같은 탄성파의 전파와 관계가 깊은 지반의 지질특성, 지발뇌관의 사용으로 일정한 시간간격으로 분할점화되는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리등이 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다.

그러나 지반내의 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인하여 진동전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며, 같은 암반에서도 현장의 발파조건등에 따라 전파특성이 달라지므로 경험적인 연구의 중요성이 부각되었다.

Hendron, Devine, Oriad 등 많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 많은 발파진동의 측정경험을 토대로 구조물 피해의 기준이 되는 최대진동속도를 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리를 주요변수로 하여 (1)식과 같은 경험적 관계식으로 나타낼 수 있음을 제시하였다.

$$V = K\left(\frac{R}{W^b}\right)^n \qquad (1)$$

여기서 V : 지반의 진동속도
(particle velocity, cm/sec)
R : 발파원으로 부터의 거리 (m)
W : 지발당 장약량 (charge per delay, kg)
K, n : 지질암반조건, 발파조건등에 따르는 상수
b : 1/2 또는 1/3

(1)식에서 거리와 지발당 최대장약량의 비인 R/W^b 를 환산거리(scaled distance, SD)라 하며, b=1/2 이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), b=1/3 이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다. 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이며, 둘다 사용되고 있으나 일반적으로는 비교적 가까운 거리에서는 삼승근이, 먼 거리에서는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

(1)식의 발파진동식에서는 지반의 성질이나 발파조건등에 따른 진동감쇠특성이 결국 상수 K, n 에 반영되어 표시되므로 안전발파설계를 위해서는 대상지역에서 시험발파를 통한 K, n 상수값을 결정하는 것이 대단히 중요하게 된다. 여기서 K, n 상수값을 구하기 위하여 측정한 자료를 이용한 회귀분석을 실시하게 되는데, 이때 사용되는 측정자료는 적어도 30개 이상 되어야 하고, 진동식의 신뢰성은 회귀분석의 상관계수가 클수록 높게 나타나는데, 상관계수의 값이 적어도 0.8 이상이 되어야 한다.

K 와 n 값이 결정되고 허용진동속도가 주어지면 (2.3)식에서 그 허용진동속도에 대한 환산거리를 구할 수 있으며, 구해진 환산거리를 이용하여 폭원으로 부터의 거리와 지발당 최대장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

3. 터널발파의 진동특성

채석장이나 석회석광산에서 사용하는 벤치발파의 경우는 모든 발파공이 2자유면인 상태에서 발파가 진행되지만, 터널발파의 경우는 1자유면인 상태에서 2자유면을 형성시킨 다음 나머지는 벤치발파와 비슷한 형태로 발파가 진행된다. 이때 1자유면 상태에서 2자유면 상태로 만드는 과정을 "심빼기"라고 하고 이 발파과정을 "심빼기발파" 혹은 "심발발파"라고 한다. 터널발파에서 이 심발의 과정은 그 발파의 성공과 실패여부를 결정짓는 아주 중요한 과정이다.

심발의 종류에는 수평공을 이용하는 방법과 경사공을 이용하는 방법, 그리고 수평공과 경사공을 이용하는 방법이 있다. 수평공을 이용하는 방법은 먼저 무장약공을 천공하여 이것을 자유면으로 이용하여 자유면 면적을 확대하는 것으로 대표적인 심발형태로는 번컷(Burn-cut)이 있다. 경사공을 이용하는 방법은 막장면에 공을 경사로 천공하여 발파시 자유면 효과를 최대한 이용할 수 있도록 하는 것인데, 이에 따른 심발형태로는 브이컷(V-cut), 피라미드 컷(pyramid cut) 등이 있고 수직공과 수평공을 혼용하는 방법에는 선경건설(주)에서 개발한 수펙스 컷(SUPEX-cut)이 있다.

