

## 터널발파설계 자동화를 위한 발파패턴 설계식 개발

최용근

### Development of Automated Pattern Generation Method for Tunnel Blasting

Yong-Kun Choi

**Abstract :** Blasting design methods applied in Korea were originally made for foreign rock conditions and blasting environments. Therefore, it has not been fully fitted to the Korean rock conditions. Since 1998, several studies for the automated pattern design of tunnel blasting have been carried out. As the result, a new blasting design method which can settle the problems was developed. Though it is more complex than prior method, it can provide a variety of advantages for us. Through the method, it is possible to vary charge weight according to the changing advance. It can also be applied to the various design for contour holes. In this study, the newly developed method is introduced.

**Key words :** automated design of tunnel blasting, blasting pattern design, tunnel blasting, blasting pattern

**초 록 :** 국내에서 발파설계에 적용하고 있는 수식은 외국의 암반조건과 발파환경에 맞게 만들어진 것으로서 암질과 현장조건이 상이한 국내에서는 잘 맞지 않거나 발파패턴의 자동설계에도 적절하지 않은 문제가 있었다. 1998년부터 터널발파설계 자동화를 구현하기 위한 여러 연구가 시행되었고, 이를 통해 개발된 발파설계식은 이러한 문제들을 해결할 수 있었다. 개발된 발파 설계식은 기존의 수식에 비해 복잡하기는 하지만, 암반상태에 따른 굴진장의 변화를 고려하여 장약량을 변화시킬 수 있고 최외곽공과 전열공의 설계도 다양하게 적용할 수 있는 등 여러 가지 장점이 있다. 이 연구에서는 터널발파설계 자동화를 위해 개발된 설계식에 대해 검토하였다.

**핵심어 :** 터널발파설계 자동화, 발파설계, 터널발파, 발파패턴

#### 1. 서 론

국내에서 터널발파 설계는 흔히 Swedish method라고 알려져 있는 Langefors and Kihlström(1963), Gustafsson(1973)과 Oloffson(1988)의 설계방법을 따르거나, 1회 굴진에 필요한 폭약량을 계산하고 이에 필요한 천공수와 공당 장약량을 계산한 후 위치별로 지정된 저항선에 따라 발파공을 배열하는 방법으로 이루어졌다. 그러나 이런 설계식은 외국의 암반조건과 발파환경에 맞게 만들어진 것으로서 암질과 현장조건이 상이한 국내에서는 잘 맞지 않는 문제점이 지적되었으며, 최근 대형 터널 현장에서 적용되고 있는 컴퓨터 제어 유압식 점보드릴에 적용하기 위한 발파패턴의 자동설계에도 적절하지 않은 것으로 알려져 있다(김태형, 2002).

국내 발파환경에 적합한 설계식을 바탕으로 표준발파패턴을 자동설계하는 기술을 개발하기 위한 연구가 1998년 최영민(1998)의 연구로부터 시작되어 김광염(1999), 김태형(2002)의 연구까지 여러 차례 시행되었다. 이러한 연구를 통해 컴퓨터에 의해 자동으로 발파설계를 수행할 수 있는 수식이 개발되었다. 자동설계기법은 발파패턴 설계방식에서 Langefors and Kihlström(1963)의 기본적인 설계 흐름을 따르지만, 암반조건에 따른 굴진장의 변화와 장약량의 변화를 고려할 수 있도록 새로운 개념과 수식이 도입되었다. 이 연구에서는 자동설계 수식을 소개하고, 새롭게 도입된 개념과 수식들에 대해서 검토하고자 한다.

#### 2. 발파패턴 설계의 자동화를 위한 수식 개발

##### 2.1 터널단면에서 발파영역 구분

터널발파는 1자유면 발파로써 자유면 수를 늘리

1) (주)지오메니컨설턴트  
접수일 : 2005년 12월 5일

기 위한 심발발파로 시작하여 터널굴착선을 형성하는 최외곽공 발파로 종결된다. 발파가 진행되는 과정에 따라 터널단면을 몇 개의 영역으로 구분할 수 있으며, 각 영역별로 서로 다른 장약계산 방법이 적용될 뿐만 아니라 공간격과 저항선 및 기폭시차도 다르게 배치된다. 발파방법에 따라 터널단면은 Fig. 1과 같이 구분된다. Fig. 1에서 A는 심발영역으로써 터널 발파시 가장 먼저 발파되는 부분이다. B영역은 수평 또는 상향으로 발파되는 확대공 영역이며, C는 하향으로 발파되는 확대공 영역이다. C의 확대공영역은 발파시 중력에 의한 파괴효과를 부가적으로 얻을 수 있으므로 B의 확대공영역에 비해 공간격과 저항선이 커지는 특징이 있다. D는 터널의 외곽선형을 결정짓는 최외곽공 영역으로써 E의 바닥공 영역과 함께 터널 발파시 마지막 단계에서 발파된다. 이밖에도 터널의 최외곽공에 제어발파를 수행할 경우에는 최외곽공과 확대공 영역 사이의 경계부에 확대공보다 장약량이 작고 공간격이 넓은 전열공(buffer holes)이 배치된다.

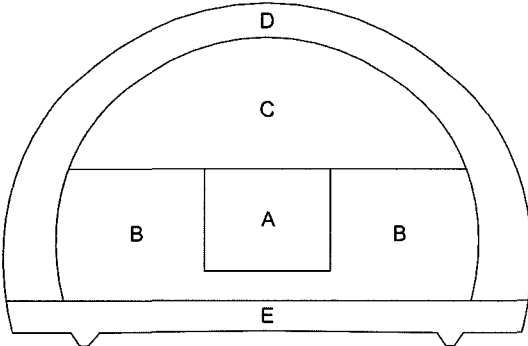


Fig. 1. 기폭단계와 설계방법의 차이에 따라 구분된 터널단면.

