

## 제6장 조절발파

### 6.1 조절발파 개요

발파에 의해 굴착되는 부분은 효과적으로 잘 파쇄 되어야 하지만 남아있는 주위 암반에 손상을 주어서는 안 된다. 지하공동이나 도로 및 철도 작업에 의해 드러난 암반의 사면, 그리고 산이나 도시를 관통하는 터널은 구조물의 수명만큼 안정성이 이루어져야 한다. 채굴 암반 주위에 있는 암석 벽면이 과도한 손상을 받으면 낙반에 의한 위험이나 과굴에 따른 추가적인 암반 보강이 필요하게 되고, 균열대가 발달하여 지하수 유입의 원인이 되기도 한다. 따라서 발파할 때 주위 암반에 손상을 주지 않고 암반이 가지고 있는 자연적인 강도를 그대로 유지할 수 있도록 발파 작업이 이루어져야 한다. 이를 위하여 조절발파(Control Blasting) 법이 이용된다.

조절발파법의 기본 원리는 적은 장약량으로 공 주위에 균열을 발생시켜 공과 공을 연결하는 파 단면을 형성하는 것이다. 공과 공 사이에 발생하는 균열은 처음에는 폭발에 의한 충격파에 의해 발생되어 나중에 폭발 가스에 의해 균열이 확대된다. 일반적으로 사용되는 발파 방법으로는 폭약 에너지를 충분히 제어하지 못하므로, 암반이 큰 손상을 받게 되고 발파 주위 암반에 많은 균열이나 과굴이나 형성될 수 있다. 따라서 폭약 에너지의 작용 방향을 제어하는 것이 필요하다. 이와 같이 일반적인 발파법의 결점을 개선할 수 있는 방법으로 제시되고 있는 조절 발파법으로 스무스 발파(Smooth Blasting), 프리스플리팅(Pre-Splitting), 쿠션 발파(Cushion Blasting), 라인 드릴링(Line Drilling) 등이 있다.

일반적으로 조절 발파에서는 발파공의 지름에 비해 작은 지름의 폭약을 장약하여 폭약과 발파공의 벽 사이에 공간을 형성하여 발파할 때 가스압을 감소시켜 공 벽면의 손상을 적게 하고 공 사이에 균열을 유도하도록 한다. 발파공 내에서 폭약을 폭발시킬 경우, 발생된 폭발 압력이 암석의 인장강도보다 크고 압축강도보다는 작은 범위가 되도록 하여 공과 공 사이에 발생된 균열 선단의 압력이 인장강도보다는 약간 큰 조건 아래서 가능한 한 길게 지속되는 것이 필요하다. 이를 위하여 일반적으로 사용되는 방법이 그림 6.1과 같이 공벽과 폭약사이에 공간을 형성하도록 하는 디커플링(Decoupling) 장약방법이다. 이 공간에 의해 폭발 시 폭발 충격력을 약하게 하는 완충 역할을 하게 된다.

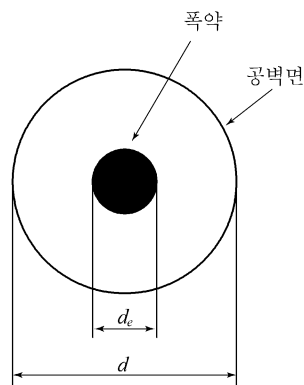


그림 6.1 Decoupling 장약방법

Decoupling Effect는 폭력을 조절하여 발파 예정선만을 따라 균열을 발생하게 되는데 그 이

유는 두 가지가 있다.

첫째, 폭약에너지 방출 및 전달에 있어서 동적 요소의 변화로서 폭약과 공벽 사이에 공기층이 있으면 폭약이 가지는 충격효과는 감소되고 장약공 내벽에 작용하는 접선방향의 최대응력치는 급격히 저하되어 장약공 근방에 생성된 방사상의 균열로 인한 파괴의 범위가 좁아지게 된다.

둘째, 준정적인 요소의 변화로서 Decoupling 장약시 공벽에서의 접선응력은 완전 장약시와는 달리 폭발 생성 가스의 팽창에 의한 준정적인 약한 압력만이 작용하게 된다. 이러한 Decoupling Effect를 이용한 발파기술로는 Smooth Blasting이 있다.

공 지름과 폭약의 지름의 비를 Decoupling Index라 하며, 폭약과 암반의 특성에 따라 적절한 수치를 선택한다.

$$\text{Decoupling Index} = \frac{d}{d_e} \quad (6.1)$$

여기서,  $d_e$  : 폭약의 지름,  $d$  : 공 지름

경암의 경우는 Decoupling Index가 2배 이상, 중경암의 경우에는 Decoupling Index를 3배 이상으로 하면 같은 효과를 얻게 된다.

## 6.2 Decoupling Effect

Decoupling이란 장약 공벽과 폭약사이에 공간을 취하는 것을 총칭하는 것으로서 발파공 지름에 비하여 훨씬 적은 지름의 폭약을 장전하여 발파공 내벽 사이에 상당한 공간을 유지하도록 위치시킨 상태를 Decoupling 장약이라고 하며, 이 공간이 폭약의 폭발 충격력을 약하게 하는 쿠션(Cushion)의 역할을 한다. 이 Decoupling을 이용하는 발파는 일반적으로 제어발파라고 불리며 최근에 주목하고 있는 발파기술의 하나이다. 이것에 속해 있는 것에는 Smooth Blasting, Pre-Splitting, Urbanite 공법 등이 있지만 어느 것이든 과파쇄에 의한 피파괴물의 손상을 가능한 한 작게 하고자 할 때 이용된다. 물론, 공간이 완충재로 작용하기 때문에 폭약의 폭발에 의한 충격력이 약하게 되며, 피파괴물 벽면의 손상을 방지함과 동시에 소음이나 진동의 억제에도 유효하다.

Decoupling Index(D.I)는

$$D.I = \frac{\phi_b}{\phi_e} \quad (6.2)$$

여기서  $\phi_b$ 는 발파공의 지름,  $\phi_e$ 는 폭약의 지름으로 발파공과 폭약 사이의 공간 크기를 표시하는 것으로서 밀장전의 경우 D.I는 1이 된다.

일반적으로 폭약이 폭발했을 때 Jones, Hino에 의하면 폭풍압력  $P_D$ 는

$$P_D = 0.000424 \cdot V_e^2 \cdot \rho_e \cdot (1 - 0.543 \cdot \rho_e + 0.193 \cdot \rho_e^2) \quad (6.3)$$

여기서,  $\rho_e$  : 폭약의 밀도  $V_e$  : 폭약의 폭속

이 폭풍압력  $P_D$ 는 폭약과 접하고 있는 매질에 전달되어 가는데 Decoupling을 이용한 발파의 경우는 매질이 공기이므로 공기의 밀도를  $\rho_a$ , 공기 중의 충격파(P파)의 전파속도를  $C_a$ 로 하면, 폭약과 공기와의 경계면에 있어서 발생하는 최고압력  $P_a$ 는

$$P_a = \frac{2\rho_a C_a}{\rho_a C_a + \rho_e V_e} \times P_D \quad (6.4)$$

로 제시된다. 이 방법으로 구한 값은 근사치이지만 그 신뢰성은 높다. 폭약 폭발에 의한 파괴효과는 폭굉압력  $P_D$ 와 장약공 내에 작용하는 가스압력  $P_s$ 의 상승효과에 의해 발생하는 것이며, 파괴에 대한 기여율은 일반적으로  $P_D$ 가 15%,  $P_s$ 가 85%라고 일컬어지고 있으며, Decoupling을 이용한 발파는  $P_D$ 와  $P_s$  모두 상당히 작게 되어 소위 Mild한 발파라고 할 수 있다. 예로써 세경(細徑)의 SB폭약을 사용한 제어발파의 경우, 폭약과 장약실에 길이는 동일하게 취한다. 폭약경을  $\phi_e$ , 장약공경을  $\phi_b$ 의 비율을 Decoupling Index(D.I)라고 하며, Abel-Nobel의 상태방정식에서  $D.I$ 를 이용한 장약공 내에 작용하는 가스압력  $P_s$ 는

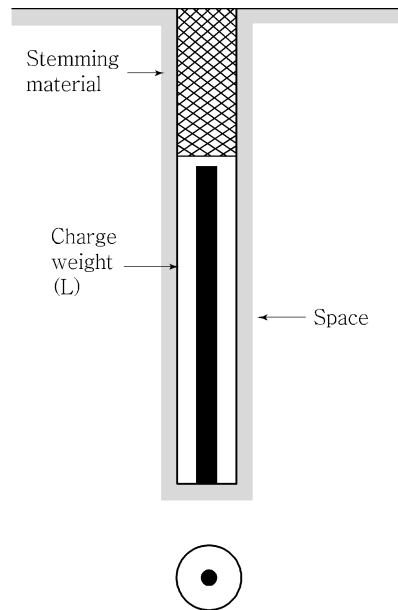


그림 6.2 Decoupling 공법에 의한 장약

$$P_s = \frac{f \cdot L}{V - \alpha \cdot L} = \frac{f}{(V/L) - \alpha} = \frac{f}{(D.I)^2 \cdot (1/\rho_e) - \alpha} \quad (6.5)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.33 + 1.26\rho_e} \quad (6.6)$$

로 제시된다.

