

비장약량 맞춤형 터널발파설계 알고리즘

최병희 · 류창하 · 정주환¹⁾

1. 서론

비장약량(specific charge (weight); powder factor)은 암석을 파괴하는데 들어가는 폭약의 양을 말하며, 대개 암석 톤당 또는 입방 미터당 폭약 소비량으로 표시한다. 통상 광산에서는 비장약량을 채굴된 광석(ore) 톤당 폭약 소비량으로 정의하며, 건설 분야에서는 굴착대상 암석 입방 미터당 폭약 소비량으로 정의한다. 비장약량의 변화는 RQD, 탄성과 속도 등과도 상관성이 좋아 여러 가지 암질조건의 변화를 잘 반영하며, 발파 용이성(blastibility)의 척도로도 많이 사용된다(Persson et al., 1994; Rustan, 1998). 또한 비장약량은 작업의 경제성과도 직접적으로 연관이 되기 때문에 광산이나 토목 현장의 필수 관리 항목이라 할 수 있다.

근래에 들어 발파작업의 효율성을 향상시키고 발파공해를 제어할 목적으로 대상 암반에 최적화된 발파공법을 발굴하는 과정에서 발파암 분류법이 많이 개발되고 있다. 이와 같은 발파암 분류법에서는 암종별로 적정한 비장약량을 설정해두고, 설정된 비장약량을 근거로 발파를 설계하도록 권고하는 경우가 많다. 또한, 어떤 현장이나 지역에서 여러 차례에 걸친 발파작업으로부터 얻어진 비장약량은 대상 암종에 대한 가장 효율적인 발파설계의 기준이 될 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 점에 착안하여 비장약량을 기준으로 발파를 설계할 때 원하는 비장약량에 맞출 수 있는 경험적인 터널발파 설계방법을 제안하였다.

2. 비장약량 맞춤형 터널발파 설계방법

2.1 비장약량 맞춤형 설계 알고리즘

비장약량 맞춤형 발파설계 알고리즘이란 주어진 조건에서 발파를 설계했을 때, 설계결과로부터 도출된 비장약량이 사전에 설정된 비장약량과 일치되도록 하는 설계방법을 말한다. 먼저, 편의상 터널단면을 그림 1과 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)의 5개 영역으로 나뉘며, 심발부는 다시 그림 1(b)와 같이 안쪽 사각형부터 제1심발, 제2심발, 제3심발, 제4심발로 세분된다. 본 논문에서는 심발부에 4개의 사각형과 대구경의 무장약공을 사용하는 실린더 컷을 적용하는 것으로 가정하므로 터널단면은 총 8개 영역(바닥공, 외곽공, 제1심발, 제2심발, 제3심발, 제4심발, 수평 확대공, 하향 확대공)으로 구분된다.

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 1의 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.

1) 한국지질자원연구원

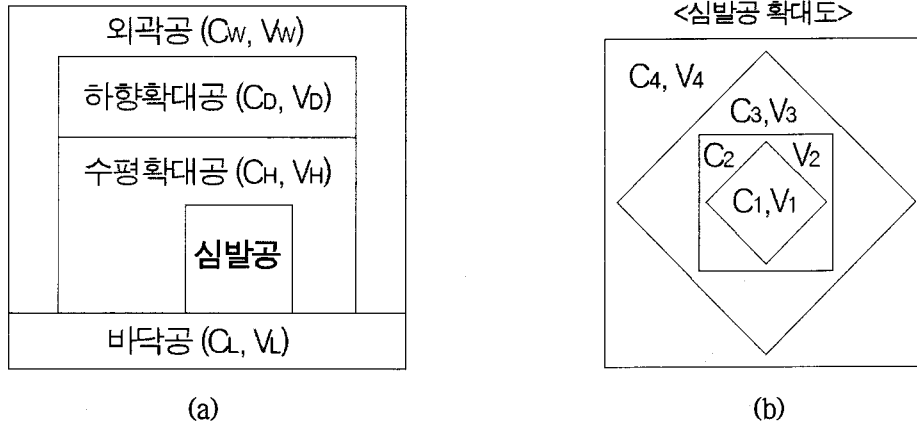


그림 1. 단순화된 터널단면

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 기존의 터널발과 설계방법들을 적용하면 모두 알 수 있는 값이므로 남아 있는 미지수는 영역별 비장약량 C_i 이다.