2.2 암석계수

Langefors and Kihlström(1963)의 설계식에서 암반상태는 암석계수라는 상수로 표현되며, 발파에 대한 암반의 저항정도를 나타낸다. 암석계수는 시

행착으로 시행되는 몇 차례의 시험발파를 통해서 구해지는 경험적인 수치로써 암석 1m<sup>3</sup>을 파쇄하는데 필요한 폭약량(kg/m<sup>3</sup>)으로 정의된다. Langefors and Kihlström(1963)는 스웨덴에서 시험된 암반을 대상으로 평가된 암석계수를 적용한 반면, 자동화 설계에서는 김태형(2002)이 국내 암반조건에 맞게 제안한 식 (1)의 RMR과 암석계수의 상관관계로부터 도출된 암석계수를 적용한다. 스웨덴의 경우 취성이 큰 화강암의 암석계수는 약 0.2 kg/m<sup>3</sup> 정도되며, 일반적으로 암석계수는 0.4 kg/m<sup>3</sup> 정도를 취하면 무난한 것으로 알려져 있다 (Persson et al., 1994). 반면, 식 (1)을 따를 경우 RMR에 대한 암석계수는 Table 1과 같다.

$$C = 0.00582 \times RMR + 0.0537 \tag{1}$$

여기서 C는 암석계수(rock constant, kg/m<sup>3</sup>), RMR은 Rock Mass Rating이다.

2.3 심발(cut) 계산

자동화 설계를 위한 심발 설계식은 Langefors and Kihlström(1963)의 심발 설계식을 국내 발파 환경에 적합하게 변형시킨 식을 적용하였다.

평행공 심발 계산

평행공 심발에는 번컷, 실린더컷, 코로만트컷 등이 있으나, 국내에서는 대구경(102mm 내외)의 무장약공을 갖는 실린더컷이 가장 많이 이용된다. 이밖에도 국내에서 개발된 대구경 수평심발(PLHBM, 무장약공의 직경이 360mm)도 소음이나 진동이 문제되는 현장에서 적용되고 있다. 자동화 설계에서는 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 실린더컷을 평행공 심발로 적용하고 있다.

가. 첫 번째 사각형 계산

Fig. 2의 (a)는 4개의 사각형을 가진 실린더컷의 설계 예로써  $\phi$ 는 무장약공의 지름(m), d는 장약공

Table 1. RMR에 따른 암석계수의 변화

RMR	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
암석계수 (kg/m <sup>3</sup> )	0.6357	0.5775	0.5193	0.4611	0.4029	0.3447	0.2865	0.2283	0.1701	0.1119

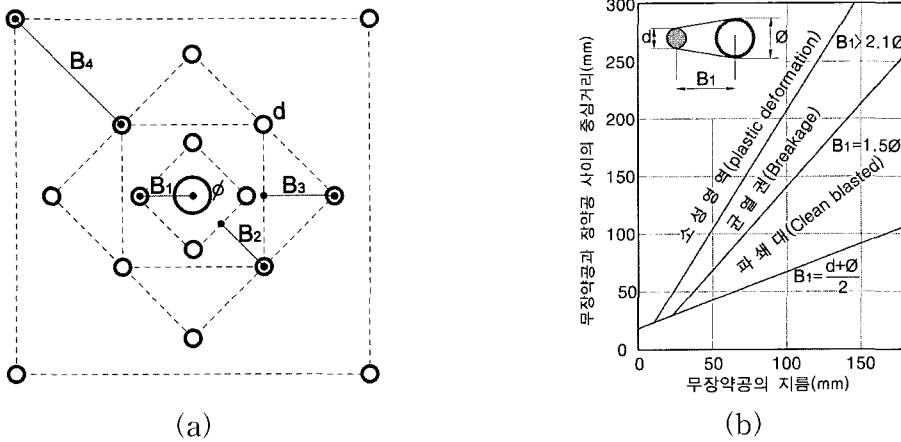


Fig. 2. (a)는 4개의 사각형을 가진 실린더컷, (b)는 무장약공과 저항선 거리에 따른 암석의 파괴양상을 표시한 그림.

의 지름(m)이다.  $B_1 \sim B_4$ 는 각각의 사각형에 배치된 발파공의 저항선을 나타낸다. Fig. 2의 (b)는 무장약공과 저항선 거리 관계에 따른 암석의 파괴양상을 나타낸다(Langefors and Kihlström, 1963). 암석을 완벽히 파쇄하고, 필요한 자유면을 정확히 확보하기 위해서는 무장약공과 첫 번째 발파공의 거리는 무장약공 지름의 1.7배 이내이어야 한다. 첫 번째 발파공과 무장약공의 거리가 무장약공 지름의 2.1배를 초과하면 암석은 파쇄되지 않으므로 심발을 형성할 수 없다. 또한 천공시 천공오차가 발생할 수 있으므로 자동화 설계에서 첫 번째 사각형의 저항선은 무장약공 지름의 1.5배를 적용한다.

$$B_1 = 1.5\phi \tag{2}$$

여기서  $B_1$ 은 첫 번째 사각형에 위치한 장약공과 무장약공 중심의 거리로써 단위는 m이다.

첫 번째 사각형에 위치한 발파공의 장약량은 다음의 식 (3)과 같은 선형장약집중도 계산 결과를 따른다.

$$I_1 = 252 \frac{d \cdot \phi \cdot C}{S_{ANFO}} \tag{3}$$

여기서  $I_1$ 은 첫 번째 사각형의 선형장약집중도로써 단위는  $kg/m$ 이며,  $S_{ANFO}$ 는 사용폭약의

ANFO 대비 상대강도로써 상수로 표현된다. 발파공 지름(d)과 무장약공 지름( $\phi$ )의 단위는 m를 적용한다. 이 경우 전색장( $h_0$ )은  $B_1$ 과 같다.