여기서,  $\rho_e$  : 폭약의 밀도,  $f$  : 화약력( $1 \cdot \text{kgf}/\text{cm}^2/\text{kg}$ )  
 $V$  : 공내 용적( $l$ ),  $L$  : 약량( $kg$ )  
 $\alpha$  : 코보륨

예를 들어 화약력이  $9000 \text{ l} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^2/\text{kg}$ 이고,  $\rho_e$ 가 1.3인 폭약을 사용할 때  $D.I=2.5$ 의 경우에 대하여  $P_s$ 를 구해보면

$$\alpha = 1.5 / (1.33 + 1.26 \times 1.3) = 0.505$$

$$P_s = \frac{9000}{2.5^2 \cdot (1/1.3) - 0.505} = 2092 \text{ kgf/cm}^2$$

으로써 장약공 벽에 작용하는 폭발가스 압력은 약  $2092 \text{ kgf/cm}^2$ 로 된다. 사용하는 폭약에 대해서는 고려되고 있지 않지만 그림 6.2는 장약공 내벽에 작용하는 응력최고치와 D.I와의 관계에 대해서 구한 일례이며, 식 (6.5)에 의한 계산 결과와 비교적 잘 일치한다. 단, Decoupling을 이용한 발파는 어디까지나 장약공 벽에 작용하는 폭발충격력과 가스압력을 약하게 하여 벽면 보호, 진동, 소음의 억제를 목적으로 한 발파이기 때문에 발파효과의 면에서 보면 폭발에너지 대부분을 파괴작용에 이용할 수 없기 때문에 완전한 발파효과는 기대할 수 없다.

장약공 내에 작용하는 가스압력은 식 (6.3)에 의하여 계산하면 구할 수 있으며, 가스압력  $P_s$ 는 천공간격  $S$ 와 암석의 인장강도  $\sigma_t$  사이에 다음과 같은 관계가 있다.

$$S = \phi_b [1 + 3(P_s / \sigma_t)^{\frac{1}{2}}] \quad (6.7)$$

여기서,  $S$  : 천공간격 (cm)

$\phi_b$  : 천공경 (cm)

$P_s$  : 장약 공벽에 작용하는 가스 압력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\sigma_t$  : 암석의 인장강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

### 1) 제발발파

(1) 2자유면을 가지는 암석발파에서 A, B자유면에 평행한 수개의 발파공을 공간간격, 공경, 공심, 장약량을 동일하게 하여 전기뇌관으로 제발시키면 인접한 발파공들이 서로 보강작용을 하여 채석량이 현저히 증가되거나 파쇄암석은 더욱 분쇄되는데 것을 제발 발파라 한다. 그림 6.3에서 가로선을 친부분은 단일 발파에 의한 파괴부분을 표시하고 세로선을 친부분이 제발발파에 의한 보강작용에 의하여 단일 발파에 비해 더 많이 파괴되는 부분이다.

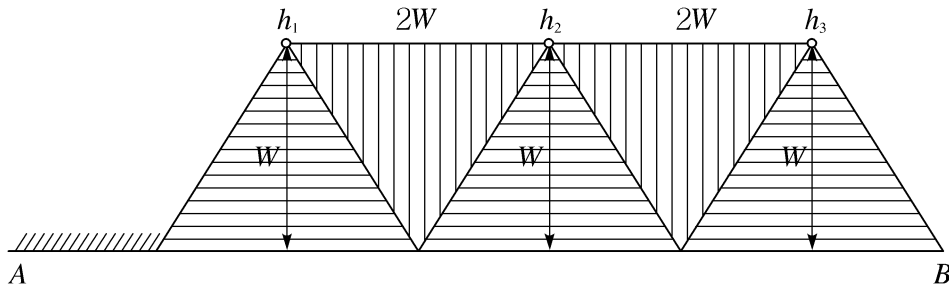


그림 6.3 단일발파(가로빗금)과 제발발파(세로빗금)에 의한 파괴부분

### (2) 제발발파 공 사이의 거리

1. 각 발파 공 사이의 거리가 저항선  $W$ 의 2배를 초과하지 않아야 한다. 저항선의 2배를 초

과하면 단일 발파한 것과 같은 결과가 된다.

$$2. \text{ 발파 공 사이의 거리} = e \times W \tag{6.8}$$

$$\text{공 사이 거리계수}(e) = \sqrt{\frac{S}{W} \times 2.84} \tag{6.9}$$

$S$  : 단일발파공의 약실 주변장

$W$  : 최소저항선

여기서, 2.84는 전단계수와 인장계수의 비로서 일정하다.

$$2.84 = \frac{\text{전단계수}}{\text{인장계수}}$$

그림 6.4과 같이 자유면을 가지는 암반에 평행한 여러 개의 발파공을 간격, 지름 그리고 깊이를 동일하게 해서 전기뇌관으로 제발발파를 하게 되면 인접한 발파공들이 서로 보강작용을 하게 되어 1 Round당 채석량은 많아지지만, 반면에 발파공해를 초래할 수 있는 단점도 있다. 즉, 그림에서 A, B, C의 위치에 장약한 폭약을 각각 단독으로 폭발시키면 삼각형 HAI, IBJ, JCK의 발파 누두공만이 생기게 되지만, 이들을 제발발파를 하면 각각의 장약의 폭발에 의한 파괴작용이 서로 겹쳐져서, 각 발파누두공 이외에 세로줄을 친 중간부분도 파괴되어 전체로서는 사다리꼴 AHKC의 모양을 이루게 된다. 그러나 이 때 암반의 성질에 따라 최소저항선의 길이  $W$ 의 값과 천공간격을 고려하지 않으면 제발발파의 효과가 상실되며, 이 경우 제발발파를 하였다 하더라도 각각의 발파공을 단발발파 하였을 때만큼의 효과도 얻기 힘들다.

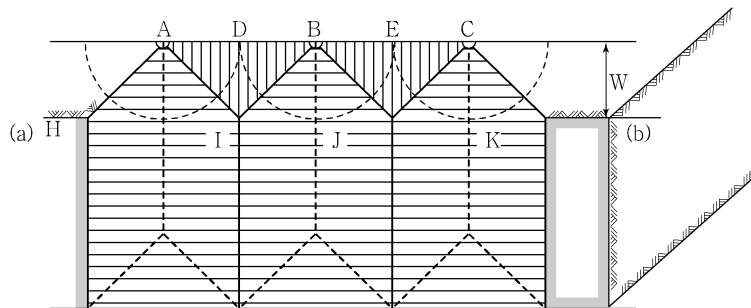


그림 6.4 제발발파

## 2) 지발발파

지발발파법은 그 지연시간의 크기에 따라 보통 지발발파법(Decisecond 또는 DS발파법, Long Period 또는 LP 발파법)과 밀리세컨드발파법(Millisecond 또는 MS발파법)으로 나눈다.

