제3장 벤치발파

3.1 벤치발파(Bench blasting) 개요

○ 상부로부터 평탄한 여러 단의 계단을 조성하고 채굴이 진행됨에 따라서 깊게 파내려가는 2자유면 발파(계단채굴)로써 도로사면, 시가지 터파기, 석회석 채굴이나 노천에서 다량의 채석, 채광을 하기 위하여 실시된 발파

○ 오버행(Overhang): 하부를 발파하여 상부의 암석을 중력으로 파괴시킬 때 상부의 암석이 떨어지지 않고 수직 이상의 급각도로 남는 상태로 계단식발파에서 계단높이(H)가 최소저항선(W)보다 극히 클 때 발생하는 현상으로, 방지대책은 천공오차에 따른 하부 집중장약을 미연에 방지하는 것과 최소저항선과 공간격을 고려하여 계단 높이를 조절하는 것

○ 백브레이크(Back break): 계단발파에서 전열 발파 시 발파충격으로 내부 암석에 균열이 생기는 현상으로 최소저항선(W)이 계단높이(H)보다 극히 클 때 발생하며, 방지대책은 막장을 수직으로 하지 않고 경사를 두고, 경사를 크게 할수록 도움이 될 수 있지만 천공장이 길게 되거나 장전에 지장이 있으므로 65~70 ° 로 하는 것이 좋고, 천공간격은 넓게 하기 보다는 좁은 편이 좋으며, 전색의 길이는 길게 하지 않는 편이 좋으며 역으로 전색길이를 너무 짧게($0.5W$)해도 안 됨

○ 벤치발파는 대규모 채석장 발파, 도심지 터파기, 도로사면 발파로 구분하며, 2개 이상의 자유면에 대해서 1열 또는 다열로 이루어진 종방향의 발파방법

○ 국내 대부분의 계단발파의 경우는 이론에 의존하지 않고 경험과 지역의 암반 특성, 즉 압축·인장 강도에 의해 장약량을 결정하고 있으나 일본에서는 일본 고유의 장약량 계산법을 이용하며, 그 밖에는 Langefors의 이론에 의존함. 그러나 이들 식을 이용해서 정확히 계산하여 국내 현장에 적용시키려면 현실적으로 여러 가지 제약이 따름. 특히 천공각도, 화약의 위력 및 자유면의 크기가 일정하지 않으므로 일본의 장약량 계산법이나 Langefors의 계산식에 의존할 경우 암석이 파괴되지 않거나 과장약으로 인한 안전사고의 위험이 있음

○ 국내의 경우 대부분 현장 시험발파를 통하여 취득한 자료를 중심으로 이들 이론식에 다시 적용시키면 좋은 효과를 볼 수 음

여기서, H : Bench 높이, W : 최소저항선

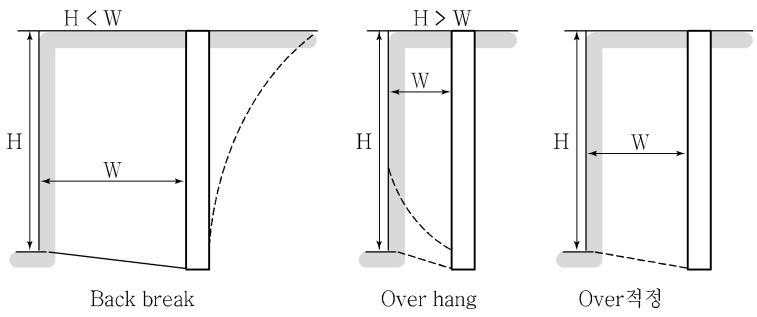


그림 3.1 Back break와 Overhang

○ 벤치발파 설계시 고려해야 할 요소: 천공경, 천공장, 최소저항선, 공간격, Sub Drilling의 길이, 천공경사 등

○ 장전방법: 위로부터 폭약을 계속하여 넣는 보통의 방법인 연속장전(Column charge), 비중이 큰 폭약을 사용할 때 행하는 방법이나 적당히 간격을 두고 장전하는 분산장전(Deck charge), 연속 장약하는 방법으로 아래쪽에는 비중이 큰 폭약을 위쪽에는 비중이 적은 폭약을 넣는 혼합장전(Mixing charge)

○ 분할한 주상장약의 일부가 다른 부분의 폭약을 전폭시키지 않게 분할하기 위하여 분할된 폭약사이에 전색물로 충전. 전색물의 전색장이 충분치 못하면 인접한 폭약이 기폭될 수 있으며, 이것은 건조한 발파공보다 습윤된 발파공에서 두드러짐

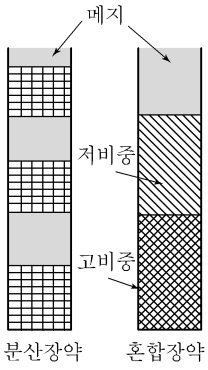


그림 3.2 장전법

- 건조와 습윤된 발파공에서 삽입 전색장

$$S_d = 6D \quad (3.1)$$

$$S_s = 12D \quad (3.2)$$

여기서, S_d : 건조한 발파공의 삽입 전색장(cm)

S_s : 습윤된 발파공의 삽입 전색장(cm)

D : 발파공의 직경(cm)

