

## 불연속면의 방향성이 암발파에 미치는 영향에 관한 고찰

정원준, 김선홍 ((주)유신코퍼레이션)

### 1. 서론

최근 지하철, 지하저장소, 터널 등 지하공간을 이용하는 건설공사가 크게 증가하고 있다. 우리나라는 산지가 국토의 2/3를 차지하고 있는 바 지하공간 개발에 있어서 암반 굴착은 피할 수 없다. 암반 굴착은 폭약을 이용한 발파굴착과 TBM, 브레이커 등을 이용하는 기계식 굴착방법이 있다. 기계식 굴착방법은 주변암반에 미치는 영향을 최소화 할 수 있고 굴착면을 미려하게 할 수 있어 지하 구조물 안정화에 상대적으로 유리하나 비용이 많이 들어 경제성이 저하되는 단점이 있다. 반면, 폭약을 이용한 암발파 굴착은 기계굴착에 비해 비용이 적게 들어 상대적으로 경제성이 뛰어난 장점이 있으나 잘못된 암발파는 여굴을 크게 발생시킬 수 있고 지하구조물 자체의 안정성에도 악영향을 미친다는 단점이 있다. 이러한 문제점에도 불구하고 암반 굴착시 주로 발파굴착이 이용되고 있으므로 암발파 굴착시 나타나는 문제점과 영향인자를 분석하여 정확한 발파가 이루어지게 할 수 있는 연구가 필요하다.

암발파에 영향을 미치는 요소로는 천공경, 천공장, 최소저항선 등 발파설계인자와 화약의 종류 및 특성에 관한 인자, 그리고 암반의 강도, 불연속면 특성등 암반의 역학적 특성에 관한 인자 등이 있다. 그 중에서도 불연속면의 방향, 간격 등은 충격파의 전달, 가스압의 팽창으로 인한 발파 파괴 메카니즘에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

Singh and Sastry(1987)는 Chunar sandstone을 이용하여, 600 mm × 350 mm × 150 mm에 50 mm의 계단 높이를 가지는 모델에 절리가 발파면에 평행한 조건, 절리가 발파면에 수직인 조건, 그리고 절리가 발파면에 각도를 가지는 3가지 경우에 대하여 경사를 0°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°로 총 10가지로 하여 발파 실험을 실시하였다. 그 결과 절리가 평행한 모델에서 최대 누두공 체적이 발생하였고, 수직인 경우는 심한 백브레이크(back break)가 발생하였으며, 각도를 가지는 경우는 지그재그면을 가져 발파면이 거칠었다. 즉 절리의 방향성이 균열의 생성과 성장에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Chakraborty et al.(1994)는 시멘트와 모래를 1:8로 배합하여 암반모델을 만들고 절리가 없는 경우, 평행한 경우, 수직인 경우의 3가지에 대해 V-cut의 발파패턴으로 발파 실험을 실시하였다. 그 결과 비장약량은 절리 모델에서 더 낮은 값을 가지나 파쇄는 절리가 없는 경우가 가장 좋았으며 수평절리 모델의 경우 더 깊은

발파공이, 수직절리모델의 경우에는 더 많은 발파공이 있어야 양호한 파쇄가 이루어짐을 보였다. Badal(1994)은 실험을 통해 수평 절리가 발달한 암반은 높은 비장약량을 요구하지만 여굴과 같은 불규칙한 면을 나타내며, 발파 대상면에 평행한 절리 모델에서 발파 결과로 얻어지는 파쇄는 일정한 형태를 보이며 현장에서는 대파의 암석 블록(boulder)으로 나타나고 발파면은 깨끗하게 나타난다고 하였다. 벤치면에 수직인 절리 모델의 발파 결과는 일정한 파쇄 정도와 작은 비장약량 값을 보이며, 백브레이크가 관찰되며, 바닥면과 발파면은 불규칙하게 나타남을 보였다.

