

절리간격과 방향이 벤치발파시 암석파쇄도에 미치는 영향에 대한 실험 연구

최용근¹⁾, 이정인²⁾

The Effect of Joint Condition on Rock Fragmentation in Bench Blasting

Yong-Kun Choi and Chung-In Lee

Abstract : Recent studies reported that natural block size of rock and joint orientation highly affect on rock fragmentation. In this study, blasting test using high strength cement mortar was carried out to verify this fact. The result of this test indicated that fragmentation is influenced by the joint interval, and at same joint interval condition, fragmentation depends on joint orientation. These results are significantly coincident with field investigations.

Key words : rock fragmentation, joint spacing, joint direction, in-situ block size, bench blasting

초록 : 현지암반 조건 중에서 자연상태 암석블록의 크기와 절리방향은 다른 요인들에 비해 상대적으로 암석 파쇄도에 큰 영향을 미치는 것으로 최근의 연구에서 확인되었다. 이러한 최근의 연구결과를 검증하기 위해 이 연구에서는 고강도 시멘트 몰탈 재료의 축소 모형을 이용한 발파실험을 실시하였다. 실험 결과 절리간격이 같을 때 절리방향에 따라 암석의 파쇄도가 달라지며, 절리간격에 따라 파쇄도에 차이를 보이는 등 현장조사에서 얻어진 것과 같은 결과를 얻었다.

핵심어 : 파쇄물의 입도분포, 절리간격, 절리방향, 암반블록의 크기, 벤치발파

1. 서 론

벤치발파시 암석 파쇄도는 절리방향, 간격, 암석의 물리적 성질 등과 같은 현지암반 조건과 저항선, 공간격, 비장약량 등과 같은 발파조건에 영향을 받는다. 최근 최용근 외(2004)는 현지암반 조건이 다른 국내 3곳의 석회석 광산에서 발파조건을 달리한 31개 벤치발파 결과를 분석하여 현지암반 조건 중에서 자연상태 암석블록의 크기와 절리방향이 다른 요인들에 비해 상대적으로 암석 파쇄도에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나 현장조사 결과는 여러 가지 영향 요인들이 결합되어 복잡한 형태로 나타나게 되므로 절리방향과 간격이 파쇄도에 미치는 영향을 세밀하게 검토하기 위해 축소 모형 실험을 통한 실험결과에 검증이 필요하였다. 따라서 이 연구에서는 인공절리를 형성시킨 고강도 시멘트 몰탈 재료의 축소 모형을 이용한 발파실험을 수행하여 현장에서 제어하기 어

려운 절리방향과 간격이 암석 파쇄도에 미치는 영향을 분석하였으며, 현장실험 결과를 검증하였다.

2. 발파실험을 위한 모형 제작

2.1 모형의 형상

최용근 외(2004)가 조사한 3개 광산지역의 주절리군이 경사각 70° 이상의 수직에 가까운 절리들로 이루어져 있으므로 축소 모형은 수직절리의 방향과 간격에 의한 영향을 검증하기 위한 형태로 제작되었다. 모형의 크기는 전기뇌관을 이용한 발파시 모형의 측면과 하부로 파쇄되는 것을 방지하기 위해 가로×세로×높이가 400×300×300mm의 크기로 제작되었다 (Fig. 1). 제작된 모형의 수는 총 12개로서, 모든 모형의 강도는 동일하며 절리간격과 절리방향이 서로 다르게 제작되었다. 절리간격은 1cm, 2cm, 3cm의 3가지로 설정되었으며, 각각의 절리간격에 대해 절리방향을 0°, 30°, 60°, 90°의 4가지 조건으로 제작하였다. 이 경우 절리의 경사는 모두 수직으로 동일하다.