식 (4)는 Langefors and Kihlström(1963)이 제시한 첫 번째 사각형의 선형장약집중도 계산식이다. 식 (3)은 식 (4)에  $B_1 = 1.5\phi$ 를 대입하여 정리한 형태를 가지고 있으나, 적용하고 있는 암석계수의 차이로 인해 식 앞의 계수에 차이가 난다.

$$I_1 = 55d \frac{\left(\frac{B_1}{\phi}\right)^{1.5} \left(B_1 - \frac{\phi}{2}\right) \left(\frac{C}{0.4}\right)}{S_{ANFO}} \tag{4}$$

식 (3)에 무장약공이 102mm, 암석계수 0.5, 장약공 지름 45mm,  $S_{ANFO}$ 가 1.16인 폭약을 사용했을 경우의 선형장약집중도는 약  $0.498kg/m$ 로 계산된다. 이러한 선형장약집중도는 국내에서 생산되는 폭약 중 지름이 25mm인 폭약에 해당된다.

#### 나. 두 번째 사각형 계산

첫 번째 사각형에 속한 발파공의 기폭에 의해 형성된 자유면을 향해 기폭되는 두 번째 사각형의 발파공은 원형의 무장약공을 향해 기폭되는 첫 번째 발파공에 비해 암석의 구속이 적고, 충격파의 반사에 의한 파쇄효과를 얻을 수 있으므로 첫 번째 사각형의 발파공에 비해 보다 낮은 장약집중도

가 가능하다. 두 번째 사각형의 선형장약집중도 (kg/m)는 식 (5)와 같이 계산한다. 그러나 일반적으로 시행되는 발파에서는 발파공 지름과 사용할 수 있는 폭약이 제한되어 있거나, 설계자가 폭약을 지정한 상태에서 설계가 이루어지므로 식 (5)에 의해 계산되는 선형장약집중도는 실제 설계 적용값과는 차이가 있으며, 참고자료로 활용될 뿐이다. 이러한 장약방법은 자동화 설계에서도 같게 적용된다.

$$l_2 = \frac{32.3 \cdot d \cdot C \cdot B_2}{S_{ANFO} \left( \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{A_1}{2B_2} \right) \right] \right)^{1.5}} \quad (5)$$

여기서  $l_2$ 는 두 번째 사각형의 선형장약집중도 (kg/m),  $d$ 는 장약공 지름(m),  $C$ 는 암석계수 (kg/m<sup>3</sup>),  $B_2$ 는 두 번째 사각형의 저항선(m),  $A_1$ 은 첫 번째 사각형의 발파로 만들어진 사각형 형태의 자유면의 폭(m)으로써  $A_1 = \sqrt{2}B_1$ 이다. Fig. 3은  $B_2$ 와  $A_1$ 과의 관계를 나타낸다.

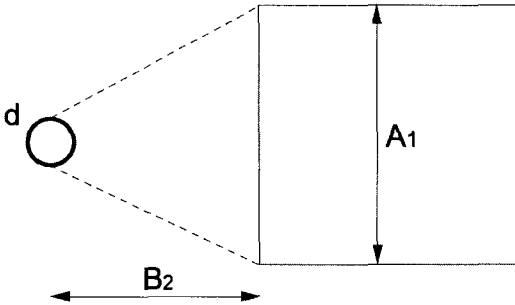


Fig. 3. 첫 번째 사각형의 발파로 형성된 자유면과 두 번째 사각형의 저항선 관계.

Fig. 3에서 적절한  $B_2$ 를 계산하기 위한 방법으로 Oloffson(1988)은  $B_2 = A_1$ 을 적용하였으며, Gustafsson(1973)은  $B_2 = 0.7A_1$ 을 적용하였다. 그러나  $B_2 = A_1$ 을 적용할 경우 새로 만들어지는 사각형이 이전 사각형으로부터 떨어져서 선형장약집중도가 급격히 증가하고, 발파시 사용할 수 있는 자유면의 넓이가 저항선에 비해 지나치게 커지는 문제가 있다. 또한 결과적으로는 전체 심발의 크기가 커지는 문제가 있다(한국도로공사, 2000). 반면

$B_2 < 0.7A_1$ 로 적용하였을 경우에는 좁은 범위에 천공수가 많아져서 정확한 천공을 어렵게 할 수도 있다. 따라서 자동화 설계에서는  $B_2 = 0.83 \cdot A_1$ 을 적용하여 적절한 크기의 심발이 형성될 수 있도록 하였다. 이 경우 전색장 ( $h_0$ )은  $h_0 = 0.5B_2$ 를 취한다.

#### 다. 세 번째 이후의 사각형

세 번째 이후의 사각형의 저항선 계산은 식 (6)을 이용한다.

$$B_n = 0.5A_{n-1} \quad (6)$$

여기서  $B_n$ 은  $n$ 번째 사각형의 저항선(m)이며,  $A_{n-1}$ 은  $n-1$ 번째 사각형의 발파로 형성된 자유면의 폭(m)이다. 단, 5번째 사각형의 경우에는 0.5대신 0.7의 계수를 적용한다. 자동화 설계에서  $n$ 번째 사각형의 선형장약집중도 ( $l_n$ , kg/m)는 식 (7)과 같은 방법으로 계산된다. 그러나 이 경우도 계산된 선형장약집중도는 참고자료로만 활용되며, 자동화 설계에서의 선형장약집중도는 설계자가 지정한 폭약의 종류에 따라 결정된다. 전색장 ( $h_0$ )은  $h_0 = 0.5B_n$ 를 취한다.

$$l_n = \frac{32.3 \cdot d \cdot C \cdot B_n}{S_{ANFO} \left( \sin \left[ \tan^{-1} \left( \frac{A_{n-1}}{2B_n} \right) \right] \right)^{1.5}} \quad (7)$$

실린더컷의 사각형 개수는 식 (8)과 같이 마지막에 만들어진 사각형의 변의 길이가 굴진장의 제공근보다 커지는 조건을 만족할 때까지 생성된다.

