = C_{3,NORM} C_L = 12.126kg/m^3$

(vi) 제4심발  $C_4 = C_{4,NORM} C_L = 2.404kg/m^3$

(vii) 수평 확대공  $C_H = C_{H,NORM} C_L = 1.796kg/m^3$

(viii) 하향 확대공  $C_D = C_{D,NORM} C_L = 1.251 kg/m^3$

5) 영역별 장약량

- (i) 바닥공  $Q_L = C_L V_L = 22.720\text{kg}$
- (ii) 외곽공  $Q_W = C_W V_W = 13.563\text{kg}$
- (iii) 제1심발  $Q_1 = C_1 V_1 = 7.605\text{kg}$
- (iv) 제2심발  $Q_2 = C_2 V_2 = 9.106\text{kg}$
- (v) 제3심발  $Q_3 = C_3 V_3 = 9.458\text{kg}$
- (vi) 제4심발  $Q_4 = C_4 V_4 = 10.280\text{kg}$
- (vii) 수평 확대공  $Q_H = C_H V_H = 34.133\text{kg}$
- (viii) 하향 확대공  $Q_D = C_D V_D = 14.162\text{kg}$

6) 총 장약량

$$Q = \sum Q_i = 121.0\text{kg}$$

3.3 영역별 패턴설계

1) 제1심발

- (i) 구속도  $f_1 = 15.0$
  - (ii) 설계 저항선  $B_1 = (1.5 \sim 1.7) \Phi = 0.15\text{m}$
  - (iii) 변의 길이  $L_1 = \sqrt{2} B_1 = 0.22\text{m}$
  - (iv) 공당 장약량  $q_1 = \frac{Q_1}{4} = 1.901\text{kg}$
  - (v) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95\text{kg/m}$   
 • 다짐도  $P = \begin{cases} 1.25 & \text{(다이너마이트)} \\ 1.18 & \text{(에멀전 폭약)} \leftarrow \text{채택} \\ 0.80 & \text{(ANFO)} \end{cases}$
  - (vi) 장약장  $h_e = \frac{q_1}{l_{320}} = 2.0\text{m}$
  - (vii) 전색장  $h_s = H - h_e = 1.2\text{m}$
- ∴ 에멀전 폭약( $\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$ )×5개  
 = 1.875kg, 2.0m

2) 제2심발

- (i) 구속도  $f_2 = 10.0$
- (ii) 설계 저항선  $B_2 = 0.7 L_1 = 0.15\text{m}$
- (iii) 변의 길이  $L_2 = \sqrt{2} \left( \frac{L_1}{2} + B_2 \right) = 0.37\text{m}$
- (iv) 공당 장약량  $q_2 = \frac{Q_2}{4} = 2.277\text{kg}$
- (v) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95\text{kg/m}$
- (vi) 장약장  $h_e = \frac{q_2}{l_{320}} = 2.4\text{m}$
- (vii) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.8\text{m}$

∴ 에멀전 폭약( $\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$ )×6개  
 = 2.250kg, 2.4m

3) 제3심발

- (i) 구속도  $f_3 = 5.0$
  - (ii) 설계 저항선  $B_3 = 0.7 L_2 = 0.26\text{m}$
  - (iii) 변의 길이  $L_3 = \sqrt{2} \left( \frac{L_2}{2} + B_3 \right) = 0.63\text{m}$
  - (iv) 공당 장약량  $q_3 = \frac{Q_3}{4} = 2.365\text{kg}$
  - (v) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95\text{kg/m}$
  - (vi) 장약장  $h_e = \frac{q_3}{l_{320}} = 2.5\text{m}$
  - (vii) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.7\text{m}$
- ∴ 에멀전 폭약( $\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$ )×6.5개  
 = 2.437kg, 2.6m

4) 제4심발

- (i) 구속도  $f_4 = 1.7$
  - (ii) 설계 저항선  $B_4 = 0.7 L_3 = 0.44\text{m}$
  - (iii) 변의 길이  $L_4 = \sqrt{2} \left( \frac{L_3}{2} + B_4 \right) = 1.35\text{m}$
  - (iv) 공당 장약량  $q_4 = \frac{Q_4}{4} = 2.570\text{kg}$
  - (v) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95\text{kg/m}$
  - (vi) 장약장  $h_e = \frac{q_4}{l_{320}} = 2.7\text{m}$
  - (vii) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.5\text{m}$
- ∴ 에멀전 폭약( $\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$ )×7개  
 = 2.625kg, 2.8m

5) 바닥공

- (i) 구속도  $f_L = 1.6$
- (ii) 최대 저항선  $B_{L,MAX} = 20 d = 0.9\text{m}$
- (iii) 설계 저항선  $B_L = B_{L,MAX} - 0.05H - F = 0.69\text{m}$   
 • 외향각(look-out): 3° 적용
- (iv) 공수  $N_L = \text{ceiling} \left( \frac{W + 2 \times 0.05H}{B_L} \right) = 8\text{공}$   
 • S/B=1 적용
- (v) 설계 공간격  
 (구석공 제외)  $S_L = \frac{W + 2 \times 0.05H}{N_L - 1} = 0.76\text{m}$

(vi) 설계 공간격

$$(구석공) S_{L,CORNER} = S_L - 0.05H = 0.60m$$

(vii) 공당 장약량  $q_L = \frac{Q_L}{N_L} = 2.84kg$ (viii) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95kg/m$ (ix) 장약장  $h_e = \frac{q_L}{l_{320}} = 3.0m$ (x) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.2m$ 

