

터널 발파패턴 설계의 자동화를 위한 설계변수의 정량적 표현에 관한 연구

김태형, 이정인
서울대학교 지구환경시스템공학부

1. 서 론

현재까지의 터널 발파패턴 설계는 유사한 공사현장에서 사용된 자료를 활용하는 경험적 방법에 의존하는 경우가 많아 기술자의 개인자료 및 경험에 의한 오차가 크다. 또한 설계패턴도 작성 및 사용화약류 견적이 주로 수동적인 방법에 의존하여 천공의 좌표가 부정확하고 시간이 많이 소요되는 등, 많은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점과 현실을 고려하여 국내 외에서 컴퓨터에 의한 자동설계 프로그램들이 일부 개발되어 왔으나 국내의 현장 조건들과 잘 맞지 않아 널리 쓰이지 못하고 있다. 따라서 국내의 현장의 조건에 알맞은 발파 설계의 자동화를 위해서는 국내 현장의 암반에 대한 경험적인 요소들과 기존의 이론을 모두 고려하여 발파패턴을 자동으로 설계할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.

발파 효율과 안정성 등을 최적화 하는데 적절한 공간격, 저항선과 장약량을 정량적으로 결정하는 이론은 Langefors, Kihlstrom(1967)의 연구로 시작되었다. 이들은 1 m³의 암석을 이완(loosening)시키는데 필요한 화약의 양으로 정의되는 암석계수(rock constant, c [kg/m³])를 여러 번에 걸친 벤치발파를 통해 구하고, 이렇게 구한 암석계수와 발파설계 변수와의 관계를 연구하여 저항선, 공간격 및 선형장약량을 구하는 관계식을 산출하였다. Olofsson(1998)은 장약공의 직경과 장약집중도, 저항선의 길이와 장약집중도 등의 관계를 그래프로 나타내어 장약량, 저항선, 공간격을 결정하였다. 발파패턴도 결정 이론에서 설계 변수를 정량적으로 표현하기 위한 이론으로 Lilly(1986)는 암반의 상태(rock mass description), 절리면의 간격, 절리면의 방향, 비중의 영향 및 경도를 고려하여 발파용이도지수(blastability index)를 제시하였다. Ashby(1977)는 광산발파연구를 통해 균열빈도와 유효마찰각으로부터 적절한 비장약량을 산출하는 관계식과 그래프를 제시하였다.

이러한 암반의 공학적 성질과 발파설계 요소와의 관계에 대한 연구는 사용 화약의 특성과 대상 암반의 조건에 따라 다른 결과가 나올 수 있기 때문에 외국의 연구결과를 국내 현장에 바로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 Langefors에 의해 제안된 설계법을 기초로 하여, 현장 상황을 고려한 발파패턴 설계변수의 산정 이론 연구 및 적절한 암반 조건의 반영방법과 적절한 공간격, 저항선, 그리고 장약량의 정량적 산정에 관하여 연구하였다. 이를 위해 암반의 상태는 현장에서 비교적 간단한 지질조사를 통해 추정해 낼 수 있도록 국내 터널 설계 및 시공시 분류법으로 사용되는 RMR값과 암석계수와의 상관관계를 이용하여 표시하였다. 또한 공간격과 저항선, 장약량은 국내 2차선 고속도로 터널현장에서 수집한 자료를 토대로 하여 적정 값을 가지도록 터널발파 자동화 설계 프로그램에 반영하였으며, 이

결과를 적용한 시험발파를 통해 수정된 결과에 의한 발파효과와 현장 적용성을 검증하였다.

2. 새로운 터널 발파 설계식

2.1 암석계수의 결정

(1) 암석계수(rock constant)

일반적으로 암석계수는 경험적인 방법에 의해서 벤치에 대한 시험발파에서 1m³의 암석을 파쇄할 때 필요한 화약의 양이라고 볼 수 있다. 스웨덴에서의 암발파 결과 암석계수는 일반적으로 0.4 kg/m³ 근처라는 것이 알려져 있으며, 일반적으로 공경 32mm의 수직공을 사용하는 벤치발파를 여러 번 실시하여 구할 수 있다. 취성이 매우 강한 결정질 화강암의 암석계수값은 0.2 kg/m³ 정도이다. 발파방향과 층(strata)이 수직인 경우 0.5 - 1.0 kg/m³ 정도이며, 일반적으로 균열(fissure)이 발달한 암질의 경우 사암에서 화강암까지는 0.4 kg/m³ 정도를 적용한다(Persson et al., 1994).

