

불연속면이 존재하는 암반에서의 Smooth Blasting의 기구  
On the Mechanism of Smooth Blasting on the Rock  
Containing Discontinuities

박 홍 민<sup>1)</sup> 이 상 은<sup>2)</sup>  
Hong-Min Park and Sang-Eun Lee

ABSTRACT

Lately, the importance of smooth blasting is increasing on every construction fields, such as underground caves, tunnels, and road construction, etc. The main purpose of smooth blasting is to prevent unnecessary cracks from the base rock which preserved permanently and is to gain the smooth fracture plane. So, in smooth blasting, explosives with low detonating velocity are generally used. But it is difficult to discuss general theory on the smooth blasting because the mechanical properties of pertinent rocks are difficult regionally. Accordingly basic researches on the smooth blasting are demanded. In this paper, the mechanisms of the smooth blasting on the rocks containing discontinuities were discussed. Firstly, the writer predicted the formation of fracture plane and unevenness using mathematical methodology, the next the model blast tests were conducted in order to simulate the crack propagation modes from the blast holes. Through the research, the following conclusions were obtained 1)The blast test results were in reasonably good agreement with the theoretical prediction. 2)The degree of discontinuity has an influence on the fracture morphology.

본 연구는 불연속면이 존재하는 암반에서 Smooth blasting이 실시되었을 때의 발파파단면의 형성기구를 밝히고, 효과적인 Smooth Blasting을 실시하기 위한 기술적 자료를 제공하기 위하여 수행되었다. 첫째, 불연속면의 경사와 발파공간거리에 의해서 형성되는 발파파단면의 형상을 I형(인접발파공이 직접 연결된것), II형(단일 균열으로 연결된것) 그리고 III형(방사상 균열에 의해서 형성된 것)으로 가정하고, 발파파단면의 요철도의 정도를 예측하는 방법을 제시하였다. 둘째, 불연속면의 종류와 발파공에서 불연속면까지의 거리의 변화에 따른 발파 균열의 상황을 검토하여 발파균열이 단일이나 방사상으로 되는 한계불연속거리를 결정하였다. 끝으로 불연속면의 종류, 발파공간거리 그리고 불연속면의 경사를 변화시킨 모형실험을 실시하여 파단면의 요철도를 실측하였다. 이 실측결과를(2)식으로 계산되는 요철도의 예측치와 (3)식으로 계산되는 한계공간거리를 기준으로 대비함으로써 예측법의 타당성을 평가하였다. 실측치와 예측치를 불연속면의 종류와 경사별로 발파공간 거리를 기준으로하여 비교한

1) 전북대학교 공과대학 교수  
2) 전북대학교 대학원 박사과정

결과 overbreak + u의 값은 예측치와 실험치가 높은 일치성을 나타내고, underbreak - u의 값은 일치성이 다소 낮게 나타났으나 전체적으로 양호한 일치성을 나타냄으로써 파단면의 형성과 요철도의 예측법이 충분히 합리적이었음이 증명되어 불연속면을 함유하는 암반에서 Smooth Blasting의 기구가 상당부분 밝혀졌다고 사료된다.

## 서언

최근 각종 건설공사와 용지조성, 지하 공동 굴착공사에서 암반굴착작업이 증가되고, Tunnel굴착에서 NATM이 일반화 되므로서 Smooth Blasting(이하 SB)의 중요성이나 높은 사용빈도에도 불구하고 시공 현장에서는 SB에 대한 명확한 방법이 채택되지 못한 경향을 볼 수 있다. 즉, SB가 목적으로 하는 평활한 파단면을 형성시키기 위해서는 예정판단선에 따라서 천공된 발파공이나 발파보조공들을 상호 연결시키는 방법이 쓰여지나 이에대한 통일적인 검토가 내려지지 못하고 있다.

그 이유중의 하나는 SB가 시공될 대상암반의 역학적 특성이 다양한데 있다고 볼 수 있다. 실존하는 암반에는 절리와 층리드에 의한 불연속면이 존재하고 더구나 이들 불연속면은 발파로서 형성되는 파단면의 형상에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 암반내에 존재하는 이들 불연속면을 고려하지 않고서는 SB의 결과를 기대하기 어렵다.

