

Pre-splitting 발파공법에 관한 기초적인 연구 A Fundamental Study of Pre-splitting Technology

윤지선¹⁾, Ji Soon Yoon, 윤병식²⁾, Byoung Sic Yoon,

¹⁾ 인하대학교 자원공학과 교수, Professor, Dept. of Mineral & Energy Resources Eng., Inha Univ.

²⁾ 인하대학교 자원공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Mineral & Energy Resources Eng., Inha Univ.

SYNOPSIS : Blasting technique of Korea has been developed and controlled blasting (; Pre-splitting, smooth blasting which are used in many ways) is available for lowering damages in surrounding rock mass. In pre-splitting, the contour charges are fired before the rest of charges, most often in a separate round so it has an effect for safety in surrounding rock mass. Particularly in excavating of rock slope, this method is adapted to last surface. However because of the application between empirical formula and field work, it is applied to in-situ rock as an accessing of experience.

In this study, it is shown that the criteria of design in pre-splitting compared the foreign empirical formula with the experimental data in Granite and Limestone region using the explosives made in Korea.

Key words : , Controlled Blasting , Pre-splitting , In excavating of rock slope , The criteria of design in pre-splitting.

1. 서 론

제어발파라 함은 터널주벽이나 갱내설비의 공간 벽면, 수로, 노천채굴의 경사면, 지하비축기지 등 벽면의 유지를 필요로 하는 경우에 여러 곳에서 행하여진다. 이것의 주목적은 암반벽면에 영향을 미치지 않게 하며 되도록 매끈한 벽면을 만드는 것이며 그 종류에는 line drilling, cushion blasting, pre-splitting, smooth blasting이 있다. 주로 노천에서 사용되는 것은 pre-splitting이고 터널 외곽공에 사용하는 것은 smooth blasting이다. 이 중 pre-splitting 발파공법은 본 발파 전에 미리 선 균열을 만든다는 특징을 가지고 있다.

그러나, 이것을 이용하기 위한 실험식은 있지만 외국의 자료를 우리 나라 현실에 맞게 보완하지 않고 그대로 적용하고 있어 문제점으로 남아 있다. 이러한 문제는 현장에서 많은 시행착오를 거치면서 경험적인 접근을 통하여 실시되고 있으며 시간적, 경제적 손실이 발생할 수 있는 중요한 요

인으로 된다. 또한, 암반굴착시 이러한 문제는 안정성에 있어서 터널붕괴, 지반침하, 사면붕괴 그리고 안전성에 있어서는 발파공해(진동, 소음, 비산, 분진)의 주요 원인중 하나가 되고 있다. 이러한 제반문제를 해결하기 위해 국내 기술축적을 위한 연구가 많이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리 나라에서 생산하고 있는 화약류인 Himite 25mm, Finex 17mm, Slurry 28mm, Hicord - 10g/m를 사용하여 석회암 및 화강암지역에서 천공경, 장약량, 천공길이, 발파계수, decoupling계수, 사용폭약, 기폭방법을 동일하게 유지하고 천공간격 만을 변화시켜 4곳에서 실험을 실시하였다. 현장시험을 통하여 얻은 자료와 실험식을 상호 비교하여 검증하였고, pre-splitting공법 설계 및 시공시 기초적인 자료로 이용될 수 있도록 하였다.

2. Pre-splitting 이론

갱내에서는 지압의 영향을 고려해야 하는 어려움으로 주로 갱외에서 사용되며 계획한 예정 굴착면을 따라 본 발파에 앞서 선행 발파하여 인위적으로 균열을 만들어 잔존암반으로부터 발파지역을 고립시켜 주변암반을 보호하고 매끈한 파단면을 형성하기 위해 사용하는 공법이다.

2.1 균열발생 메커니즘

2.1.1. 응력파의 간섭과 발생가스압에 의한 균열발생 메커니즘

응력파의 간섭효과는 충격파의 동적인 작용을 강조하고 응력파 중첩을 고려하여, 균열이 두 발파공 중간에서 시작된다는 것이고 발생가스압에 의한 효과는 폭발후 생성되는 기체의 준정적인 고압 작용을 강조하는 것이다. 그러나 두 이론은 모두 일정한 국한성이 존재한다. 응력파 간섭이론은 일렬 발파공의 동시 기폭을 요구하나 이는 실제 매우 어려운 것이며 특히, 뇌관자체도 어느 정도 기폭시차의 오차가 있기 때문이다. 또한, 준정적인 가스압 작용이론은 응력파의 영향을 무시한다.