(2) RMR과 암석계수와의 상관관계

현실적으로 위에서 설명한 바와 같은 시험발파를 통해 암석계수를 공사 중인 현장에서 구한다는 것은 불가능하다. 따라서 현장조건에 맞는 암석계수를 손쉽게 구하기 위해 현재 우리나라에서 발파설계시 암분류의 기준으로 많이 사용되는 RMR과의 상관관계를 파악하여 합리적인 암석계수를 구하였다.

(가) 적용을 위한 가정조건

현재 터널 시공시의 천공장은 독립적으로 결정되지 않고 암반의 상태에 따라 결정된다. 따라서 본 연구에서 천공장은 Table 1.에 나타난 바와 같이 도로공사의 표준패턴도에 의한 제안을 기준으로 하여 암반상태에 따라 결정되는 것으로 하였다.

(나) 자료조사지역

자료조사는 중부내륙 고속도로 연풍터널, 이화터널 현장에서 실시되었다. 연풍터널은 충북 괴산군 연풍면에 위치하고 있으며, 변성작용을 받은 석회암 지대이다. 이화터널은 충북 괴산군 연풍면에 위치하고 있으며, 흑운모 화강암, 천매암 지대이다.

(다) 상관관계

굴진율이 85% 이상인 23개의 결과를 가지고 선형회귀분석을 실시한 결과 Fig. 1.과 같이 나타났으며, 암석계수와 RMR 값과의 관계는 식 (1)과 같았고, 상관계수는 0.804로 나타났다.

$$c = 5.73 \times 10^{-3} RMR + 0.057 \quad (1)$$

2.2 설계식의 수정

(가) 심발식의 수정

Langefors의 식에 의해서 심발이 설계될 경우 Fig. 2와 같이 전반적으로 심발의 크기가 과도하게 커지고, 암반의 상태가 적절히 반영이 안 되는 등의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 수정하기 위하여 현장 발파 시공자료를 토대로 하여 Table 2.와 같이 식들을 수정하였다.

원래의 Langefors의 식에 의하면, 첫 번째 사각형의 저항선의 길이는 오직 무장약공의 직경에 의해서만 결정되도록 되어있으나, 실제로는 암반의 상태에 따라 저항선의 길이를 조절하여 설계를 하고 있다. 따라서 암반의 상태를 반영하여 저항선의 길이가 결정되도록 식을 수정하였다. 또한 원래의 방법으로 설계를 할 경우, Fig. 2.(a)에서 보듯이, 네 번째 이후의 사각형이 바깥쪽의 사각형의 영역을 침범하여 화약에너지가 효율적으로 사용되지 못하는 단점이 있다. 그러므로 수정된 식에서는 네 번째 이후의 사각형부터는 기하학적으로 설계가 이루어지도록 하여 화약에너지가 효율적으로 사용되도록 하였다.

Table 1. Drilling length suggested by Korea Highway Corporation.

Rock Type	Drilling length [m]	Rock Type	Drilling length [m]
I	5.00	IV	1.65
II	4.40	V	1.30
III	2.20		

