

## 다단 장약에 의한 터널 진동제어 발파의 수치해석

양형식<sup>1)\*</sup>, 두준기<sup>2)</sup>, 조상호<sup>3)</sup>, 김원범<sup>4)</sup>

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

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

**Abstract** Controlled tunnel blasting by deck charge was suggested and simulated by PFC and FEM analyses. Analyzed results showed that suggested method is efficient in fragmentation and able to decrease in vibration level because of decreased amount of charge per delay and dispersion of deck charge. This phenomena was explained by failure mechanism and proved that it can be successfully applied to tunnel blasting.

**KeyWords:** Controlled blasting, Tunnel, Vibration, Deck charge, Numerical analysis

**초 록** 다단 장약에 의한 터널 심빼기 발파를 제안하여 개별요소법과 유한요소해석법으로 수치해석 하였다. 그 결과, 단당 장약량을 줄이고 다단으로 분산시키면 발파로 인한 파쇄도 효과적이고, 진동도 감소할 수 있음을 보여 주었다. 이러한 현상은 파괴역학적으로도 설명이 가능하여 제안된 방법이 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

**핵심어:** 제어발파, 터널, 진동제어, 다단장약, 수치해석

## 1. 서 론

터널의 경우 진동이 가장 크게 발생하는 것은 심빼기 부분으로 알려져 있다. 이는 자유면의 형성이 여의치 않고 따라서 구속이 많은 상태에서 발파가 이루어지기 때문에 폭약이 암반을 파쇄 하는데 주로 사용되지 못하고 잔여 에너지가 진동을 유발하기 때문으로 설명된다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 심빼기 부분의 단당장약량을 줄이고, 초기 자유면의 발생을 유도하기 위하여 다단 장약을 도입하였고 이를 수치해석적으로 나타내려 하였다.

발파문제의 시뮬레이션은 동적인 요소가 주이므로 해석이 어렵다. 이 연구에서는 개별요소법 상용 프로그램으로 잘 알려져 있는 PFC와 최근 활발하게 연구되고 있는 파괴역학을 고려한 유한요소해석법을 이용하여 파쇄의 양상과 진동의 감쇠를 시뮬레이션 하였다.

## 2. PFC에 의한 파쇄양상 고찰

### 2.1 수치해석 프로그램

해석 프로그램은 2차원적 입자유동해석프로그램인 PFC 2D(Particle Flow Code)이며 Itasca 사의 지반공학 프로그램 중 하나이다.

이 해석법은 개별요소법을 기본으로 한다. 프로그램의 수행상 기본설정은 개개의 입자요소가 원형의 강성체로서 입자간의 접촉형태는 극히 작은 면적으로 간주한다. 이때 접촉점에서 접촉력과 힘-변위 관계식이 성립되고 접촉된 입자간의 결합강도를 규정해 줄 수 있어 지반과 같은 입자상 물체의 정적 및 동적인 거동문제를 해결할 수 있다.

### 2.2 해석 조건

해석 조건은 다음과 같다.

- 대상 지반 : 화강암
- 해석 단면 : 8×10 m
- 입자수 : 6000개
- 천공장 : 3.5 m

3차원적인 구조이지만 편의상 2차원 구조로 모델링 하였다.(Whittaker 등, 1992) 심발 부분은 각각의 간

<sup>1)</sup> 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>2)</sup> 정회원, 휴먼테크 기술사사무소 대표

<sup>3)</sup> 北海道大學 大学院 工学研究科 研究員

<sup>4)</sup> 학생회원, 전남대학교 대학원

\*교신저자(Corresponding Author): hsyang@chonnam.ac.kr

접수일: 2003년 9월 24일

심사 완료일: 2003년 10월 14일

Table 1. Input data for rock mass.

	Density (kg/cm <sup>3</sup> )	Normal Stiffness (N/m)	Shear stiffness (N/m)	Normal bondage (Pa)	Shear bondage (Pa)	Friction
Rock	2500	1×10 <sup>9</sup>	1×10 <sup>9</sup>	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	0.5

격이 다른 공이 엇갈려서 배열되지만 증가의 압력조건으로 나타낼 수 있고 심발부는 상하대칭이어서 대칭면의 거동은 2차원 해석이 가능하다. 이 경우 봉상인 화약이 슬릿 상으로 나타나지만, 양상을 띄게 된다고 생각된다. 모델의 상부는 자유경계, 좌우와 하부는 모두 연속경계로 하였다.

Table 1은 해석에 사용된 지반의 물성으로서 화강암의 일례를 채택하였다.