그림 1은 V-Cut, Burn-Cut 그리고 SUPEX-Cut의 발파순서에 대한 개략적인 심발의 과정을 보여주는 그림이다. V-Cut의 경우 심발경사공의 발파에 의해서 자유면을 형성하고, SUPEX-Cut의 경우는 심발경사공 발파후 굴진장의 증대를 위해 수평심발공에 의해 ②번 지역의 발파가 이루어 진다. 반면 Burn-Cut의 경우는 천공한 기존의 무장약공을 자유면으로 이용하여 수평공들에 의해 심발발파가 이루어지는 특징이 있다.

심발이 성공적으로 진행되면 명칭에 있어서 약간의 차이는 있으나, 심발확대공, 수평공, 외곽공, 바닥공의 순으로 발파가 진행되는데, 그림 2는 일반적인 터널발파 패턴에 대한 그림이다.

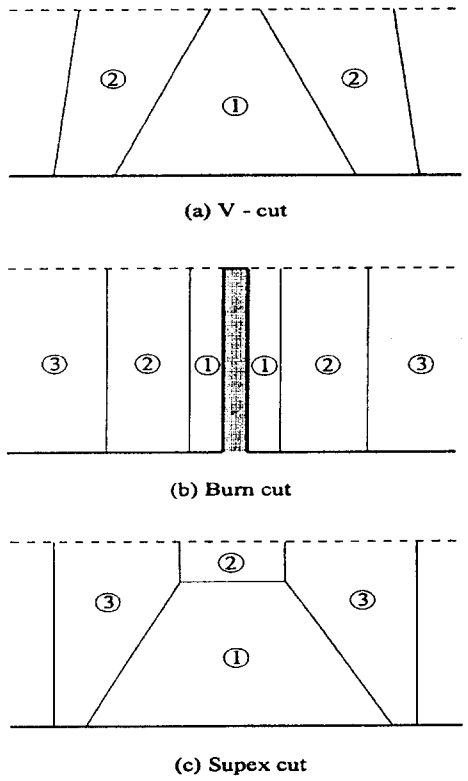

Fig. 1. Blasting sequence of irrespective cut pattern

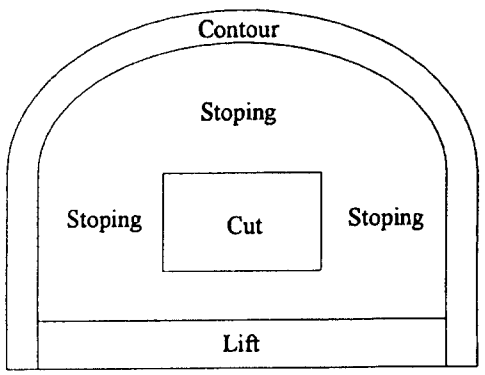

Fig. 2. General cross section of tunnel

실제 터널발파 현장인 경부고속철도 5-3공구 현장에서의 시험발파는 SUPEX-Cut과 V-Cut 두가지 공법에 대해 실시되었는데, 이 두가지 발파패턴에서 심발 부분을 제외한 나머지 부분은 모두 동일한 패턴을 사용하였다.

SUPEX-Cut 발파시 지표면에서 측정된 진동파형이 그림 3에 제시되어 있는데, 이 파형과 MS 및 DS 뇌관을 사용한 각 공들의 발파시간을 비교하면 같은 지연시차를 가지는 뇌관을 사용한 공들의 발파시 발생한 발파진동속도를 알 수 있다.