$$\text{마지막에 만들어진 사각형의 변의 길이} \geq \text{굴진장}^{0.5} \quad (8)$$

#### 경사공 심발 계산

경사공 심발에는 V-cut, 피라미드컷, Fan-cut 등이 있다. 이 중에서 작업과정이 단순한 V-cut이 가장 널리 이용되고 있으며, 자동화 설계에서는 V-cut을 경사공 심발의 기본형태로 적용한다. 자동화 설계가 적용하고 있는 V-cut의 천공패턴은 Fig. 4와 같다. Oloffson(1988)은 이 천공패턴에서 췌기 정점의 내측각도는 60° 이상 되어야 하며, 부

특이하게 그 이하가 되는 경우에는 암석저항이 증가하게 되므로 공당 장약량을 증가시켜야 한다고 지적하였다. Fig. 4에서 V-cut의 저항선 길이(B)는 장약공의 지름에 따라 결정되는 장약량에 의존한다. 일반적으로 많이 사용되는 45mm 천공의 경우 저항선 길이(B)는 대략 1.5m 정도가 되며, 38mm 천공의 경우에는 1.2m 정도가 된다. 따라서 저항선 길이가 1.5m를 초과하는 경우에는 정확한 심발형성을 위해 Fig. 4와 같이 baby-cut을 추가한다.

V-cut 심발의 공저장약 길이는 적어도 공길이의 1/3이 되도록 해야 하며, 주장약량은 공저장약량의 0.5배로 한다. 이때 전색장은 천공장의 0.3배로 하지만 상부가 과장약되지 않도록 하고, 천공각도도 조절하여야 한다. 그러나 실제 발파설계와 시공에서는 한 종류의 폭약만을 사용하는 경우가 많으므로 공저장약과 주장약을 구분하지 않고 천공장의 70%를 한 종류의 폭약으로 채우게 된다. 따라서 이러한 기준은 공저장약이 특별히 지정되지 않은 경우에는 무시될 수 있으며, 자동화 설계에서도 이러한 장약 방법을 따른다. V-cut 심발공 외측의

발파공도 유효하게 암석을 파괴할 수 있는 각도로 천공해야 하므로 이 천공의 기준도 Fig. 4에 표시된 V-cut 천공의 수렴점으로 한다.

V-cut 심발공의 외측에 천공되는 발파공을 심발 보조공으로 칭하기도 한다. 이 심발보조공에도 공저장약 길이는 공길의 1/3이 되도록 하며, 주장약량은 공저장약량의 0.5배로 한다. 자동화 설계에서는 이 발파공의 저항선 길이를 (천공길이 - 0.2)/2로 하였으며, 전색장은 저항선의 0.5배가 되도록 하였다. 저항선 길이는 한 발파의 굴진장이 짧을수록 작아지도록 조정하였다.

**2.4 바닥공(lifter) 계산**

자동화 설계에서는 심발을 제외한 바닥공, 확대공 및 전열공을 포함한 최외곽공의 설계에 같은 형태의 변수가 사용된다. 변수는 크게 터널형상과 사용폭약의 정보 등을 나타내는 입력변수와 입력변수를 이용해서 계산되는 출력변수의 두가지로 구분된다. Table 2에는 심발을 제외한 나머지 구역의 발파설계를 위해 입력되는 입력변수를 표시하였으며, Table 3에는 출력변수를 표시하였다.

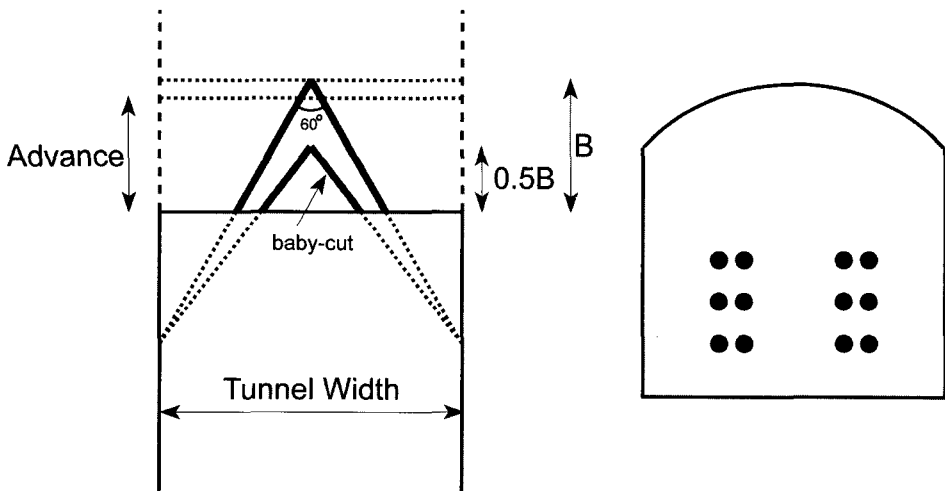


Fig. 4. V-cut의 천공패턴과 저항선 개념.

Table 2. 바닥공, 확대공 및 최외곽공(전열공 포함) 설계를 위한 입력변수

이름	변수	단위	설명
발파공 길이	H	m	천공장을 가리키며, 굴진장×굴진효율로 계산
선형장약집중도	l	kg/m	-
발파공지름	d	m	-
S <sub>ANFO</sub>	S <sub>ANFO</sub>	-	선택된 폭약의 ANFO 대비 상대강도
암석계수	C	kg/m <sup>3</sup>	RMR과 암석계수의 관계(식 (1) 및 Table 1) 참조
확대공영역 넓이	A <sub>s</sub>	m <sup>2</sup>	굴착단면에서 확대공이 배치될 영역의 넓이
look-out	l <sub>o</sub>	m	굴착계획선에서 발파공 끝점이 벗어난 거리
천공한도	l <sub>pos</sub>	m	굴착계획선을 기준으로 천공이 시작된 위치(굴착계획선 안쪽인 경우 +, 굴착계획선 밖인 경우 -, 굴착계획선상인 경우 0)
천공오차	F	m	-
굴착너비	span	m	-
주장약	g <sub>p</sub>	-	사용자가 지정한 주장약
공저장약	g <sub>s</sub>	-	사용자가 지정한 공저장약
주장약폭약의 중량	g <sub>wup</sub>	kg	선택된 주장약의 포장단위당 중량
공저장약폭약의 중량	g <sub>wus</sub>	kg	선택된 공저장약의 포장단위당 중량
주장약 길이	g <sub>lup</sub>	m	선택된 주장약의 포장단위 길이(포장길이)
공저장약 길이	g <sub>lus</sub>	m	선택된 공저장약의 포장단위 길이(포장길이)