해석의 결과는 모델의 단순화와 증가압력 처리로 인하여 정량적 해석은 무리가 있고 정성적인 것으로 판단할 수 있다.

2.3 해석 모델

Fig. 1은 재래식 발파에 대한 해석 모델로서 Fig. 2의

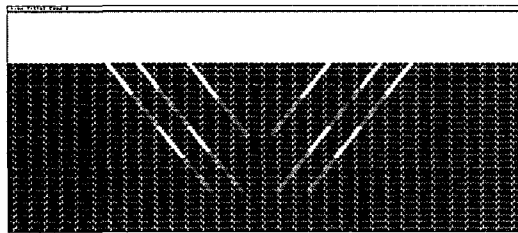


Fig. 1. Deck charged V-cut.

Table 2. Dimension of traditional V-cut (Fig. 2).

V-cut(재래식) - 경암

천공경 : 45 mm      장약경 : 32 mm

천공장 : 3.5 m      굴진장 : 3.2 m

구분	뇌관 순서	제발 공수	공당 장약량	지발당 장약량	장약장 (mm)	전색장 (mm)
			φ32×400×375g			
보조 심발공	1	2	1.125	2.25	1200	1211
	2	2	1.125	2.25	1200	1211
	3	2	1.125	2.25	1200	1211
심발공	4	2	2.438	4.88	2600	1454
	5	2	2.438	4.88	2600	1454
	6	2	2.438	4.88	2600	1454
	7	2	2.438	4.88	2600	1454
심발 확대공	8	3	1.875	5.63	2000	1928
	9	3	1.875	5.63	2000	1928
계		20		37.5		

중양 심발 부분을 모사한 것이다. Table 2는 이들의 발파 제원이다. Fig. 3은 다단장약 발파법의 해석 모델이며 이는 Fig. 4의 심발 부분을 모사한 것이다.

V-cut (재래식)

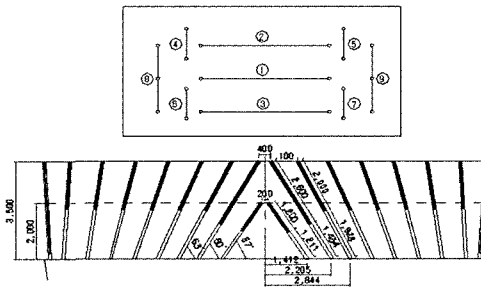


Fig. 2. A pattern of traditional tunnel blasting by V-cut.

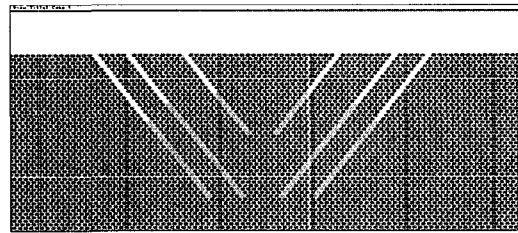


Fig. 3. Traditional V-cut.

다단장약 발파 방법

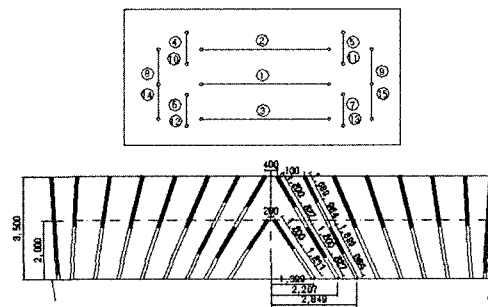


Fig. 4. A pattern of tunnel blasting by deck charged V-cut.

**Table 3.** Dimension of deck charged V-cut (Fig. 4).

다단장약발파법 - 경암

천공경 : 45 mm      장약경 : 32 mm  
 천공장 : 3.5 m      굴진장 : 3.2 m

구분	뇌관 순서	제발 공수	공당	지발당	장약장 (mm)	전색장 (mm)
			장약량 φ32×400×375g	장약량		
보조 심발공	1	2	1.125	2.25	1200	1211
	2	2	1.125	2.25	1200	1211
	3	2	1.125	2.25	1200	1211
심발공 상부	4	2	1.125	2.25	1200	827
	5	2	1.125	2.25	1200	827
	6	2	1.125	2.25	1200	827
확대공 상부	7	2	1.125	2.25	1200	827
	8	3	0.938	2.81	1000	964
	9	3	0.938	2.81	1000	964
심발공 하부	10	2	1.125	2.25	1200	827
	11	2	1.125	2.25	1200	827
	12	2	1.125	2.25	1200	827
확대공 하부	13	2	1.125	2.25	1200	827
	14	3	0.938	2.81	1000	964
	15	3	0.938	2.81	1000	964
계		34		36		

**2.4 재래식 발파의 시뮬레이션**

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

각각의 단차에서 전열에 의한 암괴의 이동으로 자유면과 이동 공간이 확보되고 있으나 100 ms 단계에서는 공저부분이 구속되고 있음을 볼 수 있다.