1) (주)지오제니컨설팅트

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

접수일 : 2005년 6월 15일

2.2 모형의 물리적, 역학적 특성

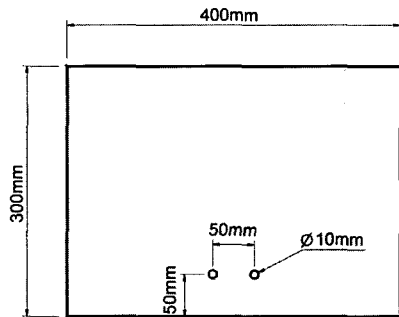
모형 제작을 위한 재료는 실험자에 의한 배합 오차를 줄이기 위해 시멘트와 모래가 이미 섞여있는 (주)유니온의 '고강도 그라우트 (HS)'를 사용하였다. 고강도 그라우트 (HS)는 시멘트와 모래가 1 : 1.5로 섞여 있는 제품으로서, 물의 중량비에 따라서 제작되는 모형의 강도가 달라지도록 설계되어 있다(제품 공급자에 따름). 이 연구에서는 모형의 강도를 최대한 크게 하기 위해 제품 공급자의 기준에 따라 고강도 그라우트 (HS)와 물의 중량비를 13%로 제작하였다. 제작된 모형의 양생은 25℃ ~ 30℃의 상온에서 10일간 이루어졌다.

제작된 모형의 물리적, 역학적 시험결과 탄성과 속도와 강도는 양생시간에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 비중은 감소 후 증가하는 것으로 나타났으나, 이는 시험시 시료 채취 위치에 따른 모래 함량의 차이에 기인한 것으로 판단되며, 양생에 따른 비중의 변화는 무시할 수 있는 것으로 추정된다.

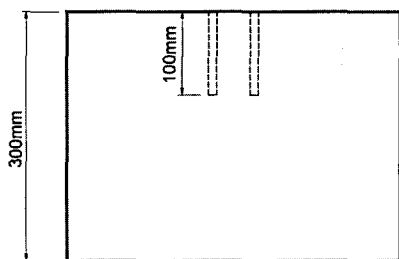
축소 모형을 이용한 실험의 경우 현장모사의 타당성을 확보하기 위해 차원해석을 실시하고, 이로

부터 계산되는 값을 축소 모형의 재료 선택에 이용하는 것이 보통이지만, 발파실험을 위한 모형의 경우는 차원해석을 통해서 발파에 의한 동적과정을 완벽하게 모사할 수 없으므로 실험을 통해 모사하기 위한 주요 목적과 관련해서 중요한 몇 개의 파라미터에 대해 정확한 차원을 제공할 수 있는 모형을 선정하게 된다 (Rustan, 1990). 따라서 차원해석이나 모델법칙(model law)에 의해 모형의 재료를 선정하기보다는 시행 착오를 통해서 현장과 가장 비슷하다고 여겨지는 재료를 선정하게 된다.

이 연구에서는 최용근 외(2004)가 조사한 광산의 표준적인 벤치높이를 기준으로 모형의 길이를 1/120 정도로 축소하되, 재료의 강도를 현지암반의 강도와 비슷하게 하고, 탄성과 임피던스를 같게 만드는 것을 가장 우선시 하였다. 이에 따라 재료와 현지암반의 일축압축강도가 비슷한 수준이 되도록 고강도 그라우트를 이용해서 얻을 수 있는 가장 큰 일축압축강도인 51MPa를 목표로 물/시멘트 비를 조정하였다. 그리고 탄성과 전파에 대한 저항이 비슷하게 하기 위하여 모형의 탄성과 임피

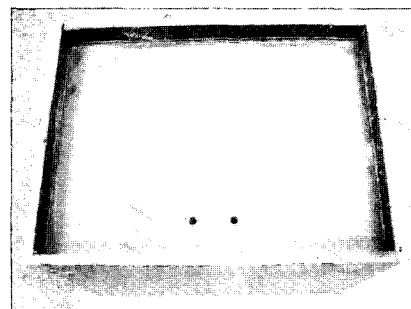
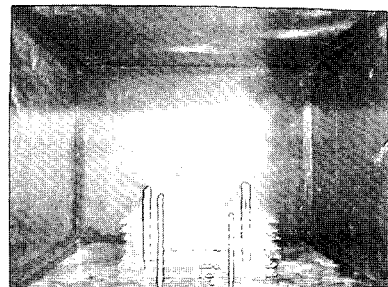


(a) Plan



(b) Front

(a) Schematic diagram of model.



(b) joint making and model curing

Fig. 1. The method and process of the model making.