본 연구에서는 불연속면의 방향성이 암발파에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 수치해석을 이용하여 접근하고자 한다. Itasca사가 개발한 개별요소법을 이용하는 상용 프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code 2 Dimension)를 이용하여 암반모델을 구성하고 불연속면이 없는 경우, 불연속면의 각도가 각각 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 90°인 경우에 대하여 수치해석을 실시하고 불연속면의 방향성이 발파에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

## 2. 해석 모델 및 조건

### 2.1 모델 물성치 결정

PFC2D는 강성체로 간주되는 원형의 입자인 볼(ball)요소와 벽(wall)요소로 모델을 구성한다. 수치모델은 볼의 크기와 볼 사이의 결합강도, 강성도, 마찰계수 등의 미소물성(micro-property)을 입력하여 구성되는데, 미소물성을 시행착오법으로 적절히 변화시켜 대상 암반의 역학적 특성을 가지도록 조정함으로써 완성된다. 본 해석에 사용한 수치모델은 암석의 일축압축시험(Uniaxial Compression Test), 압열인장시험(Brazilian Test) 등의 실내시험모사를 통해 구성되었다. 모델 구성을 위한 미소물성치는 표 1과 같다.

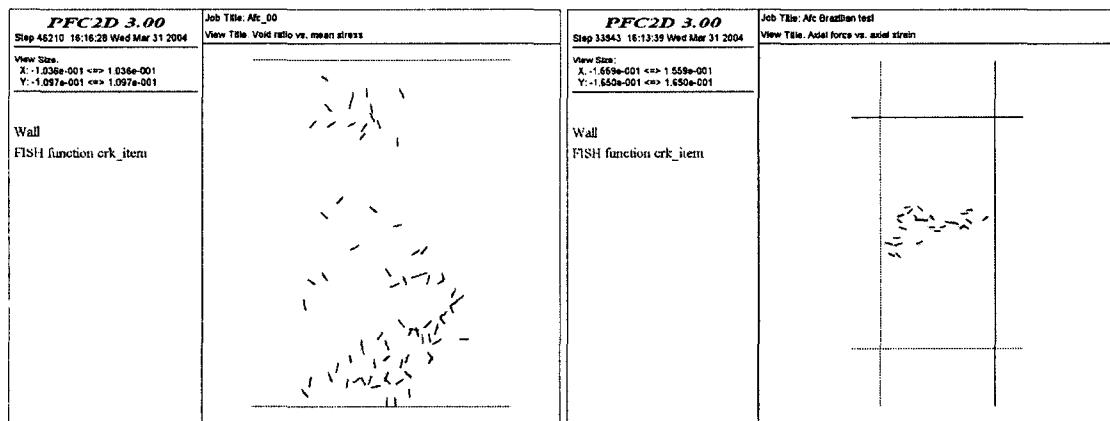
표 1. 모델구성을 위한 미소물성치(micro-property)

항 목	수치
최소 볼 반경	2 mm
최대 볼 반경/최소 볼 반경	1.66
볼 접촉 계수(ball contact modulus)	88 MPa
볼의 수직 및 전단 강성도 비(ball normal/shear stiffness)	1.0
볼 밀도(ball density)	2,630 kg/m <sup>3</sup>
볼의 수직 결합강도(ball normal bond strength)	100 MPa
볼의 평균수직결합강도의 표준편차 ball mean normal bond strength standard deviation	20 MPa
볼의 전단결합강도(ball shear bond strength)	100 MPa
볼의 평균전단결합강도의 표준편차 (ball mean shear bond strength standard deviation)	20 MPa
볼의 마찰계수(ball friction coefficient)	0.5