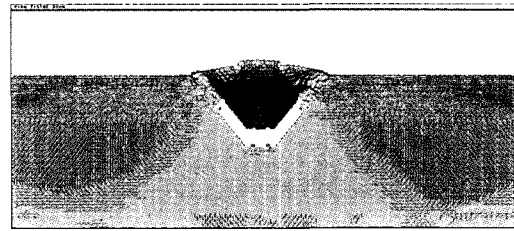
Fig. 6은 파쇄과정 중 작용하는 접촉력의 종류와 크기를 나타낸 것이다. 짙은 색은 압축성분, 옅은 색은 인장성분을 포함한 전단력을 나타내며, 굵을 수록 강도가 강하다. 발파공 주변 부분은 전단력이 주로 작용하고 심발 파쇄 부분은 압축력이 강하게 작용하고 있어 자유면에 대한 Hoppkinson 반사효과가 잘 나타나지 않고 있다.

해석 결과, 재래의 V cut은 오랜 경험의 축적으로 이루어지고 널리 사용되는 방법이나 미세한 파쇄 메커니즘 면에서는 약간의 문제가 있는 발파방법으로 생각할 수 있다.

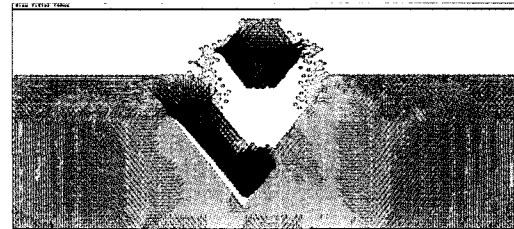
**2.5 다단장약 발파법의 해석**

Fig. 7은 다단 장약에 의한 발파 결과 발파 후 25 ms에서 375 ms까지 파쇄석의 이동 양상을 나타낸 것이다.

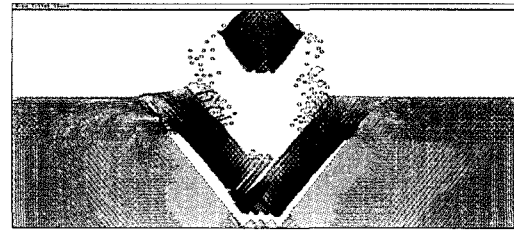
해석 결과, 각각의 발파 단계에서 충분한 자유면과 이동 공간이 확보되고 있다. 발파시차가 재래식의 250 ms 보다 좀 더 긴 375 ms로서 50 % 정도 길게 배정되어



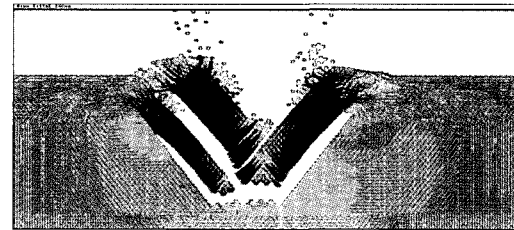
(a) 25 ms



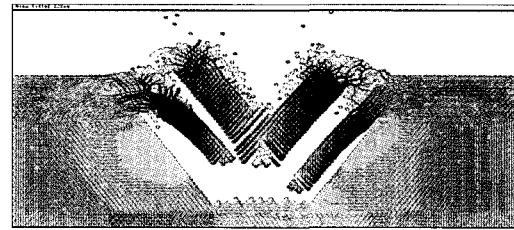
(b) 100 ms



(c) 150 ms



(d) 200 ms



(e) 250 ms

**Fig. 6.** Contact force of V-cut blasting.

있음을 감안하면 발파 시간의 희생이 크지 않은 상태에서 파쇄가 더 적은 규모로 잘게 나뉘어 일어난다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 파쇄 과정 중 접촉력의 종류 및 크기를 나타낸 것이다. Fig. 6에 비하여 파쇄석 부분에 인장력이 나타나, 순간 순간 형성되는 자유면의 반사효과를 보여준다. 이로써 다단 분산장약은 파쇄 정도와 파괴메카니즘

측면에서 파괴효율이 향상됨을 보여준다. 이와 함께 분산에 의해 단당 장약량이 감소되므로 진동의 감소도 기대할 수 있다.