Table 1. The properties of model in case of 13% water weight

Curing time (day)	3	4	5	7	10
Apparent specific gravity	2.23	2.14	2.15	2.3	2.3
P-wave velocity (m/sec)	3,590	3,350	3,300	4,040	4,010
S-wave velocity (m/sec)	1,880	1,840	1,850	2,130	2,100
Uniaxial compressive strength (MPa)	33.7	33.5	34.1	47.8	50.9
Tensile strength (MPa)	3.7	3.1	3.3	4.4	4.5
Young's modulus (Gpa)	2.09	1.86	1.88	1.82	2.3
Poisson's ratio	0.14	0.2	0.16	0.24	0.21

던스를 현지암반의 탄성과 임피던스와 유사하게 모사하였다. 이에 따라 밀도와 탄성과 속도의 곱으로 표현되는 탄성과 임피던스는 축소모형과 현지암반이 1:1.48 정도의 비를 갖게 됨으로서 비교적 만족할 만한 수준으로 평가되었다.

2.3 절리제작 방법

절리모사를 위해 두께 0.4 mm의 유리판을 이용하였다. 모형 제작은 절리역할을 하기 위한 유리판을 형틀에 붙인 후 배합된 모르타르를 붓는 방법으로 이루어졌다. 모든 모형에서 절리모사를 위한 유리판은 모형의 앞쪽 자유면으로부터 65 mm, 위쪽 수평면에서 깊이 200 mm의 범위에 부착되었다. 모형 제작과정은 다음과 같다.

- ① 제작된 형틀의 전면 안쪽에 종이를 붙인 후, 접착제를 이용해서 절리방향과 간격을 고려하여 유리판을 종이에 부착한다.
- ② 고강도 그라우트 (HS)와 물이 혼합된 모르타르를 소량씩 넣어 유리 사이에 골고루 스며들도록 서서히 타설한다.
- ③ 양생은 10일간 실시한다.
- ④ 양생이 끝나면 저항선과 공 간격이 각각 50mm가 되도록 발파공의 위치를 선정 후, 너관이 삽입될 수 있도록 지름이 10mm, 깊이가 100mm인 2개의 발파공을 드릴을 이용하여 수직으로 뚫는다.

제작된 모형의 표기는 절리방향과 절리간격에 따라 'AA00-0'의 형태로 기재된다. 먼저 맨 앞의 'AA'는 절리방향에 대한 표기로서, VJ는 절리방향과 앞쪽 자유면의 방향이 수직인 경우이며, HJ는 수평인 경우, DJ는 경사져 있는 경우를 표시한다. 두 번째 항인 '00'은 절리방향이 앞쪽 자유면과 경사진 경우만 적용되는 값으로서, 경사각이 30°인 경우에는 30으로, 60°인 경우에는 60으로 표기된다. 마지막에 표기된 '0'은 절리간격 (cm)을 표현하는 것으로서 1, 2, 3의 숫자 중 1가지로 결정된다. 따라서 절리방향이 앞쪽 자유면의 방향과 수직하고 2cm의 절리간격을 가지는 경우에는 VJ-2로 표기되며, 절리방향이 앞쪽 자유면의 방향과 60°의 각도를 이루고 절리간격이 3cm인 경우에는 DJ60-3으로 표기된다.

2.4 절리모사의 타당성 검증

실제 암반에서 충전되지 않은 절리는 암반사이에서 갈라져 있는 틈의 역할만을 할 뿐이며, 절리면 양쪽의 암반은 서로 밀착되어 있다. 따라서 절리를 모사하기 위해 삽입된 유리판의 임피던스가 모형을 구성하는 주재료인 고강도 그라우트와의 임피던스가 큰 차이를 보인다면, 유리판은 자연상태의 절리처럼 갈라져 있는 틈의 역할이 아니라 충전물의 역할을 하게 됨으로써 탄성파를 강하게 굴절시키거나 흡수 또는 반사시키는 역할을 하게 될 것이다. 재료의 탄성과 임피던스는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Z = \rho \cdot V_p \quad (1)$$