볼의 최소 크기는 2 mm, 볼의 최대크기와 최소크기의 비율은 1.66으로 설정하였다. 볼의 밀도는  $2,630 \text{ kg/m}^3$ , 변형계수를 결정하는 미소물성인 볼 사이의 수직 및 전단강성도는 모두 88 MPa로 설정하였다. 또한, 모델의 강도를 결정하는 미소물성치인 수직 및 전단결합력은 평균 100 MPa에 표준편차 20 MPa의 값을 가지도록 하였다. 이상의 미소물성치로 일축압축시험과 압열인장시험을 실시한 결과를 그림 1~2와 표 2에 정리하였다. 실내시험 모사를 통해서 암반 모델이 가지는 역학적 특성을 일반적인 경암의 역학적 특성과 유사하게 설정하였다. 본 모델의 변형계수는 46.1 GPa, 일축압축강도는 110.4 MPa, 간접인장강도는 25.8 MPa 이다. 일축압축시험은 그림 1 (a)와 같이 크기가 100 mm × 200 mm인 암석 시험편을 만들고 모델의 상하에 벽 요소를 배열하여 상하 벽요소를 가압판으로 삼아 힘을 가하여 시험을 모사한다. 압열인장 시험은 그림 1(b)와 같이 직경이 100 mm인 시험편을 만들고 모델의 좌우에 벽요소를 배열하여 힘을 가한다.

표 2. 실내시험 모사 결과

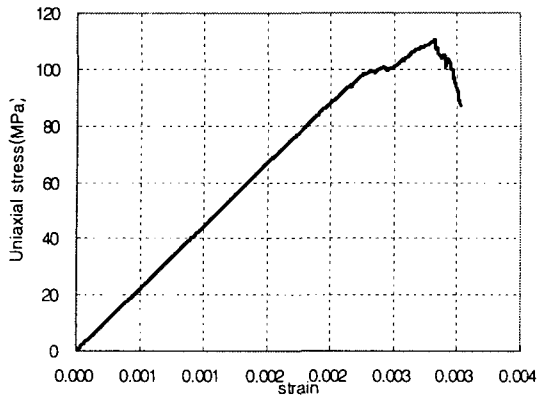
항 목	수 치
일축압축강도	110.4 MPa
간접인장강도	25.8 MPa
변형계수	46.1 GPa
포아송비	0.10



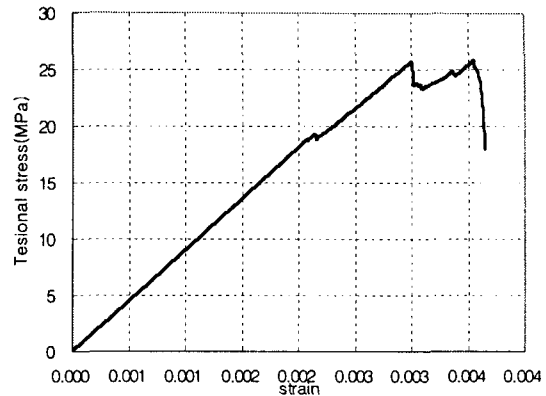
(a) 일축압축시험

(b) 압열인장시험

그림 1. 암석의 실내시험 모사



(a) 일축압축시험

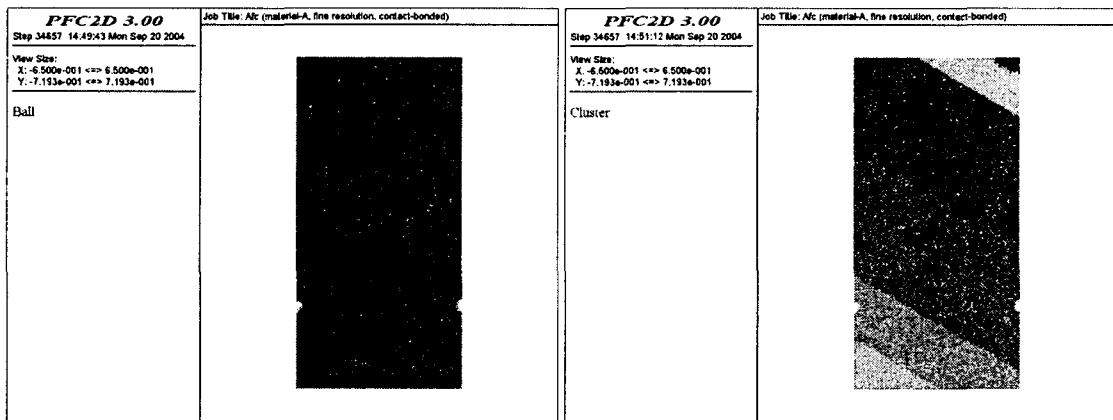


(b) 압열인장시험

그림 2. 응력-변형도 곡선

## 2.2 암반모델의 구성

실내시험모사를 통해 얻어진 미소물성치로 600 mm × 1200 mm 크기에 그림 3(a)와 같이 불연속면이 없는 경우와 그림 3(b)와 같이 굴착예정선과 불연속면의 각도를 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 90°로 발생시켜 모델을 설정하였다.