∴ 에멀전 폭약(ø32mm/0.375kg/400mm)×7.5개  
= 2.813kg, 3.0m

6) 외곽공 - 스무스 발파

(i) 구속도  $f_W = 0.7$ (ii) 최대 공간격  $S_{W,MAX} = (15 \sim 16)d = 0.68m$ (iii) 공수  $N_W = ceiling\left(\frac{W + 2(K - B_L)}{S_{W,MAX}}\right) + 1 = 20$ 공(iv) 설계 공간격  $S_W = \frac{W + 2(K - B_L)}{N_W - 1} = 0.66m$ (v) 최대 저항선  $B_{W,MAX} = 1.25 S_{W,MAX} = 0.84m$ (vi) 설계 저항선  $B_W = B_{W,MAX} - 0.05H - F = 0.63m$ (vii) 공당 장약량  $q_W = \frac{Q_W}{N_W} = 0.678kg$ (viii) 장약밀도  $l_{170} = \frac{q_W}{H} = 0.21kg/m$ 

· 장약밀도 범위: 0.18~0.27kg/m 체크

∴ 정밀폭약(ø17mm/0.125kg/500mm)×6개  
= 0.750kg, 3.0m

7) 수평 또는 상향 확대공

(i) 구속도  $f_H = 1.4$ (ii) 최대 저항선  $B_{H,MAX} = (1.0 \sim 1.2) B_{L,MAX} = 0.99m$ (iii) 열수  $N_{COL} = ceiling\left(\frac{W - L_4 - 2B_W}{B_{H,MAX}}\right) = 3$ 열(iv) 설계 저항선  $B_H = \frac{W - L_4 - 2B_W}{N_{COL}} = 0.80m$ (v) 설계 공간격  $S_H = (1.0 \sim 1.2) B_{H,MAX} = 1.09m$ (vi) 공수  $N_H = 3N_{COL} + 3 = 12$ 공

· 심발부 위에 3공 추가

(vii) 공당 장약량  $q_H = \frac{Q_H}{N_H} = 2.844 kg$ (viii) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95 kg/m$ (ix) 장약장  $h_e = \frac{q_H}{l_{320}} = 3.0m$ (x) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.2m$ 

∴ 에멀전 폭약(ø32mm/0.375kg/400mm)×7.5개  
= 2.813kg, 3.0m

8) 하향 확대공

(i) 구속도  $f_D = 1.1$ (ii) 최대 저항선  $B_{D,MAX} = (1.0 \sim 1.2) B_{H,MAX} = 1.09m$ (iii) 행수  $N_{ROW} = ceiling\left(\frac{K - B_L - 2S_H - B_W}{B_{D,MAX}}\right) = 1$ 행(iv) 설계 저항선  $B_D = \frac{K - B_L - 2S_H - B_W}{N_{ROW}} = 1.00m$ (v) 최대 공간격  $S_{D,MAX} = (1.1 \sim 1.2) B_{D,MAX} = 1.20m$ (vi) 열수  $N_{COL} = ceiling\left(\frac{W - 2B_W}{S_{D,MAX}}\right) + 1 = 5$ 열(vii) 설계 공간격  $S_D = \frac{W - 2B_W}{N_{COL} - 1} = 0.94m$ (viii) 공수  $N_D = N_{ROW} N_{COL} = 5$ 공(ix) 공당 장약량  $q_D = \frac{Q_D}{N_D} = 2.832kg$ (x) 장약밀도  $l_{320} = 7.85 d^2 P = 0.95kg/m$ (xi) 장약장  $h_e = \frac{q_D}{l_{320}} = 3.0m$ (xii) 전색장  $h_s = H - h_e = 0.2m$ 

∴ 에멀전 폭약(ø32mm/0.375kg/400mm)×7.5개  
= 2.813kg, 3.0m

#### 4. 결론

본 논문에서 제안하는 비장약량 맞춤형 터널발파 설계방법은 비장약량 값이 미리 결정되어 있을 때 정확히 그 비장약량을 얻을 수 있도록 해주는 발파설계 알고리즘이다. 따라서 이 알고리즘을 적용하면 원하는 비장약량을 그대로 얻을 수 있지만 그 전제조건으로 일반적인 터널발파 설계방법에 대한 기본적인 지식이 필요하며, 터널단면의 영역별 구속도도 설계자가 직접 부여하여야 한다. 아울러 최종패턴을 얻었을 때 그것이 적절한 설계인지의 여부를 판단하는 것도 설계자의 몫으로 남아있다. 하지만 비장약량이 사전에 결정되어 있다는 것은 주어진 체적의 암석을 파괴하는데 적합한 장약량이

이미 알려져 있다는 뜻이므로 기존의 설계방법들과 함께 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용한다면 무엇보다 발파설계의 과정이 한층 쉬워지게 되고, 또 발파 결과도 좋아질 것이다. 특히, 발파를 거듭할수록 현장 조건에 더 적합한 비장약량을 얻을 수 있으므로 본 알고리즘은 학습을 통해 진화하는 설계도구의 역할을 하게 되어 발파효율을 점점 더 향상시킬 것이다. 이 외에도 막장면의 암질이 영역별로 서로 다른 경우 본 알고리즘을 적용한다면 영역별 비장약량을 원하는 대로 쉽게 조절할 수 있으므로 유익할 것으로 본다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Persson, P., R. Holmberg and J. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, pp.191-193, pp.184-185, p. 224.
2. Rustan, A., 1998, Rock Blasting Terms and Symbols, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 149-150.



**최 병 희**

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042-868-3237  
E-mail : bhchoi@kigam.re.kr



**류 창 하**

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042-868-3236  
E-mail : cryu@kigam.re.kr



**정 주 환**

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Tel : 042-868-3249  
E-mail : coswin33@nate.com