

## 절리특성을 고려한 터널 발파 설계

임 경호<sup>1)</sup>, 김 치환<sup>2)</sup>, 남 기천<sup>1)</sup>, 박 성록<sup>1)</sup>, 이 성규<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>청석 ENG, <sup>2)</sup>우석대학교

### 초 록

터널 발파시 발파효율은 암반의 특성에 큰 영향을 받기 때문에 암반 특성을 분석하고 이를 기초로 발파설계를 수행하는 것이 중요하다. 그럼에도 불구하고 현재까지 국내에서의 발파설계는 무결암의 단축압축강도만으로 발파암을 분류한 후 각 발파암의 발파계수를 구하는 방법을 이용하거나 공학적 암반분류법의 하나인 RMR분류를 이용하여 발파암을 분류하되 객관적 근거가 미약한 경험적인 발파계수를 산정하는 방식을 통하여 이루어졌다. 본 연구에서는 절리특성을 고려한 발파설계를 위하여 Ashby의 접근법을 활용하였다. 또한 절리조사 결과를 통한 발파암 분류방법과 발파패턴설계를 추가하여 발파설계 전 과정을 수행할 수 있도록 Ashby의 접근법을 응용하였다. 따라서 절리 분포 특성을 고려한 발파암 분류가 가능하고, 절리암반 특성을 고려한 발파설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

### 1. 서 론

암반발파에 영향을 주는 요소는 크게 암반 특성, 폭약, 발파패턴, 기폭순서이다. 이중 암반 특성은 발파 효율에 지대한 영향을 미친다. 발파 효율에 영향을 주는 암반 특성은 크게 강도 특성, 물리적 특성, 암반의 에너지 흡수력, 절리면의 특성 등으로 구분할 수 있다<sup>2)</sup>. 강도 특성으로는 무결암의 압축강도, 인장강도, 전단강도 등이 해당되며, 물리적 특성에는 무결암의 탄성계수, 포아송비가 포함된다. 에너지 흡수력은 발파에 의해 발생하는 에너지를 전파하거나 흡수하는 정도를 나타내며, 발파를 위해 필요한 에너지에 영향을 준다. 절리면의 특성은 발파시 파쇄도에 영향을 주는 요소로 암반 블록의 크기, 절리면의 전단강도 등이다. 암반 특성이 발파 효율과 밀접한 관계가 있다는 것은 자명하나 둘간의 관계가 복잡하여 암반 특성과 발파 효율간의 상관관계를 분석하고 이를 발파설계에 적용하기 위한 체계적인 접근이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 그러나 암반분류시스템을 이용하여 경험적 방법에 의한 터널 굴착 및 지보설계를 수행하는 방법과 유사하게 발파암분류방법(blastability scheme)을 통하여 암반 특성과 발파 효율간의 관계를 분석하고 이를 암반 발파설계에 적용하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 이와 같은 연구사례를 살펴보면 Hino는 암반의 압축강도와 인장강도의 비를 이용하여 발파계수를 구하는 방법을 제안하였고<sup>2)</sup>, Heine와 Dimock은 암반의 탄성파속도와 평균 폭약상수(powder factor)간의 상관관계를 보고하였다<sup>2)</sup>. Rakishev는 암반의 강도 특성 이외에 절리면을 추가로 고려하여 암반의 blastability를 평가하는 방법을 제안하였다<sup>2)</sup>. Ashby는 절리빈도와 절리면의 전단강도와 폭약상수로 표현되는 발파상수의 상관관계를 제시하였다<sup>3)</sup>.

한편 국내에서 주로 사용되는 발파암 분류법은 무결암의 단축압축강도를 이용한 방법이 있다. 이것은 무결암의 단축압축강도만으로 발파암을 분류한 후 각 발파암의 발파계수를 구하는 방법으로 암반의 특성 중 극히 일부만을 고려할 수 있다는 한계가 있다. 또 다른 방법으로는 터널 굴착 및 지보설

계시 활용하는 공학적 분류방법인 RMR 분류 기준에 따라 발파암 등급 분류를 한 후 등급 구분과 무관하게 발파계수를 산정하는 문제점이 있다.