본 연구는 불연속면이 존재하는 암반에서 SB의 결과를 먼저 얻기 위한 기술적 자료를 제공.확립시키기 위하여, 먼저 인접한 발파공 사이에 개재된 불연속면의 경사와 발파공간거리가 변화되었을 때 형성되는 발파단면의 요철도를 이론적으로 고찰하고 산출식을 유도하여 형성될 요철도의 정도를 예측한 후, 모혀요실험을 실시하여 위의 고찰방법의 타당성을 평가하고 SB의 파괴기구를 검토하였다.

이를 위하여 불연속성의 정도와 발파공에서 불연속면까지의 거리를 변화시킨 단일

단일 발파공에서 발생하는 균열의 발달상황을 실험적으로 검토하고 끝으로 불연속면이 존재하는 모형암반에서 불연속면의 불연속성 정도,경사,그리고 발파공간거리를 변화시킨 실험을 통하여 발파파단면의 형성기구를 최종적으로 검토하였다.

## 발파파단면형성의 이론적 고찰

SB의 파괴기구에 대해서는 인접된 발파공에서 충격파가 발파공간에서의 중첩에 의한다는 설<sup>1)</sup> 충격파에 의한 인접공 주변의 응력 집중에 수반하여 인접공간을 연결하는 방향으로 균열이 발생된다는 설<sup>2)</sup>등이 발표되고 있다. 그러나 이들의 제안은 개별적으로 발파조건에 따라서 타당성이 인정되지만 단독적으로는 SB의 파괴기구를 설명하기에는 불충분한 것으로 평가되고 있다.

이들 세가지 설 중에서 앞의 두 설은 발파공에서 발생된 충격파가 전파되어 인접공간이나 발파공 주변에서 공간을 연결하는 방향으로 발생하는 균열이 SB파괴기구의 주요인이 된것으로 생각하고 있다. 따라서 이들 제안의 내용을 종합하여 SB파괴기구는 발파충격파에 의해서 먼저 발파공 주변에 다수의 방사상 균열이 발생되고, 이들이 가수압의 작용에 의하여 발달되는 과정에서 발파공간을 연결하는 방향으로 균열이 선택적으로 발달된다고 정의하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 지금 불연속면의 양쪽에 배치된 발파공이 발파되었을 때 형성되는 파단면은 Fig.1과 같은 세가지 형태(I형, II형, III형)로 예상된다. I형은 불연속면의 영향을 받지않고두 발파공이 직접연결되어 명확한 파단면이 형성되는 이상적인 SB가 실

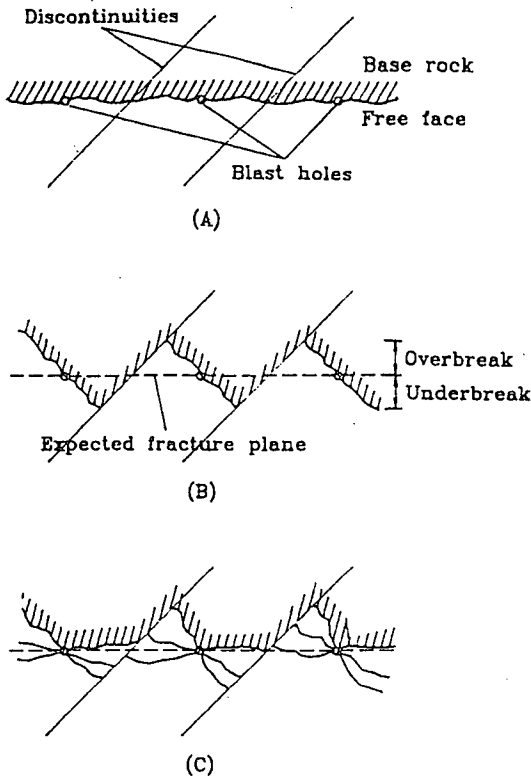


Fig. 1. The types of fracture plane.