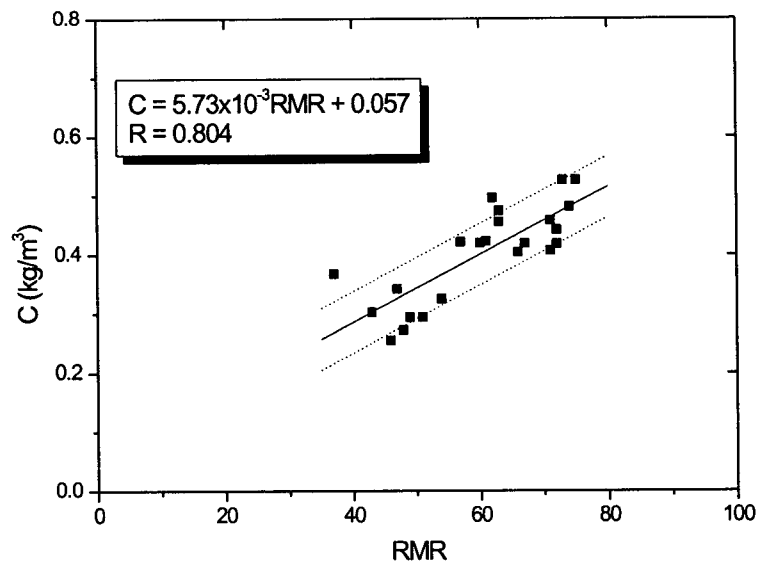
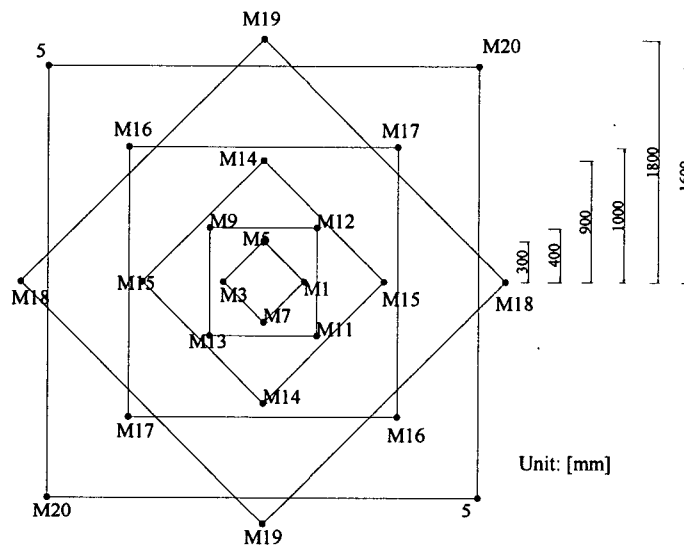


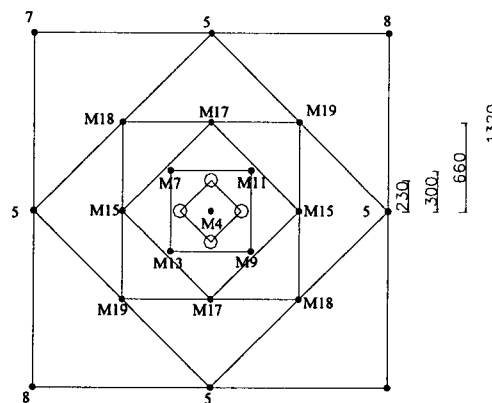
Fig. 1. Rock Constant(c) vs. RMR.

Table 2. Modified formulae for cut design.

Order of squares	Modified formulae
1 st square	$B_1 = 1.5\Phi \frac{0.35}{c}$
Lineal charge concentration	$l = 240 \frac{d \cdot \Phi \cdot c}{S_{ANFO}}$
2 nd and 3 rd square	$B_n = 1.02\sqrt{A'_{n-1} \cdot \Phi}$
4 th square and over	$A_n = 2 \cdot a_{n-1}$



(a) Cut designed by Langefors' formulae.



(b) Cut designed by modified formulae.

Fig. 2. Comparison of two cuts (H=4.5m, c=0.46kg/m³)

Table 3. Modified formulae for lifter and stoping hole design.