따라서 기존 발파설계법의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 Ashby가 연구 제시한 발파상수를 이용한 발파설계법을 검토하였으며 이를 터널 발파설계에 적용하였다. Ashby는 이들 절리특성을 통하여 발파상수를 산정하는 방법을 제안하였다. 하지만 발파설계에 필요한 발파암 분류방법 및 발파패턴 설계 절차에 대해서는 명시적으로 제시하지 않았기 때문에 발파설계에 직접 적용하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 발파암 분류 방법과 발파패턴 설계 절차를 추가하여 Ashby의 연구결과를 적용하였다. Ashby의 연구를 기초로 발파설계를 하기 위하여 절리의 간격과 전단강도를 기준으로 나누어진 균질절리영역(fracture domain)<sup>1)</sup>을 발파암을 분류하는 기준으로 원용하였다. 절리의 간격을 결정하기 위하여 터널과 절리가 교차하는 교차각에 따른 절리의 빈도를 산출하였다. 시추에 의해 얻는 암석 코아와 암반 절리에서 측정된 절리면 거칠기 상수(joint roughness coefficient, JRC)와 절리벽면 압축강도계수(joint wall compressive strength coefficient, JCS)로부터 Barton-Bandis 절리모델을 이용하여 절리면 강도를 구하였다<sup>5)</sup>.

## 2. 지형 및 지질개요

본 연구에서 적용하였던 터널은 국도 17호선의 여수시 통과 구간중 호랑산을 통과하는 2차로 병설터널인 수천터널이며, 터널의 연장은 순천방향 1,760m, 돌산방향 1,780m이다. 지질은 중생대 백악기 유천층군에 속하는 화산암류와 이를 관입한 화강암류로 대별된다. 기반암은 성인 및 생성시기가 각기 다르나 관입암인 화강암류가 주류를 이룬다. 산 정상부는 유천층군에 해당되는 화산쇄설성 퇴적암인 응회암이 돔 형태도 분포하고 있으나 터널 주변 암반은 화강암류만으로 이루어져 있다. 화강암류는 홍색을 띠는 중립~세립질암으로서 우백질이며 부분에 따라 장석 반정을 갖는 반상석리를 보이기도 한다. 터널주변암반은 암석의 강도가 크고 수직절리가 잘 발달한 암반이다.

## 3. 적용 발파설계법 개요

Ashby가 제안한 방법은 절리특성을 고려한 발파상수 산정방법이라고 요약할 수 있다. 이때 고려되는 절리특성은 절리빈도와 절리면의 마찰각이다. 절리빈도는 암반블록의 크기를 결정짓는 요소이며, 절리면의 마찰각은 절리면의 전단강도를 결정짓는 요소로 절리 암반의 특성을 평가할 수 있는 지수이다. Table 1에 Ashby가 연구보고한 내용과 이번 연구에 적용한 발파설계법의 차이점을 나타내었다. Ashby의 연구 결과가 절리특성을 이용한 발파상수 산정에 국한되어 있는 반면 이번에 적용한 설계법은 절리조사 및 조사 결과 분석에 의한 발파암 분류, 발파상수 산정, 발파패턴 설계에 이르는 발파설계의 전과정으로 확장하였다.

발파설계는 크게 발파암분류, 발파암별 발파상수 산정, 발파패턴설계의 세 단계로 이루어진다. 절리조사 결과를 이용하여 절리특성이 유사한 균질절리영역을 구분하였으며, 각 균질절리영역을 하나의 발파암으로 분류하였다. 균질절리영역에 의한 발파암 분류 후 Ashby의 방법을 이용하여 각 발파암에 대한 발파상수를 산정한 후 천공장, 천공 배열 등을 고려하여 장약량을 계산하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 발파설계 흐름을 보여준다.

Table 1. Comparisons between Ashby's original approach and extended approach.

Item		Ashby's Approach	Extended Approach
Blastability Scheme	Joint Survey	X	Scanline Survey, BIPS(BHTV), Core Joint Survey
	Classification	X	Classified with Fracture Domain
Joint Index	Frequency	X	Statistical Evaluation
	Friction Angle	Patton Joint Model	Barton-Bandis Joint Model
Powder Factor		$P_{f_{ANFO}} = \frac{1.4 \tan(\phi + i)}{\sqrt[3]{\text{fractures/m}}}$	$P_{f_{ANFO}} = \frac{1.4 \tan\left(\phi_b + JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right)}{\sqrt[3]{\text{fractures/m}}}$
Pattern Design		X	O

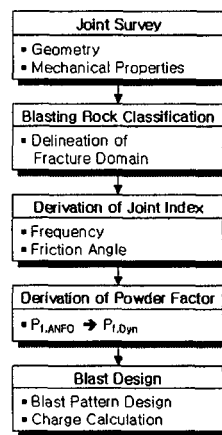


Fig. 1. Flow chart for blast design.