여기서 Z : 재료의 임피던스,

ρ : 재료의 밀도,

V_p : 재료의 P파 속도

실험에서 얻어진 모형의 주재료인 고강도 그라우트의 P파 속도 (V_m)는 4,010m/sec, 밀도 (ρ_m)는 2.3g/cm³이며, 유리판의 P파 속도 (V_g)는 4,580m/sec, 밀도 (ρ_g)는 2.23g/cm³이다. 따라서 모형의 주재료와 유리판의 탄성과 임피던스 비는 다음의 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\frac{Z_g}{Z_m} = \frac{2.23\text{g/cm}^3 \times 4,580\text{m/sec}}{2.3\text{g/cm}^3 \times 4,010\text{m/sec}} = 1.107 \quad (2)$$

계산 결과 주재료와 유리판의 임피던스 비는 1:1.1 정도로 거의 차이가 나지 않는다. 따라서 유리판은 모형내에서 갈라져 있는 틈의 역할만을 할 뿐, 탄성파를 흡수하거나 굴절시키지 않을 것으로 판단되며, 유리판을 이용한 절리모사는 적절하다고 판단된다.

3. 축소 모형 실험결과 분석

3.1 파쇄입도 측정 결과

발파 후 얻어진 파쇄물의 입도는 실험실에서 체 (sieve)를 이용한 방법으로 분석되었다. 가장 큰 체의 규격을 벗어나는 파쇄물은 자를 이용해서 파쇄물의 단축방향 길이를 측정하였으며, 이 길이를 파

쇄물의 크기로 결정하였다. 분석된 결과는 입도분포곡선으로 작성되었으며, 이 곡선으로부터 내삽에 의한 방법으로 파쇄물의 평균크기 (X_{50})를 결정하였다. 측정된 파쇄물의 크기는 Table 2와 같다.

3.2 절리간격이 파쇄물의 크기에 미치는 영향

Table 2에서 동일한 절리방향을 가진 경우에 절리간격이 클수록 파쇄물의 크기는 커지는 경향을 보였다. 그러나 절리간격의 영향은 절리방향에 따라 다르게 나타났다. 절리간격에 따른 파쇄물의 평균크기 차이는 절리방향이 0°일 때 가장 크게 나타났으며, 각도가 증가할수록 점차 감소하여 90°를 이룰때 가장 작게 나타났다. 즉 절리방향이 0°일 때, 절리간격이 1cm와 3cm인 경우의 평균크기는 59% 차이를 보이나, 30°인 경우는 45%, 60°인 경우는 41%, 90°인 경우는 37%로 점차적으로 그 차이가 작아지는 경향을 보였다. Fig. 2에는 절리방향과 절리간격에 따른 파쇄물의 입도분포 곡선을 도시하였다. 이 그림에서도 절리방향의 영향이 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, 절리방향이 0°에서 90°로 바뀔때 따라 입도분포곡선이 절리간격에 관계없이 점차 일치해가고 있음을 알 수 있다.

3.3 절리방향이 파쇄물의 크기에 미치는 영향

Fig. 3은 각각 절리간격이 1cm, 2cm, 3cm인 경우 절리방향에 따른 파쇄물의 입도분포곡선을 도시한 그림이다. 절리방향이 파쇄물의 평균크기에 미치는 영향은 모형실험과 현장조사에서 같게 나타났다. 절리간격이 같을 때 절리방향이 30°인 경우에서 파쇄물의 평균크기가 가장 작게 나타났으며, 절리방향이 0°와 90°인 경우에서 크게 나타났다. 다만, 절리간격이 2cm인 경우에는 0°와 90°에서 가장 작은 파쇄물의 평균크기를 보였으며, 60°인

Table 2. Result of analysis for mean fragment size

Joint direction	Joint spacing = 1 cm	Joint spacing = 2 cm	Joint spacing = 3 cm
0°	16.4 mm	21.6 mm	39.8 mm
30°	15.7 mm	22.5 mm	28.6 mm
60°	17.8 mm	24.7 mm	30.3 mm
90°	19.7 mm	21.4 mm	31.2 mm

