

## 다단 장약 터널 진동제어 발파의 수치해석적 검증

양형식<sup>1)</sup>, 두준기<sup>2)</sup>, 조상호<sup>3)</sup>, 김원범<sup>1)</sup>

### Numerical Analysis on Controlled Tunnel Blasting by Deck Charge

Hyung-Sik Yang, Joon-Kee Doo, Sang-Ho Cho, Won-Beom Kim

**초 록.** 다단 장약 터널 진동제어 발파에 대하여 개별요소법과 유한요소해석법으로 수치해석적으로 검증하였다. 그 결과, 단당 장약량을 줄이고 다단으로 분산시키면 발파로 인한 파쇄도 효과적이고, 진동도 감소할 수 있음을 보여 주었다. 이러한 현상에 대하여 파괴역학적으로도 설명하였다.

**핵심어 :** 제어발파, 터널, 진동제어, 다단장약, 수치해석

#### 1. 서 론

터널에서 진동이 가장 크게 발생하는 것은 심폐기 부분으로 알려져 있다. 자유면이 제한되어 구속이 크기 때문이며 폭약의 잔여 에너지가 진동을 유발하기 때문으로 설명된다.

본 연구에서는 다단 장약에 의한 터널 진동제어 발파법(두 외, 2003)을 수치해석적으로 검증하였다. 수치해석은 개별요소법 상용 프로그램인 PFC 2D(Particle Flow Code)와 파괴역학을 고려한 유한요소해석법을 이용하여 파쇄의 양상과 진동의 감쇠를 시뮬레이션 하였다.

#### 2. PFC에 의한 파쇄양상 고찰

##### 2.1 수치해석 프로그램

PFC 2D는 개별요소법의 일종인데 개개의 입자요소가 원형의 강성체로서 입자간의 접촉형태는 극히 작은 면적으로 간주하여 접촉점에서 접촉력과 힘-변위 관계식이 성립되어 접촉된 입자간의 결합강도를 규정할 수 있다.

1) 전남대학교

2) 휴먼테크기술사사무소

3) 북해도 대학교

접수일 : 8월 10일

#### 2.2 해석 조건

해석 조건은 다음과 같다.

- 대상 지반 : 화강암(단위중량 2500 kg/cm<sup>3</sup> 범선강성도 1000 MN/m 전단강성도 1000 MN/m 법선결합력 1 MPa 전단결합력 1 MPa 마찰계수 0.5)
- 해석 단면 : 8×10m
- 입자수 : 6000개
- 천공장 : 3.5m

3차원적인 구조이지만 편의상 2차원 구조로 모델링 하였다.(Whittaker 등, 1992) 이 경우 봉상인 화약이 슬릿 상으로 되지만, 등가압력을 고려하므로 파쇄의 모양은 정성적으로 같은 형상을 띄게 된다고 생각된다.

#### 2.3 해석 모델

Fig. 1.은 재래식 발파에 대한 해석 모델로서 Fig. 2.의 중앙 심발 부분을 모사한 것이다. Fig. 3.은 다단장약 발파법의 해석 모델이며 이는 Fig. 4.의 심발 부분을 모사한 것이다.

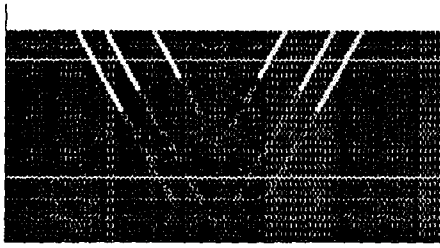


Fig. 1. Traditional V-cut

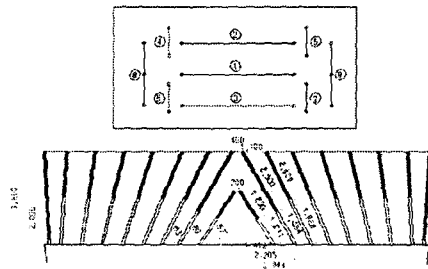


Fig. 2. A pattern of traditional tunnel blasting by V-cut

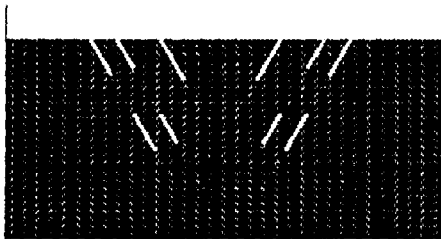


Fig. 3. Deck charged V-cut

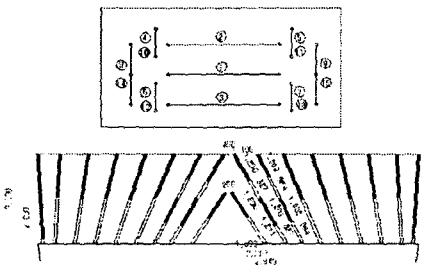
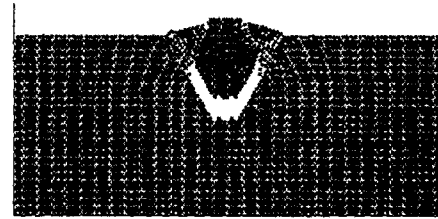