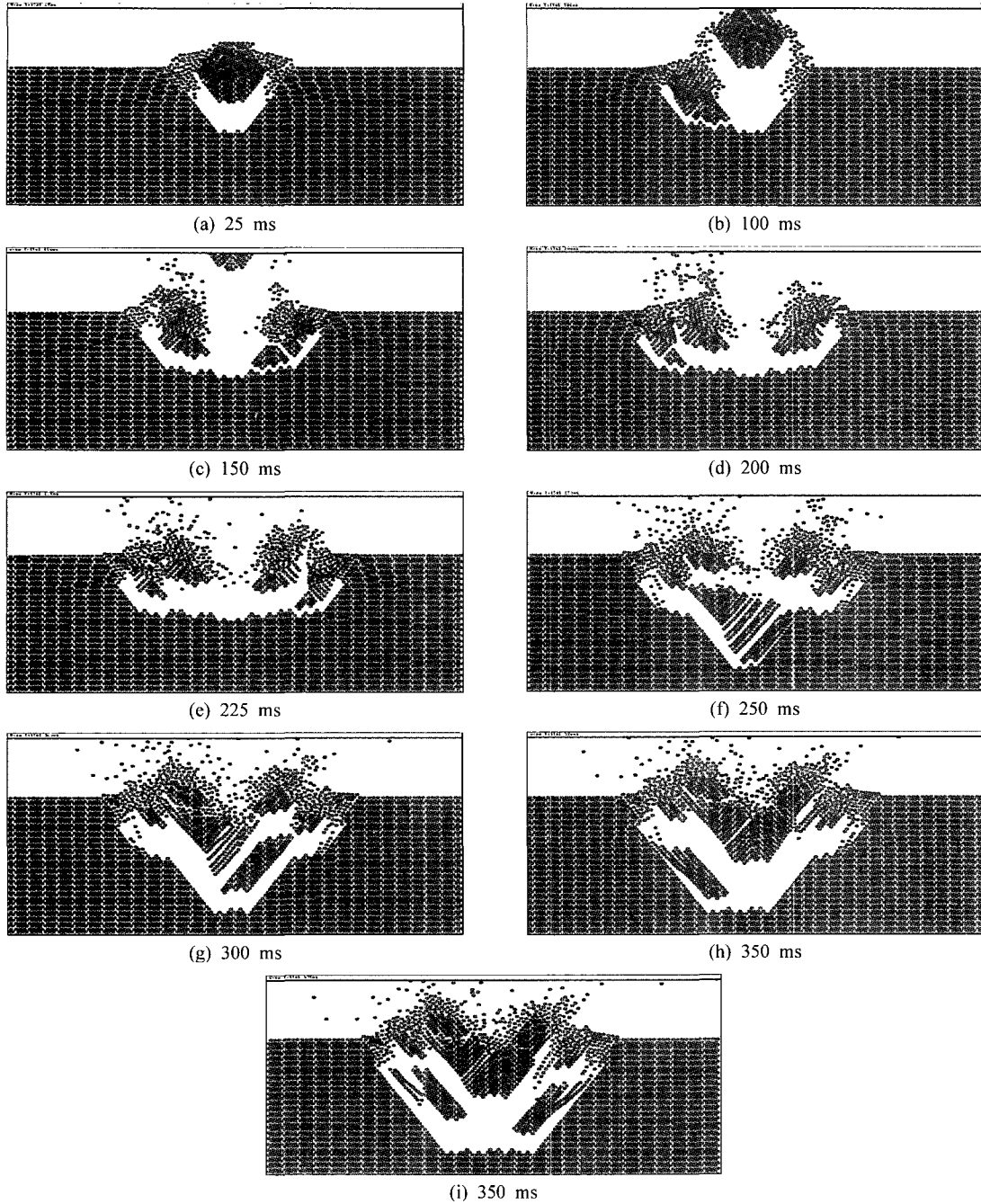


Fig. 7. Particle movement of deck charged V-cut blasting.