시된 경우이다(Fig.1의(a)) 그러나 일반적으로 균열은 불연속면이 영향을 받아서 발파면에는 요철이 생성되기 때문에 평활하게 되지 않는다. 이 경우 발파균열은 불연속면의 불연속성의 정도, 발파공간까지의 거리, 그리고 폭약량과 관련되어 단일로 되는 경우(Fig.1의 (b))와 방사상으로 되는 경우(Fig.1의 (c))로 되며, 이때 파단면은 이들 균열이 불연속면과 연결된 상태로 형성된다. 실제로 SB가 실시되었을 때 파단면은 I형을 형성되는 경우는 거의 없고 II형이나 III형으로 형성되므로, 파단면의 요철도를 감소시키기 위해서는 III형으로 형성되도록 설계되어야 한다.

불연속성의 정도와 폭약량이 정해지면 파단면의 형상은 발파공에서 불연속면까지의 거리에 의해서 결정되므로 파단면의 II형

이나 III으로 형성되는 한계가 되는 거리를 한계불연속면거리( $W_0$ )라 한다.

SB의 결과를 평가하기 위한 척도로서 발파파단면의 요철도로정하고 Fig.2와같이 불연속면의 양측에 발파공이 배치된 암반을 가상하여  $S_1=S_2=S/2$ ( $S$ :발파공간격)라면, 발파공에서 불연속면까지의 수직거리 $W$ (Fig.2에서  $W_1, W_2$ )와 파단면의 요철도 $U$ (Fig.2에서  $u_1=-u, u_2=+u$ )는 다음 식으로 주어진다.

$$W = S/2\sin \theta \quad (1)$$

$$U = \pm S/2 \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

이다.

$U$ 는  $\theta$ 가 일정할때  $W$ 에 의해서 좌우되므로  $W$ 값의 대소는 파단면이 II형이나 III형으로 되는가를 결정하게 된다. 또한  $W=W_0$ 라하면 II형이나III형으로 되는 한계가 되는 발파공간격(한계공간거리) $S_0$ 는

$$S_0 = 2W_0/\sin \theta \quad (3)$$

으로 된다.

이상으로부터 Fig.2와 같이 인접된 발파공 사이에 불연속면이 개재되었을때 불연속면의 정도가 심하지 않고 인접 발파공에 의한 상호작용에 의해서 균열 발달에 미치는 영향도가 높을 때는 발파파단면은 I으로 형성되고,  $-u, +u$ 는 거의 나타나지 않을 것이다. 그러나 불연속성의 정도가 심할때는  $-u, +u$ 는 크게 나타나게 된다.  $-u, +u$ 는 (2)식에 의해서 산출되며, (3)식으로 계산되는  $S_0$ 와 관련시켜 다음과 같이 예측할 수 있다. 공간격 $S$ 가 한계공간거리 $S_0$ 보다 작을 때는  $S$ 값의 범위도 한정되어  $-u, +u$ 는 크게 나타나지 않으며 파단면은 III형으로 형성될 것이고,  $S$ 가  $S_0$ 보다 큰 영역에서는  $-u, +u$ 가 증대되어서 파단면은 II형으로 형성될 것이다.

**한계불연속면거리의 실험적 고찰**  
전절에서 불연속면이 존재하는 암반에서

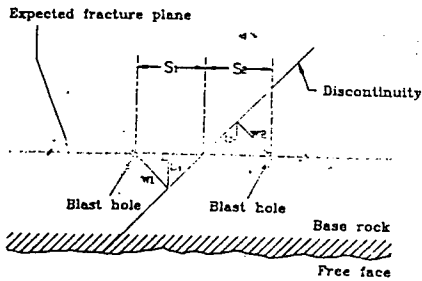


Fig. 2. Arrangement of blast holes on the rocks containing discontinuity.