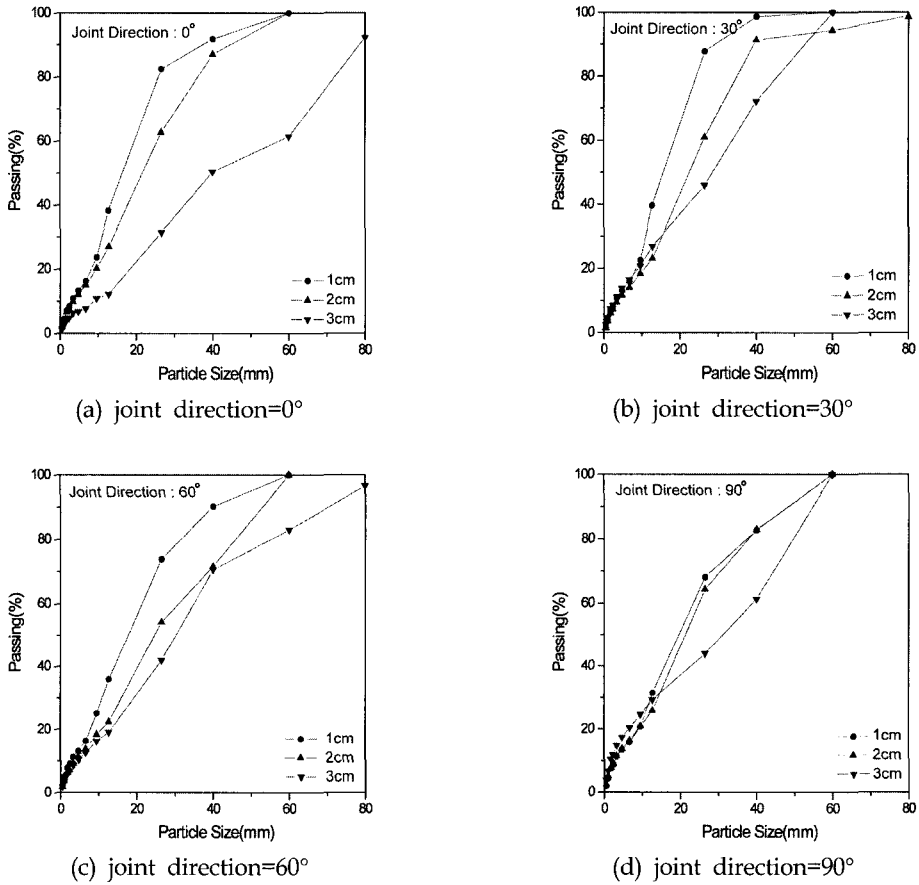


Fig. 2. The fragmentation curves in case the joint direction is 0°(a), 30°(b), 60°(c) and 90°(d).

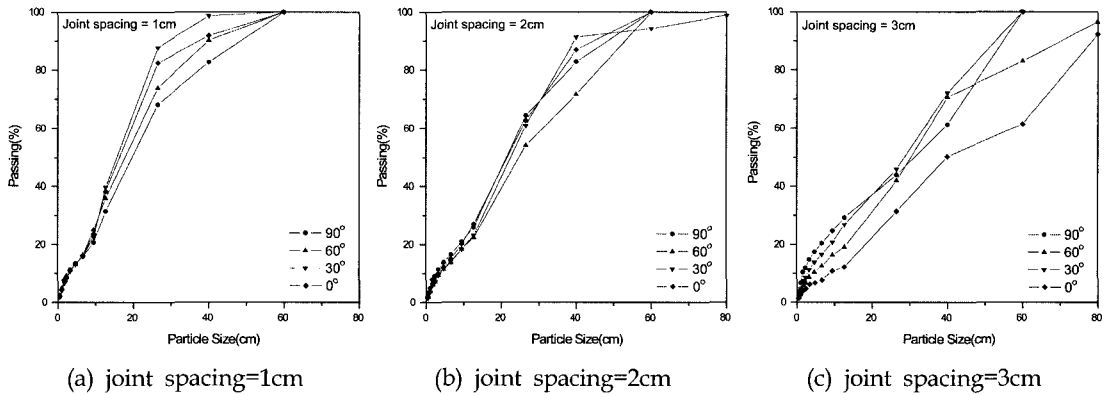


Fig. 3. The fragmentation curves in case the joint spacing is 1cm, 2cm and 3cm.