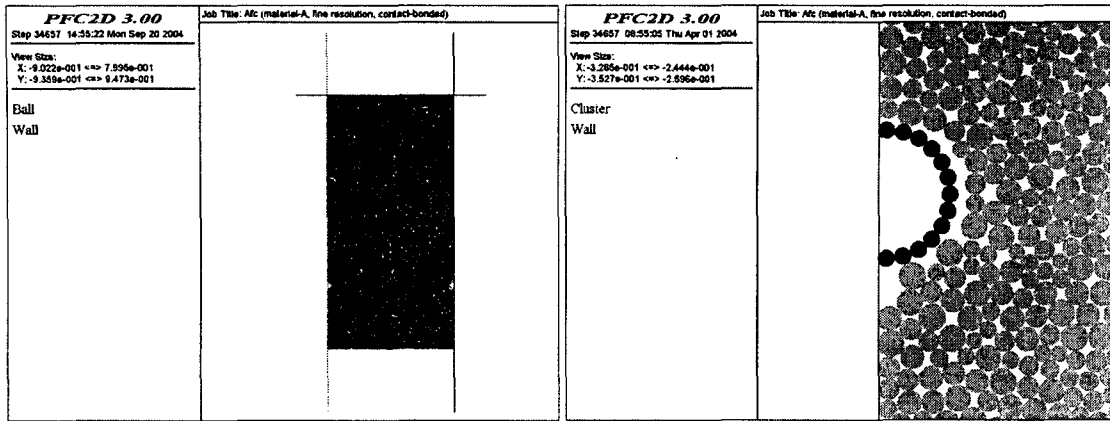


(a) 불연속면이 없는 경우

(b) 불연속면이 존재하는 경우(30°)

그림 3. 암반모델

그림 4(a)는 경계조건을 나타내는 그림으로 모델의 상부와 좌·우측부에 벽요소를 배열하여 고정경계조건을 설정하였고 하부는 개방하여 발파시 자유면의 역할을 하도록 하였다. 발파 현상을 축대칭 현상으로 간주하여 발파공의 절반만을 모델링 하였는데, 그림 4(b)와 같이 암반 모델 하부에서 300 mm 위 좌·우 양 끝단에 2공을 배열하였다. 발파공의 직경은 40 mm가 되도록 하였다.



(a) 경계 조건 (b) 발파공 형상  
그림 4. 경계조건 및 발파공 형상

### 2.3 발파압력의 산정

발파압력은 주로 경험식에 의해 추정되며 폭약의 폭속과 화약의 비중이 발파압력에 민감한 요인으로 작용한다. 공벽에 작용하는 압력은 장약공의 직경과 폭약의 직경에 따라 결정된다. 식 (1)은 단위화약량 1kg에 대한 최대폭굉압력을 계산하는 경험식이다(유숙희, 1993).

$$P_{Det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SG_e \times V_e^2}{1 + 0.8 SG_e}, \quad P_B = P_{Det} \times \left( \frac{d_c}{d_h} \right)^3 \quad (1)$$

여기서,

$P_{Det}$  : 폭굉압력 (kbar)

$P_B$  : 공벽에 가해지는 압력(kbar)

$V_e$  : 폭속(ft/sec)

$SG_e$  : 폭약의 비중

$d_c$  : 폭약의 직경(약경)

$d_h$  : 장약공의 직경(천공경)

이다.