DS(또는 LP)발파법은 0.1~0.5초의 긴 시차로 기폭시키는 것이며, MS발파법은 20~25밀리세컨드의 짧은 시차로 기폭시키는 방법이다. 이와 같은 지발발파를 실시하기 위해서는 DS(LP)뇌관 또는 MS뇌관이 보통 사용되지만, 시차를 임의로 선택해서 실시하고자 할 때에는 순발전기뇌관과 Timer를 병용하고 또 비전기식뇌관을 사용할 경우 표면지연뇌관을 사용할 수 있다. 여기서 지발발파에 의한 파괴기구를 이해하기 위해서는 먼저 단발발파에 따르는 여러 가지 현상에 대하여 시간적인 관점에서 검토할 필요가 있다.

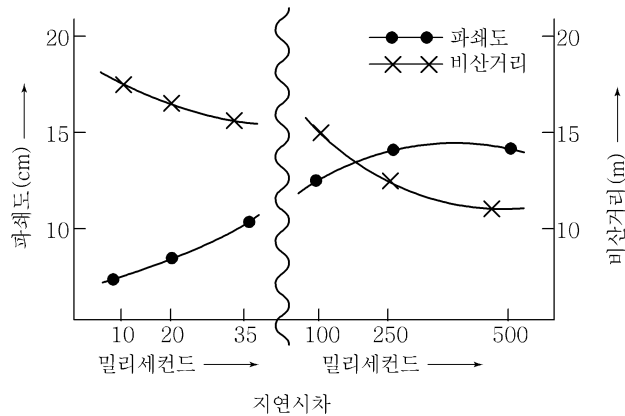


그림 6.5 지발전기뇌관의 시차와 암석의 비산거리 및 파쇄도

일반적으로 폭약의 폭굉에 따른 충격압은 매우 높아서  $10^8 \text{ kg/cm}^2$  정도에 달하나 그 작용 시간은 매우 짧다. 이에 비하여 가스압은  $10^4 \text{ kg/cm}^2$  정도의 값이지만 그 작용시간은 비교적 길다. 그림 6.5는 지발발파에서 지연시차와 암석의 비산거리 및 파쇄도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지발전기뇌관의 시차가 짧을수록 암석은 작게 파쇄되고 멀리 비산된다. 따라서 대발파의 경우에 파쇄암석편이 멀리 비산하여 부근의 가옥에 피해를 끼칠 경우와 같은 때에는 시차가 짧은 밀리세컨드발파법은 적당하지 않다.

한편 많은 시험결과 수백 g의 폭약량으로 최소저항선의 길이가 1m 미만의 발파의 경우 폭굉 후 암반표면에 균열이 일어날 때까지의 시간은 1~9 ms이며, 응력파의 작용에 의한 암반 속에 생기는 균열은 폭굉 후 9 ms 이내에 끝나는 것으로 생각할 수 있다. 다음에 폭굉 후 암반표면이 움직이기 시작하는 시간에 대해서는 측정방법에 따라 그 결과가 다르지만, 최소저항선의 길이가 0.5m 정도일 때 최소저항선 위의 암석이 가장 빨리 파괴되어 움직이기 시작하며, 발파공에서 멀어짐에 따라 움직이는 시간이 늦어진다. 그리고 발파공에 대해서 수직방향보다 수평방향이 더 늦어진다. 이것은 자유면 근처의 암반의 파괴가 응력파의 반사에 의한 파괴만으로 일어나는 것이 아니며, 더욱이 발파누두공이 완전히 생성될 때까지의 시간은 15~30 ms로 보고 있다.(단, 최소저항선의 길이가 1m일 때)

장약량과 시간이 적절하게 조합되면 다수 열 발파에서 열 사이의 암체가 확장(팽창)할 수 있는 공간이 확보된다. 단일 열 발파에서는 파쇄된 암석들이 자유공간으로 자유롭게 이동되기 때문에 팽창이 문제가 되지 않는다. 다수 열 발파에서 첫 번째 열 발파공 앞의 암석들이 두 번째 열 발파가 이루어지기 전에 앞으로 충분히 이동하지 못하면 두 번째 열에서 발파된 파쇄 암석들의 이동에 방해가 될 것이다. 이와 같이 팽창이 제한되면 입자속도가 커지고 파쇄효율은 감소된다. 뒷 열이 충분히 팽창될 수 있도록 팽창공간을 확보해 주기 위해서는 첫 번째 열의 발파에서는 최적의 저항선에 맞도록 계산한 장약량보다 많이 장전할 필요가 있다.

파괴효과의 관점에서 지발발파법과 제발발파법과는 다른 특징을 가지고 있으며, 특히 MS발파법은 종래의 작업경험으로 보아 파쇄효과가 크고, 암석이 적당한 크기로 잘게 깨지며, 분진의 발생량이 비교적 작고, 발파에 의한 진동이 적고, 발파 후의 암괴가 막장 근처에 높이 쌓이지 않고 멀리 날아가며, 발파 후 막장에 부석이 적고, 폭음이 작으며, 인접발파공을 압괴하거나 발파선을 끊는 일이 드물다는 특징이 인정되며, MS발파가 제발발파와 다른 점은 MS발파는 제발발파와 같은 효과가 있으나 각공의 폭발에 시간차가 있으므로 각공은 먼저

폭발에서 생긴 자유면을 이용할 수 있으며, MS발파의 적용 장소로는 석회석 광산이나 노천 채굴시와 탄광에서 Methane 가스가 나오는 곳에서는 제한을 받으며(가연성 가스가 0.5% 이상 일 때), 탄진이 부유할 때, 대발파 및 수중발파를 할 때 등이 있다.

DS(또는 LP)발파법에서도 MS발파법보다 현저하지는 않지만, 역시 같은 특징이 인정되고 있다. 일반적으로 폭약의 폭굉에 의한 작용은 매우 짧은 시간 안에 끝나지만, 가스압에 의한 파괴작용은 상당히 긴 시간 계속된다. 따라서 MS발파의 파괴기구를 생각하면 폭약의 폭발에 의한 충격작용에 의해서 균열이 발생하고, 가스압에 의해서 다시 그 파괴작용이 진행되는 상태에 있을 때, 폭약의 폭발에 의한 충격작용 및 가스압의 작용이 첨가되면 한층 더 파괴를 조장하고 촉진시키는 효과를 가지게 된다. 또 나중의 폭발에 의한 충격작용과 가스압의 작용은 파쇄암석편의 돌출 속도를 증가시키고, 그 결과 파쇄 암석편끼리 충돌이 되어 파쇄효과를 높이며, 보다 멀리 비산된다. 이와 같은 점에서 MS발파는 첫 번째 폭약의 폭발에 의한 충격작용이 사라지고, 가스의 압력이 충분히 작용하고 있을 동안 다음 폭약을 기폭하되 그 시간의 간격은 20~25 ms가 가장 효과적이다.

### 3) 조합발파

최소저항선이 커지면 천공지름도 최소저항선에 비례하여 장약실을 크게 해야만 발파효과를 좋게 유지할 수 있으나 천공지름을 크게 하지 않고 작은 지름의 공들 간격을 좁게 하여 여러 개 천공하여 발파하면 큰 저항선에 대해서도 발파가 가능하다. 이렇게 **큰 저항선에 대해 작은 천공지름으로 집중하여 천공하여 발파하는 방법을 조합발파 또는 집중발파**라 한다.