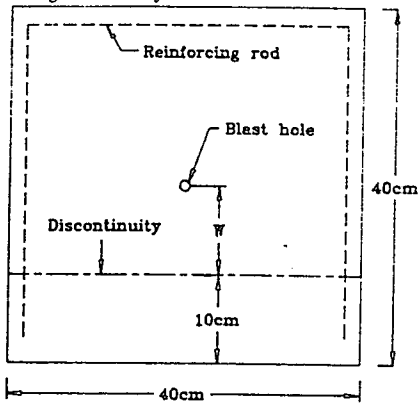


Fig. 3. Specimen for the experiment of crack propagation from the blast hole near the discontinuity.

형성되어질 파단면의 요철도의 정도를 예측 하였으나 실제의 발파에서는 불연속성의 정도와 자유면에서의 반사이장과의 영향이 가해지는데 이에 대한 평가가 쉽지 않다.

그러므로 불연속면에 근접된 단일 발파공에서 불연속면 방향으로 발달되는 균열이 불연속성의 정도와 불연속면까지의 거리에 따라서 변화되는 상황을 실험적으로 검토함으로써 전절에서의 요철도 예측법의 타당성을 평가하고, 발파와 단면이 II형 또는 III으로 형성되는 한계불연속면거리( $W_0$ )를 결정한다.

**시편 및 실험**

시편은 콘크리트 블록으로 제작하였으며, 규격은 40X40X10cm이다. 발파후, 시편의 형상을 유지시키기 위하여 6mm 철근을 2단으로 둘러 배치시키고 4주간 양생시켰다. 압축강도는 330kg/cm<sup>2</sup>이다(Fig.3)

불연속성의 정도를 변화시키기 위한 조건은 A조건(시멘트 덧치기), B조건(신문지협재), C조건(0.25mm의 비닐협재)의 3종류로 하였고, 발파공경은 10mm, 발파공과 불연속면과의 거리는 3cm부터 12cm까지 1cm간격으로 10종류이며, 각 조건에 대해서 3개씩 제작하였다.

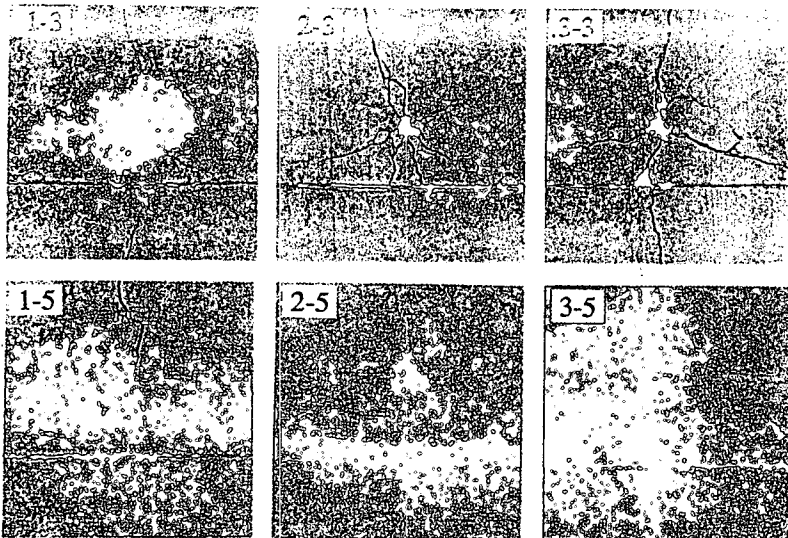


Photo 1. Crack propagation from blast hole to discontinuities. O-: type of discontinuity, 1-I type, 2-II type, 3-III type; -O: distance between blast holes and discontinuity.

따라서 시편의 총수는 90개이다. 사용폭약은 도폭선을 사용하였고,도폭선에는 종이고리를 부착시켜 공중양에 위치하도록 하였으며,디커플링지수는 2이다.