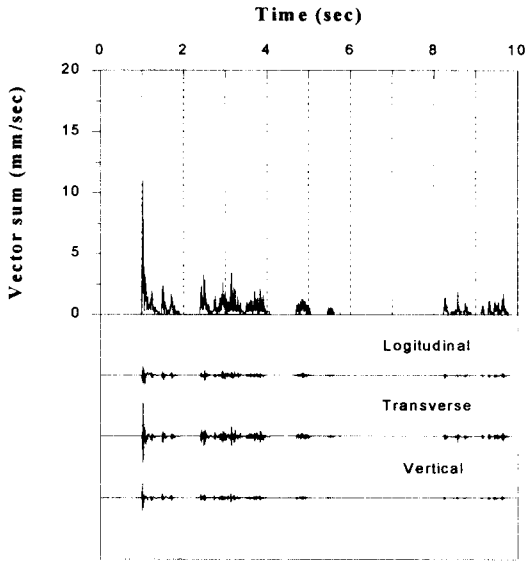

Fig. 3. Wave form of blast-vibration in SUPEX -Cut tunnel blasting

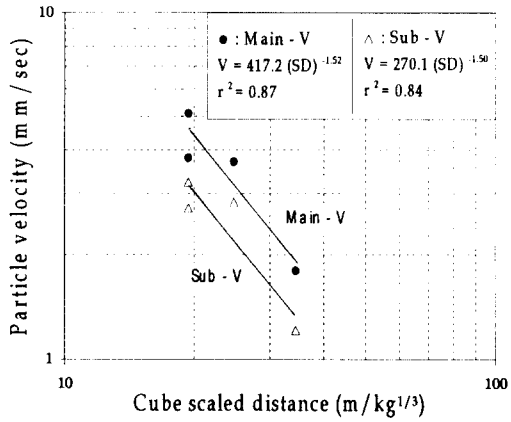

Fig. 4. Peak particle velocity with respect to free face number in V-cut tunnel blasting

그림 4는 V-Cut에 의한 터널발파시 산위 지표면에서 측정된 진동속도를 1자유면인 심발경사공

이 발파될 때와 심발경사공이 발파된 이후인 심발보조공이 발파될 때로 구분하여 분석한 결과인데, 심발보조공의 발파에 의한 발파진동속도가 1자유면 발파인 심발경사공의 발파에 의한 발파진동속도에 비해 약 70% 정도의 수준을 나타내고 있다.

따라서 터널발파의 경우는 벤치발파와는 달리 지발당장약량이 같은 경우라도 1자유면 발파인 심발부분의 발파에서 가장 큰 진동이 발생하므로, 심발부분에 대한 지발당장약량을 줄이는 방법으로 기존의 발파패턴을 수정할 경우 30% 이상 발파진동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 V-Cut과 SUPEX-Cut의 심발공 발파에 의한 발파진동을 비교한 그림으로 SUPEX-Cut의 경우가 약 20-30% 더 낮은 진동속도를 나타내고 있는데, 이것은 수평심발공들이 부분적으로 무장약공을 역할을 한다는 점과 심발경사공의 각도가 V-Cut에 비해 작은 이유에 기인한 것으로 판단된다.

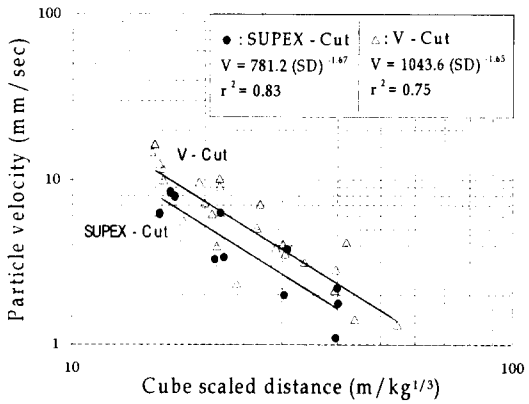

Fig. 5. Comparison between V-Cut and SUPEX -Cut in tunnel blasting

4. 심발 시험발파

터널발파의 심발부분에 대한 시험발파를 골프장 건설현장의 벤치면에서 수행하였는데, V-Cut에 대한 심발시험발파 패턴도는 그림 6과 같다. 본 연구에서는 용어의 통일을 위해 ①-③번공은 심발공, ④-⑥번공은 심발보조공으로 부른다. 각공은 38 mm 직경의 인력식 레그 드릴을 사용하여 깊이 1.3m 까지 한 발파당 총 12공을 천공하였으며, 사용된 화약은 28mm 직경, 중량 200g인 다이나마이트(제품명 Himite 5500)이다.