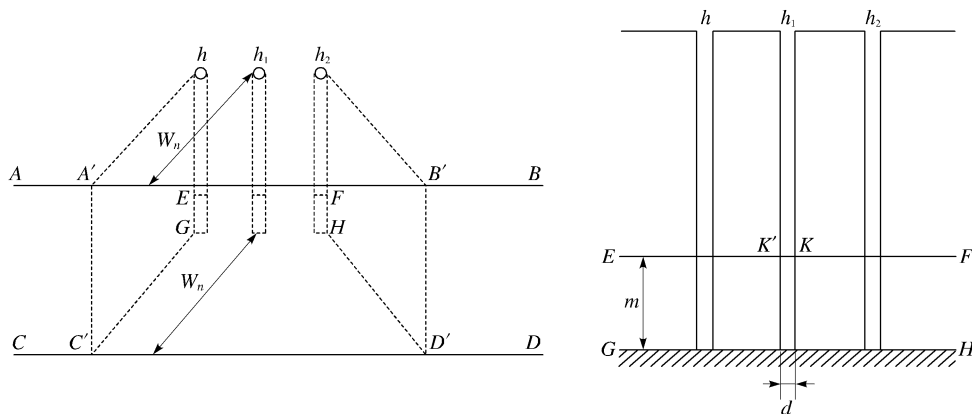


그림 6.6 조합발파

집중발파시의 약실의 투사면적  $A$ 는  $N$ 개의 발파공을 집중하였을 때  $N \times A$ 가 되며 주변장  $S$ 는  $2[m + Nd + (n - 1)K]$ 가 되므로 집중발파시의 저항선  $W_n$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$W_n = \frac{N \times A}{Ca \times 2[m + Nd + (n - 1)K]} \quad (6.10)$$

또한 집중발파시의 저항선  $W_n$ 이 단일발파시의 저항선  $W$ 의 몇배가 되는가는  $W_n = q \times W$

식에서 유도할 수 있다.

$$W_n = q \times W, \frac{W_n}{q} = \frac{A}{Ca \times S} \quad (W = \frac{A}{Ca \times S})$$

$$\therefore q = \frac{W_n \times Ca \times S}{A} \tag{6.11}$$

(6.10)식과 (6.11)식에 의하여 다음식을 구할 수 있다.

$$q = \frac{N \times A}{Ca \times 2[m + Nd(n-1)K]} \times \frac{Ca \times S}{A} = \frac{N \times S}{2[m + Nd(n-1)K]} \tag{6.12}$$

- $q$  : 저항선의 비
- $S$  : 단일발파공의 약실 주변장
- $m$  : 장약장
- $K$  : 공 사이의 거리
- $d$  : 구멍의 지름
- $N$  : 발파공수
- $(n-1)$ : 공 사이간격의 수

### 6.3 Line Drilling

#### 1) 방법 및 적용

이 방법은 굴착 예상면을 따라 일렬의 공들을 공 간격을 좁게 연속적으로 천공하여 본 발파를 할 때 파단면의 형성이 유도되도록 하는 방법이다. Pre-Splitting이나 Smooth Blasting와 비교할 때, 파단 예정면에 천공한 공에는 장약을 하지 않는다는 것이 특징이다. 설계 예를 들면, 라인 드릴링공의 지름은 35~75mm를 사용하고, 공 간격은 지름의 2~4배 크기로 천공하며, 장약을 하지 않고 자유면과 굴착 예정선 사이에 천공된 발파공들에 장약을 한다.

라인 드릴링공과 인접한 첫 번째 주변공과의 거리는 본발파 최소저항선의 0.5~0.75배 정도가 되게 한다. 또한 첫 번째 열의 천공 간격은 본발파 공 간격의 0.5~0.75배로 시행하며, 장약은 일반 장약량의 반 정도로 한다. 이렇게 하여 형성된 공들은 장약한 공들이 발파될 때에 발생한 균열들이 Line Drilling된 면을 따라 파쇄되고, 그 바깥쪽으로는 균열이 미치지 못한다. 이 방법은 발파할 때 후방으로 전달되는 폭발 에너지의 일부가 굴착 예상면에 천공된 공들에 의해 차단되어 뒤쪽 암반에 영향을 주지 않기 때문에 **매끈한 면**을 얻을 수 있지만, **천공 수의 증가로 천공 비용이 증가**되는 단점이 있다. 그리고 가장 중요한 요소 중의 하나로서 **예정 파단선상의 공들이 평행 천공이 이루어져야 하기 때문에 천공 작업의 숙련이 필요**하며, **균질하지 않은 암반에서는 비효과적**이다. Line Drilling은 대부분 **갱의 굴착에 적용**한다.

#### 2) Line Drilling의 장·단점

Line Drilling의 장점은 약장약일 경우에는 굴착선에 영향을 줄 수 있는 곳에서는 적용가능



하며, 발파할 때 후방으로 전달되는 폭발 에너지의 일부가 굴착 예상면에 천공된 공들에 의해 차단되어 뒤쪽 암반에 영향을 주지 않기 때문에 매끈한 면을 얻을 수 있다.

단점으로는 매우 균일한 암반을 제외하고는 발파결과를 예견할 수 없고, 천공간격을 밀접하게 하기 때문에 천공비용이 많이 들며, 천공을 많이 하기 때문에 천공시간이 많이 소요되며, 아주 적은 천공오차에도 나쁜 결과를 초래한다.

## 6.4 Smooth Blasting

### 1) 파괴기구

그림과 같이 인접한 2개의 장약공을 동시에 기폭하면 각각의 폭약으로부터 응력파가 나와서 방사상으로 전파하여 그 응력파가 공 중앙에서 충돌하므로 서로 간섭하여 인장파를 파생하여 천공의 선과 직각방향으로 파단이 생긴다.

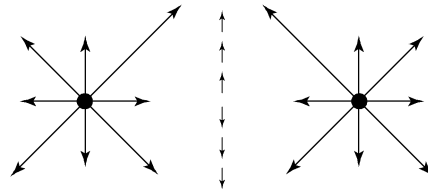


그림 6.7 파괴 원리

### 2) 방법 및 적용

이 발파 방법은 노천이나 지하 터널 작업 모두에서 사용할 수 있지만 주로 지하 터널 작업에서 많이 사용되는 발파법이다. 일반 발파 방법과 마찬가지로 예상 굴착면의 발파공을 맨 나중에 발파시키는 점에서는 같지만 천공 형태는 정상적인 발파작업에 비해 공 간격을 좁게 하고 다른 공보다 작은 지름과 낮은 장약 밀도를 가진 폭약을 사용하는 점에서 차이가 있다. Smooth Blasting의 효과를 좌우하는 중요한 요소는 공 간격(S)대 최소저항선(W)의 비(그림 6.8)이며, 일반적으로 공 간격은 최소저항선의 0.7~0.8 정도로 하면 양호한 결과를 얻을 수 있다. 예를 들면, 공 지름이 25~48mm의 경우, 장약 밀도 0.23 kg/m, 지름 17mm의 정밀 폭약을 사용한다면, 최소저항선은 0.7~0.9m, 공 간격은 0.5~0.7m 정도로 설계할 수 있다.

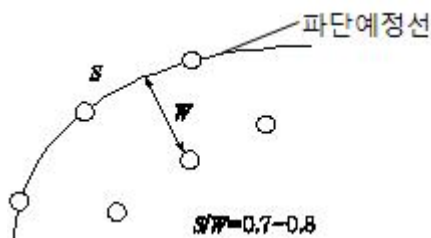
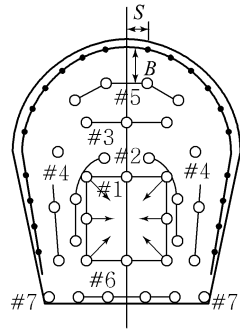


그림 6.8 공 간격과 최소저항선

### 3) Smooth Blasting공법(SB공법)의 실시

SB공에는 **약포의 지름이 적은 저비중 폭약을 장전**, **천공지름과 약포지름의 차를 크게** 하여 폭약을 기폭하면 장시간에 걸쳐 공벽에 정적인 압력으로 하여 서로 연결하는 선상에 원활한 균열을 생기게 하기 때문에 Decoupling 효과도 이용된다.