한편, 공벽에 작용하는 발파압력은 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 시간이력을 적용하여야 하며 식 (2)와 같이 Starfield가 제안한 창함수(window function)를 이용하여 시간이력을 적용한다(Histake etc, 1983).

$$P_d(t) = 4P_B \left( \exp\left(-\frac{Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(\sqrt{2}Bt) \right) \quad (2)$$

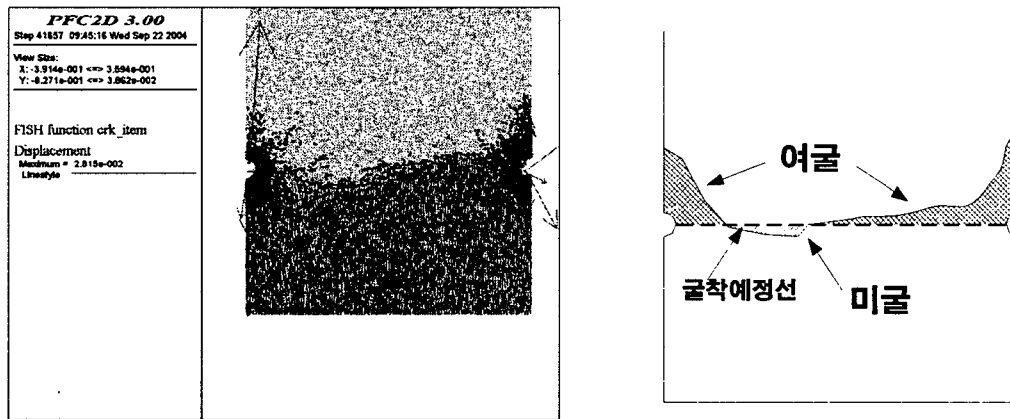
여기서,  
 B : 16,338인 하중상수  
 t : 시간

터널 최외곽공의 경우를 가정하여 식 (1)로 공벽에 미치는 압력을 계산하면 약 75 MPa이다. 본 연구에서는 불연속면의 방향성이 암발파에 미치는 영향을 고찰함이 목적이므로 발파압력, 즉 장약량에 따른 영향을 고려하지 않았으므로 모든 모델에서 동일하게 75 MPa의 발파압력을 적용시켜 해석을 수행하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 불연속면이 없는 암반 모델

불연속면이 없는 암반 모델의 해석결과는 그림 5와 같다. 그림 5는 발파후 1.056 milli-second 후의 결과를 나타낸 그림이다. 그림 5(a)는 균열 생성모습으로 발파공 주변에는 방사형의 균열대가 형성되고 있으며 방사형 균열 끝부분에서 균열이 진전되어 서로 연결됨이 관찰된다. 화살표는 입자에 발생하는 변위벡터를 나타낸 것이다. 균열의 형상과 변위발생경향으로부터 굴착선의 프로파일을 도시하면 그림 5(b)와 같다.