### 결과 고찰

실험결과와 시편사정의 예를 Photo 1에 나타냈다. 발파균열은 시편의 표면에 나타나서 육안으로 식별되는 것만을 착색시켜서 구분하였고, 발파공에서 불연속면상에 수선을 내리고 수선의 좌우측에 불연속면에 도달한 균열중 에서 최외측의 것이 불연속면과 교차되는 점을 구한 후, 불연속면과 수선의 교점에서 균열과 불연속면의 교점과의 거리 L을 수선위 좌측은(-), 우측은(+)로 부호를 붙여서 측정하였다. 발파공에서 불연속면까지의 거리W와 L과의 관계를 A,B,C각 조건별

로 Fig.4에 도시한다. 실험결과 A조건에서는 발파공과 불연속면과의 거리W가 커질수록 불연속면에 도달하는 균열의 수는 감소되지만L은 크게 변화되지 않고 있다. C조건인 경우는 W가 어느 범위를 넘어서 커지면 S은 급격히 작아진다. B조건인 경우는 대체로 A와 C조건 사이에 분포되어 있다. 이러한 경향은 불연속면 조건의 차이에 기인하는 것으로 추정된다.

A조건인 시멘트 덧치기면은 강도 저하를 초래하는 약선으로 작용은 하지만 발파공에서 발생한 충격파가 불연속면을 통과하는 균열의 발달방향에 큰 영향을 주지 않고,단일 균열로 발달하는 경우에도 반드시 불연속면에 수직적인 방향을 취하지 않기 때문에 W의 증가가 L에 큰 영향을 미치지 않는 결과를 가져온다. 그러나 C조건은 불연속면에서

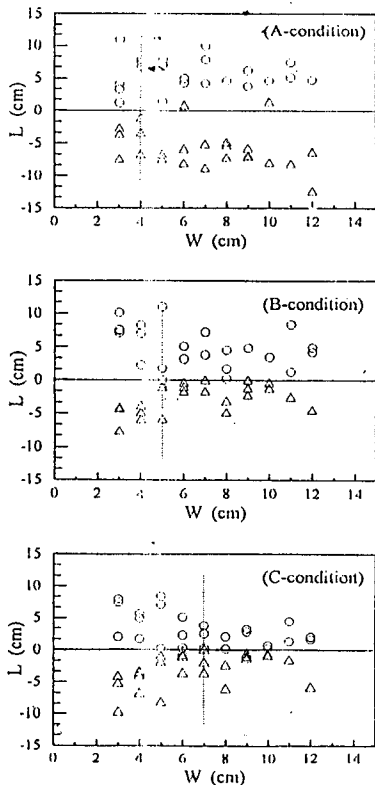


Fig. 4. Relations between W and L(dashed line:  $W=L$ ).

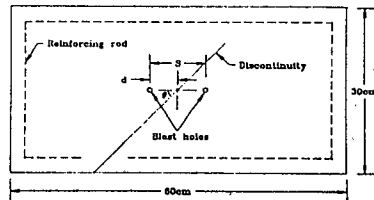


Fig. 5. Specimen for the experiment of smooth blasting in base rock contained discontinuity.

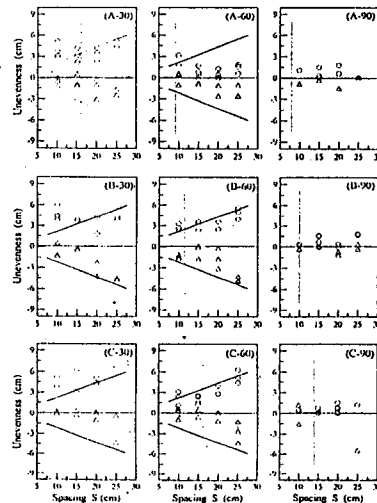


Fig. 6. Unevenness in each conditions(dashed line:  $S=S_0$ )( $\circ$ : underbreak,  $\triangle$ : overbreak).

수직인 방향을 취하지 않기 때문에 W의 증가가 L에 큰 영향을 미치지 않는 결과를 가져온다. 그러나 C조건은 불연속면에서 충격파의 반사가 현저하여 W가 증가되어 발파공에서의 방사상 균열이 불연속면에 도달하지 못하는 한계거리가 되면 불연속면에 수직방향으로 균열의 발달을 촉진하는 결과가 된다

동일 조건의 시편3개 중에서 어느 한 시편만이라도 단일 균열이 형성되는 W는 A, B, C조건에서 각각 4, 5, 7cm로 나타나며(Fig.4의 점선), 이들 수치는 각 조건에서 파단면이 II형이나III형으로 되는 한계불연속면 거리  $W_0$ 이다.