본 연구에서 사용한 발파설계법은 발파암 분류 방법과 발파상수 산정 방법에서 있어서 기존 발파 설계법보다 개선된 발파설계법이라 할 수 있다. 즉 발파암 분류시 절리특성을 고려함으로써 기존에 사용하던 무절암의 단축압축강도만으로 발파암을 분류하던 방식에 비해 절리 암반의 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존의 방법이 경험치를 사용하여 발파상수를 산정한 반면 본 발파설계에서는 조사를 통해 얻은 절리빈도와 절리면 마찰각을 통하여 각 발파암의 발파상수를 산정함으로써 발파상수 산정의 객관성을 확보할 수 있게 되었다.

## 4. 발파암 분류

### 4.1 개요

터널 발파설계는 유사한 암반 특성을 보이는 등급으로 암반을 분류하고 각 암반 등급에 적합한 설계를 수행한다는 측면에서 RMR이나 Q-System 등과 같은 암반분류를 활용하여 경험적 설계를 수행하는 터널 굴착 및 지보설계와 절차상으로 유사하다고 할 수 있다. 그러나 발파암 분류시 평가되는

암반 특성과 터널 굴착 및 지보설계를 위한 암반분류시 평가되는 암반 특성은 서로 다르기 때문에 터널 발파설계시 활용하는 암반분류는 터널 굴착 및 지보설계에 활용되는 암반분류와는 다른 방법으로 이루어져야 한다. Ashby의 방법을 적용하는데 필요한 절리특성을 암반 분류의 평가항목으로 선정하였다. 절리 특성은 위치에 따라 변화하지만 일정한 범위 내에서는 유사한 경향을 보이는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 이 때 유사한 절리특성을 보이는 영역을 균질절리영역이라 하고 이 개념을 활용하여 발파암을 분류하였다. 즉 각각의 균질절리영역을 개별 발파암으로 분류하였다.

#### 4.2 발파암 분류를 위한 절리 조사

발파암 분류시 암반 특성 평가 항목은 역학적 특성에 해당되는 절리면의 마찰각과 분포 특성에 해당되는 절리빈도이다. 절리면의 마찰각은 절리면 거칠기계수, 절리벽면 압축강도에 영향을 받기 때문에<sup>5)</sup> JRC와 JCS를 이용하여 마찰각을 평가하였다. 이들 특성을 조사하기 위하여 노두 및 시추공에서 절리 조사를 수행하였다. 노두에서는 조사선법을, 시추공에서는 시추공영상촬영(BIPS)을 이용하여 절리 분포 특성을 조사하였으며, 시추 코어에 존재하는 자연 절리면에 대한 JRC, JCS 측정 시험을 수행하였다. 각 조사법의 조사 항목은 Table 2와 같다.

Table 2. Measuring items of each surveying method.

Item	Scanline survey	BIPS	Core joint survey
Orientation	○	○	X
Spacing	○	○	○
Size	○	X	X
JRC	○	X	○
JCS	○	X	○

#### 4.3 발파암 분류 결과

발파암은 균질절리영역을 분류하는 방법을 사용하여 구분하였다. 터널이 통과할 암반은 총 3개의 발파암으로 구분할 수 있었으며, 구분결과는 Fig. 2와 같다. 각 발파암의 절리분포특성 및 절리 역학적 특성은 각각 Table 3과 같다. 절리 역학적 특성은 시추 코어에 존재하는 자연 절리면에 대한 시험을 통하여 결정하였으며, 방향성 시추가 이루어지지 않았기 때문에 각 절리면이 어느 절리군에 속한 것인지 판별할 수 없다. 따라서 JRC, JCS는 절리군 구분없이 각 발파암에 대해 하나의 값으로 결정하였다.

