

## 암반발파에서 파단면 제어를 위한 수치해석적 연구

조상호<sup>1)</sup>, 김승곤<sup>1)</sup>, 양형식<sup>2)</sup>, 가네꼬 카츠히코<sup>3)</sup>

### 초 록

터널발파 및 도로사면에서 보다 더 적극적인 파단면형성을 위해 윙홀 발파(Wing-Hole Blasting, WHB)가 제안된 바 있으며 최근 현장에 적용단계에 와있다. 본 연구에서는 WHB 발파설계에 필요한 기초자료를 얻기 위한 목적으로 노치를 가진 발파공을 모델화하여 주변 암반의 파괴과정을 수치해석적으로 검토하였다.

### 1. 서 론

제어발파는 암반터널이나 지하공동 굴착에서 널리 사용되고 있는 발파공법으로서, 여굴 및 미굴을 최소화하여 평활한 파단면을 형성하고, 주위암반의 손상을 최소화하기 위한 발파공법이다. 제어발파에서 파단면의 제어메카니즘은 서로 근접한 발파공으로 부터 전파된 응력파의 상호간에 기인한다. 이것은 응력파의 상호간섭이 일어나기 까지 시간은 각각 독립된 발파로서 균열은 각각의 장약공으로 부터 동심원상으로 신장하는 것을 의미한다 (조상호 외, 2004) 따라서 그 시간범위에서 주변암반의 손상발생은 본질적으로 피할 수 없다. 이 손상의 억제책으로서 공간격을 가능한 짧게하는 것을 고려할 수 있으나 이것은 발파의 경제적 우위성을 현저하게 저하시킨다. 따라서 상기의 문제에 대처하기 위해서는 기폭직후부터 균열진전 방향성의 제어가 가능하도록 장약공과 폭약의 형상, 장약방법 등을 개량할 필요가 있다. 현재까지 제안된 각종의 균열방향 제어발파법은 상기 손상제어의 가능성을 보여준다. 특히 갱도굴진에서 비교적 장공의 발파가 요구되고 있으므로 기술적으로 가능하다면 장약공 형상의 변경이 시공상 가장 적절한 방법이라고 생각되며, 이것을 고려했을때 윙홀발파(Wing-Hole Blasting, WHB)은 상당히 유망한 수법으로 보고된 바 있다(椋외,1992). WHB는 측벽에 노치(notch)를 가진 원형공을 굴착하기 위해서 날개형 비트를 이용하고, 설계 굴착면의 방향과 노치의 방향을 일치시켜 균열방향을 제어하는 발파공법이다.

본 논문에서는 암반발파에서 손상제어효과를 해명하여, 윙홀발파 설계에 필요한

---

1) 전북대학교 자원·에너지공학과  
2) 전남대학교 지구환경시스템공학부  
3) 북해도대학교 대학원공학연구과

기초자료를 얻기 위한 목적으로 그의 암반파괴과정해석을 수치해석적으로 검토한다. 구체적으로는 윙그홀에 대해서 통상폭약과 저비중폭약을 이용한 경우를 해석하고, 각각의 해석결과로 부터 암반의 파괴과정과 최종파단면형태를 수치해석으로 해명한다. 동시에 파단면 형태와 형성에 관하여 고찰을 한다. 추가로 기폭초시정도가 파단면형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 DS뇌관 기폭초기오차를 고려하였다.

## 2. 윙홀 발파(Wing-Hole Blasting, WHB)

윙홀발파법은 균열방향을 적극적으로 제어하기 위한 발파법으로서, 이것은 장약공에 노치를 만들어 노치의 선단부에 인장응력을 집중시켜, 초기균열의 방향을 제어하도록 하는 발파법이다. 장약공에 노치를 넣은 방법으로는 워터젯(water jet)이나 컷터(cutter)를 이용한 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들은 원형장약공을 천공하는 작업과 노치를 넣는 작업이 각각 진행되어야 하므로, 두번의 작업이 필요하게 된다. 여기서, 두 작업을 한번에 마무리 할 수 있는 윙그홀 비트(wing hole bit)를 개발되었다.(Fig.1) 이것은 비트의 선단부에 원형장약공을 천공하면서 비트의 후방에 있는 날개모양의 돌출부가 노치부분을 굴착할 수 있게하므로, 노치를 가진 장약공을 한번의 작업으로서 천공이 가능한 공법이다. (무쿠끼 외, 1992) 윙홀과 비슷한 형태의 노치공을 이용한 균열제어에 관한 연구는 수십년 전부터 이루어져 왔으며, 최근 국내에서도 윙홀비트와 유사한 제품이 발표된 바가 있다.