	Modified formulae
Burden of lifters	$B = 0.7 \left\{ \frac{l \cdot S_{ANFO}}{c + 0.07} \right\}^{1/2}$
Burden of stoping	$B = 0.8 \left\{ \frac{l \cdot S_{ANFO}}{c + 0.07} \right\}^{1/2}$

(나) 바닥공 및 주변공에 대한 수정

바닥공과 주변공 역시 Langefors에 의한 식이 실제로 현장에서 적용되어지고 있는 값들에 비해 큰 값을 산출해낸다. 비슷한 암반조건에서의 총 천공수를 비교해 보면, Lagefors의 식에 의한 공수가 실제 현장에서 사용되어지는 공수에 비해 70% 정도 밖에 되지 않는다. 따라서 김광엽(1999)에 의해 지적되었듯이 굴진율이 떨어지는 주요한 원인이 되어 Table 3.에서와 같이 식들을 수정하였다. 원래의 식에서 보면 저항선에 따라 암석계수를 수정하여 적용하도록 되어 있으나, 보통의 경우 저항선이 1 m 내외이므로 간단히 하였다. 그리고, 종래에는 공간격과 저항선의 비를 1.25로 고정하였다. 그러나, 같은 등급의 암반이라 하더라도 암중에 따라 다른 특성을 보이므로 그 비를 1~1.25의 범위를 가지도록 하여 적절한 공간격을 선택하도록 하였다.

장약량의 경우, 바닥공에서 주상장약은 기저장약으로 사용되는 화약의 70%인 선형장약량을 가지는 화약을, 주변공에서는 50%인 선형장약량을 가지는 화약을 사용하도록 되어있다. 그러나, 이와 같은 조건을 국내에서 생산되는 화약으로 충족시키는 것은 곤란하기 때문에, 현장에서 주로 사용되는 조합인 다이너마이트계 화약과 에멀전계 화약의 선형장약량비인 90%를 기준으로 하여 화약을 결정하도록 하였다.

(다) 최외곽공에 대한 수정

조절발파를 실시하는 경우 최외곽공의 공간격은 다음의 식 (2)에 의하여 결정된다. 여기서 상수 k는 보통 15~16 사이의 값을 갖게 되며, 최외곽공의 공간격은 주로 발파공의 직경에 의해서만 결정된다. 그러나, 현재 현장에서는 암반의 상태에 상관없이 동일한 직경으로 천공을 수행하므로 암반의 상태에 따른 적절한 공간격을 결정할 수 없다. 따라서 식 (3)과 같이 암석계수의 값에 따라 상수 k의 값을 결정하도록 하여 암반의 상태에 따라 공간격이 결정되도록 하였다.

$$S = kd \tag{2}$$

$$k = \begin{cases} 11.1 & (c \leq 0.28) \\ 13.5 & (0.28 < c \leq 0.4) \\ 14.4 & (0.4 < c) \end{cases} \tag{3}$$

원식에서 최외곽공에 장약되는 화약의 선형장약량은 발파공의 직경의 제곱에 비례하여

결정되도록 되어있다. 그러나 국내 현장에서 사용되는 화약은 보통 플라스틱관으로 포장된 정밀화약을 주로 사용하고 있기 때문에, 화약의 선형장약량은 일정하며, 전체적인 장약량 또한 발과공의 직경보다는 암반의 상태에 따라 결정된다. 따라서 암반의 상태에 따라 선형장약량이 다음의 식 (4)와 같이 결정되도록 식을 수정하였다.

$$l = 1.26 c^2 \quad (4)$$

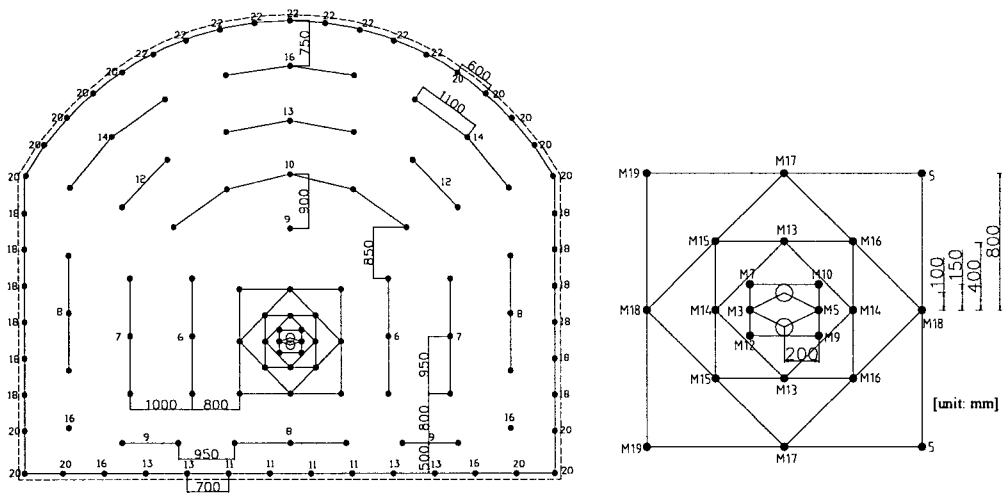


Fig. 4. Designed pattern of blast of pipe tunnel.