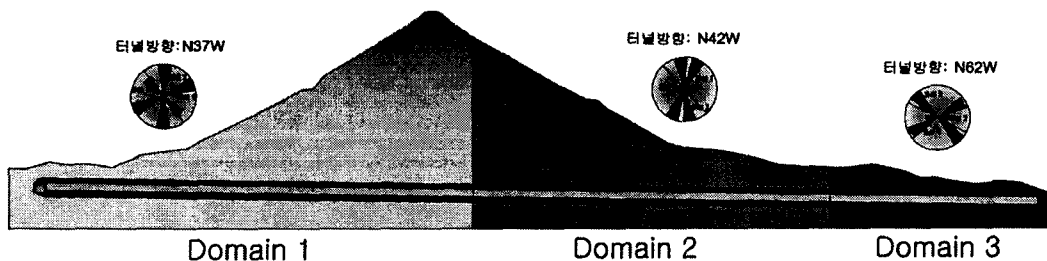


Fig. 3. Boundary of each fracture domain.

Table 3. Joint properties in each fracture domain.

Fracture domain	Length (m)	Joint set 1			Joint set 2			Joint set 3			JRC	JCS (MPa)
		Orient	Trace length (m)	Spacing (m)	Orient	Trace length (m)	Spacing (m)	Orient	Trace length (m)	Spacing (m)		
1	810	335/88	1.52	0.40	092/87	0.82	0.50	226/66	1.40	1.00	7.9	50
2	600	295/90	1.30	0.29	262/86	1.10	0.90	282/30	2.40	0.23	8.1	109
3	400	338/84	1.76	0.55	217/86	1.60	1.60	001/31	1.60	0.62	10	82.8

## 5. 발파설계

### 5.1 발파 상수 결정

#### 5.1.1 절리 상수

폭약 상수 산정을 위해서는 각 발파암의 절리빈도와 절리면 마찰각을 결정해야 한다.

##### 1) 절리빈도

절리빈도는 선밀도로서 단위 길이에 존재하는 모든 절리수를 의미한다. 절리빈도는 터널 진행 방향과 각 절리군 대표 방향이 이루는 각도에 따라 달라지기 때문에 이 두 방향의 사이각을 이용하여 터널방향의 절리빈도를 계산하였다. 터널 방향의 절리빈도는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^D \lambda_i \cos \delta_i \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_s$  : 터널 방향의 절리빈도,  $\lambda_i$  : 각 절리군의 절리빈도,

$D$  : 절리군수,  $\cos \delta_i$  : 터널 방향과 절리군 극점방향의 사이각이며, 사이각은 식(2)를 이용하여 계산한다.

$$\cos \delta_i = |\cos(\alpha_{ni} - \alpha_{si}) \cos \beta_{ni} \cos \beta_{si} + \sin \beta_{ni} \sin \beta_{si}| \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_{ni}$ ,  $\beta_{ni}$ ,  $\alpha_{si}$ ,  $\beta_{si}$  : 절리군 극점방향의 경사방향, 경사각, 터널방향의 경사방향, 경사각이다. 각 발파암별 터널 방향의 절리빈도는 소수점 첫째자리에서 올림하였으며 최종 산정결과는 Table 4와 같다.

##### 2) 절리면 마찰각

Ashby는 거칠각  $i$ 를 고려한 Patton 절리모델(4)을 사용하여 절리의 마찰각을 기본마찰각과 거칠각의 합 ( $\phi + i$ )으로 산정하였다. 하지만 거칠각  $i$ 는 측정이 쉽지 않다는 단점이 있다. 한편 Barton과 Bandis은 암석절리에 대한 일련의 시험을 통하여 기본 마찰각, JRC, JCS로 절리면의 마찰각을 산정하는 절리모델을 제안하였으며, 이 절리모델은 현재까지 제안된 절리모델중 암석절리의 전단강도 및 전단변형거동을 가장 현실적으로 모사할 수 있는 모델로 평가되고 있다. 또한 마찰각 산정에 이용되는 JRC와 JCS는 간단한 현장 시험을 통하여 간편하고 신속하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서

본 연구에서는 Barton과 Bandis가 제안한 절리모형을 이용하여 절리면 마찰각을 산정하였다. 각 발파 암별 절리면 마찰각 산정 결과는 Table 5와 같다. 기본 마찰각은 습윤상태의 세립질 화강암에 대한 기본 마찰각으로 Barton과 Choubey가 제안한 값(6)을 사용하였다.

Table 4 Joint frequency for each fracture domain.