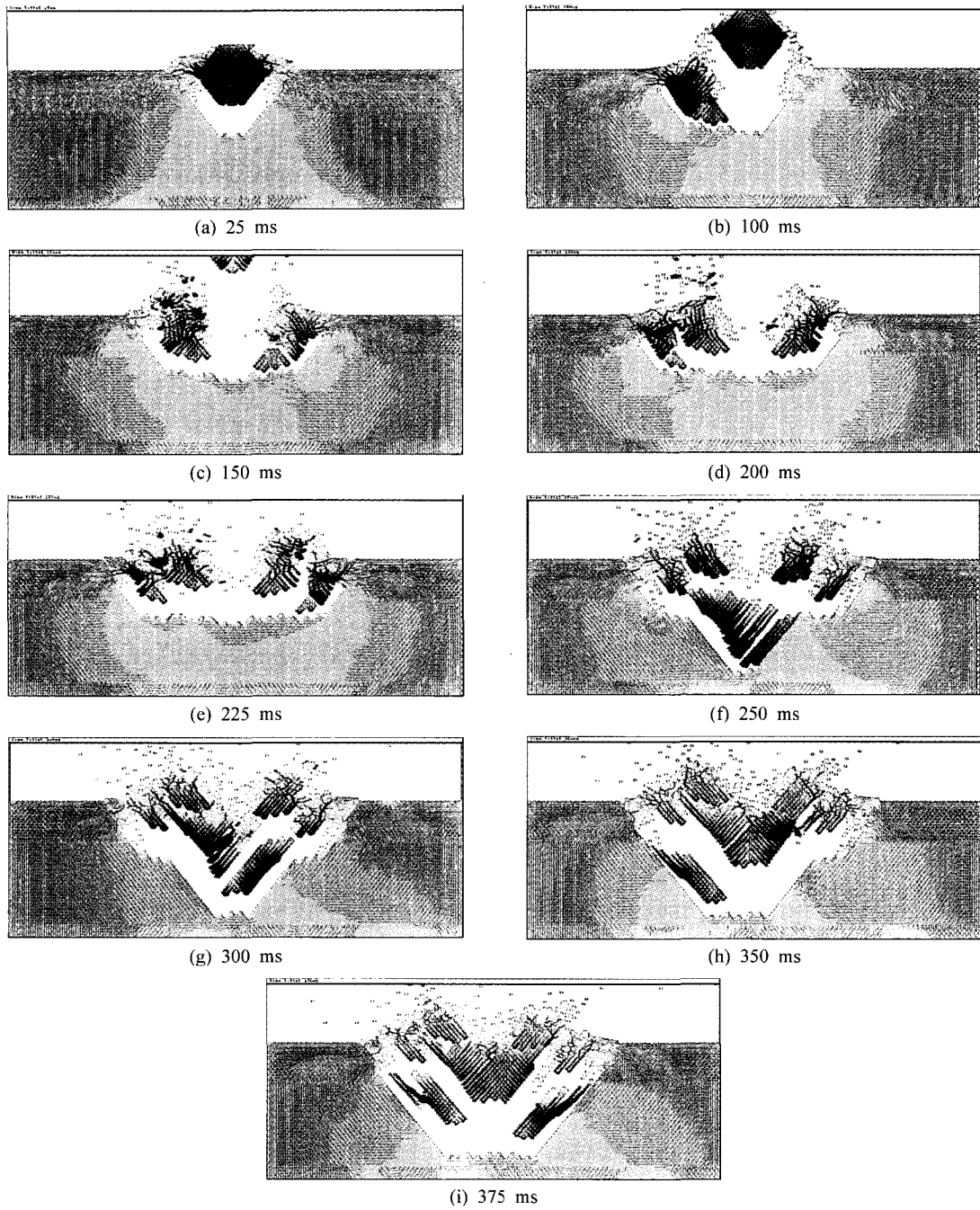


Fig. 8. Contact force of deck charged V cut blasting.

2.6 비교 검토

재래식 발파는 상대적으로 파쇄 후 이동하는 암괴의 크기가 크다. 이는 다단장약 방법이 파쇄도를 높이는 데도 기여하고 있음을 의미한다. 이러한 현상은 다단 분

산장약의 경우 한 단차에서 발파해야 하는 암괴의 크기가 작기 때문에 특정 암석의 파쇄에 필요한 최소한의 장약만 확보되면 다단 장약의 파쇄효과도 크게 나타난다는 것으로 생각된다.

V-cut 발파법에서 재래식발파에서 보조심발공을 발파하고 심발공을 발파하려면 마땅히 장약량을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 실제로는 보조 심발공을 발파하지 않았을 때와 거의 동일한 폭약량을 장전해야 발파가 가능하다. 이와 같은 현상은 자유면의 크기 효과에 의한 것이라고 생각된다.

보조심발공에 의해 형성된 썰기형의 자유면은 최소저항선거리는 1/2로 단축시켰을지라도 자유면이 썰기 형상을 이룬다. 따라서 심발공이 발파될 때 폭공파가 자유면에서 반사하여 되돌아오면서 암반에 인장파괴를 일으키는 역할을 하지 못하고 보조심발공을 발파하지 않았을 때와 동일하거나 거의 비슷한 저항선거리로 발파가 이루어져서 최소저항선거리는 줄어도 심발공의 구속저항이 감소되지 않았기 때문이라고 생각된다.