Fig. 4. A pattern of tunnel blasting by deck charged V-cut

2.4 재래식 발파의 시뮬레이션

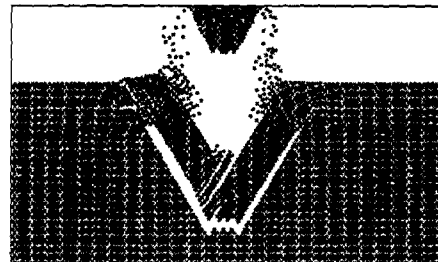
Fig. 5는 폭발 후 25 ms부터 250 ms에 이르는 동안에 암반 입자가 파쇄, 이동되는 모양을 나타낸 것이다.



(a) 25 ms



(b) 100 ms



(c) 150 ms



(e) 250 ms

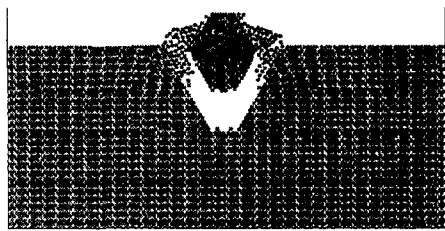
Fig. 5. Particle movement of traditional V-cut blasting

각각의 단차에서 전열에 의한 암괴의 이동으로 자유면과 이동 공간이 확보되고 있음을 알 수 있다. 즉 종래의 V cut은 오랜 경험의 축적으로 이루어진 방법으로 파쇄 메커니즘 면에서는 큰 문제가 없는 발파방법으로 생각할 수 있다.

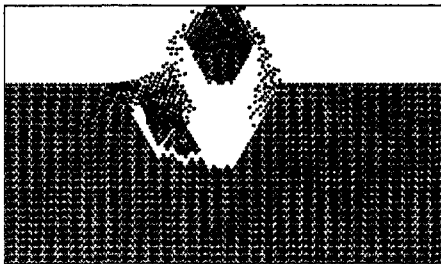
**2.5 다단장약 발파법의 해석**

Fig. 6은 다단 장약에 의한 발파 결과 발파 후 25 ms에서 375 ms까지 파쇄석의 이동과 접촉력의 종류 및 크기를 나타낸 것이다.

해석 결과, 각각의 발파 단계에서 충분한 자유면과 이동 공간이 확보되고 있으며 발파시차가 재래식의 250 ms 보다 좀 더 긴 375 ms로서 50 % 정도 길게 배정하였다. 이는 발파 시간의 희생이 크지 않은 상태에서 파쇄가 더 적은 규모로 잘게 나뉘어 일어난다는 것을 의미한다. 이로써 단당 장약량 감소의 효과를 충분히 발휘하고 있다는 것을 알 수 있다.