Fracture domain	Joint set	Orient.	Orient. of pole	Frequency	Tunnel trend	Directional variation of joint frequency	Frequency along tunnel direction (No. of joints/m)
1	Set 1	335/88	155/02	2.50	143 (N37W)		4(3.81)
	Set 2	092/87	272/02	2.00			
	Set 3	226/66	046/24	0.60			
2	Set 1	295/90	115/00	2.94	138 (N42W)		4(3.96)
	Set 2	262/86	082/04	2.00			
	Set 3	282/30	102/60	0.33			
3	Set 1	338/84	158/06	2.70	118 (N62W)		3(2.37)
	Set 2	217/86	037/04	1.11			
	Set 3	001/32	181/58	0.59			

Table 5 Joint friction angle for each fracture domain.

Fracture domain	Basic friction angle(°)	JRC	JCS(MPa)	Friction angle(°)
1	29	7.9	50.0	41.5
2	29	8.1	109.0	44.6
3	29	10.0	82.8	47.0

### 5.1.2 폭약 상수

폭약상수  $P_{f, ANFO}$ 는 Ashby가 제안한 다음 식(3)의 마찰각항을 수정한 식(4)를 사용하여 산정하였다.

$$P_{f_{ANFO}} = \frac{1.4 \tan(\phi + i)}{\sqrt[3]{\text{fractures/m}}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

$$P_{f_{ANFO}} = \frac{1.4 \tan\left(\phi_b + \text{JRC} \log_{10}\left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n}\right)\right)}{\sqrt[3]{\text{fractures/m}}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4)$$

여기서,  $\left(\phi_b + \text{JRC} \log_{10}\left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n}\right)\right)$ 는 절리면 마찰각으로 Barton과 Bandis가 제안한 방법을 사용하였으며, (fractures/m)는 절리빈도이다.

각 발파압에 대한 절리마찰각, 터널 방향의 절리빈도, 폭약 상수를 Table 6에 수록하였다.

Table 6. Joint friction angle, joint frequency in tunnel direction, powder factor.

Fracture domain	Joint friction angle (°)	Joint frequency (No. of joints/m)	Powder factor (kg/m <sup>3</sup> )
1	41.5	4	0.78
2	44.6	4	0.87
3	47.0	3	1.04

### 5.1.3 사용 폭약 종류에 따른 폭약 상수 보정

발파설계시 다이너마이트를 사용 폭약으로 선정하였기 때문에 Ashby의 제안 방식에서 적용하였던 ANFO 기준의 폭약상수( $P_{f, ANFO}$ )를 다이너마이트 기준의 폭약상수( $P_{f, Dyn}$ )로 보정하여 발파 설계의 주된 설계 요소인 공당 장약량 산정시 활용하여야 한다. 이를 위해 서로 다른 폭약간의 상대위력 보정을 위해 식(5)를 이용하였다. 각 폭약간의 상대위력은 Table 7에 수록하였으며, Table 8에 ANFO의 폭약상수와 다이너마이트의 폭약상수를 수록하였다.

$$S = \frac{5}{6} \frac{Q}{Q_o} + \frac{1}{6} \frac{V}{V_o} \quad (5)$$

여기서  $Q_o$  : 기준 폭약 1kg의 폭발열

$Q$  : 비교 대상 폭약 1kg의 폭발열

$V_o$  : 표준상태 하에서의 기준폭약 1kg의 가스 방출량

$V$  : 표준상태 하에서의 비교 대상 폭약 1kg의 가스 방출량

Table 7. Relative weight strength of explosives.

Explosives	Q (MJ/kg)	V (m <sup>3</sup> /kg)	S_dyn	S_anfo	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Megamite- II	5.153	0.890	1.06	1.08	1,400~1,600
Megamite- I	4.827	0.880	1.00	1.02	1,300~1,500
ANFO	4.609	0.970	0.98	1.00	900
Newmite+ II	4.609	0.736	0.94	0.96	1,200~1,300
Newmite+ I	3.687	0.826	0.79	0.81	1,100~1,200
Finex- I	2.723	0.640	0.59	0.60	1,000

Table 8. Powder factor for ANFO and dynamite.