- 압질 : 경질화강암
- $S \leq 0.8B$
- $B = 0.7 \sim 0.8B$
- SB공
- 사용뇌관 : MSD
- 천공장 : 260cm
- 장약 : 공저에 고성능 GD 200g/공
- 주장약 SB 정밀폭약 4분/공
- S : SB공의 공간격
- B : SB공의 최소저항선

그림 6.9 Smooth Blasting의 천공

SB공법의 천공은 **발파공의 천공장, 천공각도, 공간격의 오차가 적어야** 하며, SB공은 **등간격**으로 될 수 있는 한 **평행**하게 하며, 최소저항선(B)을 너무 멀리 취하지 말아야 하며, **SB공의 간격(S)은 최소저항선(B)보다 작게** 한다.

$$S \leq 0.8B \quad (S = 0.6B \text{가 적당})$$

$$S = 0.5 \sim 0.7m, \quad B = 0.6 \sim 0.9m$$

SB공의 장약은 **정밀폭약(New Finex)**을 사용해야 하며, Decoupling 계수는 2.0~3.0 정도로 하며, 전폭성이 좋은 폭약이어야 한다.(ANFO는 소공경인 경우 전폭성이 나쁘다.) 그리고, 장약량은 1m당 250g 정도가 좋고, 공구로부터 20~50cm까지 되도록 장전한다. 또, 공저에는 뿌리 절단을 잘해 주기 위하여 Gelatin Dynamite를 100~200g 장전하고 정밀폭약을 천공입구까지 채워야 하며, 약포와 공벽간에 공간을 유지하기 위하여 Sleeve를 사용하고, SB공은 원칙적으로 메지를 하지 않으나 전단의 발파에 의해서 폭약이 뿔뿔히 나갈 우려가 있을 때 20cm 정도 메지를 한다. 기폭법은 SB공은 가능한 한 동시 기폭시키는 것이 좋고, DSD보다 초시 편차가 적은 MSD를 사용해야 하며, 전폭약의 위치는 정기폭이 Cut Off의 우려가 있을 때에는 중간기폭이나 역기폭을 실시한다.

### 4) Smooth Blasting의 장·단점

**장점**은 발파에 의한 터널공사나 지하실 공사에서 **굴착예정면의 암반손상을 줄일** 수 있으며, 또한 **여굴이 적고 평활한 굴착면**을 얻을 수 있고 **2차작업이 적어지**게 된다. 그 때문에 자주 **시공작업이 빨라지**며, 낙석이나 낙반의 위험이 적어지므로 **안전상 좋고**, 지나친 굴착이 적어지므로 **콘크리트 매설량이 감소**되고 **공사비용이 적게** 들며, 수로 터널에서는 **수류의 마찰이 적어지**며 또한 **통기경도에서는 통기효율이 좋아**진다는 점이다

**단점**은 암석이 천매암, 결정편암과 같이 절리, 층리, 편리 등이 발달한 암석에서는 효과가 적고, SB공의 **공간격과 최소저항선과의 사이에 조화와 정확도를 요구**함으로써 **고도의 천공 기술이 요구**되며, SB공의 천공간격이 보통의 발파법보다 좁기 때문에 **천공수가 많**게 되고,

도급 생산제를 택하고 있는 곳에서는 천공과 장약에 경비가 들게 되므로 실시하기 어렵다.

## 6.5 Cushion Blasting

### 1) 방법 및 적용

이 방법은 Line Drilling과 같이 일렬의 발파공이 천공되지만 천공 수에서는 Line Drilling보다 적게 요구된다. Smooth Blasting와 마찬가지로 굴착 예상면의 발파공들을 맨 나중에 기폭시키지만 장약방법은 이 방법과 상이하다. 그림 6.10과 같이 발파공보다 훨씬 작은 지름의 폭약을 발파공 내에 분산시키고 폭약을 자유면 쪽의 발파공 벽에 장약하고 나머지 부분은 전색을 실시한다.

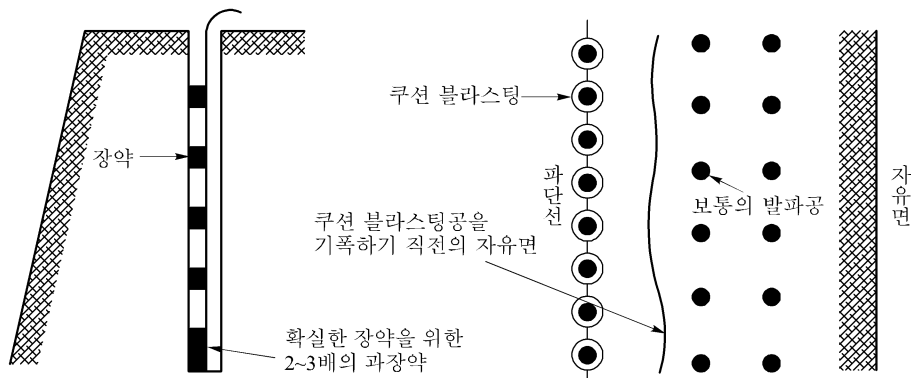


그림 6.10 Cushion Blasting를 위한 장약방법

이 방법은 Line Drilling에 비해 공 간격을 넓게 할 수 있기 때문에 천공비가 감소하지만, 작업의 어려움 때문에 지하 작업에서는 적당하지 못하고 노천에서 수평 및 경사공에 적용할 수 있다. 발파공의 공경은 50~164mm로 다양하다. Cushion 발파공들은 소량 장약하고, 완전하게 메지하면서 잘 분배하여 장약한다. 그리고 주 발파가 이루어진 다음 점화한다. 메지는 폭약으로부터 충격을 완화시키고 틈과 응력을 최소화한다. Cushion 발파에서는 공들 간에 연시초시를 없게 하던가 아주 짧게 하여 점화한다. 폭음과 소음이 문제가 되지 않는 곳에서는 도폭선으로 점화하는 것이 가장 좋은 방법이다.

저항선과 공간격은 주변(경계)공들의 공경 크기에 맞추어 변화시켜야 한다. 발파공에는 도폭선을 부착시켜 약포형 폭약으로 장전한다. 약경 25~32mm, 길이 200mm의 약포형 폭약에 도폭선을 부착시켜 발파공을 따라 30~50cm 간격을 두고 장전한다. 굴착하부에 턱이 없도록 하고, 하부에 위치한 각공들 간에 전단파괴를 증진시키기 위해 발파공 하부에 장약밀도를 높여야 한다. 정확한 천공은 중요하며 이론적인 계획보다 15cm 이상 편차가 생기면 좋은 결과를 얻을 수 없다. Cushion Blasting이 직각(90°)의 코너부근에 이용될 때는 Pre-Splitting과 결합한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

표 6.1 Cushion 발파를 위한 천공·장약 패턴

주변공의 공경 (mm)	장약밀도 (kg/m)	폭약종류	저항선 (m)	공간격 (m)
50~64	0.12~0.35	함수, Dy 25mm	1.20	0.90
75~89	0.20~0.70	함수, Dy 32mm	1.50	1.20
102~114	0.35~1.10	함수, Dy 32mm 밀집장약	1.80	1.50
127~140	1.10~1.50	함수, Dy 55mm	2.10	1.80
152~165	1.50~2.20	함수, Dy 65mm	2.70	2.10

함수 : 함수폭약, Dy : Dynamite

## 2) Cushion Blasting의 장·단점

장점으로는 공간격을 크게 할 수 있고, 천공을 적게 할 수 있으며, 암반이 불균일한 곳에 잘 적용된다는 점이고, 단점은 Cushion 발파공이 점화되기 전에 주발파공이 발파되어야 하며, Pre-Splitting과의 결합 없이 90° 된 코너에 적용하기 어렵다.

## 6.6 Pre-Splitting

### 6.6.1 개요

PS발파(Pre-Splitting 발파)는 범면 보호 및 원활한 벽면을 형성시키기 위하여 본 발파에 앞서서 계획 범면의 선상에 미리 불연속면을 만드는 제어발파의 일종이며, 기본적으로는 Smooth Blasting 이론의 연장이다. 장약공의 직경에 비교해서 작은 직경의 폭약을 장약하면 폭약과 장약공 사이에 공간이 형성되며, 이 공간에 의해 폭약이 폭발할 때 발생하는 충격압은 공기층의 폭굉 Impedance의 차이에 의한 충격의 감쇠효과가 크며, 가스압은 장약공 내 체적의 영향을 받기 때문에 공간이 크면 가스압의 값은 작게 된다. 따라서 공벽에 작용하는 충격압 및 가스압을 조밀 장전의 경우와 비교한다면 벽면을 손상시키는 정도가 훨씬 작은 상태로 공과 공 사이에 균열을 발생시키는 것이다.

### 6.6.2 공내 작용응력

공내에 폭약을 장전해서 폭발시킨 경우 그 장약공내에 발생된 폭발 압력은 암석의 인장강도보다 크고 압축강도보다 작게 되는 범위가 필요하며, 공과 공 사이에 발생된 균열 침단에서의 압력이 인장강도보다 약간 큰 조건을 길게 지속시키는 것이 필요하다.