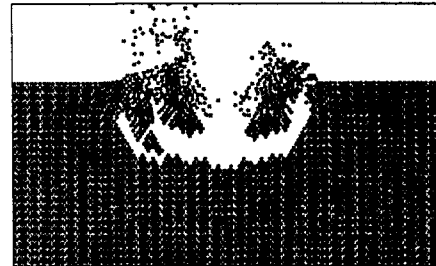
(a) 25 ms



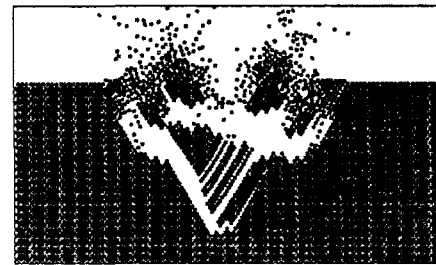
(b) 100 ms



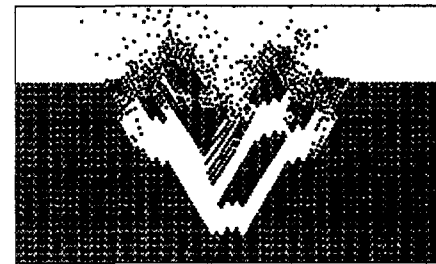
(c) 150 ms



(d) 200 ms



(f) 250 ms



(g) 300 ms

Fig. 6. Particle movement of deck charged V-cut blasting

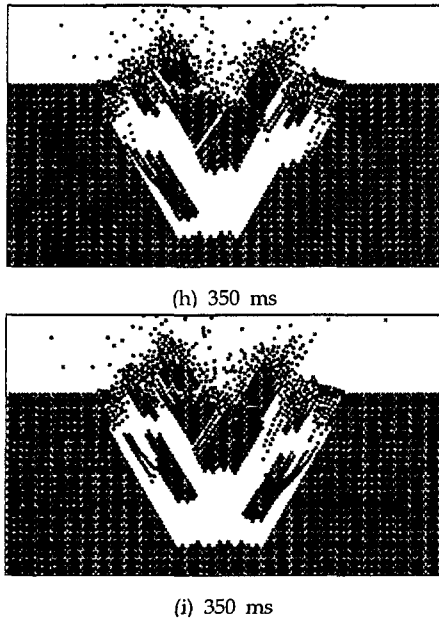


Fig. 6. Continued

## 2.6 비교 검토

다단장약 발파는 상대적으로 파쇄 후 이동하는 암괴의 크기가 작다. 이는 다단장약 방법이 파쇄도를 높이는데도 기여하고 있음을 의미한다. 이는 다단 장약의 경우 한 단차에서 발파해야 하는 암괴의 크기가 작기 때문으로 특정 암석의 파쇄에 필요한 최소한의 장약만 확보되면 다단 장약의 파쇄 효과도 크게 나타난다는 것으로 생각된다.

V-cut 재래식발파에서 보조심발공을 발파하고 심발공을 발파하면 장약량을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 실제로는 보조공을 발파하지 않았을 때와 거의 동일하게 장전해야 발파가 가능하다. 이는 자유면의 크기 효과에 의한 것으로 보인다. 보조공에 의해 형성된 썩기형 자유면은 최소화항선이 절반으로 줄어도 자유면이 썩기 모양이 되어 심발공 발파 때 폭굉파가 반사하여 돌아오면서 인장파괴를 일으키지 못하고 보조공을 발파하지 않았을 때와 비슷하게 발파가 되어 심발공의 구속 저항이 감소되지 않기 때문이라 생각된다.

다단장약으로 보조심발공과 심발공 상부에 남아

있는 암반을 제거하여 보조공과 동일한 깊이로 자유면을 형성시키면 최소화항선이 반으로 감소된 상태로 보조공이 발파될 때와 동일한 조건에서 심발공 발파가 이루어져 인장파괴효과와 압축전단파괴효과에 의해 암반이 파괴되므로 최소화항선의 감소효과가 정상적으로 발현되는 것이라 생각된다.

Fig. 5에서는 보조심발공에 의한 자유면의 형식이 완전한 썩기 모양을 보이고 있고 이것이 이후의 발파에 구속되는 현상으로 나타나고 있다. 반면 Fig. 6은 자유면이 사실상 평탄하고 후속 발파의 양상이 파쇄도가 증가하며 파쇄석의 분산이 커지는 것을 볼 수 있다.

## 3. 다단장약발파의 진동감쇠효과에 대한 수치해석 결과

### 3.1 수치해석 이론

비정상 동탄성 문제에서 유한요소의 관계식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. (Kaneko 외, 1995, Cho 외, 2003)

$$M(t)\ddot{u}(t) + C(t)\dot{u}(t) + K(t)u(t) = f(t) \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $u(t)$ ,  $f(t)$ 는 각각 시간  $t$ 에서의 절점변위벡터, 절점변위속도벡터, 절점변위 가속도벡터 및 절점력 벡터이며,  $K(t)$ ,  $C(t)$ ,  $M(t)$ 는 각각 강성 매트릭스, 점성 매트릭스 및 질량 매트릭스이다. 본 해석에서는 정변형률 요소를 이용해  $K(t)$ 를 고려하였다. 또한  $C(t)$ 는 내부 점성 매트릭스  $C_{in}(t)$ 이며  $C_{in}(t) = K(t)/(2\pi f_0 Q)$ 로써 고려하였다. 여기서  $Q$ 는 감쇠치  $Q$ 값이고,  $f_0$ 는 응력파의 대표 주파수이다.

### 3.2 해석모델 및 해석조건

다단장약 기폭과 일반장약 기폭방법에 의한 진동감쇠효과를 검토하기 위해서 Fig. 7 (a), (b)와 같이 두 모델을 설정하였다.