Fracture domain	Powder factor for ANFO ( $P_{f,ANFO}$ (kg/m <sup>3</sup> ))	Powder factor for dynamite ( $P_{f,DYBA}$ (kg/m <sup>3</sup> ))
1	0.78	0.72
2	0.87	0.81
3	1.04	0.96

### 5.2 발파패턴 설계

각 발파암별 폭약상수를 산정한 후 천공장, 천공 배열 등을 고려하여 세부 발파설계를 수행하였다. RMR과 Q를 기준으로 분류한 6개의 표준보강패턴에 대응한 발파설계를 역시 6개의 패턴으로 나누었다. 발파설계에서 심발공법은 1회 굴진장이 2m 이상인 패턴 I~III은 Cylinder cut 방식을 적용하였고, 1회 굴진장이 1.5m 이내인 패턴 IV~VI은 V-cut 방식을 적용하였다. 공당 장약량 산정을 위해서는 5.1.3에서 구한 폭약상수를 이용하여 공저장약밀도를 산정한 후 Table 9에 제시된 절차에 따라 계산하였다. Table 10에 발파암중 발파암 1, 즉 균질절리영역 1, 을 기준으로 한 패턴 I~VI의 발파 설계 결과를 수록하였다.

Table 9. Calculation of charge weight per hole

	Calculation Procedure
Cut Holes	Cylinder cut : $Q(\text{kg}) = L_c \times (H-h_0)$ $L_c(\text{kg/m}) = 55 \times d \times \left(\frac{V}{\phi}\right)^{1.5} \times \left(V - \frac{\phi}{2}\right) \times \left(\frac{C}{0.4}\right)$ V-cut : similiar procedure for stoping holes calculation
Stoping Holes & Floor holes	$Q = Q_b + Q_c = \frac{1}{3} \times H \times L_b$ $Q_b = \frac{1}{3} \times H \times \frac{\bar{C} \times f \times (V \times E)}{(0.9)^2 \cdot S_{ANFO}}$ $Q_c = h_c \times L_c$
Contour Holes	$Q = Q_c \times (H - h_0)$

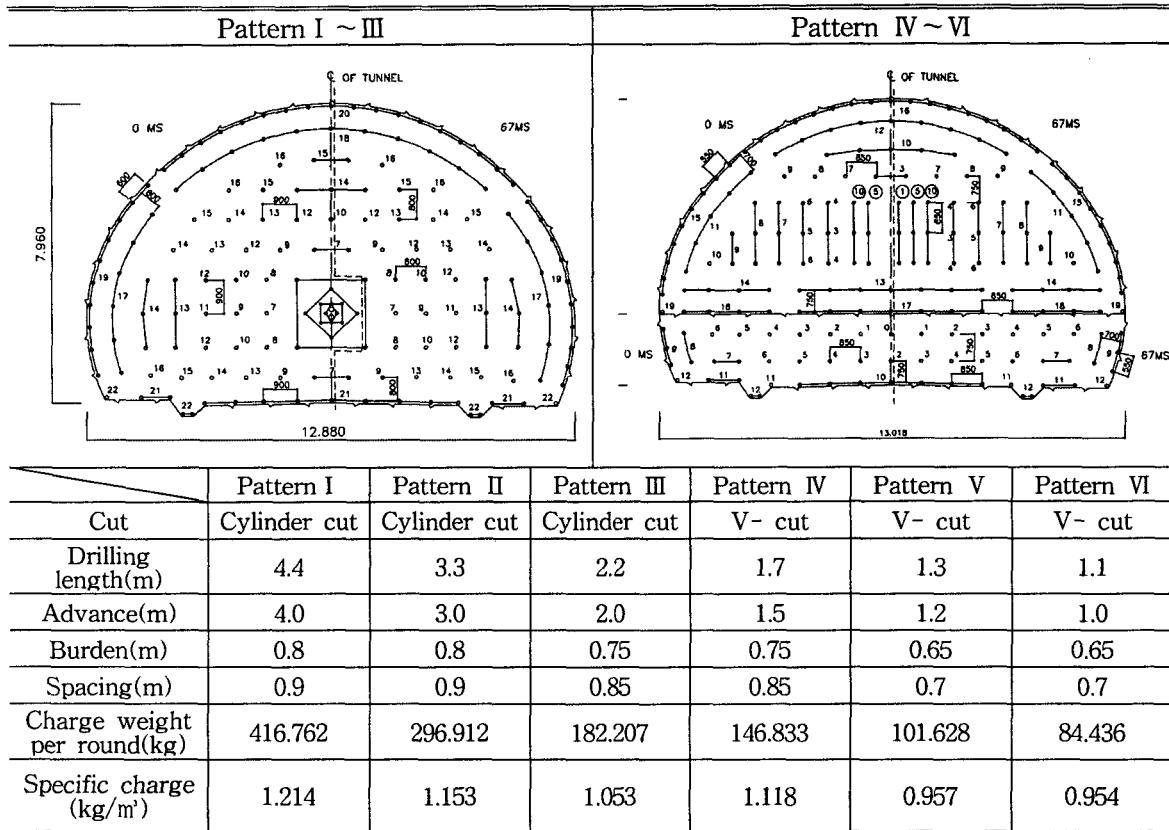
Q: charge per hole(kg), H: hole depth(m),  $Q_b$ : bottom charge(kg),  $Q_c$ : column charge(kg),  $L_b$ : bottom charge concentration(kg/m),  $L_c$ : column charge concentration(kg/m),  $h_0$ : stemming(m), d: drill hole diameter(m),  $\phi$ : empty hole diameter(m), V: burden(m), C: rock constant, f: fixation factor