따라서 균열의 형성과정은 천공간격이 적정할 때 발파공벽상의 응력이 집중하는 곳에서 먼저 인장 균열이 발생하고 후에 가스압의 작용 하에 균열은 연장선을 따라 확대되어 최후에 일정한 폭을 갖춘 파단면을 형성한다는 두 요소의 복합적인 관점에서 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. 응력파는 초기 균열의 유도작용을 일으키고, 폭발기체가 형성하는 고압의 준정적인 작용이 파단면을 형성하는 동력이 된다는 것이다. 즉, 균열과 파단면의 형성은 응력파와 가스압의 공동작용의 결과이며 균열형성에 대한 두 요소의 영향은 장약방법과 암반 및 암석특성에 따라 좌우될 것이다.

2.2 이론적인 관계식

2.2.1 폭약의 폭발에 의한 장약공에 발생하는 작용압력

$$P_s = \frac{f \cdot L}{V - A \cdot L}$$

$$A = \frac{1.5}{1.33 + 1.26 \rho_e}$$

P_s = 장약공내 작용압력 (kgf / cm²)

f = 화약력 (l · kgf / cm² / kg)

L = 공당 장약량 (kg)

V = 공내용적 (l)

A = 폭약밀도에 따른 상수 (l / kg)

ρ_e = 폭약의 가비중 (kg / l)

(1)

식 (1)은 Abel-Nobel의 상태방정식에 의해 장약공내에 발생한 폭발압을 구한 것이며 장약공내 작용압력을 decoupling 계수의 관계로 구하면 다음과 같다.

$$P_s = \frac{f}{\left(\frac{\phi_b}{\phi_e}\right)^2 \cdot \frac{1}{\rho_e} - A} \quad (2)$$

여기서 ϕ_b = 천공경 (mm)이고 ϕ_e = 약경 (mm)이다.

2.2.2 외국의 천공간격에 대한 실험식

$$\text{공간격 } S = \phi_b \left\{ 1 + 3 \left(\frac{P_s}{\sigma_t} \right)^{1/2} \right\} \quad (3)$$

$$\text{공간격 } S = \frac{\phi_b (P_s + \sigma_t)}{\sigma_t} \quad (4)$$

식 (3)은 일본에서 植田, 酒井(1973)이 종래의 각종 실험 데이터로부터 얻은 실험식이며 식 (4)는 캐나다에서 P. N. Calder, A. Bauer(1983)에 의해서 제시된 실험식이다. 단, σ_t 는 암석의 인장강도이다.

2.2.3 장약량

공당 장약량(kg/hole)을 구하는 식(최신발파기술, 윤지선譯, 1992)으로는 발파계수, 천공간격, 천공길이를 변수로 해서 다음과 같이 구한다.

$$L = C \cdot S \cdot H \quad (5)$$

여기서, L = 공당 장약량(kg/hole), C = 발파계수, S = 천공간격(m), H = 천공길이(m)이며, 발파계수 C의 값은 암석강도에 따라 변화하지만 암석을 경암, 중경암 및 연암의 3개로 분류한 경우에는 연암에서 0.17, 중경암에서 0.2, 경암에서는 0.25의 값을 갖는 것으로 나타나 있다.

2.3 사용 화약류

pre-splitting 공법에 사용되는 폭약으로서는 디커플링 효과를 이용하기 위해서 천공경보다 작은 직경의 폭약과 저비중, 저폭속의 특성을 가진 폭약을 주로 사용하고 있다. 우리 나라에서는 현장 사정에 따라서 조금씩 다르지만 정밀폭약(17mm, 22mm)과 함수폭약(25mm, 28mm) + 도폭선 + 순발뇌관을 많이 사용하고 있는 실정이다.

3. 본 연구의 흐름

실험 수행 과정을 flow-chart로 나타내면 다음과 같다.