총 8개의 영역별 비장약량 C_i 를 식 (1)로부터 바로 구할 수는 없기 때문에 식 (1)의 양변을 C_L 로 나누어 비장약량들을 정규화(normalization)한다.

$$\frac{C}{C_L} = C_{NORM} = \frac{V_L \left(\frac{C_L}{C_L} \right) + V_W \left(\frac{C_W}{C_L} \right) + \dots + V_D \left(\frac{C_D}{C_L} \right)}{V_L + V_W + \dots + V_D} = \frac{\sum V_i C_{i,NORM}}{\sum V_i} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\frac{C}{C_L} = C_{NORM}$ 은 정규화된 전체 비장약량, $\frac{C_i}{C_L} = C_{i,NORM}$ 은 정규화된 영역별 비장약량이다. 정규화 과정을 거치면 영역별 비장약량 C_i 를 상대적인 크기로 표시할 수 있으므로 문제가 간단해진다. 즉, 어떠한 방법을 통해 식 (2)에서 영역별 비장약량의 상대적인 크기인 정규화된 영역별 비장약량 $C_{i,NORM}$ 만 결정할 수 있다면 곧바로 C_{NORM} 을 알 수 있으므로 다음 식 (3)과 (4)를 통해 영역별 비장약량 C_i 를 모두 구할 수 있다.

$$C_L = \frac{C}{C_{NORM}} \quad (3)$$

$$C_i = C_{i,NORM} C_L \quad (4)$$

2.2 정규화된 영역별 비장약량 결정법

영역별 비장약량 C_i 는 위와 같이 간단한 방법을 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 크기를 먼저 결정해 주어야 한다. Persson 등(1994)에 의하면 다른 조건이 일정할 때 저항선 B 는 구속도 f 와 다음과 같은 관계가 있다고 보고하였다.

$$B \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (5)$$

식 (5)에서 구속도 f 는 벤치의 경사와 같은 암반의 기하학적 조건에 따라 달라지며, 터널의 경우에는 발파공의 위치, 기폭순서 등에 따라 달라지는 암반의 구속정도를 표현하는 상수이다. 식 (5)는 다른 조건이 일정할 때 저항선 B 와 구속도 f 의 관계를 표시하므로 이와 마찬가지로 다른 조건이 일정할 때 공간격 S 나 굴진장 I 도 식 (5)의 관계가 있다고 볼 수 있으므로 다음 식 (6)이 성립한다.

$$\begin{aligned} S &\propto \frac{1}{\sqrt{f}} \\ I &\propto \frac{1}{\sqrt{f}} \end{aligned} \quad (6)$$

한편, 어떤 발파에서 전체 비장약량이 ρ 이고 영역별로 구속도의 차이가 없다고 가정하면 각 영역의 발파공에 대해 다음 식 (7)이 성립할 것이다.

$$Q_i = \rho V_i \quad (7)$$

그러나 실제로는 각 영역은 발파공의 위치나 기폭순서 등에 따라서 구속의 정도가 서로 다르기 때문에 식 (7)과 같이 모든 영역에 대해 비장약량을 동일하게 ρ 로 배정한다면 적절하게 발파가 되지 않을 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 식 (7)에 식 (5)와 (6)의 관계를 적용하면 다음 관계식이 성립한다.

$$Q_i = \rho V_i = \rho B_i S_i I = C_i \frac{B_i}{\sqrt{f_i}} \frac{S_i}{\sqrt{f_i}} \frac{I}{\sqrt{f_i}} = C_i \frac{V_i}{f_i^{1.5}} \quad (8)$$

그러면 식 (8)로부터 영역별 비장약량 C_i 는 다음 식 (9)와 같이 새롭게 결정된다.

$$C_i = f_i^{1.5} \frac{Q_i}{V_i} = f_i^{1.5} \rho \quad (9)$$

이제 영역별 비장약량 C_i 를 임의 영역의 C_j 로 정규화하면 다음 관계가 성립한다.

$$C_{i,NORM} = \frac{C_i}{C_j} = \frac{f_i^{1.5} \rho}{f_j^{1.5} \rho} = \frac{f_i^{1.5}}{f_j^{1.5}} \quad (10)$$

그러므로 터널단면의 각 영역별로 구속도 f_i 만 적절히 설정해 준다면 정규화 된 영역별 비장약량 $C_{i,NORM}$ 을 쉽게 계산할 수 있다.