장약공 내에 발생한 폭발압은 Abel-Nobel의 상태방정식에 의해 계산된다.

$$P_s = \frac{f \cdot L}{V - \alpha \cdot L} \quad (6.13)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.33 + 1.26\rho_e} \quad (6.14)$$

여기서,  $P_s$  : 장약공 내 작용압력 ( $kgf/cm^2$ )

$f$  : 화약력 ( $1 \cdot kgf/cm^2/kg$ )

- $L$  : 장약량 ( $kg$ )
- $V$  : 공내 용적 ( $l$ )
- $\alpha$  : 코보륨 ( $l/kg$ )
- $\rho_e$  : 폭약의 가비중 ( $kg/l$ )

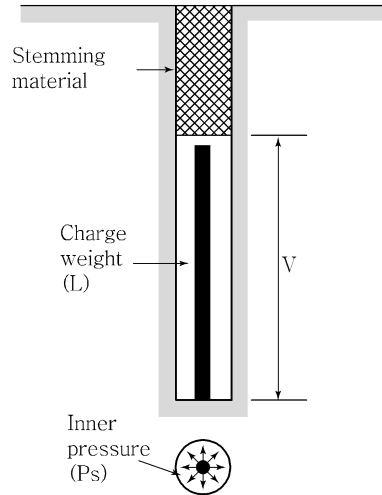


그림 6.11 장약공 내 작용압력

또한, 천공 내 작용압력을 Decoupling Index(공경/약경)의 관계로 구하면 다음과 같이 된다.

$$P_s = \frac{f}{\left(\frac{\Phi_b}{\Phi_e}\right)^2 \frac{1}{\rho_e} - \alpha} \quad (6.15)$$

여기서,  $\Phi_b$  : 천공경 ( $mm$ ),  $\Phi_e$  : 약경 ( $mm$ )

장약공 내 작용압력을 종축에 취하고 Decoupling Index를 횡축에 취하여 장약공 내 작용압력과 Decoupling Index의 관계를 도시하면 그림 6.12와 같게 된다. 그림에서 Decoupling Index가 2.5 이상으로 되면 장약공 내 작용압력은 대략 암석의 압축강도보다 작게 된다. 중경암의 경우는 3.0 이상으로 하는 쪽이 좋다는 것을 알 수 있다. 장약공 내벽에 작용한 준정적압력은 각 공을 연결하는 선(면)상에 발생하는 응력집중으로 균열을 발생시킨다. 그림 6.13 균열반경에 대해서는 종래의 각종 실험 데이터로부터 다음과 같은 실험식이 제창되고 있다.

$$r_t = -\frac{\Phi_b}{2} \left[ 1 + 3 \left( \frac{P_s}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6.16)$$

여기서,  $S = 2r_t$ ,  $r_t$  : 균열반경 ( $cm$ )

$\Phi_b$  : 천공경 ( $cm$ ),  $P_s$  : 천공 내 작용압력 ( $kgf/cm^2$ )

$\Phi_t$  : 인장강도 ( $kgf/cm^2$ ),  $S$  : 공간격 ( $cm$ )

압축강도  $1,050 kgf/cm^2$ 의 암반에 공경 45, 65, 75mm로 천공했을 때 발생하는 균열반경을 구하면 표 6.2와 같다.

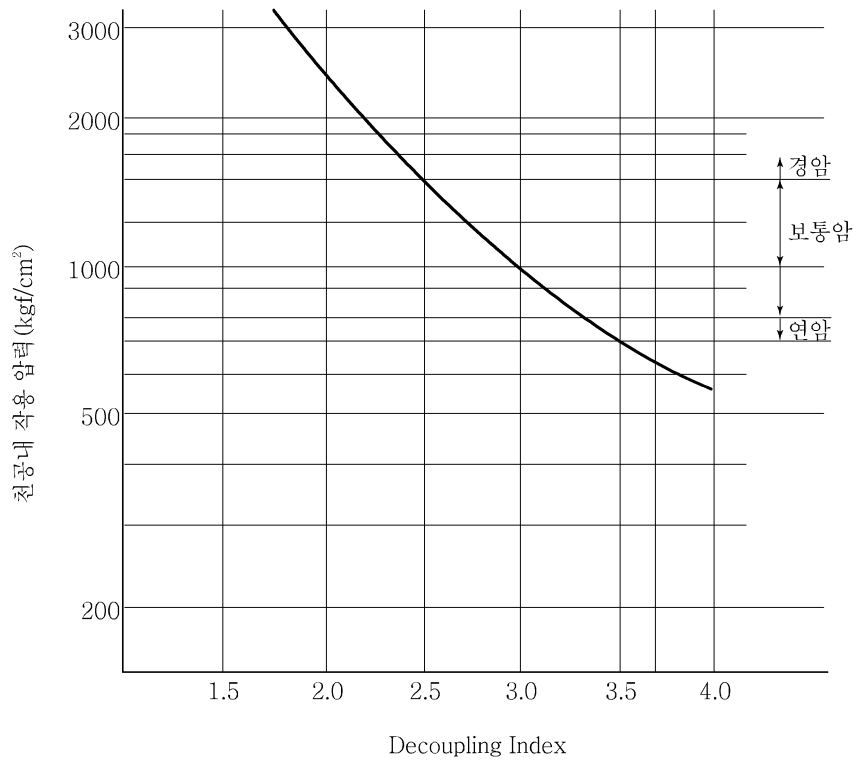


그림 6.12 천공내 작용압력과 Decoupling Index의 관계

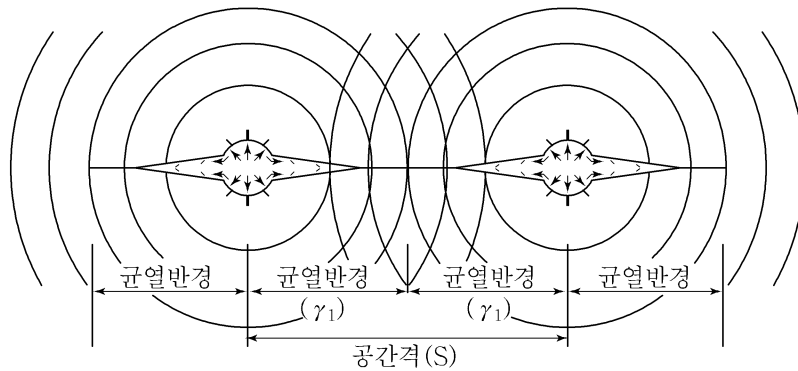


그림 6.13 균열반경

표 6.2 Decoupling Index와 균열반경과의 관계

장약공격 (mm)	45		65		75	
Decoupling Index	2.65 <sup>1)</sup>	2.05 <sup>1)</sup>	3.82 <sup>1)</sup>	2.95 <sup>1)</sup>	4.41 <sup>1)</sup>	3.41 <sup>1)</sup>
장약공 내 작용압력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	825.7	238.9	378.3	106.2	280.7	780.6
균열반경 (cm)	25.5	41.7	25.9	41.2	24.7	40.0
공간격 (cm)	51.0	83.4	51.9	82.4	49.4	80.0

단,  $f=4400^1)$ ,  $8200^2) l \cdot kgf/cm^2$ ,  $\rho_e=1.20^1)$ ,  $1.05^2) kg/l$ ,  $\alpha=0.53^1)$ ,  $0.57^2)$

$\sigma_i=70 kgf/cm^2$ (압축강도의 1/15)

### 6.6.3 Pre-Splitting 계획

#### 1) 장약량

Pre-Splitting은 Smooth Blasting에 비해 균열 수의 발생을 적게 하고 비석이 발생하지 않는 발파를 하기 때문에 폭약 에너지가 균열생성 및 발달에 소비되는 효율이 높고, 1공당 약량은 적게 된다. Pre-Splitting에서의 약량은 다음 식으로 계산한다.

$$W = C \cdot S \cdot L \quad (6.17)$$

여기서,  $W$ : 1공당 약량(kg),  $C$ : 발파계수  
 $S$ : 공 간격(m),  $L$ : 천공길이(m)

발파계수는 암석강도에 따라 변화하지만 암석을 경암, 보통암 및 연암의 3개로 분류하여 과거의 실제 데이터를 기준으로 표 6.3에 제시한 수치를 표준으로 하면 좋다.