다단장약을 하여 보조심발공과 심발공 상부에 남아있는 암반을 제거하여 보조심발공과 동일한 깊이로 자유면을 형성시키면 최소저항선거리가 1/2로 감소된 상태의 보조심발공이 발파될 때와 동일한 조건에서 심발공의 발파가 이루어진다. 이때 인장파괴효과와 압축전단파괴효과에 의해 암반이 파괴되므로 최소저항선거리의 1/2 감소효과가 정상적으로 발현되어 장약량이 적어지고 진동이 낮게 발생하는 것이라고 생각된다.

재래식 V cut 심발 발파의 과정을 보이는 Fig. 6에서는 보조심발공에 의한 자유면의 형식이 완전한 썰기 모양을 보이고 있고 이것이 이후의 발파에 구속되는 현상으로 나타나고 있다. 반면 다단장약 방식의 발파에서는 Fig. 8의 과정에서 보이는 것처럼 자유면이 사실상 평탄한 모양으로 나타나고 이에 따라 후속 발파의 양상이 파쇄도가 증가하며 또 파쇄석의 분산이 커지는 모양을 볼 수 있다.

### 3. 다단장약발파의 진동감쇠효과에 대한 수치해석 결과

#### 3.1 수치해석의 이론

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

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

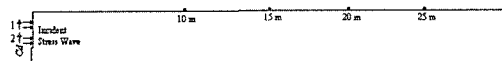
여기서,  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $u(t)$ ,  $f(t)$ 는 각각 시간  $t$ 에서의 절점변위가속도벡터, 절점변위속도벡터, 절점변위벡터 및 절점력 벡터이며,  $K(t)$ ,  $C(t)$ ,  $M(t)$ 는 각각 강성 매트릭스, 점성 매트릭스 및 질량 매트릭스이다. 본 해석에서는 정변형률 요소를 이용해  $K(t)$ 를 고려하고,  $M(t)$ 는 Lumped Mass법을 적용하였다. 또한  $C(t)$ 는 내부 점성 매트릭스  $C_{in}(t)$ 이며  $C_{in}(t)=K(t)/(2\pi f_0 Q)$ 로써 고려하였다. 여기서  $Q$ 는 감쇠치  $Q$ 값이고,  $f_0$ 는 응력파의 대표주파수이다. 이러한 전제로써 Newmark- $\beta$ 법을 적용해서 정식화를 수행하였다. 그리고 전체강성방정식은 영이 아닌 성분만을 일차원배열로 저장시켜 연립방정식을 계산하는 ICCG법이 채용되었다.

#### 3.2 해석모델 및 해석조건

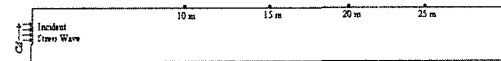
다단장약 기폭과 일반장약 기폭방법에 의한 진동감쇠 효과를 검토하기 위해서 Fig. 9 (a), (b)와 같이 두 모델을 설정하였다.

다단장약 기폭과 일반장약 기폭의 큰 차이점으로써 장약방법이 다르며, 다단장약의 경우는 분상장약 기폭 방법을 사용한다. 본 해석에서는 분상장약 기폭방법과 일반장약 기폭방법을 단순화시켜 모델링 하였다.

Fig. 9 (a)의 경우, 좌측경계를 대칭경계로 하였으며, 좌측상단은 장약공, 상단면은 자유경계, 우측과 하단면은 연속경계로 하였다. 분상장약 기폭을 재현하기 위해서 장약공 내 상하단 두 경계로 나누어 상단부터 기폭이 적용되도록 하였다. 기폭방법은 역기폭으로 하였으며 폭약의 폭공속도는 5000 m/s로 하였다. 그림 내 장약공에 표시되어있는 숫자는 기폭순서를 의미한다. 다단장약 기폭방법의 경우 분상장약부의 기폭시간간격은 120 ms 정도이지만, 충격파의 간섭현상과 계산시간을 절약을 고려하여 250  $\mu$ s로 하였다. Fig. 9 (b)는 일반장약 기폭방법의 모델로서 장약방법을 제외한 나머지 해석조건은 Fig. 9 (a)와 동일하게 하였다. 일반장약 기폭을 재현하기 위해 장약 공저에서부터 장약공 중간부까지 기폭이 이루어지도록 하였다. 해석모델의 절점수는 35,322 개이며, 요소는 69,328 개이다. Fig. 10은 장약공 내에 적용된 하중입력곡선으로서, 최대압력은 100



(a) deck charge



(b) general charge

Fig. 9. Simulated FEM model.