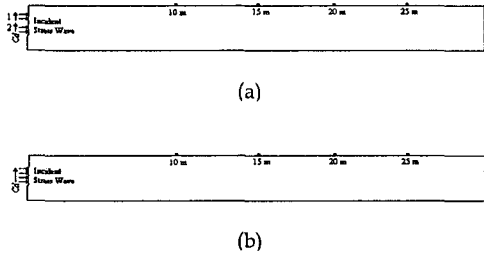


Fig. 7. Simulated FEM model: (a) deck charge, (b) general charge

그림에서 좌측경계를 대칭경계로 하였으며 좌측 상단은 장약공, 상단면은 자유경계, 우측과 하단면은 연속경계로 하였다. 기폭은 역기폭으로 하였으며 폭약의 폭굉속도는 5000 m/s로 하였다. 장약공에 표시되어있는 숫자는 기폭순서이다. 다단장약 기폭방법의 경우 기폭시간간격은 250  $\mu$ s로 하였다. 일반장약은 공저에서부터 장약공 중간부까지 기폭이 이루어지도록 하였다. 하중입력곡선은 상승 후 유지되는 것으로 하였으며, 최대압력은 100 MPa, 증가시간은 10  $\mu$ s로 하였다.

3.3 진동속도의 비교분석

발파공으로부터 각각 10, 15, 20, 25 m 떨어진 자유면에서의 수평방향 진동성분을 Fig. 8에 보였다. 다단 장약의 경우, 10 m에서 수평방향 최대진동치는 1.5 m/s이었으며, 일반장약 기폭의 경우 1.8 m/s였다. 이러한 차이는 파의 분산과 중첩으로 인한 상쇄 효과에 따른 것으로 (a)의 파형에서 확인할 수 있다. 이는 장약량이 같더라도 다단 장약할 경우 단거리에서도 상당한 진동감쇠효과를 볼 수 있음을 의미한다.

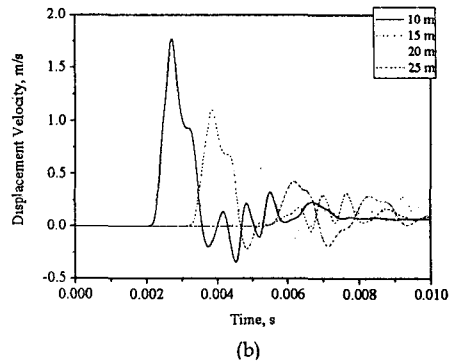
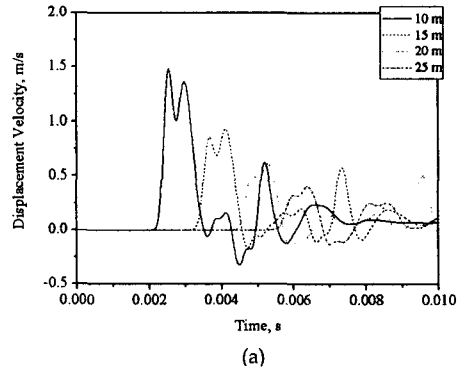


Fig. 8. Comparison of horizontal vibration component: (a) deck charged V-cut, (b) traditional V-cut

4. 결론

본 연구에서는 다단 장약에 의한 터널 심폐기 발파 방법을 제안하고 이를 개별요소법과 유한요소해석법으로 수치해석하여 검증하였다.

해석 결과, 단당 장약량을 줄이고 다단으로 분산하면 파쇄가 향상되고, 단당 장약량이 감소되어 진동이 감소함을 보여 주었다. 또 파괴역학적 관점에서도 자유면의 역할과 기하적 배치에 따른 진동의 감쇠를 설명할 수 있어 제안된 방법이 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

### 참 고 문 헌

1. 두준기, 양형식, 김형건, 김용국, 2003, 다단장약에 의한 V-cut발파공법의 진동제어효과와 발파 효율증대에 관한 연구. 화약발파 31.3
2. Cho, S.H., Y. Ogata and K. Kaneko, 2003, Strain rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.* 40.5, 763-777
3. Kaneko, K., Y. Matsunaga, and M. Yamamoto, 1995, Fracture mechanics analysis of fragmentation process in rock blasting. *J. Japan Explosive Soc.* 58(3): 91-99
4. PFC 2D, ITASCA
5. Whittaker, B.N., R.N. Singh & G. Sun, 1992, *Rock Fracture Mechanics*, Elsevier, New York