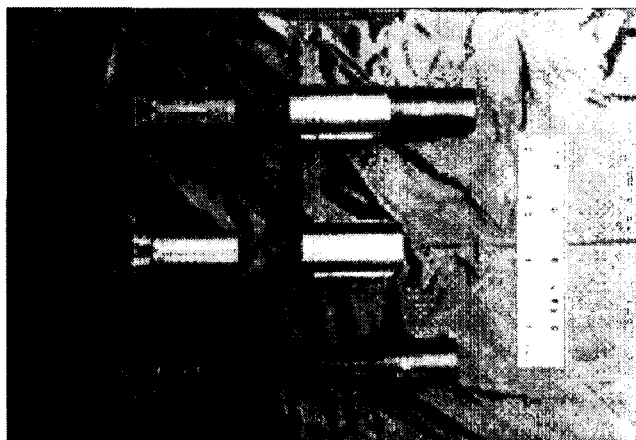


Fig. 1 경암용 윙홀 드릴비트(무쿠끼 외, 1992)

### 3. 윙홀발파에서의 암반파괴과정 해석

#### 3.1 암반파괴과정 해석법

본 연구에서는 동적유한요소 해석법과 파괴역학을 기초로 하여 제안된 암석파괴 프로세스 해석법(조상호 외, 2004)를 적용하였다. 해석모델은 Fig. 2에 나타난것과 같이 자유면에 평행한 3개의 장약공을 가진 일자유면발파를 가정한 것으로 하였다. 또한 발파조건이 균열의 진전프로세스에 미치는 영향을 검토하기 위해서 장약공

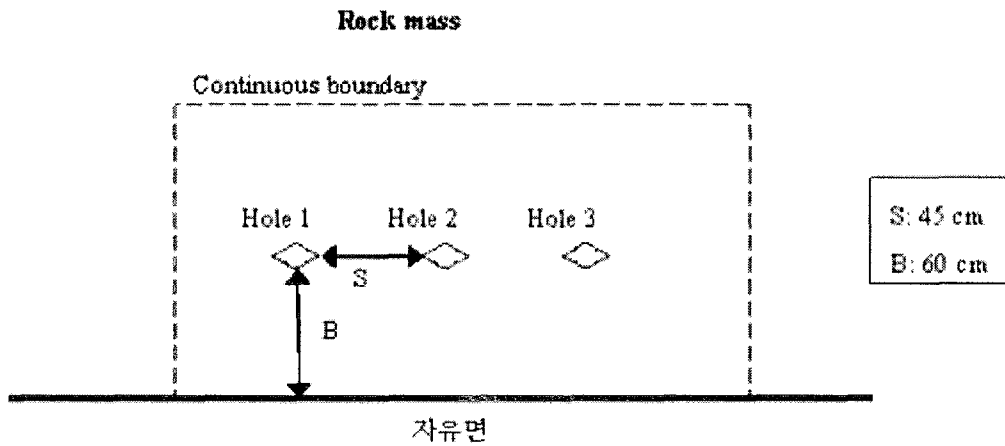


Fig 2 윙홀발파의 해석모델

공간격과 최소저항선비가 3대 4인 모델을 작성하였다. 여기서 모델은 최소저항선(W)과 공간격(S)이 각각 45cm, 60cm가 되게 하였으며, 전전한 경암으로 가정하였으며, Table 1에 역학적 물성치를 나타내었다. 장약공내경은 터널내 제어발파 규격인 직경 45 mm로 하였다. 장약공 공벽에 작용하는 폭발생성가스는 등엔돌피 팽창을 가정한 JWLS상대방정식<sup>3)</sup>을 적용하였다.

$$P = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + C V^{-1} \quad (1)$$

여기서 V는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이 체적의 비에 따라 디카플링 및 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현하도록 하였다. 폭약은 SB용 슬러리폭약 (약경 22mm)의 JWLS변수로서 KHT 코드에 의한 계산치를 사용하였다. 본 연구에서는 윙그홀에 대해서 통상폭약과 저비중폭약을 이용한 경우를 해석한다.