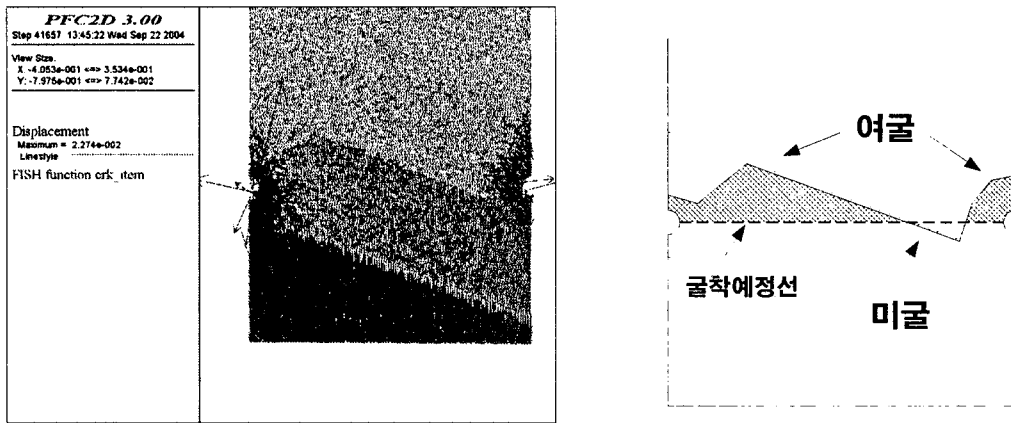


(a) 균열 및 변위벡터 (b) 굴착선 프로파일  
 그림 5. 불연속면이 없는 경우 해석 결과도

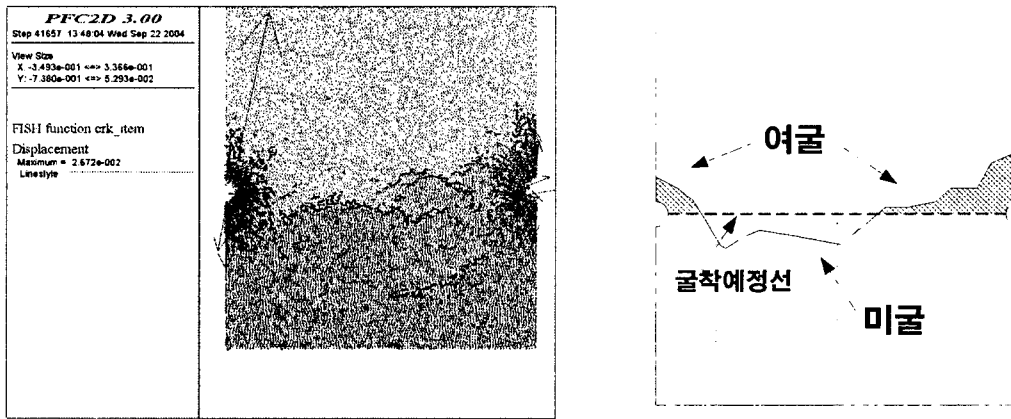
#### 3.2 불연속면이 존재하는 암반 모델

불연속면의 방향이 굴착예정선과 이루는 각도가 45° 이상이 될 경우 불연속면에 의한 영향이 줄어들었다. 굴착예정선과 평행한 불연속면을 가진 모델과 10°, 20°, 30°의 각도를 가진 모델의 경우 새로운 균열에 의해 굴착선이 형성되기보다는 기존 존재하는 불연속면을 따라 굴착선이 형성되어 여굴과 미굴의 발달이 상당

히 크게 나타났다. 즉 불연속면의 존재가 새로운 균열의 발생을 방해하고 기존재하는 불연속면으로 파괴를 유도하고 있었다. 따라서, 불연속면과 발파공의 배열이 여굴과 미굴형성에 많은 영향을 미치는 것으로 판단되며 깨끗한 굴착을 위해서는 위 현상을 고려하여 발파공의 위치 변경 또는 무장약공 배치등의 발파패턴 변화가 필요할 것이다. 반면, 불연속면의 각도가 45°, 60°, 90°인 모델의 경우 발파로 인해 새로이 형성된 균열에 의해 굴착선이 형성되고 있어 불연속면의 방향성에 의한 영향이 앞선 모델들에 비해 상대적으로 작았다. 그림 6과 7은 불연속면과 굴착예정선과의 각도가 20°인 모델과 90°인 모델의 결과를 나타낸 것이다.