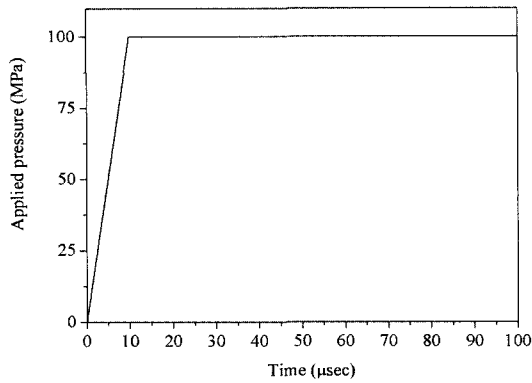


Fig. 10. Input load curve.

MPa, 증가시간은 10 µs, 압력지속시간은 충분히 길게 하였다.

3.3 진동속도의 비교분석

Fig. 11은 분상장약 기폭과 일반장약 기폭에 의해 발생된 충격파의 전달과정을 최대주응력분포로 보여주고 있다. 우하단의 음영부는 인장강도를, 나머지 음영부는 압축강도를 나타낸다.

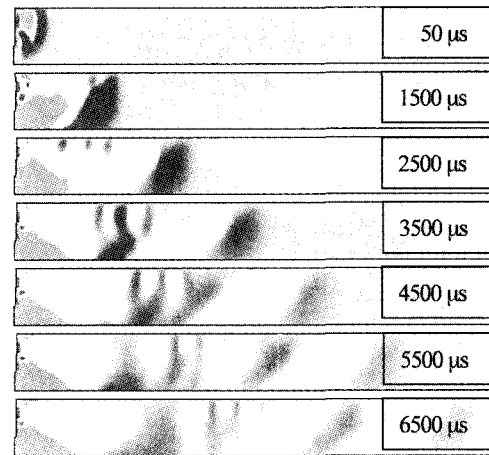
충격파는 종파속도로 전파되며, 그 뒤에는 전단파 등이 뒤따르며, 자유표면에는 표면파가 발생되어 응력분포를 산란시키며 전파됨을 보여 준다.

분상장약 기폭과 일반장약 기폭에 의해 발생된 진동 전달특성을 비교하기 위해서 발파공으로부터 각각 10 m, 15 m, 20 m, 25 m가 이격된 자유표면에서의 수직방향과 수평방향 진동성분을 Fig. 12와 Fig. 13에 비교하였다. 분상장약 기폭의 경우, 10 m에서 수직방향 최대진동치는 0.39 m/s이었으며, 일반장약 기폭의 경우, 0.80 m/s의 최대치를 나타내었다. 또 수평성분도 1.5 m/s와 1.8 m/s 정도로 차이를 보이고 있다.

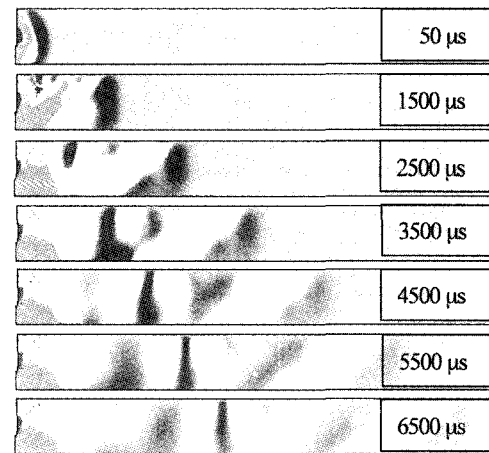
이러한 차이는 파의 분산과 중첩으로 인한 상쇄 효과에 따른 것으로 (a) 그림의 파형에서 이를 확인할 수 있다.

이 결과는 동일 장약량을 사용하더라도 장약량을 분리시켜 기폭 시켰을 경우 단거리에서도 50% 이상의 진동감쇠효과를 볼 수 있음을 보여준다.

설계기폭순서로 볼 때 본 해석의 경우 2번째 이후의 해당되는 장약공을 단순화시켜 다단장약과 일반장약 기폭에 의한 진동속도를 비교하였다. 설계기폭의 1번 기폭 장약량이 동일한 관계로 최대진동입자속도의 감소는 얻기 어려울 것으로 생각되지만, 연속되는 기폭을 고려했을 때 다단장약 기폭방식의 경우 진동레벨의 감쇠효과를 충분히 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



(a) deck charge



(b) general charge

Fig. 11. Comparison of max. principal stress distribution and propagation pattern.

4. 결 론

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 감소될 수 있음을 보여 주었다.