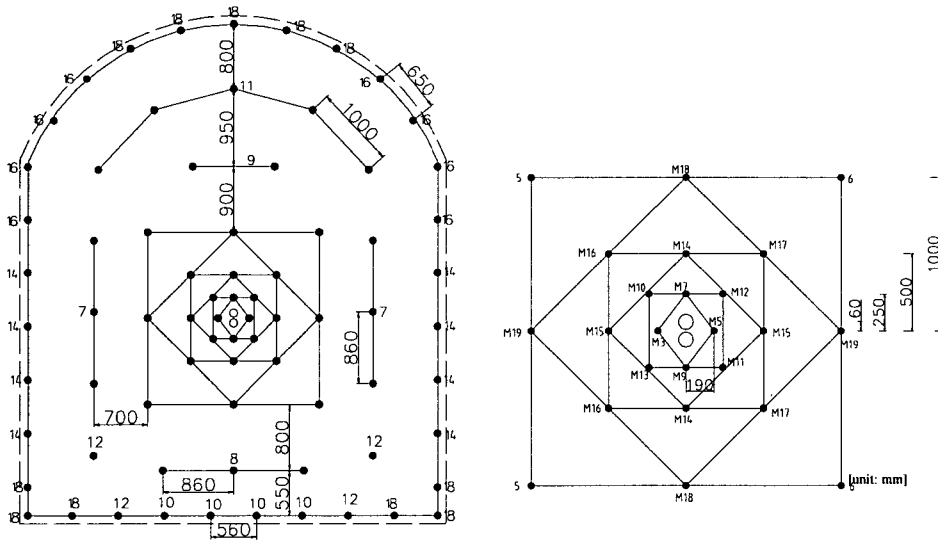


Fig. 5. Designed pattern of blast of water curtain tunnel.

3. 수정된 식의 현장적용성 검토

3.1 시험발파

(가) 시험 대상 터널 및 지질조건

시험발파는 석유비축기지터널 중, 파이프 터널에서 1회, 워터커튼 터널에서 2회 실시되었다. 시험 대상 지역은 응회암 지대로 암질상태는 비교적 양호한 상태이며 화산회, 석영편, 암편들이 다양하게 함유되어있다. 파이프 터널의 단면적은 60 m²이었고, 워터커튼터널의 단면적은 27.3 m²이었다.

(나) 적용패턴

Fig. 4.는 파이프 터널에 적용된 패턴이고, 설계 비장약량은 1.068 kg/m³이다. 워터커튼 터널에 적용된 패턴은 Fig. 5.와 같으며 설계 비장약량은 1.56 kg/m³이다. 두 터널에서 모두 무장약공이 2개인 번켓을 사용하였다.

3.2 시험발파 결과

시험대상터널의 암반분류 결과 파이프터널의 RMR 값이 45였으며, 워터커튼터널은 각각 66과 71이었다. 파이프 터널의 경우 막장 좌측부분에 절리가 많이 발달되어 있었으며, 절리 사이에 점토가 충전되어있어 천공 및 장약작업이 원활하게 이루어지지 못하여 설계량보다 화약이 적게 들어간 공들이 발생하였다. 이로 인하여 파이프터널의 굴진율은 82%로 저조하였다. 반면, 워터커튼터널은 전반적으로 암반의 상태가 양호하여 장약 및 천공작업에서 별다른 어려움이 없었으며, 굴진율은 모두 90% 이상을 기록하였다. 비장약량은 천공실수로 인해 13공이 더 천공된 워터커튼터널의 Sta.+23.3의 경우를 제외하고서는 설계된 비장약량과 3% 가량의 차이를 보였다. 추가적인 파쇄가 필요한 대파의 발생은 없었고, 최외곽공의 단면도 매끄러워 보강을 위한 지보재를 추가적으로 타설할 필요가 없었다. 세부적인 사항은 Table 4.와 같다.