Table 3. 바닥공, 확대공 및 최외곽공(전열공 포함) 설계를 위한 출력변수

이름	변수	단위	설명
저항선	B	m	-
공간격	S	m	-
비장약량	q <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	-
수정선형장약집중도	l'	m	$l' = 1 \times 0.016 + 0.980$ (경험식)
수정 S <sub>ANFO</sub>	S <sub>ANFO</sub> '	-	$S_{ANFO}' = S_{ANFO} \times 0.016 + 0.980$ (경험식)
수정암석계수	$\bar{C}$	kg/m <sup>3</sup>	$\bar{C} = C + 0.35$ (김태형, 2002)
최대저항선	B <sub>max</sub>	m	-
공개수	N	개	바닥공, 확대공의 발파공 수
수정공개수	N <sub>h</sub>	개	천공장에 따라 수정된 확대공의 발파공 수
공당장약량	Q <sub>b</sub>	kg	-
주장약 개수	g <sub>np</sub>	개	-
공저장약 개수	g <sub>ns</sub>	개	-
장약비율	ratio	-	단, 전열공에서는 공간격 조절 비율

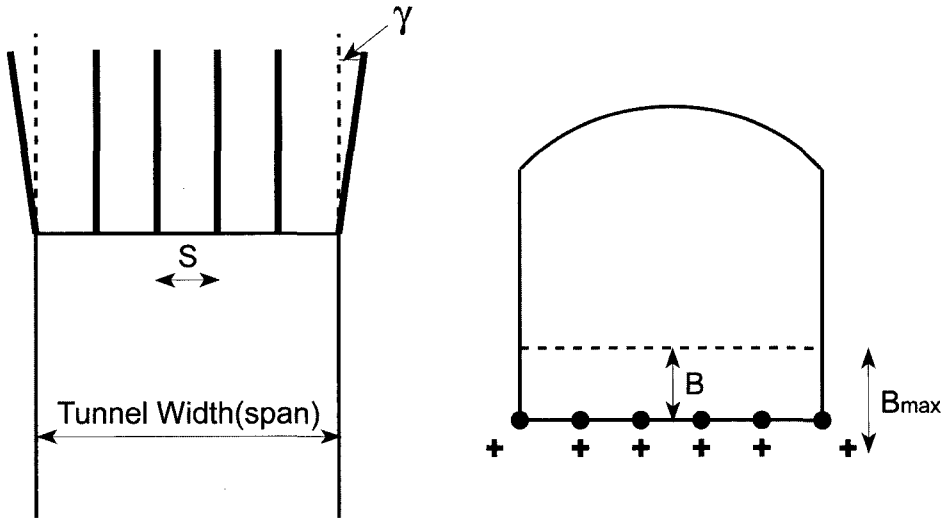


Fig. 5. 바닥공의 천공패턴(  $\gamma$ 는 look-out).

바닥공 설계 방법은 벤치발파 설계와 비슷하지만, 바닥공 발파는 벤치발파와 달리 중력의 반대방향으로 파쇄가 이루어지므로 암석의 저항이 커진다. 따라서 바닥공 발파설계에서는 벤치발파에 비해 암석의 구속정도가 커지는 것을 고려해야 한다. Fig. 5는 바닥공의 천공패턴을 나타낸다. Fig. 5의 오른쪽 그림에서 • 표시는 천공의 시작점을 가리키며, + 표시는 천공의 끝점을 가리킨다.

저항선 계산

자동화 설계에서 바닥공의 저항선은 Langefors and Kihlström(1963)가 최대저항선을 계산하기 위해 제시한 식과 비슷한 형태로 식 (9)와 같이 계산된다. 이 식은 변형된 암석계수와 암석의 구속정도, 바닥공 발파의 look-out을 고려하기 위해 만들어졌다. 최종 설계에 적용되는 저항선(B)은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$B_{max} = 0.9 \times \sqrt{\frac{l' \times S_{ANFO}}{C \times 1.55}} \tag{9}$$

여기서  $l'$ 와  $S_{ANFO}$ ,  $C$ 는 각각 수정선형장약 집중도(kg/m), 수정  $S_{ANFO}$ , 수정 암석계수(kg/m<sup>3</sup>)이다. 이 값의 계산은 Table 3을 참조한다

$$B = B_{max} - lo - F - lpos \tag{10}$$

여기서  $lo$ 는 look-out(m),  $F$ 는 천공오차(m),  $lpos$ 는 천공한도(m)로써 굴착계획선을 기준으로 한 천공시작점의 위치를 가리킨다.