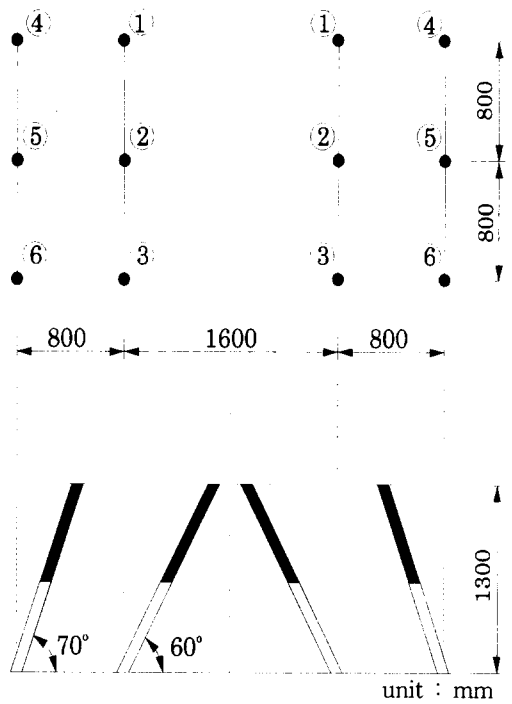

Fig. 6. Drilling-pattern of V-cut test blasting

V-1 시험발파의 경우는 자유면과 60°의 각도로 천공된 심발공 6공에 같은 MS-1번 뇌관을, 자유면과 70°의 각도로 천공된 심발보조공 6공에는 같은 MS-6번 뇌관을 사용한 반면, V-2 시험발파에서는 ①번공에서 ⑥번공까지 각각 60msec의 지연시차를 가지고 순차적으로 발파되도록 설계하였다.

그림 7은 SUPEX-Cut 에 대한 심발시험발파 패턴도이고, 여기서도 용어의 통일을 위해 ①번공을 심발경사공, ②-⑤번공을 수평심발공, ⑥번공을 좌우측 주변공으로 부른다. 천공직경 및 사용화약은 V-Cut에서와 마찬가지로 각각 38mm, 28mm 직경의 다이나마이트이나 천공깊이는 V-Cut보다 깊은 1.5m로 하였다. 한 발파당 총 31공을 천공하였고, 심발경사공의 천공각도는 자유면에 대해서 65°로 하였다.

SUPEX-1 과 SUPEX-2 시험발파시는 심발경사공 8공에 같은 번호의 뇌관을 사용하여 동시에 발파하였으나, SUPEX-3 시험발파시는 심발경사공 8공을 20msec 의 지연시차를 두고 두공씩 순차적으로 발파하였다.

심발경사공에서는 중기폭 방법을 그리고 나머지 공들에서는 역기폭 방법을 사용하였으며, 전색물로는 모래를 이용하였다.