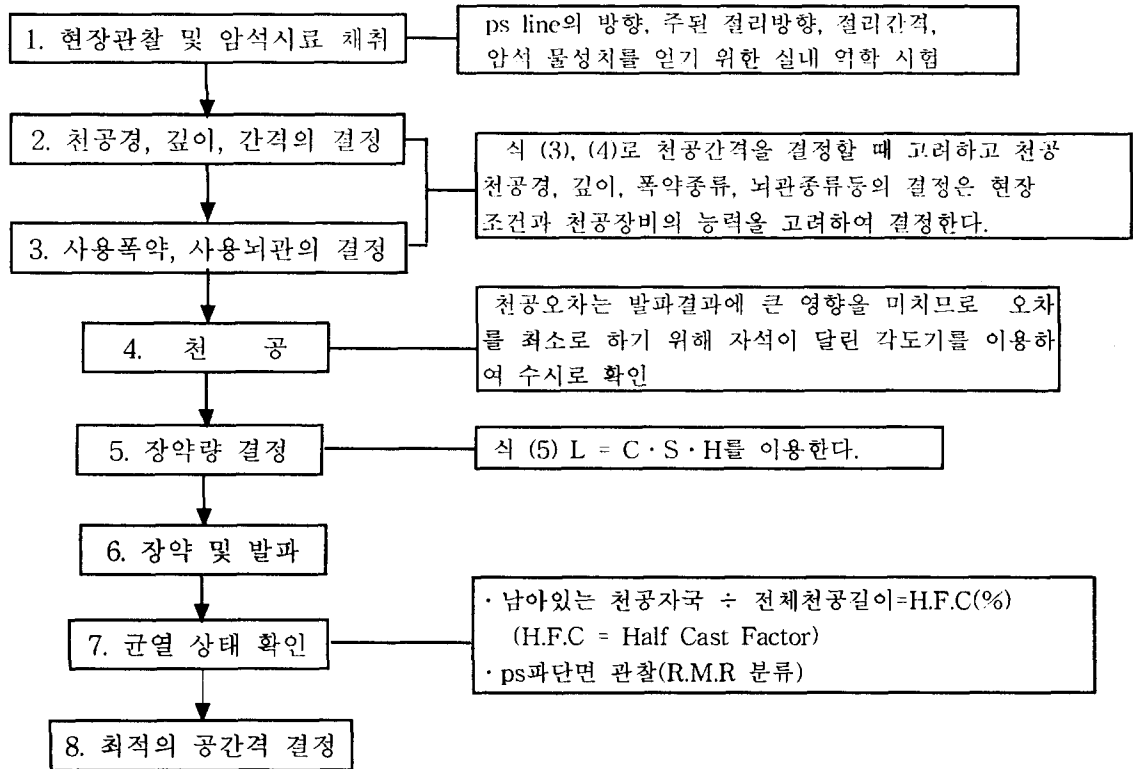


그림 1. 본 연구의 흐름도

4. 시험장소의 현장관찰 및 시험방법

4.1 실내 역학 실험 결과

실내암석 실험은 ISRM에서 제안한 방법에 의거하여 NX 및 BX 코어로 성형하여 실시하였으며, 탄성과 속도와 동포아송비는 일본 OYO社에서 제작한 Sonic viewer를 사용하여 구하였다.

표 1. 시험장소의 암석 물성치

| 공 종 장 소 | 단위중량 (g/cm^3) | 일축압축강도 (kgf/cm^2) | 압열인장강도 (kgf/cm^2) | 탄성과속도 (m/sec) | 동포아송비 |
|------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-------|
| 동해 석회석 광산 | 2.72 | 793 | 33 | S파 : 1945 P파 : 4495 | 0.38 |
| 아산 화강암 석산 | 2.64 | 1321 | 60 | S파 : 2239 P파 : 4930 | 0.36 |