3. 비장약량 맞춤형 설계에

제안된 알고리즘에 따라 터널발파를 설계하는 방법을 예시하였다. 계산의 편의상 터널단면은 그림 1의 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.

비장약량 맞춤형 설계는 크게 기하학적 설계와 영역별 패턴설계의 두 가지 과정으로 이루어진다. 기하학적 설계과정에서는 영역별 패턴설계 과정에서 도출되는 저항선, 공간격 등의 기하학적 자료들을 참조한다. 반면, 영역별 패턴설계 과정에서는 기하학적 설계과정에서 산출된 영역별 장약량을 발파공에 적절히 배분하는 역할을 한다. 아래의 예는 주어진 암석량이 67.5 m^3 일 때 비장약량을 1.8 kg/m^3 으로 맞추고자 하는 경우인데, 계산된 총장약량이 121 kg 이므로 설계 비장약량은 $(121 \text{ kg})/(67.5 \text{ m}^3) = 1.79 \text{ kg/m}^3$ 이 되어 의도했던 비장약량과 같다. 그림 2는 설계된 최종 패턴도이다.

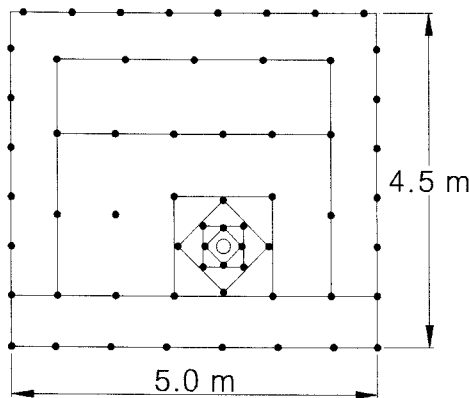


그림 2. 설계된 발파패턴

3.1 입력자료

- | | | |
|-----------|-------|--------------------|
| 1) 터널 폭 | $W =$ | 5.0 m |
| 2) 터널 높이 | $K =$ | 4.5 m |
| 3) 터널 단면적 | $A =$ | 22.5 m^2 |

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

3.2 기하학적 설계

1) 영역별 암석량

(i) 바닥공	$V_L = I W B_L =$	10.35 m ³
(ii) 외곽공	$V_W = I B_L \{ (K - B_L) + (W - B_W) + (K - B_L - B_W) \} =$	21.38 m ³
(iii) 제1심발	$V_1 = I \left(L_1^2 - \frac{\pi \Phi^2}{4} \right) =$	0.12 m ³
(iv) 제2심발	$V_2 = I (L_2^2 - L_1^2) =$	0.27 m ³
(v) 제3심발	$V_3 = I (L_3^2 - L_2^2) =$	0.78 m ³
(vi) 제4심발	$V_4 = I (L_4^2 - L_3^2) =$	4.28 m ³
(vii) 수평 확대공	$V_H = I \{ (2S_H) (W - 2B_W) - L_4^2 \} =$	19.01 m ³
(viii) 하향 확대공	$V_D = V - \{ V_L + V_W + (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) + V_H \} =$	11.32 m 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
• $\sum V_i C_{i,NORM} =$	55.134 m ³
• $\sum V_i =$	67.500 m ³

4) 영역별 비장약량

(i) 바닥공	$C_L = \frac{C}{C_{NORM}} =$	2.195 kg/m ³
(ii) 외곽공	$C_W = C_{W,NORM} C_L =$	0.634 kg/m ³
(iii) 제1심발	$C_1 = C_{1,NORM} C_L =$	63.011 kg/m ³
(iv) 제2심발	$C_2 = C_{2,NORM} C_L =$	34.299 kg/m ³
(v) 제3심발	$C_3 = C_{3,NORM} C_L =$	12.126 kg/m ³
(vi) 제4심발	$C_4 = C_{4,NORM} C_L =$	2.404 kg/m ³
(vii) 수평 확대공	$C_H = C_{H,NORM} C_L =$	1.796 kg/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 kg
(ii) 외곽공	$Q_W = C_W V_W =$	13.563 kg
(iii) 제1심발	$Q_1 = C_1 V_1 =$	7.605 kg
(iv) 제2심발	$Q_2 = C_2 V_2 =$	9.106 kg
(v) 제3심발	$Q_3 = C_3 V_3 =$	9.458 kg
(vi) 제4심발	$Q_4 = C_4 V_4 =$	10.280 kg
(vii) 수평 확대공	$Q_H = C_H V_H =$	34.133 kg
(viii) 하향 확대공	$Q_D = C_D V_D =$	14.162 kg