표 6.3 발파계수

암석분류	발파계수
연 암	0.17
보통암	0.20
경 암	0.25

또 천공경에 따른 장약량을 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$W_m = \frac{D_b^2}{0.12} \quad (6.18)$$

여기서,  $W_m$ : 약량(g/m),  $D_b$ : 천공경(cm)

#### 2) 공간격

공간격은 근접공 내의 상호간에 발생한 폭발압력에 의하여 생긴 균열의 신장 길이로 결정된다. PS에 사용되는 폭약의 종류와 Decoupling Index 및 균열반경의 관계를 고려해서 천공경의 10~12배 정도를 표준으로 암반상태와 천공 길이의 변화에 대응하여 공간격을 조정할 필요가 있다.

즉, 암반의 절리방향 쪽은 저항이 작기 때문에 쉽게 균열이 발생하지만, 절리에 대하여 직각 쪽은 저항이 크고 절리방향으로 폭발압력이 손실되기 쉽기 때문에 균열발생이 곤란하다. 따라서 절리에 대하여 직각방향으로 Pre-Splitting을 하는 경우에는 공 간격을 좁게 하든가, 장약공과 장약공 사이에 공공을 천공하여 균열이 천공선상에 발생되기 쉽도록 하는 것이 필요하다. 또한 약장약으로 된 경우에도 암반 절리의 영향을 받아서 절리상에 균열이 발생하기 쉬우므로 약장약은 피해야 한다. 일반적으로 공저는 절단하기 어려운 경향이 있기 때문에 공저에 전폭약의 약량을 약간 많이 하는 쪽이 좋다.

### 3) 전색 및 기폭

전색물은 장약공 내에 발생된 폭발압력을 유효하게 작용시키고, 소음발생을 차단시킬 수 있도록 하기 위해서 일반적으로 천공경이 크면 클수록 더 많은 전색이 필요하다. 두 개의 평행한 Pre-Splitting Line 간의 사이가 4m 이내일 경우 동시기폭은 피해야 하고, 평행한 Pre-Splitting Line 간의 시차는 50ms이어야 한다. 한 Line의 기폭은 점화 흠어짐이 없는 상태로 제발시키는 곳이 Pre-Splitting 효과가 높기 때문에 순발 전기뇌관을 사용하며, Pre-Splitting Line이 길 경우 몇 개의 부분으로 나누어 연차적으로 지연되도록 한다. 또한 부득이한 경우라고 해도 발파공간의 지연시간이 17ms를 초과해서는 안 된다.

### 4) 기타

Pre-Splitting 효과는 천공 정밀도에도 크게 영향을 받기 때문에 가급적 천공 정밀도를 높여 천공하는 것이 필요하며, Pre-Splitting은 암반 상태에 대응한 공 간격 및 약량을 결정해야 하므로 시험발파를 실시하고 Pre-Splitting 효과를 확인할 필요가 있다.

## 6.7 폭파의 응용해석

### 6.7.1 폭파의 수치 해석

발파에 의해 발생하는 폭굉압은 통상 10,140kbar(145,000~2000,000psi 범위) 기압에 도달하기 때문에, 암반 내의 폭약이 폭발한 경우에는 매우 큰 응력파가 암반 내에 투사되고, 이 파동에 의해 폭원근방의 암석은 파괴된다. 그러나 이 응력파가 전파함에 따라 감쇠하고, 폭원에서 어느 정도 떨어지면 암석을 파괴할 수 없게 되고, 그 후는 파괴를 동반하지 않는 파동으로써 암반 내를 전파해 간다. 파괴권 내에서의 현상에 관해서는 해석 조건이 매우 복잡하기 때문에, 파괴권 외의 파동에 관해서만 검토가 행해지고 있었다. 그러나 최근 컴퓨터의 발달과 그에 따르는 수치계산법의 개발에 의해, 매우 복잡한 조건의 경우의 해석이 가능하게 되었고 따라서 파괴권 내부의 현상의 해석도 할 수 있는 각종 시뮬레이션 기법이 제안되고 있다.

폭약의 폭발현상을 파동전파문제로 생각한 경우, 수치계산법으로서의 공간, 시간을 각각 이산화해서 수치적분을 하는 것이 일반적이다. 공간의 이산화 방법으로는 차분법, 유한요소법, Tensor Code법 등의 방법이 있으며, 문제에 따라 적용되고 있다. 이들 기법에는 각각 장단점이 있지만 폭발현상을 검토할 경우, 지금까지 많은 성과를 올리고 있는 Tensor Code법에 의한 검토를 소개한다. Tensor Code란 Maenchen과 Sack에 의해 개발된 기법(그림 6.13)이다.

우선 임의시간  $t$ 에 재료 내에 존재하고 있는 응력장에 Lagrange 좌표로 표시한 운동방정식을 적용한다. 그것을 차분근사를 사용해서 풀고, 재료 내의 각점의 시간  $t$ 에 대응한 가속도를 구한다. 그것을 미소한 시간증분  $\Delta t$ 로 2회 적분함으로써 변위를, 또한 이것으로부터 재료 내의 변형률을 구한다. 이것에 재료의 상태방정식을 적용해서  $t + \Delta t$ 시간에 대응하는 재료 내의 응력 상태를 산출해서 그 응력장을 구한다. 이와 같이 해서 구해진 응력장에 다시 운동방정식을 적용한다는 순서를  $\Delta t$ 란 시간 증분으로 반복 실시함으로써 시간을 진행시켜



과도응력을 계산한다는 기법이다.

이 방법에 의한 암반의 파괴상황의 시뮬레이션의 일례로서 Sasa 등에 의해 실시된 해저암반 굴착을 위한 1자유면 천공폭파에 의한 파괴상황을 계산할 경우, 최초에 작은 모델을 상용해서 장약근방의 응력상태를 계산하고, 그 결과를 요소의 중심의 위치의 응력으로서 입력한다.

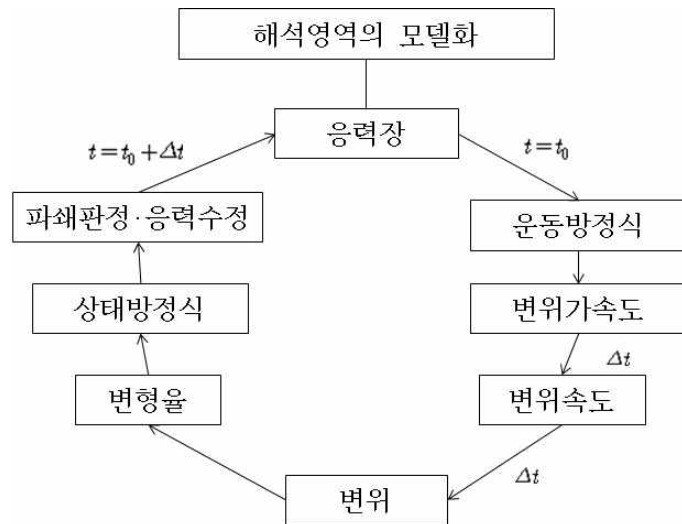


그림 6.13 Tensor Code법에 의한 Simulation 기법

### 6.7.2 전자파 조사

전자파(micro파)를 암석표면에 조사하면 전자레인지에 의한 가열과 같은 원리(유전가열)에 의해 조사면을 중심으로 암석내부에 발열이 생긴다. 식 6.13에 유전가열에 의한 발열량의 계산식을 제시한다.

$$P = \frac{5}{9} f \epsilon_r E^2 \tan \delta \times 10^{-10} \quad (2.13)$$

여기서,  $E$ 는 전기장도( $3 \times 10^4 V/m$ ),  $f$ 는 전기의 주파수,  $\epsilon_r$ 는 비유전율,  $\delta$ 는 유전체 손실각이며,  $P$ 는 유전체(암석) 중에 단위면적, 단위시간당 발생하는 열량( $W/m^2$ )이다.