Table 4. Blasting results of pipe tunnel and water curtain tunnel.

	Number of holes	Used amount of charge (kg)	Drilling Length (m)	Advance (m)	Rate of Advance (%)	Specific Charge (kg/m ³)
Sta.0+408.4	108+2	189.5	3.4	2.80	82.4	1.128
Sta.0+ 20.5	79+2	138.0	3.4	3.15	92.6	1.604
Sta.0+ 23.3	88+2	169.0	3.4	3.22	94.7	1.921

4. 결 론

본 연구에서는 터널 발파패턴 설계의 자동화를 위한 설계변수를 실제 최적 발파에 부합하도록 정량적으로 표현하기 위하여 Langefors에 의해 제안된 설계법의 기초이론을 국내 현장에서 성공적으로 수행되고 있는 터널 발파시공자료를 토대로 설계 기초식들을 수정하였으며, 이의 현장적용성을 검증하고자 시험발파를 실시하였다. 또한, 암반조건을 정량적으로 나타내기 위해 국내에서 암반분류법으로 많이 사용하는 RMR과 암석계수와의 상관관계를 분석하여 회귀식을 제시하였고, 이를 통해 얻은 암석계수값을 터널공사현장에 적용하였다. 이 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 2차선 고속도로 터널현장자료를 토대로 RMR과 암석계수의 상관관계를 분석하였으며, 상관계수는 0.804로 양호하였다. 이 관계를 통해 암반의 상태를 손쉽게 구하여 패턴 설계에 적용이 가능하도록 하였다.

2) 심발 설계시, 암반의 상태를 반영하여 저항선을 결정하도록 하였으며, 전체적으로 심발의 크기가 과도하게 커지는 것을 방지하였다. 네 번째 사각형 이후의 사각형부터는 심발의 사각형이 기하학적으로 설계되어 화약에너지가 보다 효율적으로 이용되도록 하였다.

3) 바닥공과 주변공의 설계는 적절한 공수를 유지하도록 하기 위해 저항선의 길이가 감소하도록 식을 수정하였다. 또한, 국내에서 생산되는 화약의 특성을 고려하여, 주상장약은 기저장약의 90%의 선형장약밀도를 가지는 화약을 사용하도록 하였다.

4) 장약공의 공경에 의해서만 결정되던 최외곽공의 공간격을 수정하여 암반의 상태를 반영하여 적절한 값을 가지도록 하였다. 이를 위해 최외곽공의 공간격 산출식에서 계수 k 를 암석계수값에 따라 정하여 암질을 반영하여 적절한 공간격을 가지도록 하였다.

5) 시험발파를 통하여 수정된 식의 현장적용성과 발파효과에 대한 검증을 실시하였다. 시험발파 결과 평균 90% 정도였으며, 여굴, 비장약량, 파쇄입도 등에서도 양호한 결과를 보였다. 따라서, 수정된 식으로 설계하여 발파를 실시한다면, 대략 90% 내외의 굴진율을 달성하고, 여굴과 파쇄입도도 양호한 결과를 보일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강대우, 심동수 편저, 1998, 건설기술자를 위한 응용발파기술, 구미서관, pp.143-150
2. 김광염, 1999 암반의 분류를 고려한 터널 발파 패턴설계의 자동화에 관한 연구, 공학석사 학위논문, 서울대학교
3. 이정인 역, 1995, 암반사면공학, 도서출판 엔지니어즈, pp.342-344
4. A. Scott, 1996 'Blastability' and Blast Design, 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation

- by Blasting, Montreal, pp.27-36
5. Lopez Jimeno, Ayals Carcedo, 1995, Drilling and Blasting of Rocks, Balkema
 6. Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jamin Lee, 1994, Rock blasting and explosive engineering, CRC Press
 7. U. Langefors, B. Kihlstrom, 1967, The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & Sons INC.