공간격 계산

바닥공의 이론적인 공간격은  $B_{max}$ 와 같으며, 공간격을 이보다 크게 할 경우에는 저항선을 그에 비례해서 감소시켜야 한다. 그러나 터널폭이 충분한 여유가 없을 때는 바닥공의 간격을  $B_{max}$ 보다 작게해야 한다. 반면, 실제 설계에 적용되는 공간격은 바닥공의 look-out과 터널 바닥의 폭을 고려한 실제 천공수로부터 계산된다. 바닥공의 천공수 ( $N$ )는 식 (11)과 같이 계산되며, 자동화 설계의 실제 공간격( $S$ )은 식 (12)와 같다. 식 (11)과 (12)에서  $span$ 은 굴착너비로써 터널바닥의 폭(m)을 가리킨다.

$$N = \text{nearest higher integer of } \frac{(span + 2 \times lo + 2)}{B_{max}} \tag{11}$$

$$S = \frac{span + 2 \times lo}{N - 1} \tag{12}$$

바다공의 장약장에 대해 Persson(1994)는 전색장을 천공경의 10배 만큼 확보한 나머지 부분을 폭약으로 채우는 방법(장약장=천공장-10×천공경)을 추천하고 있으며, Gustafsson (1973)은 저항선의 0.2배를 추천하고 있다. 그러나 암석계수가 크고, 천공장이 짧을 경우에는 이러한 계산방법으로 필요한 장약장을 확보할 수 없으므로 자동화 설계에서는 장약량 계산은 다음의 식 (13)을 따른다.

$$g_{np} = \frac{H \times 0.8 - g_{ns} \times g_{lus}}{g_{lup}} \quad (13)$$

여기서  $g_{np}$ 는 주장약의 개수이며,  $g_{ns}$ 는 공저장약의 개수이다.  $g_{lus}$ 는 공저장약으로 사용된 폭약의 포장길이이며,  $g_{lup}$ 는 주장약으로 사용된 폭약의 포장길이를 나타낸다. 설계자가 공저장약을 별도로 지정하지 않은 경우에  $g_{ns} = 0$  이며, 설계자가 별도로 지정한 경우에  $g_{ns}$ 는 식 (14)와 같이 계산된다. 따라서 공저장약이 있는 경우의 공당 장약량은  $g_{np}$ 와  $g_{ns}$ 를 더한 개수가 된다.

$$g_{ns} = \frac{H \times 0.1}{g_{lus}} \quad (14)$$

**2.5 확대공(stoping) 계산**

기존의 발파 설계식을 이용해서 확대공을 설계할 경우, 확대공의 저항선을 임의로 설정한 후 공간격과 공당 장약량을 계산하는 과정으로 설계가

이루어진다. 그러나 이런 설계방법으로는 암반상태(암석계수)와 천공장 변화에 따라 공간격과 저항선을 능동적으로 변화시킬 수 없다. 따라서 기존의 발파 설계식은 컴퓨터를 이용한 자동화 설계 방식에는 부적합하다. 반면 자동화 설계는 이런 문제를 해결하기 위해 확대공 구역에 적정 장약량을 배치하기 위한 경험적 방법을 사용한다. 이 경험적 방법은 암반상태와 주어진 천공장을 이용해서 소요 공개수를 조절하기 위한 변수(여기서는 'Factor'로 정의)를 결정하는 과정으로 이루어지는데 이 과정은 Table 4와 Fig. 6에 설명되어 있다.

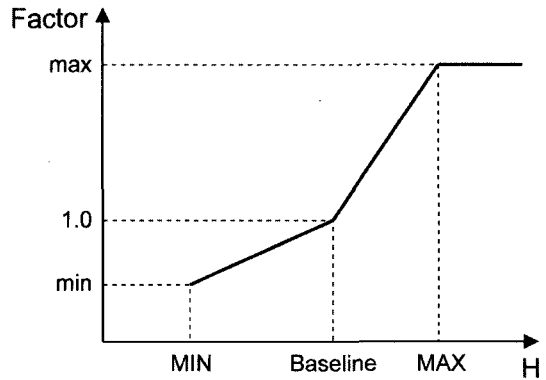


Fig. 6. 천공장의 변화에 따라 확대공 소요 공개수를 계산하기 위한 그래프; 암반상태(RMR)에 해당하는 H의 Baseline, MIN, MAX 값을 Table 4에서 결정한 후 이를 그래프의 x축(H-축)에 대입하고, 주어진 천공장(H)에 대한 Factor를 결정한다.

Table 4. 암반상태에 따른 확대공의 소요 공개수 조절을 위한 변수

RMR	암석계수 ( C )	H			Factor	
		Baseline	MIN	MAX	min	max
90	>= 0.5193	4.50	1.3	6.0	0.85	1.20
70	< 0.5193	3.50	1.3	4.5		
50	< 0.4029	2.20	1.1	3.4		
30	< 0.2865	1.65	1.0	2.1		
10	< 0.1701	1.30	0.9	1.5		

※ Baseline =  $5.1299 - \frac{3.8733}{1 + \exp(\frac{C - 0.4358}{0.0857})}$  로 계산된다.



저항선 계산

일반적으로 터널 굴착과 보강방법은 암반상태에 따라 달라진다. 즉 암반상태에 따라 굴진장이 달라지게 되므로 확대공의 저항선 계산과 장약량은 이러한 굴진장의 변화를 고려할 수 있도록 조정되어야 한다. 자동화 설계에서는 이러한 변화를 고려하기 위해 식 (15)와 같은 경험적 관계식을 적용하고 있다.

$$\text{ratio}_1 = 0.322 \times C + 0.564 \quad (15)$$

여기서 C는 암석계수(kg/m<sup>3</sup>)이고, ratio<sub>1</sub>은 암반상태에 따라 장약량을 조절하기 위한 계수로써 차원은 없다.