Table 1 원홀발파의 동적파괴과정 해석모델에 적용된 물성치

| Parameter                                | Value |
|--|-------|
| Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )      | 2700  |
| Elastic modulus E (GPa)                  | 80    |
| Poisson's ratio $\nu$                    | 0.25  |
| Average compressive strength $S_c$ (MPa) | 250   |
| Average tensile strength $S_t$ (MPa)     | 18    |
| Fracture energy $G_f$ (Pa·m)             | 300   |
| Coefficient of uniformity $m$            | 5     |
| P wave velocity $C_P$ (m/s)              | 6000  |

### 3.2 해석결과

#### 3.2.1 일반폭약에 의한 암반파괴과정

제발기폭조건은 현행의 발파에서 실현하기 어려운 이상적인 발파조건이므로 DS뇌관의 기폭시차에러를 고려하여 파괴과정해석을 하여 파단면형성에 관하여 살펴보았다. Fig. 3(a)는 해석결과로서 최대주응력 분포와 균열을 보여주고 있다. 여기서 압축응력(-)은 파란, 인장응력(+)은 적색으로 나타내고, 균열은 흑색선으로 표시하였다. 시각은 중심공이 기폭된 시간을 기준으로 한 경과시간이다. 시각50s에서는 중앙의 장약공이 기폭되어 공으로 부터 압축의 응력파가 반경방향으로 전파하고, 이에 뒤따라 인장의 응력파가 전파하고 있다. 이인장응력파에 의해 장약공의 공벽으로 부터 방사상의 균열이 발생하고 있다. 중앙 장약공으로 부터 탁월균열의 진전방향은 자유면, 좌우, 상단면으로서, 좌우방향으로 진전된 균열들은400s간격으로 기폭되는 좌측공과 우측공으로 부터의 균열과 연결된다. 자유면 방향으로의 진전된 균열들은 모두 자유면과 연결되었다. 결과적으로 일반폭약을 사용한 경우 파단면이 형성되었으나 상단면 발파손상영역을 발생시켰다.