또 파괴역학적 관점에서도 자유면의 역할과 기하적 배치에 따른 진동의 감쇠를 설명할 수 있어 제안된 방법이 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

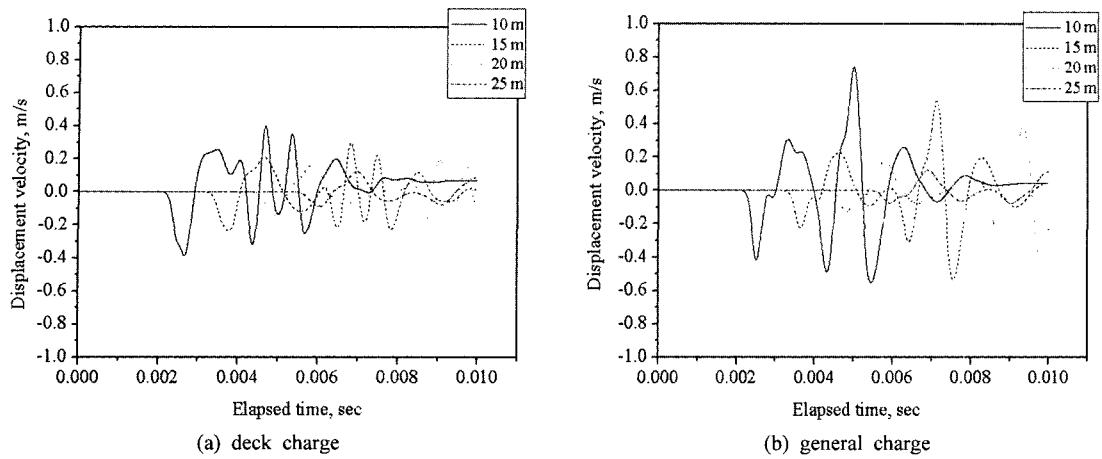


Fig. 12. Comparison of vertical vibration component.

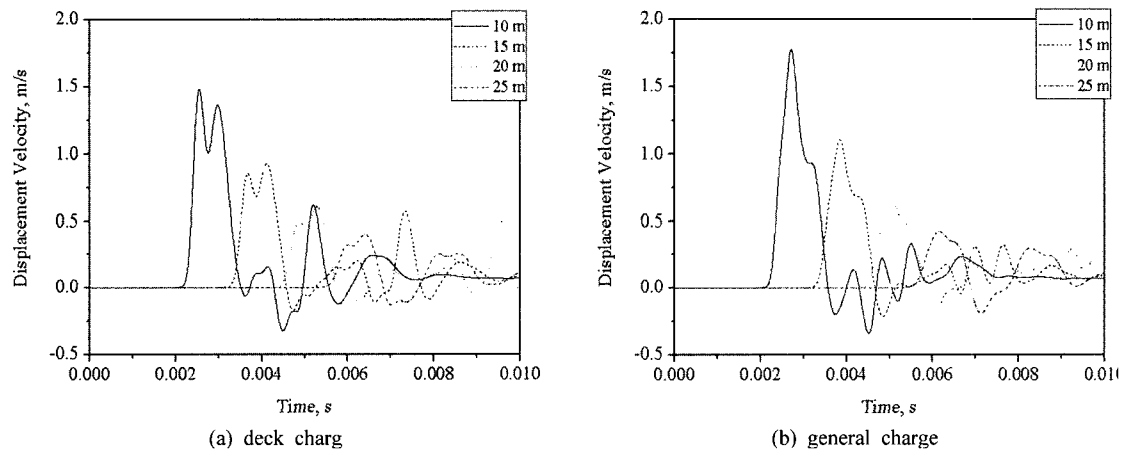


Fig. 13. Comparison of horizontal vibration component.

### 참고문헌

1. Cho, S.H., H.S. Yang and K. Kaneko, 2003, Influence of rock inhomogeneity on the static strength of rock, *Tunnel and Underground Space* 13.2, 117-124.
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.



**양 형 식**



1979년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사  
Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부  
교수

**두 준 기**



1975년 전북대학교 자원공학과 공학사  
1987년 화약류관리 기술사  
Tel: 02-885-5770  
E-mail: jkdoos1@hanmail.net  
현재 휴먼테크기술사사무소 대표

**조 상 호**



1998년 전북대학교 자원공학과 공학사  
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2003년 북해도대학 대학원 공학연구과  
공학박사  
Tel: +81-11-706-6325  
E-mail: chosh@geo-er.eng.hokudai.ac.jp  
현재 북해도대학 대학원 공학연구과  
연구원

**김 원 범**



2002년 전남대학교 자원공학과 공학사  
Tel: 062-530-0824  
E-mail: rockyman@krpost.net  
현재 전남대학교 대학원 석사과정