경우에 가장 큰 파쇄물의 평균크기를 발생시켰다. 30° 이하를 이룰 때 가장 작게 됨을 알 수 있다. 따라서 파쇄물의 크기는 절리방향이 벤치방향과

3.4 절리방향과 파괴면 형상의 관계

절리방향에 따라 파괴면의 형상은 차이를 보인다 (이 연구에서 파괴면이란 발파공의 옆에 수직인 측면에 나타나는 파괴면을 가리킨다). 절리방향이 0° 인 경우에는 파괴면의 각도가 자유면과 수직하거나 작은 예각으로 나타났다(Fig. 4(a)). 이 경우 절리간격에 관계없이 절리를 고려하기 위해 삽입된 유리판의 양끝까지 파괴가 이루어졌다. 절리방향이 30° 인 경우는 절리간격에 관계없이 파괴면의 각도는 자유면과 60° 정도를 이루는 것으로 나타났다(Fig. 4(b)). 파괴면이 자유면과 이루는 60° 의 각도는 절리면과는 수직을 이루는 것으로서 절리면에 수직인 방향으로 파괴면이 발생했음을 가리킨다. 이런 현상은 절리면 방향이 자유면과 60° 를 이루는 경우에도 나타난다(Fig. 4(c)). 이 경우 파괴면의 각도는 자유면과 30° 를 이루게 되며, 절리면과는 수직인 방향이 된다. 반면 절리방향이 90° 인 경우에는 발파공에 가까운 절리면에서 더 이상의 파괴가 진행되지 못하고 절리면을 따라서 자유면에 수직인 방향으로 파괴면이 형성되었다

(Fig. 4(d)). 파괴면의 방향이 절리면과 수직을 이루게 되는 것은 뇌관의 폭발로 발생한 탄성과 중절리면에 가장 먼저 도달하는 것이 절리면에 수직하게 입사하는 것이며, 수직하게 입사된 탄성과의 에너지가 최대가 되기 때문이다. 이 때 절리면에 가장 먼저 도달한 탄성은 압축파로서 절리면에 탄성과의 입사방향과 수직인 방향, 즉 절리면에 평행한 방향으로 인장응력을 발생시키게 되며 이로 인해 절리면에 수직인 파괴면이 발생하게 된다.

4. 축소 모형에 대한 실험과 현장조사 결과 비교

4.1 블록크기(절리간격)의 영향

현장조사에서 얻어진 블록크기와 파쇄물의 평균크기 관계는 Fig. 5와 같다. 현지암반의 블록크기가 커질수록 파쇄물의 평균크기도 커지는 것으로 나타났다. 축소 모형 실험에서 발파 이전의 블록크기는 절리간격으로 표현될 수 있다. 축소 모형의