6) 총 장약량

$Q = \sum Q_i =$	121.0 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 m
(iii) 변의 길이	$L_1 = \sqrt{2} B_1 =$	0.22 m
(iv) 공당 장약량	$q_1 = \frac{Q_1}{4} =$	1.901 kg
(v) 장약밀도	$l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$	0.95 kg/m
	• 다짐도 $P = \begin{cases} 1.25 & \text{(다이내마이트)} \\ 1.18 & \text{(에멀전 폭약)} \leftarrow \text{사용} \\ 0.80 & \text{(ANFO)} \end{cases}$	
(vi) 장약장	$h_e = \frac{q_1}{l_{32\phi}} =$	2.0 m
(vii) 전색장	$h_s = H - h_e =$	1.2 m
※ 에멀전 폭약($\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$) \times 5개 = 1.875 kg, 2.0 m		

2) 제2심발

(i) 구속도	$f_2 =$	10.0
(ii) 설계 저항선	$B_2 = 0.7 L_1 =$	0.15 m
(iii) 변의 길이	$L_2 = \sqrt{2} \left(\frac{L_1}{2} + B_2 \right) =$	0.37 m
(iv) 공당 장약량	$q_2 = \frac{Q_2}{4} =$	2.277 kg
(v) 장약밀도	$l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$	0.95 kg/m
(vi) 장약장	$h_e = \frac{q_2}{l_{32\phi}} =$	2.4 m
(vii) 전색장	$h_s = H - h_e =$	0.8 m
※ 에멀전 폭약($\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$) \times 6개 = 2.250 kg, 2.4 m		

3) 제3심발

(i) 구속도	$f_3 =$	5.0
(ii) 설계 저항선	$B_3 = 0.7 L_2 =$	0.26 m
(iii) 변의 길이	$L_3 = \sqrt{2} \left(\frac{L_2}{2} + B_3 \right) =$	0.63 m
(iv) 공당 장약량	$q_3 = \frac{Q_3}{4} =$	2.365 kg
(v) 장약밀도	$l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$	0.95 kg/m

- (vi) 장약장 $h_e = \frac{q_3}{l_{32\phi}} =$ 2.5 m
 (vii) 전색장 $h_s = H - h_e =$ 0.7 m
 ※ 에멀전 폭약(ϕ 32mm/0.375kg/400mm) \times 6.5개 = 2.437 kg, 2.6 m

4) 제4심발

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

5) 바닥공

- (i) 구속도 $f_L =$ 1.6
 (ii) 최대 저항선 $B_{L,MAX} = 20 d =$ 0.9 m
 (iii) 설계 저항선 $B_L = B_{L,MAX} - 0.05H - F =$ 0.69 m
 • 외향각(look-out): 3° 적용
 (iv) 공수 $N_L = ceiling \left(\frac{W + 2 \times 0.05H}{B_L} \right) =$ 8공
 • S/B = 1 적용
 (v) 설계 공간격 (구석공 제외) $S_L = \frac{W + 2 \times 0.05H}{N_L - 1} =$ 0.76 m
 (vi) 설계 공간격 (구석공) $S_{L,CORNER} = S_L - 0.05H =$ 0.60 m
 (vii) 공당 장약량 $q_L = \frac{Q_L}{N_L} =$ 2.84 kg
 (viii) 장약밀도 $l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$ 0.95 kg/m
 (ix) 장약장 $h_e = \frac{q_L}{l_{32\phi}} =$ 3.0 m
 (x) 전색장 $h_s = H - h_e =$ 0.2 m
 ※ 에멀전 폭약(ϕ 32mm/0.375kg/400mm) \times 7.5개 = 2.813 kg, 3.0 m

6) 외곽공 - 스무스 발파

(i) 구속도	$f_W =$	0.7
(ii) 최대 공간격	$S_{W,MAX} = (15 \sim 16) d =$	0.68 m
(iii) 공수	$N_W = ceiling \left(\frac{W + 2(K - B_L)}{S_{W,MAX}} \right) + 1 =$	20공
(iv) 설계 공간격	$S_W = \frac{W + 2(K - B_L)}{N_W - 1} =$	0.66 m
(v) 최대 저항선	$B_{W,MAX} = 1.25 S_{W,MAX} =$	0.84 m
(vi) 설계 저항선	$B_W = B_{W,MAX} - 0.05 H - F =$	0.63 m
(vii) 공당 장약량	$q_W = \frac{Q_W}{N_W} =$	0.678 kg
(viii) 장약밀도	$l_{17\phi} = \frac{q_W}{H} =$	0.21 kg/m