### SB 파단면 형성기구와 한계발파 공간거리의 고찰

불연속면이 개재된 암반에서 생성되는 발파파단면의 형상에 영향을 미치는 주요인인

불연속성의 정도, 파단예정면과 불연속면과의 각도, 발파공간격이 변화될때 발파공 안에서 형성되는 파단면의 요철도를 검토하여SB에 대한 실용적 자료를 제시한다.

### 시편 및 실험

시편의 규격은 60X40X10cm 이고 불연속면의 종류와 시편 제작방법은 전절에 준하였다. 시편의 모식도는 Fig.5와 같다.

파단예정면에 대한 불연속면의 경사각  $\theta$ 은  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 3종이고, 발파공간 거리는 10, 15, 20, 25, 30cm의 5종으로서 각조건에 대해서 3개씩 제작하여 총시편수는 135개이다. 사용폭약과 형성된 균열의 검출방법은 전절의 실험과 동일하지만 2개의 발파공을 동시에 기폭시켜야 하기 때문에 뇌관에서 발파공까지의 도폭선의 길이는 같게 하였다.

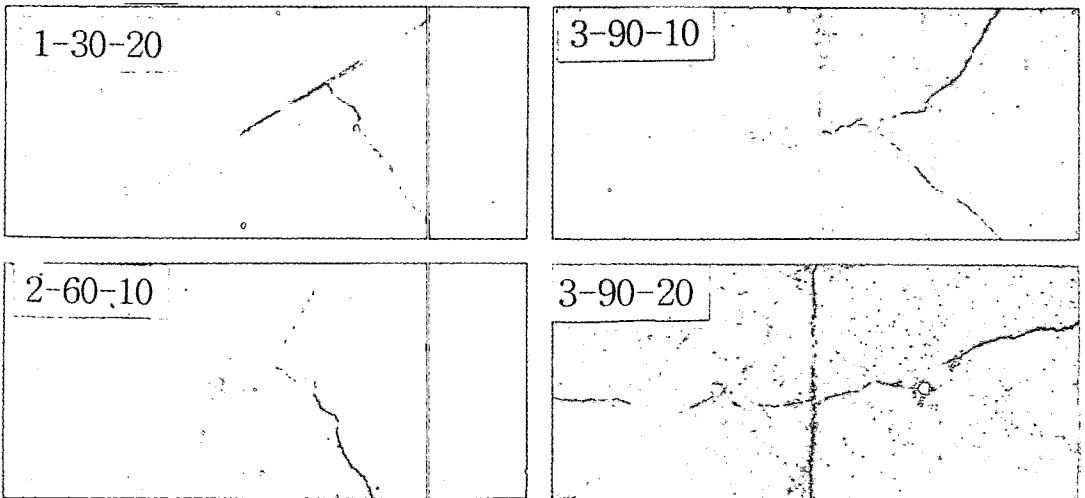


Photo 2. Formation of fracture plane in model specimen contains discontinuity. ○-: type of discontinuity, 1-I type, 2-II type, 3-III type; -○-: angle of discontinuity; -○-: distance between two blast holes.

### 결과고찰

불연속면 양측의 발파공에서 발달된 균열 중에서 가장 깊게 불연속면에 교차된 것의 의하여 파단면의 요철도가 형성되기 때문에 이들이 불연속면과 교차된 점에서 파단

예정면까지의 거리  $-u, +u$ 를 측정하였다.

이들 측정치를 불연속면의 종류와 불연속면의 경사별로 발파공간거리를 기준으로 하여 Fig.6에 표시하였다. Fig.6에는(2)식으로 계산되는 요철도의 예측치를 실선으로 표

시하였고, 불연속면의 경사와 한계불연속면 거리의 실험에서 얻어진  $W_0$ 의 값을 이용하여 (3)식으로부터 구해진  $S_0$ 의 값을 점선으로 나타냈다. 또한 모형실험 결과의 예를 Photo2에 나타냈다.