(a) 균열 및 변위벡터 (b) 굴착선 프로파일  
그림 6. 불연속면이 각도가 20°인 경우 해석 결과도

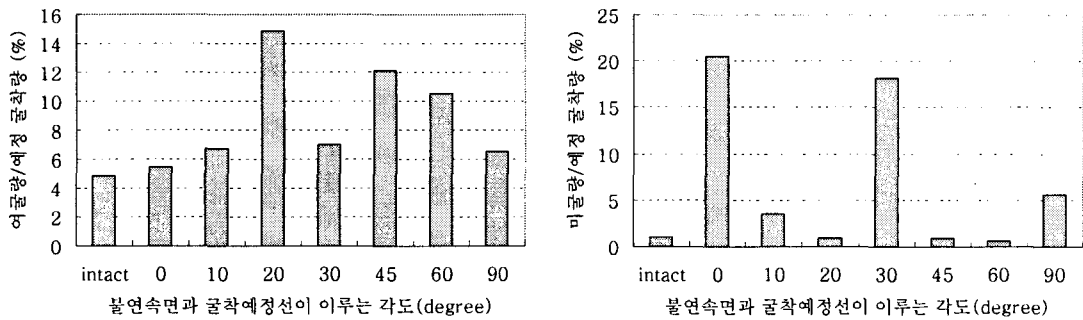


(a) 균열 및 변위벡터 (b) 굴착선 프로파일  
그림 7. 불연속면이 각도가 90°인 경우 해석 결과도

발파로 인한 여굴량은 표 3과 그림 8과 같이 불연속면의 각도가 20°인 경우가 예정굴착량에 대한 비율이 14.9%로 최대였으나 각도가 45°이상인 경우가 45°이하인 경우에 비해 대체로 더 큰 비율을 나타냈다. 미굴의 양은 0°일 경우가 예정굴착량의 20.5%로 최대를 나타냈다. 이것은 발파공 앞에 기존재하는 불연속면으로 인해 예정굴착선쪽으로 균열전파가 이루어지지 못하여 나타난 것으로 판단된다.

표 3. 여굴량과 미굴량

구분	여굴		미굴	
	여굴량 (m <sup>3</sup> )	굴착량에 대한 비율(%)	미굴량 (m <sup>3</sup> )	굴착량에 대한 비율(%)
intact	0.0087	4.83	0.0018	1.0
0°	0.0098	5.44	0.0369	20.5
10°	0.0121	6.72	0.0064	3.56
20°	0.268	14.89	0.0016	0.89
30°	0.0126	7.00	0.0327	18.2
45°	0.0218	12.11	0.0016	0.89
60°	0.019	10.56	0.0012	0.67
90°	0.0118	6.56	0.010	5.56



(a) 여굴량

(b) 미굴량

그림 8. 여굴량과 미굴량

#### 4. 결과 요약 및 논의

본 연구는 개별요소법을 기반으로 하는 상용프로그램인 PFC2D를 이용하여 불연속면의 방향성이 암발파 결과에 미치는 영향을 고찰하였으며 본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 해석 결과, 불연속면은 발파로 인한 균열의 생성과 전파를 차단하고 불연속면 방향으로 파괴를 유도한다. 이러한 경향은 본 해석에서 경사가 0°~30°인 경우처럼 불연속면의 경사가 예정굴착선과 평행에 가까울수록 더 잘 나타났다.

2) 여굴량은 대체로 불연속면과 예정굴착선과의 각도가 45°이상일 때 더 컸으며 미굴량은 특별한 경향을 나타내지 않았다. 최대 여굴량은 불연속면의 각도가 20°일 경우였고 최대미굴량은 불연속면의 각도가 예정굴착선과 평행일 경우였으



나 이것은 발파공의 위치에 의한 영향때문으로 판단된다.

3) 일정한 방향성을 가지는 불연속면이 존재하는 암반에서의 발파는 발파공의 위치, 공간격을 조절함으로써 여굴과 미굴을 제어할 수 있을 것으로 판단되며 다음의 추가 연구가 필요하다.

- 2개 이상의 절리군을 가질 경우
- 3차원 해석을 통한 연구
- 여굴과 미굴 제어를 위한 발파패턴에 관한 연구

### 참고 문헌

1. Badal, R., 1994, Controlled Blasting in Jointed Rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, No. 1, pp. 79~84.
2. Chakraborty, A. K., Jethwa, J. L. and Paithankar, A. G., 1994, Assessing the Effects of Joint Orientation and Rock Mass Quality on Fragmentation and Overbreak in Tunnel Blasting, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 471~482.
3. Histake, M., Sakurai, S., ITO, T., Kobayashi, Y. 1983, Analytical contribution to tunnel behavior caused by blasting, *Proceedings Fifth Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Vol 2, E191-E194
4. Itasca Consulting Group Inc., 1999, PFC User's Manuals.
5. Singh, D. P. and Sastry, V. R., Role of Weakness Planes in Bench Blasting - A Critical Study, *Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Keystone, Colorado, pp. 135~146.
6. 유숙희, 1993, 발파에 의한 암석 파쇄의 수치해석 모델에 관한 연구, 한양대학교 공학 석사학위 논문, 79p.