• 장약밀도 범위: 0.18 ~ 0.27 kg/m 체크

※ 정밀폭약($\phi 17\text{mm}/0.125\text{kg}/500\text{mm}$) \times 6개 = 0.750 kg, 3.0 m

7) 수평 또는 상향 확대공

(i) 구속도	$f_H =$	1.4
(ii) 최대 저항선	$B_{H,MAX} = (1.0 \sim 1.2) B_{L,MAX} =$	0.99 m
(iii) 열수	$N_{COL} = ceiling \left(\frac{W - L_4 - 2B_W}{B_{H,MAX}} \right) =$	3열
(iv) 설계 저항선	$B_H = \frac{W - L_4 - 2B_W}{N_{COL}} =$	0.80 m
(v) 설계 공간격	$S_H = (1.0 \sim 1.2) B_{H,MAX} =$	1.09 m
(vi) 공수	$N_H = 3 N_{COL} + 3 =$	12공
	• 심발부 위에 3공 추가	
(vii) 공당 장약량	$q_H = \frac{Q_H}{N_H} =$	2.844 kg
(viii) 장약밀도	$l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$	0.95 kg/m
(ix) 장약장	$h_e = \frac{q_H}{l_{32\phi}} =$	3.0 m
(x) 전색장	$h_s = H - h_e =$	0.2 m

※ 에멀전 폭약($\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$) \times 7.5개 = 2.813 kg, 3.0 m

8) 하향 확대공

(i) 구속도	$f_D =$	1.1
(ii) 최대 저항선	$B_{D,MAX} = (1.0 \sim 1.2) B_{H,MAX} =$	1.09 m

(iii) 행수	$N_{ROW} = ceiling \left(\frac{K - B_L - 2S_H - B_W}{B_{D,MAX}} \right) =$	1행
(iv) 설계 저항선	$B_D = \frac{K - B_L - 2S_H - B_W}{N_{ROW}} =$	1.00 m
(v) 최대 공간격	$S_{D,MAX} = (1.1 \sim 1.2) B_{D,MAX} =$	1.20 m
(vi) 열수	$N_{COL} = ceiling \left(\frac{W - 2B_W}{S_{D,MAX}} \right) + 1 =$	5열
(vii) 설계 공간격	$S_D = \frac{W - 2B_W}{N_{COL} - 1} =$	0.94 m
(viii) 공수	$N_D = N_{ROW} N_{COL} =$	5공
(ix) 공당 장약량	$q_D = \frac{Q_D}{N_D} =$	2.832 kg
(x) 장약밀도	$l_{32\phi} = 7.85 d^2 P =$	0.95 kg/m
(xi) 장약장	$h_e = \frac{q_D}{l_{32\phi}} =$	3.0 m
(xii) 전색장	$h_s = H - h_e =$	0.2 m
※ 에멀전 폭약($\phi 32\text{mm}/0.375\text{kg}/400\text{mm}$) \times 7.5개 = 2.813 kg, 3.0 m		

4. 결론

본 논문에서 제안하는 비장약량 맞춤형 발파설계 알고리즘은 비장약량 값이 미리 결정되어 있을 때 정확히 그 비장약량을 얻을 수 있게 하는 발파설계 방법이다. 따라서 이 방법을 적용하면 원하는 비장약량을 그대로 얻을 수 있지만 그 전제조건으로 일반적인 터널발파 설계에 대한 기본적인 지식이 요구되며, 특히 설계자가 터널단면의 각 영역별로 적절한 구속도 f_i 를 부여할 필요가 있다. 또 최종 패턴으로부터 그것이 적절한 설계인지의 여부를 판단하는 것도 역시 설계자의 몫이다. 하지만 비장약량이 사전에 결정되어 있다는 것은 주어진 체적의 암석을 파괴하는데 가장 적절한 장약량을 이미 알고 있다는 것이므로 일반적인 발파 설계 방법과 함께 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 특히 막장면의 암질이 영역별로 크게 다른 경우에는 본 알고리즘을 적용하면 영역별로 비장약량을 미세하게 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.