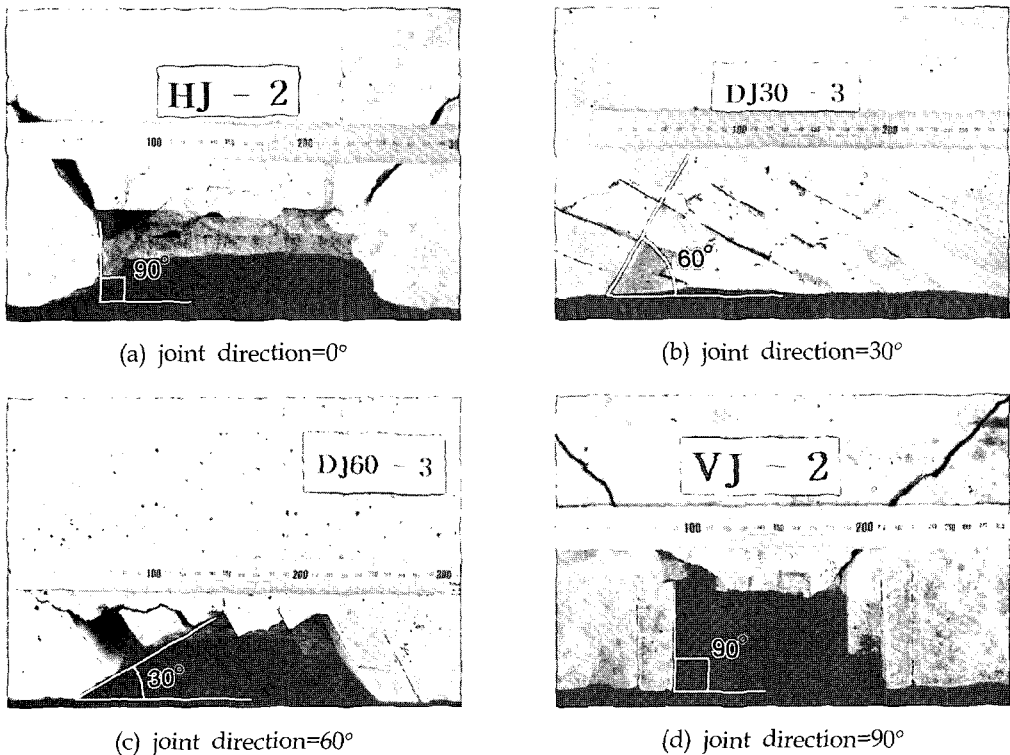


Fig. 4. The blasted shape of the model in case the joint direction is 0° (a), 30° (b), 60° (c) and 90° (d).

발파실험 결과 얻어진 파쇄물의 평균크기를 절리 간격에 대해 표현하면 Fig. 6과 같다. 이 그림에서 파쇄물의 평균크기는 절리간격의 증가에 따라 커지는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Fig. 5의 현장조사 결과와 같다.

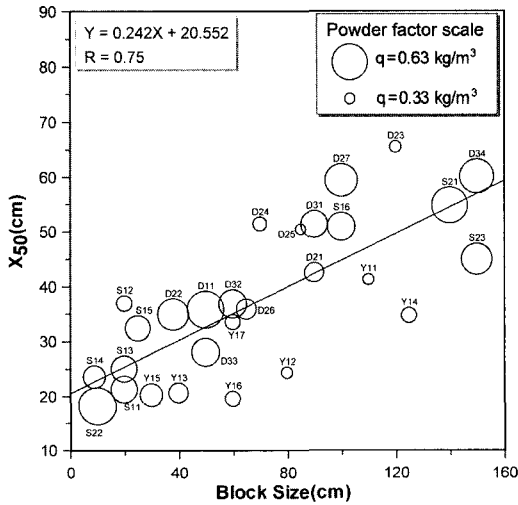


Fig. 5. Relationship between the block size in the natural condition and the mean fragment size(D11: 1st bench of Donghae 1-mine; D32: 2nd bench of Donghae 3-mine; S12: 2nd bench of Sinki 1-mine; Size of the circle: magnitude of powder factor). (after Choi et. al(2004))

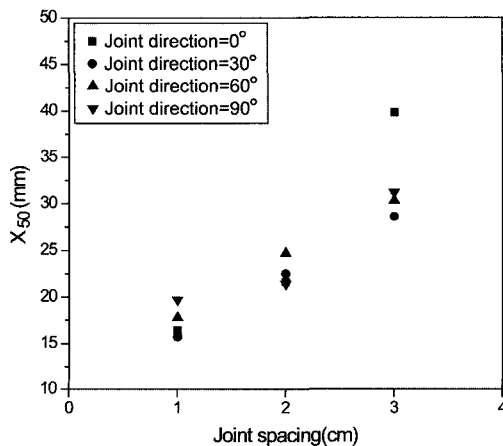


Fig. 6. Relationship between the joint spacing of model and the mean fragment size.

4.2 절리방향의 영향

Fig. 7은 최용근 외(2004)가 절리방향에 따른 파쇄물의 평균크기 변화를 일반화된 식으로 표현하기 위해 현장조사에서 얻어진 절리방향과 파쇄물의 평균크기 변화 관계를 도식한 것이다. 또한 식 (3)은 Fig. 7에서 절리방향과 파쇄물의 평균크기 변화 관계를 회귀분석하여 얻어진 함수이며, Fig. 7에 y축 방향의 위치를 다르게 하여 실선과 점선으로 표시되어 있다. 이 식은 절리방향에 따른 파쇄물의 크기변화 양상을 표현하는 가중치 형태의 함수이며, 절리방향이 20°~30° 부근에서 파쇄물의 평균크기가 가장 작은 값을 갖게 되고, 70°~80° 부근에서 가장 큰 값을 갖게 됨을 가리킨다.

$$k = 0.4 \cdot \sin 3(\alpha + 70^\circ) + 0.9 \quad (3)$$

여기서 α : 절리주향과 벤치주향이 이루는 각도 (°)