발열한 영역은 바깥쪽에 팽창해서 팽창압이 생긴다. 이압력이 암석의 강도를 넘었을 경우 Crack이나 파쇄가 생긴다. 각종 암석공시체에 대해서 수10kw~100kw의 전자파를 조사하는 조사실험을 한 결과, 온도상승속도나 최고온도는 크지만, 온도상승범위는 작은 온도분포패턴을 가지는 것과 넓고 깊은 범위에 걸쳐 온도상승이 생기는 패턴의 것으로 크게 나눌 수 있다. 온도상승범위가 작은 암석에는 간극이 많은 Ohyaishi든지 유색광물이 많은 반려암, 섬록암이 있다. 한편, 화강암, 안산암 등의 치밀한 암질의 것은 깊고, 넓은 범위에 걸쳐 온도상승이 생긴다. 전자파 조사에 의한 암석의 파쇄패턴은 앞에서 언급한 온도분포와 밀접하게 관계되고 있다. 간극이 적은 응회질의 암석에서는 전자파 조사에 의해 급격한 폭열현상을 일으키지만, 그 후에 Crater가 생기고 Crack이 형성되는 일은 없다. 이것은 간극 중에 포함되는 물이 특별히 유전율이 큰 물질 ( $20^\circ C$ 에서 물의 비유전율의 약 80)이기 때문에, 선택적

으로 가열되고 수증기 폭발을 일으켰기 때문으로 생각된다.

조사를 연속해도 폭열현상을 단속적으로 일으킬 뿐 폭열공 배후의 온도상승은 상당히 적다. 심성암의 파쇄효율은 유색광물의 함유량이 크고 색지수가 큰 것일수록 파쇄효율이 좋다. 화강암에 대해서는 파쇄는 생기지 않지만 온도분포에 대응한 조사면에 직교하는 깊은 균열이 생긴다. 석회암은 전자파 조사로 파쇄나 균열이 가장 생기기 어려운 암석이다. 이와 같이 암석에 따라 파쇄특성이 다르기 때문에 암반의 파쇄에 전자파 조사를 직접 적용하는 것은 지금까지는 곤란하다고 생각되고 있다. 주위의 느슨함을 동반하지 않고 화강암과 같은 치밀한 암석을 굴착하고 싶은 경우, 하나의 굴착방법으로서 심빼기 발파와 같은 효과를 가진 전자파 조사에 의해 균열 형성과 그 후의 썩기관입과 같은 기계에 의한 파쇄를 조합하는 것도 생각되고 있다. 이 공법은 특히 주위에 방호가 없는 열린 장소에서의 굴착에서는 전자파의 누설에 주의가 필요하고, 조사에 의한 암반의 고열화의 영향을 고려해야 하는 기술적인 문제점과 함께, 그의 경제효율이 매우 나쁜 것도 앞으로 문제로 남아있다.

### 6.7.3 고온암석용융

암석용융굴착은 수 1000℃에 달하는 고온의 발열체를 내장하는 Penetrater라고 하는 암반용융기를 암석 등에 눌러 붙이고 그 부분을 가열용융시켜 더욱더 눌러 붙이는 힘을 유지함으로써 연화된 용융체를 배제하고 그에 의해 봉상체의 추진을 하는 것으로 미국에서 고안된 기술이다. 개발된 Penetrater의 종류에는 고결형과 Slim배제형 등이 알려지고 있다.

고결형 Penetrater는 용융물을 공 외로 배출할 것이 없이 공벽에 눌러 붙임으로써 관입하도록 설계되어 있으며 선단의 형상이 방사선상으로 되고 있다. 이 고결형 Penetrater가 비중 1.8 이하의 다공질 암석이나 층적층 등의 미고결 지반에 관입된 경우, 시추공 주위는 용융해서 유리상태로 된다. 발열체 최고사용온도 2800℃, 발열체 용량 5kw, 직경 50mm의 굴착 Head를 가진 고결형 Penetrater는 터널 등의 굴착을 할 경우 Line drilling 상태로 Borehole을 작성하면 용융유리체가 연속된 일체의 지보공으로 될 수 있기 때문에 굴착과 동시에 지보를 시공할 수 있다는 유리한 면이 있다.

배출형 Penetrater는 현무암, 화강암과 같은 밀도가 높은 암석을 대상으로 한 것이며, 용융물이 냉각매체에 의해 냉각되고, Grass pellet나 Rock wool로서 후방에 배출된다. 이 Type의 Penetrater는 대심도의 천공에의 적용을 목적으로 개발된 것이지만, 발열체를 임의의 깊이에 설치하고 가열함으로써 열응력을 발생시켜, 그 부분의 암반의 파쇄를 하는 것도 가능하다고 여겨진다.

### 6.7.4 새로운 파쇄법

새로운 파쇄법으로 물을 주입한 시추공 중에서 고압전원을 Pulse 상태(10-4s 이하)에 방전함으로써 충격을 발생시켜 암석을 파쇄하는 방법도 제안되고 있다. 또한 Jet를 사용해서 대구경의 천공을 하는 기술은 러시아에 실용화되어 몇 가지 실적이 있다. 최근에는 대출력의 CO<sub>2</sub> laser를 사용해서 암석이나 콘크리트를 파쇄하는 실험도 시작되고 있으며, 가까운 앞날의 실용화가 기대된다. 앞으로 이들 방법에 대해서는 파쇄효율이나 굴착공법으로서의 검토가 계속됨으로써 그의 적용성이 보다 명확히 될 것으로 예상된다.

## 단원정리

### 1. Decoupling 지수

$$\text{Decoupling index} = \frac{d}{d_e}$$

$d_e$  : 폭약의 지름

$d$  : 공 지름

### 2. 제발발파의 공간격

$$\text{발파공간의 거리} = e \times W$$

$$\text{공간거리계수}(e) = \sqrt{\frac{S}{W} \times 2.84}$$

$S$  : 단일발파공의 약실 주변장

$W$  : 최소저항선

### 3. 저항선의 비

$$q = \frac{N \times A}{Ca \times 2[m + Nd(n-1)K]} \times \frac{Ca \times S}{A} = \frac{N \times S}{2[m + Nd(n-1)K]}$$

$q$  : 저항선의 비

$S$  : 단일발파공의 약실 주변장

$m$  : 장약장

$K$  : 공간의 거리

$d$  : 구멍의 지름

$N$  : 발파공수

$(n-1)$  : 공간간격의 수

### 4. 장약공내에 발생하는 폭발압

$$P_s = \frac{f}{\left(\frac{\phi_b}{\phi_e}\right)^2 \frac{1}{\rho_e} - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.33 + 1.26 \rho_e}$$

$P_s$  : 장약공 내 작용압력(  $kgf/cm^2$  )

$f$  : 화약력(  $l \cdot kgf/cm^2/kg$  )

$\phi_b$  : 천공경(  $mm$  )

$\phi_e$  : 약경(  $mm$  )

$\alpha$  : 코보륨

$\rho_e$  : 폭약의 가비중(  $kg/l$  )

### 5. 균열반경

$$r_t = \frac{\Phi_b}{2} \left[ 1 + 3 \left( \frac{P_s}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$r_t$  : 균열반경 (cm),  $P_s$  : 천공 내 작용압력 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\Phi_b$  : 천공경 (cm),  $\sigma_t$  : 인장강도 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $S$  : 공 간격 (cm)

$zr_t$  :  $S$

#### 6. Pre-splitting의 약량

$$W = C \cdot S \cdot L$$

$W$  : 1공당 약량 (kg),  $C$  : 발파계수,

$S$  : 공 간격 (m),  $L$  : 천공길이 (m)

#### 7. 천공경에 따른 장약량

$$W_m = \frac{D_b^2}{0.12}$$

$W_m$  : 약량 (g/m),  $D_b$  : 천공경 (cm)

#### 8. Pre-splitting 공간격

$$S = \Phi_b \left[ 1 + 3 \left( \frac{P_s}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$S$  : 천공간격 (cm),  $\Phi_b$  : 천공경 (cm),  $\sigma_t$  : 암석의 인장강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_s$  : 장약 공벽에 작용하는 가스 압력 (kgf/cm<sup>2</sup>)

#### 9. Trim Blasting

$$L = \frac{Dh^2}{0.12}$$

$$S = 16Dh$$

$L$  : 장약밀도 (g/m),  $Dh$  : 장약공의 직경 (cm),  $S$  : 공간거리