확대공의 저항선은 암반상태에 따라 조절된 공당 장약량(Qb)과 주어진 암반상태에 적합한 비장약량(qs)을 이용해서 확대공 구역에 최적으로 배치시킬 수 있는 발파공 수를 계산함으로써 구해진다. 먼저 암반상태에 따라 공당 장약량(폭약의 개수)은 식 (16)으로 구해진다.

$$g_{np} = \frac{H \times \text{ratio}_1 - g_{ns} \times g_{lus}}{g_{lup}} \quad (16)$$

여기서 g<sub>np</sub>는 주장약으로 사용되는 폭약의 발파공당 개수이며, ratio<sub>1</sub>은 식 (15)로부터 구해진 값이다. H는 천공장(m), g<sub>ns</sub>는 공저장약의 개수로써 설계자가 공저장약을 지정한 경우에는 바닥공 계산에서와 같은 방법으로 식 (17)에 의해 계산된다. 또한 g<sub>lus</sub>는 공저장약으로 사용된 폭약의 포장길이이며, g<sub>lup</sub>는 주장약으로 사용된 폭약의 포장길이를 나타낸다. 만약 설계자가 공저장약을 지정하지 않은 경우라면, g<sub>ns</sub> = 0 이다.

$$g_{ns} = \frac{H \times 0.1}{g_{lus}} \quad (17)$$

이제 공당 장약량(Qb)은 g<sub>np</sub>와 g<sub>ns</sub>를 더한 개수가 되며, 이를 중량으로 계산하면 식 (18)과 같다.

$$Qb = (g_{np} \times g_{wup}) + (g_{ns} \times g_{wus}) \quad (18)$$

여기서 g<sub>wup</sub>와 g<sub>wus</sub>는 각각 주장약과 공저장약으로 사용된 폭약의 포장단위당 중량을 가리킨다. 두 번째로 주어진 암반상태에 적합한 비장약량(qs)은 식 (19)로 계산되며, 확대공 구역의 발파공수는 식 (20)으로 계산된다.

$$qs = 1.356 + 0.776 \times \log_{10}(C) \quad (19)$$

$$N = \frac{qs \times As \times H}{Qb} \quad (20)$$

여기서 qs는 확대공 구역에 대한 비장약량(kg/m<sup>3</sup>), C는 암석계수(kg/m<sup>3</sup>), N은 확대공 구역의 발파공수, As는 확대공 구역의 면적(m<sup>2</sup>), H는 천공장(m), Qb는 공당장약량(kg)이다. 천공장이 길어질수록 저항선과 공간격은 커지게 되며, 천공장이 짧을 때는 어느 정도의 이상의 저항선과 공간격을 유지해야 하므로 식 (20)으로 구해진 확대공의 발파공 수를 천공장에 따라 조절할 필요가 있다. 자동화 설계에서는 천공장에 따라 발파공 개수를 조절하기 위해 Table 5의 식을 이용한다.

이제 확대공의 저항선은 식 (21)과 같이 계산된다. 식 (21)로부터 구해지는 확대공의 저항선은 수평 (B<sub>n</sub>) 또는 하향(B<sub>up</sub>)으로 발파되는 확대공에 대한

Table 5. 천공장에 따라 확대공의 발파공 수를 조절하기 위한 식

조 건	H < MIN	H > MAX	MIN ≤ H < Baseline	Baseline ≤ H ≤ MAX
발파공수 수 정	$N' = \frac{N}{\min}$	$N' = \frac{N}{\max}$	$a = \frac{1.0 - \min}{\text{Baseline} - \text{MIN}}$ $N' = \frac{N}{a \times H + b}$ $b = 1.0 - a \times \text{Baseline}$	$a = \frac{\max - 1.0}{\text{MAX} - \text{Baseline}}$ $b = 1.0 - a \times \text{Baseline}$ $N' = \frac{N}{a \times H + b}$

※ max, min, Baseline 등은 Table 4 및 Fig. 6 참조

값이다. 따라서 중력의 효과를 얻을 수 없는 상향으로 발파되는 확대공의 저항선( $B_{down}$ )은 식 (21)로 구해진 저항선의 0.8배를 적용한다. 또한 식 (21)로 계산된 저항선이 천공장의 0.75배를 초과할 경우 ( $B > 0.75 \times H$ )에는  $B = 0.75 \times H$ 를 적용한다.

$$B = \frac{\sqrt{A_s}}{\sqrt{N_h - 1}} \quad (21)$$

여기서  $B$ 는 확대공의 저항선(m),  $N_h$ 는 천공장에 따라 조절된 확대공의 발파공 개수,  $A_s$ 는 확대공 구역의 면적( $m^2$ )이다. 확대공의 공간격은 확대공의 위치에 관계없이 식 (21)로 계산된 저항선의 1.1배( $S = 1.1 \times B$ )를 취한다. 또한 계산된 확대공의 공간격이 천공장의 0.75배를 초과할 경우 ( $S > 0.75 \times H$ )에는  $S = 0.75 \times H$ 를 적용한다.

## 2.6 최외곽공(contour) 계산

최외곽공은 터널의 굴착형상을 결정하는 발파공으로써 일반적으로 스무스 블라스팅(smooth blasting)에 의한 조절발파를 실시한다. 이 조절발파는 발파공 간격을 좁게 하고, 디커플링에 의한 장약을 하며, 확대공 발파로 발생한 균열이 최외곽공의 발파로 발생하는 균열영역을 넘지 못하도록 확대공과 최외곽공 사이에 약장약된 발파공을 배치하는 방법으로 이루어진다. 스무스 블라스팅에 의한 조절발파를 할 경우 발파공 간격에 대해 Gustafsson(1973)은 45mm 천공일 경우 0.6~0.7m를 제시하였으며, 김태형(2002)과 정원준과 김선홍(2004)은 암반상태에 따라 공간격을 다르게 하는 것이 적절하다고 지적하였다. 자동화 설계에서는 최외곽공의 공간격을 식 (22)와 같이 암반상태에 따라 다르게 적용한다.

$$S = k \times d \quad (22)$$

여기서  $S$ 는 최외곽공의 공간격(m),  $d$ 는 발파공 지름(m)이다.  $k$ 는 암반상태에 따른 계수로써 암석계수  $C \leq 0.18$ 이면  $k = 12.2$ ,  $0.18 < C \leq 0.29$ 이면  $k = 13.0$ ,  $0.29 < C \leq 0.40$ 이면  $k = 13.5$ ,  $C > 0.40$ 이면  $k = 14.4$ 를 적용한다. 최외곽공의 저항선, 즉 최외곽공과 전열공의 간격은 식 (23)을 적용한다.