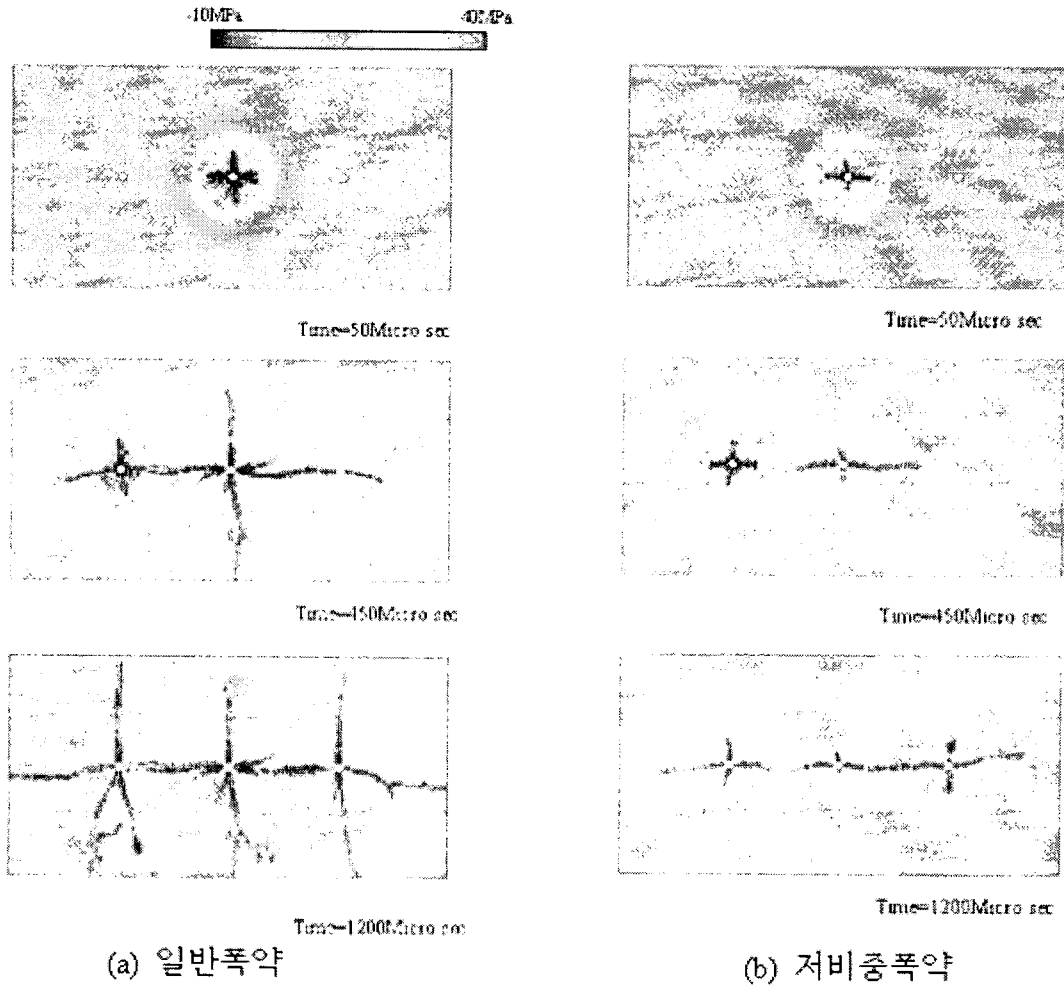


Fig 3 윙홀발파의 동적파괴과정해석 결과

### 3.2.2 저비중 폭약에 의한 암반파괴과정

윙홀에 저비중 폭약을 적용한 경우를 해석한 결과를 Fig. 3(b)에 최대주응력 분포와 균열진전과정으로서 보여주고 있다. 위의 경와 동일하게 시각50s에서는 중앙의 장약공이 기폭되어 공으로 부터 압축의 응력파가 반경방향으로 전파하고, 이에 뒤따라 인장의 응력파가 전파하고 있다. 일반폭약을 사용한 경우와는 달리 자유면방향으로 탁월균열이 발생하지 않았으며, 상단부 암반손상영역이 제어되었다.

다시말하면, 저비중폭약을 사용하면 공간을 연결하는 방향의 균열이 탁월하게 신장하고 파단면이 형성시키고, 암반의 주변손상은 제어할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

저비중 폭약을 사용했음에도 불구하고 자유면으로 부터의 반사파의 영향으로 부터 자유면과 직교 또는 평행한 방향으로 탁월균열이 발생하게 되는데, 이는 선행기폭된

발파공으로 부터 발생된 탁월균열의 방향과 자유면의 존재는 밀접한 관계가 있음을 보여 주고있다. 또한 후속기폭하는 장약공으로 부터 신장하는 탁월균열은 선행기폭된 장약공으로 부터 발생된 탁월균열의 영향을 크게 받는다. 다시말하면 후속기폭된 발파공으로 부터 신장하는 균열의 선단이 선행기폭에 의해 발생된 균열에 어느정도 접근하게 되면 양 균열간에 응력간섭이 발생하여 양 균열이 결합하게 된다. 그러나 이와 같은 조건이 성립하지 않는 경우에는 균열이 결합하지 않는다. 따라서, 공간격이 멀어지면 균열이 장약공사이를 결합하는 가능성이 저하하게 된다.

## 6. 결론

본 연구에서 윈홀발파에서 암석파괴과정을 수치해석적으로 검토하여, 그 균열진전 메카니즘에 대해서 고찰하였다. 본 연구로 부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

일반폭약을 사용한 경우 파단면이 형성되었으나 상단면 발파손상영역을 발생시켰다. 윈홀에 저비중 폭약을 적용한 경우에는자유면방향으로 탁월균열이 발생하지 않았으며, 상단부 암반손상영역이 제어되었다.

## 참고문헌

1. 조상호, 양형식, 金子勝比古, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭초기오차가 암반파괴과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간, Vol. 14, No. 2, 121-132
2. 무꾸끼 외, 1992, 신발파공의 개발, 윈그홀 비트, 윈그홀 블라스팅공법, 터널과 지하, 일본터널기술협회지, Vol. 23(7), 41-45