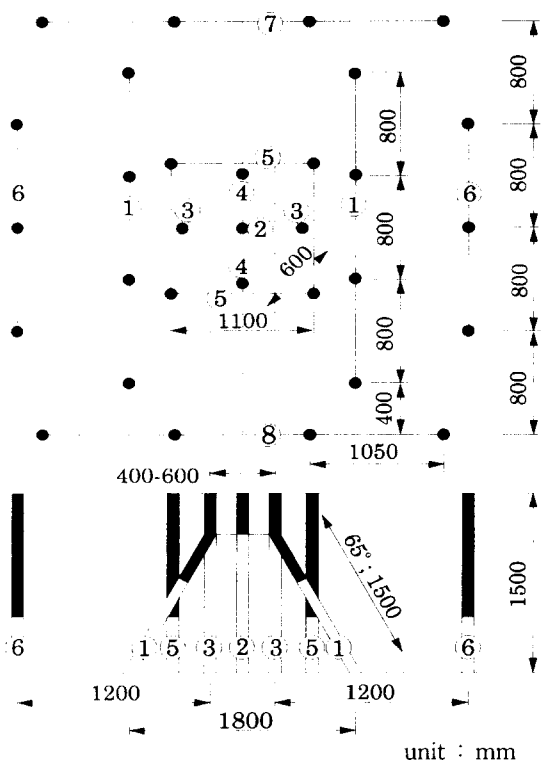

Fig. 7. Drilling-pattern of SUPEX-cut test blasting

그림 8은 심발경사공 8공과 좌우측 주변공 6공에 각각 같은 번호의 뇌관을 사용한 심발시험발파 SUPEX-1에 대해 심발경사공의 발파시 측정된 발파진동을 회귀분석한 그래프와 좌우측 주변공의 발파시 측정된 발파진동을 회귀분석한 그래프를 비교한 그림이다.

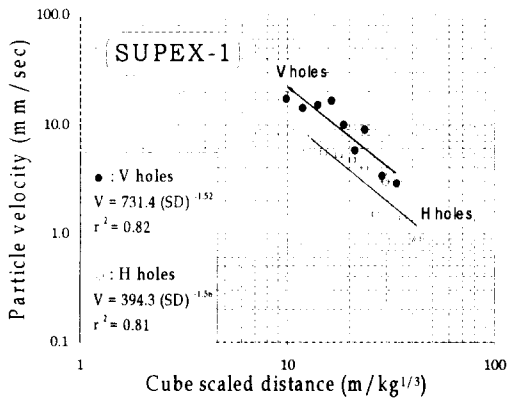

Fig. 8. Blast-vibration of SUPEX-1 test blasting

같은 삼승근환산거리에서 2자유면 발파인 좌우측 주변공의 발파에 의한 발파진동속도가 1자유면 발파인 심발경사공의 발파에 의한 발파진동속도에 비해 50% 정도의 수준을 나타내었는데, 이 결과는 V-Cut에 대한 심발시험발파 및 터널발파에서의 계측결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

5. 발파시차에 의한 진동제어

그림 9는 심발경사공 8공 모두에 MS-1번 뇌관을 사용한 SUPEX-1 및 SUPEX-2의 진동속도 측정값과 심발경사공 8공을 20msec 시차를 두고 2공씩 발파시킨 SUPEX-3의 진동속도 측정값을 비교한 그림인데, SUPEX-3에서 해석을 위해 사용된 지발당장약량은 SUPEX-1 및 SUPEX-2와 같은 7.2kg으로 하였고, 세경우 모두 발파진동의 감쇠경향을 나타내는 n값은 거의 비슷하게 나타나고 있다.

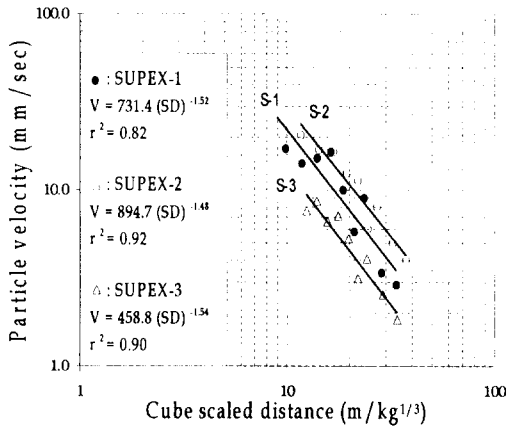

Fig. 9. The Comparison of particle velocity in SUPEX-cut test blasting

SUPEX-1의 회귀분석 결과를 기준으로 할 때, 표토층의 깊이가 50cm 이내로 암반층이 거의 지표면까지 드러난 지역에서 수행된 SUPEX-2의 발파진동값이 약 30% 더 큰 값을 보이고 있다. 반면, 20msec의 시차를 두고 심발경사공 8공을 2공씩 발파한 SUPEX-3의 발파진동속도값은 SUPEX-1에 비해 약 60% 수준을 보이는데, 이것은 심발경사공을 모두 동시에 발파하는 것에 비하여 발파효과적인 측면에서 큰 차이를 보이지 않는다면 심발경사공을 짧은 시차를 두고 순차적으로 발파하는 것이

현장에서 발파진동을 줄일 수 좋은 방안임을 나타내는 것이다.