## 6. 결론 및 제언

본 연구의 대상지역은 절리가 잘 발달한 암반으로 절리가 터널발파에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 절리 영향을 고려할 수 있는 발파설계의 필요성이 대두되었다. 이를 위해 본 연구에서는 Ashby가 제안한 절리 특성을 고려한 발파상수 산정 방법을 터널 발파설계에 적용하기 위해 절리암반의 특성을 평가할 수 있는 지수인 절리빈도와 절리면의 전단강도를 활용하는 방법에 대해 다루었다. 또한 제시한 방법에 의해 결정된 발파상수를 이용하여 터널발파 설계를 수행한 사례를 소개하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.



Table 10. Examples of designed blast pattern.



1) 현재까지 국내에서 발파설계에 적용되는 발파암반분류 방법은 암석의 단축압축강도만을 고려하는 방법으로 암반내 절리의 특성을 발파설계에 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 Ashby의 방법을 활용함으로써 절리암반 특성을 고려한 발파설계를 수행할 수 있었다. 또한 절리조사 결과를 활용한 발파암분류방법과 발파패턴 설계절차를 추가하여 터널발파설계 전과정을 수행할 수 있도록 Ashby의 방법을 확장하였다.

2) 절리분포 특성이 다를 경우 발파상수도 달라지게 되므로 지표 노두조사와 시추공내 절리 조사자료의 분석을 토대로 터널구간을 총 3개의 균질절리영역으로 구분하여 각 영역별 절리 분포 특성을 결정하였으며, 이를 토대로 발파상수를 결정하여 장약량 산정시 활용하였다. 균질절리영역 1, 2, 3에서 다이내마이트 기준의 발파상수는 각각 0.72, 0.81, 0.96kg/m<sup>3</sup>이었다.

3) Ashby가 제안한 절리 특성을 고려한 발파상수 산정 방법을 터널 발파설계에 적용해본 결과 비장약량(specific charge)은 발파암 1, 즉 균질절리영역 1, 을 기준으로 0.954~1.214kg/m<sup>3</sup>을 나타내었고, 기존의 2차로 터널 발파설계 결과와 비교해 볼 때 패턴 I~III은 큰 차이를 보이지 않았으나 패턴 IV~VI은 다소 높은 양상을 나타내었다.

4) 암반내 절리의 역학적 특성이외에 절리 분포의 기하학적 특성이 발파에 미치는 영향이 매우 크므로 이에 대한 영향을 고려하여야 하나 아직까지 이에 대한 정량적 반영이 미흡한 실정이다. 따라서 향후 절리 분포의 기하학적 특성과 발파상수 간의 상관관계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 김치환, 2000, 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어 설계정수 결정, 암반공학문제의 수치해석(한국암반공학회 2000년 추계심포지엄), pp. 23-35
2. Scott, A., 1996, 'Blastability' and blast design, Rock Fragmentation by Blasting(Mohanty eds.), pp. 27-36
3. Hoek, E., Bray, J., 1981, Rock slope Engineering, The Institute of Mining and Metallurgy, London, pp. 282-284
4. Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon 1, pp. 509-513
5. Barton, N., Bandis, S. C., 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCSmodel in engineering practice, Proc. Int. Symp. Rock Joints(Barton and Stephansson eds.), Loen, Norway, pp. 603-610
6. Barton, N., Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech., Vol. 10, pp. 1-54.