4.1.2 현장 관찰

표 2. 현장관찰 자료

| 장 소 | 종 류 | | 주향 (°) | 경사 (°) | 절리간격 (cm) | R.Q.D (%) | 절리의 충진물 유무 | 지하수 상태 |
|-----------|-------------------------|--|-----------|-----------|--------------------|--------------|---|-------------------------------------|
| | 구 분 | | | | | | | |
| 아산 화강암 | 주된 절리 | | N27~30W | 68SW | Type-1 30~50 | 67~78 | 틈간격(aperture)은 약 1mm로 충진물 은 거의 없었다. | 표면에 노출된 지하 수는 찾아 볼 수 없 었음. |
| | 계획 ps line | | N68W | 80~90SW | | | | |
| | 절리방향과 ps line의 차이 | | 38~41 | 12~17 | Type-2 200~350 | 83~91 | Type-1에서 약 30cm의 풍화대가 존재하였다. | |
| 동해 석회석 | 주된 절리 | | N12~20W | 85~89SW | Type-3,4 50~100 | 80~88 | 틈간격(aperture)은 약 1~10mm로 최 대 20mm까지 발 견되었으며 충진물 은 풍화를 심하게 받았다. | 표면에 노출된 지하 수는 찾아 볼 수 없 었음. |
| | 계획 ps line | | N32W | 80~85 | | | | |
| | 절리방향과 ps line의 차이 | | 8~20 | 4~5 | | | | |

4.2 시험 절차

4.2.1 천공 패턴

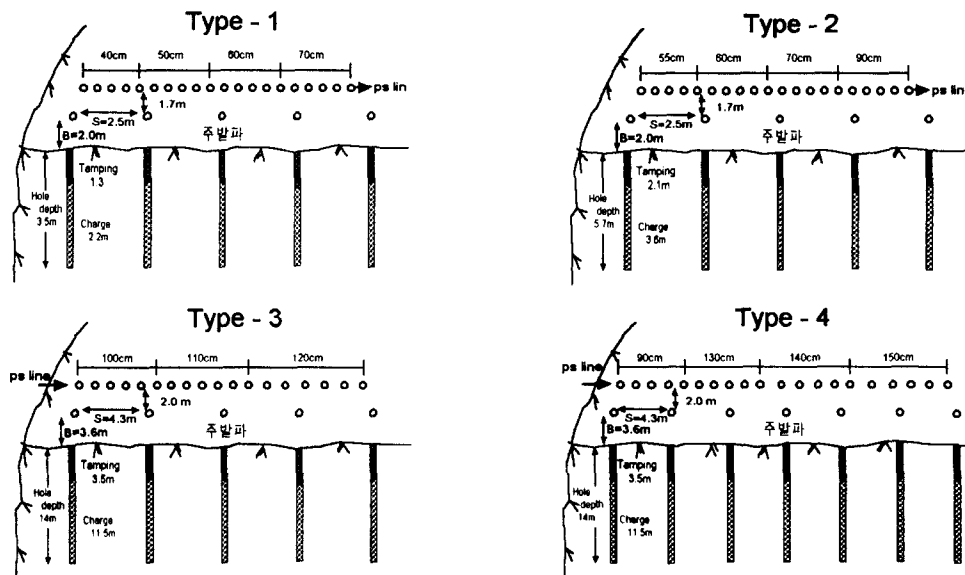


그림 2. 천공패턴도

4.2.2 장약 방법

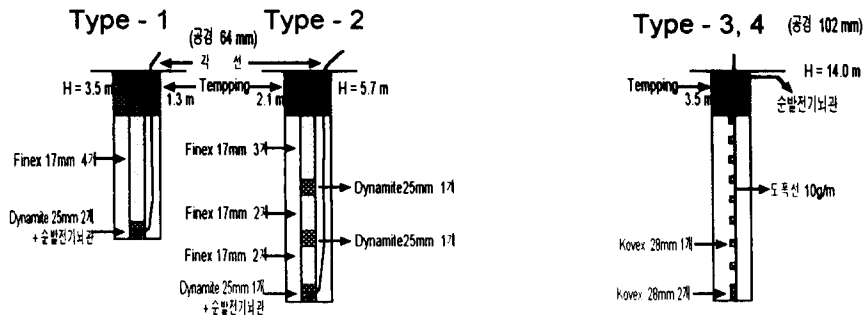


그림 3. 장약 방법

여기서, decoupling계수는 Type-1,2에서 3.8이고 Type-3,4에서는 3.6이다.

4.2.3 기폭 방법

Type-1,2는 역기폭을 사용하여 공저부분에 Himite(Dynamite) 25mm 로 전폭약포를 제작하였으며 Type-3,4는 함수폭약을 도폭선으로 연결하여 주발과보다 먼저 기폭하고 또한 동시에 기폭시키기 위해 ps line은 모두 순발전기뇌관을 사용하여 직렬로 연결하고 기폭하였다. 본 발과공들에 사용된 전기뇌관은 ms #8번 이후의 것들이다.