그림 10은 심발공의 발파에 의한 진동속도를 비교한 그림인데, 총 6공의 심발공중 60msec 의 지연시차를 두고 2공씩 순차적으로 발파한 V-2의 경우가 6공의 심발공을 동시에 발파한 V-1에 비해 약 60% 더 작은 진동속도를 나타내었다.

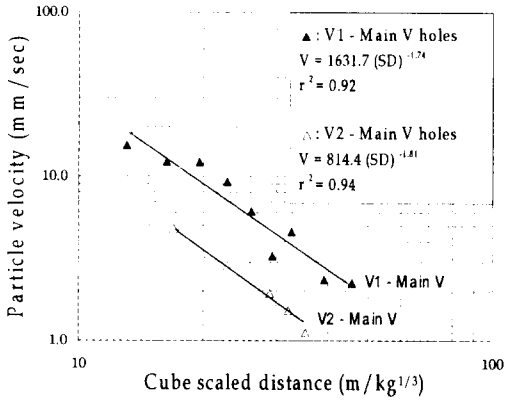

Fig. 10. The Comparison of particle velocity in V-cut test blasting

6. 결 론

1. V-Cut 및 SUPEX-Cut에 의한 터널발파의 진동계측 결과, 같은 지발당장약량을 사용한 경우라도 1자유면 발파인 심발부분의 발파시 발생하는 발파진동이 2자유면 발파인 주변공들의 발파시 발생하는 진동보다 30% 이상 더 크게 나타났다.
2. 심발공법별 비교에서는 SUPEX-Cut의 경우가 V-Cut에 비해 심발부분의 발파시 발생하는 발파진동의 최대값이 약 20-30% 더 작게 나타났다.
3. 심발시험발파를 수행한 결과, V-Cut의 심발공 6공을 동시에 발파한 경우보다 60msec 의 시차를 두고 두공씩 순차적으로 발파한 경우가 약 60%의 발파진동 감소효과를 나타내었다.

또한 SUPEX-Cut의 심발경사공 8공을 동시에 발파하지 않고 20msec 의 시차를 두고 두공씩 순차적으로 발파한 경우 발파진동을 약 40% 감소시킬 수 있었다.

4. 각공당 장약량이 서로 다른 심발시험발파와 현장 터널발파의 진동파형과 진동지속시간을 고려할 때, 심발발파시 발생하는 진동을 감소시키기 위한 심발공들간의 발파시차는 60msec 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이정인, 1996 분착식다단발파공법(SUPEX-Cut)에 관한 보완연구, 서울대학교 에너지자원 신기술연구소
2. 선경건설(주), 1994, 터널신발파공법
3. 한국자원연구소, 1994, 신발파공법에 대한 시험분석 및 평가연구
4. Per-Anders Person, Roger Holmberg, Jaimin Lee, 1994, Rock Blasting and Explosive Engineering, CRC Press
5. U. Langefors, B. Kihlstrom, 1979, Modern Technique of Rock Blasting, A Halsted Press
6. Rune Gustafsson, 1973, Swedish Blasting Technique, SPI
7. Stig O Olofsson, 1991, Applied Explosives Technology for Construction and Mining
8. B. Singh, et. al., 1993, Blasting in Ground Excavation and Mines, Balkema
9. Barry M. New, Ground Vibration Caused by Construction Works, 1990, Tunnelling and Under ground Space Technology, Vol. 5 No. 3, pp. 179-190
10. Giorgio Berta, 1994, Blasting-induced Vibra-tion in Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 175-187