### 불연속면의 경사( $\theta$ )의 영향

$\theta$ 가  $90^\circ$  일 때는 발파파단면이 I형인 경우에는 물론이고 II형으로 형성될 때도 균열은 불연속면에 직각방향으로 발달되어 요철도는 거의 0이 될것으로 예측된다. 실험결과 불연속면이 A 조건일때는 파단면은 I형으로 형성 되었으나 B와C 조건에서는 실측치와 예측치가 잘 일치됨으로써 앞에서 제시한 예측방법이 합리적이었다고 보여지지만, A조건에서는 일치도가 다소 떨어진다. 이는 인접발파공에서의 균열이 제어되기 때문인 것으로 해석된다. 실험결과  $60^\circ$ 의 경우는 파단면이 I형으로 형성되는 시편수가 전체의 반수에 이르고, 전체적으로 A조건에서 -u값은 작게 나타난다.

### 발파공간거리의 영향

발파공간 거리가 한계공간 거리보다 클 때 ( $S > S_0$ )에는 좌측공에서의 균열은 underbreak를 발생시킨다. 실험결과 B와 C 조건에서는 예측치와 실측치가 어느 정도의 일치성을 보였다. 그러나 몇개의 시편에서는 균열은 발파공간을 연결시키는 방향으로도 발달되어 underbreak를 감소시키는 결과를 가져오고,불규칙한 양상을 보이기 때문에 전체적으로 예측치와의 일치성이 overbreak의 경우에 비하여 떨어지고 있다. 발파공간 거리가 한계공간거리보다 작을때 ( $S < S_0$ )에는 불연속면의 방향으로 균열은 방사상으로 발달될 경향이 높을 것으로 예상된다. 따라서 우측공에서의 균열로 형성되는 overbreak는 예측치보다 크게 나타날 가능성이 있다. 그러나 실험 결과는  $\theta$ 가  $30^\circ$  이고 S가 S보다 작은 범위에서만

overbreak는 예측치보다 높게 나타났고, 발파공간거리가 한계공간거리와 비슷한 범위에 있을때는 많은 시편에서 균열은 방사상으로 발달되어 파단면은 III형으로 형성되었다.

그리고  $S < S_0$ 일때 좌측공에서 발달된 균열에 의해서 형성된 파단면은 암반 내측방향으로 발달된 방사상 균열에 의해서 형성되게 되므로 underbreak는 예측치보다 작아질 것으로 예상되었는데 실험결과 예측과 일치하는 것으로 나타났으며, 경우에 따라서는 overbreak상태로 되는 시편도 있다. 이는 S가  $S_0$ 보다 작기 때문에 발파공간을 연결하는 방향으로 균열이 발생할 가능성이 높아지기 때문이고, 대체로 파단면은 III형으로 형성된다.

### 결론

불연속면이 존재하는 암반에서 SB가 실시되었을 때의 발파파단면의 형성기구와 발파파단면에 있어서 요철도의 발생정도를 예측하였고, 이 예측치와 모형 발파실험을 통해서 얻은 실측치와 비교 검토하였다. 종합적으로 볼때 overbreak의 경우에는 예측치와 실측치가 높은 일치성을 나타냄으로써 예측을 위한 고찰방법이 합리적이었다고 판단된다. 그러나 underbreak의 경우에는 일치도가 다소 떨어지고 있다. 또 I형과 같은 파단면이 형성되는 경우는 불연속면이 A조건이고, 불연속면의 경사가  $90^\circ$  인 경우이다. 그러나  $60^\circ$ 의 경우에도 I형의 파단면이 형성되는 경향이 나타난다. 불연속면의 조건이 A와 C인 경우에서 형성되는 파단면의 양상에는 뚜렷한 차이가 나타났으나 B조건에서의 파단면은 A와 C 조건의 중간 경향을 나타내고 있다. 이는 불연속성의 정도의 차이가 파단면의 형성에 큰 영향을 주고 있음을 나타내고 있는 것으로 판단된다.