5. 시험 결과

5.1 기존 실험식에 의한 공간격 계산

표 3. 실험식에 의한 천공간격

| 구 분 | | 실험식 | $S = \phi_b \left\{ 1 + 3 \left(\frac{P_s}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$ | | $S = \frac{\phi_b (P_s + \sigma_t)}{\sigma_t}$ | |
|------|-----------|--------|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| 변수 값 | 아산 | Type-1 | $\sigma_t = 60 \text{ kgf/cm}^2, \phi_b = 6.4 \text{ cm}, P_s = 404 \text{ kgf/cm}^2$ | | | |
| | 화강암 | Type-2 | $\sigma_t = 60 \text{ kgf/cm}^2, \phi_b = 6.4 \text{ cm}, P_s = 401 \text{ kgf/cm}^2$ | | | |
| | 동해 석회암 | Type-3 | $\sigma_t = 33 \text{ kgf/cm}^2, \phi_b = 10.2 \text{ cm}, P_s = 196.4 \text{ kgf/cm}^2$ | | | |
| | | Type-4 | | | | |
| 계산결과 | 아산 | Type-1 | 56.2cm ≒ 56cm | | 49.5cm ≒ 50cm | |
| | 화강암 | Type-2 | 56.0cm | | 49.2cm ≒ 49cm | |
| | 동해 석회암 | Type-3 | 84.9cm ≒ 85cm | | 70.9cm ≒ 71cm | |
| | | Type-4 | | | | |

5.2 현장시험결과와 기존 실험식에 의한 계산결과의 비교

표 4. 천공간격(S)에 대한 발파계수(C), 요철도(Evenees) 및 H.C.F.(Half Cast Factor)

| | H=3.0m, L=0.65kg/hole(Type-1) | | | | H=5.0m, L=1.075kg/hole(Type-2) | | | | H=12.0m, L=2.5kg/hole(Type-3, 4) | | | |
|----------|----------------------------------|---------------|-------------|------------------|-----------------------------------|---------------|-------------|------------------|-------------------------------------|---------------|-------------|------------------|
| | 천공 간격 (cm) | 발파 계수 C | 요철도 (cm) | H.C.F | 천공 간격 (cm) | 발파 계수 C | 요철도 (cm) | H.C.F | 천공 간격 (cm) | 발파 계수 C | 요철도 (cm) | H.C.F |
| 식 1 | 56.2 | 0.39 | - | - | 56.0 | 0.38 | - | - | 84.9 | 0.25 | - | - |
| 식 2 | 49.5 | 0.44 | - | - | 49.2 | 0.44 | - | - | 70.9 | 0.29 | - | - |
| 시험 결과 | 40 | 0.54 | -3~+4 | 8.3/10.5 79% | 55 | 0.39 | -4~+2 | 11.2/12.8 88% | 90 | 0.23 | -2~+3 | 10.5/50 21% |
| | 50 | 0.43 | -4~+12 | 11.5/13.8 83% | 60 | 0.36 | -2~+5 | 11.8/14.5 81% | 100 | 0.21 | -6~+3 | 24.5/30 82% |
| | 60 | 0.36 | -15~+2 3 | 2.3/5.3 43% | 70 | 0.31 | 0~+13 | 0.7/2.75 25% | 110 | 0.19 | -2~+9 | 41.0/60.0 68% |
| | 80 | 0.27 | - | | 90 | 0.24 | - | - | 120 | 0.17 | +3~+25 | 17.0/30.0 57% |
| | - | | | | - | | | | 130 | 0.16 | +2~+18 | 30.5/50 61% |
| | - | | | | - | | | | 140 | 0.15 | +4~+23 | 19.0/50.0 38% |
| | - | | | | - | | | | 150 | 0.14 | +3~+45 | 12.0/50.0 24% |

5.3 현장시험과 기존 실험식과의 차이점에 대한 보정방법 제안

표-4를 보면 천공간격이 Type-1은 50cm, Type-2은 55cm, Type-3,4는 100cm일 때 가장 좋은 결과를 나타내었으며 이것을 기존식에 α , β 라는 보정계수를 넣으면 다음과 같이 α , β 값이 계산된다. 이것은 원위치 암반의 인장강도와 암석의 인장강도가 다른 값을 나타내므로 그 차이를 α , β 의 보정계수로 나타낸 것이 된다.