$$B = \frac{S}{0.8} \quad (23)$$

여기서  $B$ 는 최외곽공의 저항선(m),  $S$ 는 식 (22)에 의한 값으로써 최외곽공의 공간격(m)이다. 최외곽공의 폭약 수량은 암반상태에 따라 다르게 적용하며, 확대공에서 주장약으로 사용하는 폭약을 반드시 공저장약으로 한 개 이상 사용한다. 이 경우 최외곽공의 주장약 개수는 식 (24)로 계산된다.

$$g_{np} = \frac{H \times \text{ratio}_2 - g_{ns} \times g_{lus}}{g_{lup}} \quad (24)$$

여기서  $g_{np}$ 는 최외곽공에 주장약으로 사용되는 폭약의 개수이며,  $g_{lup}$ 는 주장약으로 사용되는 폭약의 포장 길이(m),  $g_{ns}$ 는 공저장약의 개수,  $g_{lus}$ 는 공저장약으로 사용되는 폭약의 포장 길이(m),  $H$ 는 look-out을 고려한 실제 천공장(m)이다. 또한  $\text{ratio}_2$ 는 암반상태에 따라 장약량을 조절하기 위한 계수로써 식 (25)와 같이 경험적으로 구한다.

$$\text{ratio}_2 = 0.752 \times C + 0.466 \quad (25)$$

여기서  $C$ 는 암석계수( $kg/m^3$ )이다.

## 2.7 전열공(Buffer holes) 계산

전열공은 최외곽공과 확대공 사이에 배치되어 확대공의 폭발효과를 완충시켜 주는 역할을 하는 발파공이다. 전열공의 저항선은 심발이 있는 경우와 없는 경우로 구분되어 적용된다. 심발이 있는 경우 전열공의 저항선은 수평으로 발파되는 확대공의 저항선과 같게 하며, 심발이 없는 경우에는 상향으로 발파되는 확대공의 저항선과 같게 한다. 자동화 설계에서 적용하고 있는 이 같은 방법은 심발이 없는 경우에는 2번째 또는 그 이상의 자유면이 이미 형성되어 있으므로 컴퓨터에 의한 자동 계산시 계산값을 발생시키지 못하는 문제를 없애기 위해서이다. 전열공의 공간격은 암반상태에 따라 다르게 적용되며, 식 (26)과 같이 계산된다.

$$S = \text{최외곽공의 공간격} \times \text{ratio}_3 \quad (26)$$

여기서 S는 전열공의 공간격(m)이며,  $ratio_3$ 는 암반상태에 따른 계수로써 암석계수(C)에 대해 식 (27)과 같이 경험적으로 계산된다.

$$ratio_3 = (-1.288) \times C + 2.144 \quad (27)$$

전열공의 폭약 수량은 확대공의 공당 장약량에 따라 달라진다. 확대공에서 주장약으로 사용하는 폭약을 반드시 공저장약으로 한 개 이상 사용한다. 전열공의 주장약 개수( $g_{np}$ )는 식 (28)과 같이 계산된다.

$$g_{np} = \frac{\text{확대공의 공당장약량} \times 0.8 - \text{공저장약량}}{g_{wup}} \quad (28)$$

여기서  $g_{wup}$ 는 전열공에 주장약으로 사용되는 폭약의 포장단위당 중량(kg)이다.

### 3. 결 론

국내에서 발파설계에 적용해온 수식은 외국의 암반조건과 발파환경에 맞게 만들어진 것으로써 암질과 현장조건이 상이한 국내에서는 잘 맞지 않았으며, 발파패턴의 자동설계에도 적절하지 않은 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 차례의 연구가 진행되었으며, 국내 작업환경과 발파설계 자동화에 적합한 발파설계 수식이 개발되었다. 개발된 자동설계 수식은 터널발파설계 자동화 프로그램인 TunDesign에 적용되었으며, 이 프로그램은 발파설계의 표준패턴을 작성하기 위한 도구로 사용되고 있다.

이 연구에서 검토된 발파설계 수식들은 기존의 발파설계에 적용되어온 Swedish method에 비해 복잡하기는 하지만, 암반상태에 따른 굴진장의 변화를 고려하여 장약량을 변화시킬 수 있고, 최외곽공과 전열공의 설계도 다양하게 작성할 수 있는 등 여러 가지 장점이 있다. 그러나 이 발파설계 수식들을 이용해서 만들어지는 발파패턴을 시공에 적용할 경우에는 현장조건을 면밀히 검토하여 설계의 타당성을 검증한 후에 적용해야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 김광염, 최영민, 이정인, 1999, 터널발파 패턴설계 자동화 프로그램의 개발에 관한 연구, 1999 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 51-54.
2. 김태형, 2002, 터널 발파패턴 설계의 자동화를 위한 설계변수의 정량적 표현에 관한 연구, 서울대학교 공학석사 학위 논문.
3. 정원준, 김선홍, 2004, 불연속면의 방향성이 암발파에 미치는 영향에 관한 고찰, 2004 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 73-81.
4. 최영민, 1998, 터널발파설계 자동화 프로그램 개발에 관한 연구, 서울대학교 공학석사 학위 논문.
5. 한국도로공사, 2000, 여굴최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, 한국도로공사 도로연구소.
6. Gustafsson, R., 1973, Swedish blasting technique, Nora, Sweden.
7. Langefors, U. and B. Kihlström, 1963, The modern technique of rock blasting, New York, Halstead Press.
8. Oloffson, 1988, Applied explosives technology for construction and mining, Nora Boktryckeri AB.
9. Persson, P.A, R. Holmberg and J. Lee, 1994, Rock blasting and explosive engineering, CRC Press.



### 최 용 근

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel : 02-3472-2261

E-mail : ykchoi@geogeny.biz

현재 : (주)지오제너럴컨설팅트 상무이사