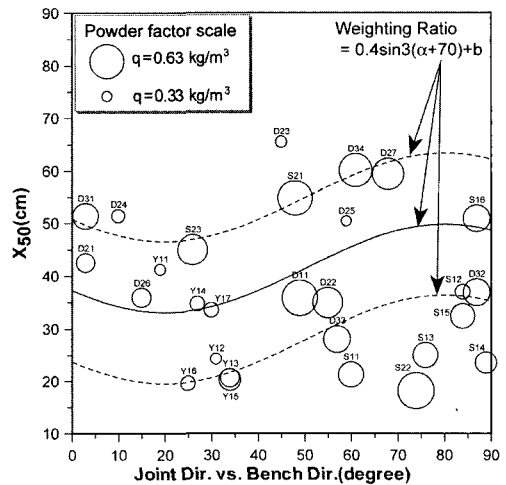


Fig. 7. The weighting factor respected to the relationship between the joint direction and measured mean fragment size(after Choi et. al(2004)).

Fig. 8은 식 (3)을 축소 모형 실험에서 얻어진 절리방향에 따른 파쇄물의 평균크기와 함께 도식한 그림이다. 이 그림으로부터 절리방향에 따른 파쇄물의 평균크기 변화 양상은 현장조사와 모형실험에서 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 예를 들면 절리간격이 1cm인 경우에 절리방향에 따른 파쇄물의 평균크기 변화는 현장조사의 회귀분석으로

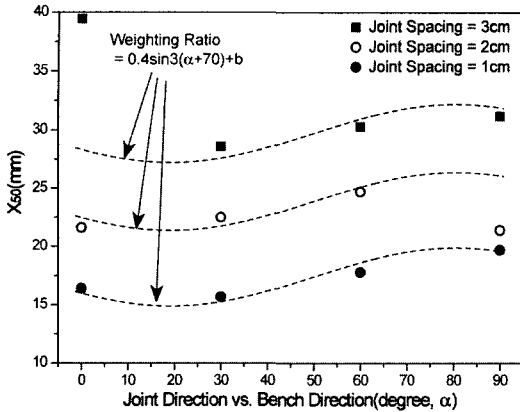


Fig. 8. The variation of the average size of the fragment with respect to the joint direction.

부터 얻어진 식 (3)의 그래프와 정확히 일치하며, 절리간격이 2cm와 3cm인 경우에는 회귀분석 그래프와의 편차가 커지지만 전체적인 경향은 잘 부합되는 것으로 나타났다. 현장에서 조사된 주절리군이 모든 조사지역에서 경사각 70° 이상의 수직에 가까운 절리로 평가되었으므로 절리방향과 간격이 암석 파쇄도에 미치는 영향을 검증하기 위한 축소 모형 실험은 수직절리만을 고려한 형태로 이루어졌다. 실험결과 절리방향이 0° 또는 30°에서 파쇄물의 평균크기가 가장 작게 되는 것으로 나타났으나, 절리방향이 0°이고 절리간격이 저항선의 0.5배를 초과하는 경우에는 절리면을 따라 블록이 분리

되는 현상이 발생하여 대형 블록이 만들어지고 따라서 파쇄물의 평균크기가 커지는 현상이 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 축소 모형을 이용한 발파실험을 통해 현지암반의 블록크기와 절리방향이 암석 파쇄도에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과 절리간격이 넓어질수록 파쇄물의 평균크기가 증가하며, 절리방향이 30°이내에서 파쇄물의 평균크기가 가장 작게 되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 현지암반의 블록크기와 절리방향이 암석 파쇄도에 영향을 미친다는 최근의 연구와도 잘 부합되는 것이다.

참고문헌

1. 최용근, 이정인, 이정상, 김장순, 2004, 벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 22, No. 3, pp. 1-12.
2. Rustan, A., 1990, The importance of using joints to achieve scaled fragmentation in magnetite concrete used for sublevel blast models, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1/2/3, pp. 425-438.



최용근

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)지오제니컨설팅트 이사



이정인

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과 공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과 공학석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대학원 자원
공학과 공학박사

Tel : 02-880-7221, E-mail : cilee@snu.ac.kr
현재 : 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수