표 5. 실험식 보정계수 α , β 의 값 (Φ_b , P_s , σ_t 의 값은 표 3 참조)

| Type | 보정된 실험식 | $S = \Phi_b \left\{ 1 + 3 \left(\frac{P_s}{\alpha \cdot \sigma_t} \right)^{1/2} \right\}$ | $S = \frac{\Phi_b (P_s + \beta \cdot \sigma_t)}{\beta \cdot \sigma_t}$ |
|--------------------|------------|--|--|
| | | α | β |
| Type-1, S = 50cm | | 1.31 | 0.99 |
| Type-2, S = 55cm | | 1.04 | 0.88 |
| Type-3,4 S = 100cm | | 0.69 | 0.68 |

6. 결 론

본 연구에서는 제어발파의 일종인 pre-splitting의 설계 및 시공에 기초적인 기준을 제시하기 위하여 장약량, 사용폭약, 천공경, 천공깊이를 고정하고 천공간격만 변화시켜 화강암 및 석회암 지역에 현장시험을 실시한 후 최적의 천공간격을 찾아서 기 제시된 실험식과 상호 비교하여 천공간격에 대한 보정계수 α , β 값을 제시 하였다. 또한, 발파계수 C를 시험 Data로부터 역산하여 나타냈으며 이들의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 화강암으로 이루어진 지역인 Type-1,2의 R.M.R값은 60~84의 값을 나타내며 이것은 II등급 우수로 분류되며 보정계수 α 은 1.31~1.04, β 는 0.99~0.88로 산정되었다. 한편, 석회암으로 이루어진 지역인 Type-3,4의 R.M.R값은 59로서 III등급 양호로 분류되며 α 은 0.69, β 은 0.68의 값이 얻어졌다. 즉, Type-1,2의 경우에는 기 제시된 실험식을 그대로 사용하여도 큰 문제는 없지만 Type-3,4의 경우에는 기존식에서 산정된 값보다 약 20cm정도의 천공간격을 넓혀 사용하여도 좋다고 판단된다.
2. 천공간격은 일반적으로 천공경의 8~12배로 알려져 있으며 10배가 많이 사용되고 있다. 본 연구에 의하면 기 제시된 계산식으로부터 천공간격은 천공경의 7~9배로 되고 있지만 현장시험을 통해서 8~11배가 가장 적절하다는 것을 확인하였다.
3. Pre-split line과 인접공과의 거리는 일반적으로 주된 발파공의 천공간격의 0.5배로 알려져 있으며 본 연구에서도 주된 발파공의 천공간격에 약 0.47~0.68배로도 하여 큰 문제가 없었으므로 Pre-split line과 인접공과의 거리는 주된 발파공의 천공간격에 0.5배가 적절하다는 것을 확인 하였다.
4. 현장시험을 통해 최적의 공간격을 얻은 후 장약량, 천공깊이는 고정된 factor이므로 C(발파계수)의 값을 역산하였을 때 일반적으로 알려져있는 0.17~0.25인 값보다 높은 0.21~0.43의 값을 나타내었다. 즉, 식 (5) $L = C \cdot S \cdot H$ 으로 장약량을 산출할 때 일반적으로 알려져있는 0.17~0.25인 C값을 사용할 경우에 장약량이 작게 산정되어 pre-split의 효과를 얻을 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로, 본 시험과 유사한 화강암 및 석회암지역에서의 C값은 석회암 0.21, 화강암 0.43으로 정하는 것이 바람직하다.

7. 참고문헌

1. 류창하, (1997), "Smooth blasting 공법의 개념과 설계변수 고찰", 97년 비축기지 건설기술 세미나 논문집, pp. 89~106
2. 윤지선 역, (1992), 최신발파기술, 구미서관, pp. 54~85
3. P. N. Calder, and A. Bauer, (1983), "Pre-split blast design for open-pit and underground mines," , 5th Congr. Int. Sci. Rock. Mech. Vol. 2, pp. 185~190
4. J. J. Jiang. (1996), "Study of pre-split blasting using fracture mechanics", Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp. 201~206
5. Thomas Lewandowski, V. K. Luan Mai and Richard E. Danell, (1996), "Influence of discontinuities on presplitting effectiveness", Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp. 217~225