○ 암석의 강도와 천공경, 천공장 및 장약량에 따라 분산장약을 실시하여 시험발파한 후 적절한 전색장을 결정하여야 하며, 기폭순서는 상부 자유면에 가까운 폭약부터 기폭할 수 있도록 뇌관의 시차 배열에 신중

○ 벤치발파의 장점

- 평지에서 작업이 가능
- 낙석, 붕괴 등의 위험이 없고 안전
- 작업이 단순화되며 발파계획도 단일화하여 설계한 대로 실시
- 계획적 채굴이 됨으로써 다량채석이 가능하고 생산량을 확보 가능
- 암층에 변화가 있더라도 선별하여 채굴할 수 있으므로 품질 관리상 유리
- 각종 고성능의 대형기계류 투입이 가능하므로 경제적
- 다른 발파법에 비해서 비교적 옥석의 발생이 적고, 장공발파를 위해 저비중의 ANFO폭약 등 값싼 폭약 사용

○ 벤치발파의 단점

- 계단 조성을 위해 광범위하게 벌채, 절토, 진입로 등의 준비공사가 많고
- 기계매입 등의 초기투자가 큼
- 다른 노천채굴법에 비교해서 개발공사 기간 긺

3.1.1 암체 모양에 따른 발파공의 위치와 방향

(1) 발파공의 위치

1) 계단 발파 : 암석발파 및 석재 채취에 있어서 암체가 계단상일 때에 순발뇌관을 사용한 전기발파에 의한 제발발파를 실시하면 유리(그림 3.3). 암체의 파괴방향인 전면에 발파공

을 평행하게 천공하고 앞의 열과 뒤의 열을 동시에 폭파시키면 폭발력이 상호 보강작용으로 인하여 채석량 증가

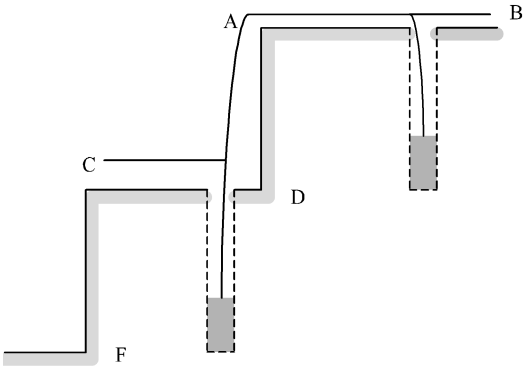


그림 3.3 계단식 발파

2) 경사면의 발파 : 경사가 져 있는 암체를 계단 모양으로 하여 발파효과를 높이면 그림 3.4와 같이 h_1, h_2공을 천공, 장약하여 제발발파를 시행하여 수직면으로 절취한 다음, 암체를 계단상으로 만들고 이와 같은 1차적 작업이 끝나면 h_3, h_4공은 자유면에 대하여 거의 평행이 되도록 천공. h_5공도 동일한 목적에서 천공방향을 취하게 되는데 급격히 수직공을 천공하게 되면 저항선이 크게 되어 파괴효과가 나쁘게 되므로 점진적으로 천공각도를 바깥쪽으로 벌리면서 천공해 가다가 최후의 발파공만 수직이 되게 천공

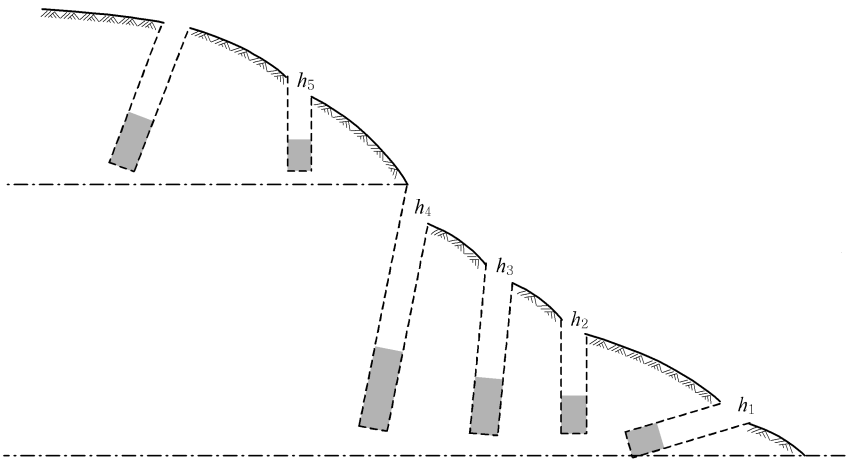


그림 3.4 경사면 발파

(2) 천공의 방향

1) 1자유면의 경우 : 앞면만 자유면 즉 1자유면인 경우에는 자유면에 대하여 수직천공을 실시하면 암석저항이 크기 때문에 공발현상이 야기될 우려가 많으므로 되도록 자유면에 대하여 경사를 가지게 천공 실시. 이때의 파괴 방향은 공저에서 천공방향과 직각인 방향이 파괴선이 되므로 이 파괴선이 자유면의 바깥쪽으로 나가지 않도록 유의. 동일 위치에서 동일한 길이로 발파공을 천공하였을 때에는 자유면에 통하는 파괴선, 즉 최대 파괴선을 선택. 그림 3.5에서와 같이 천공각도가 45 ° 인 h_2공일 때가 가장 효과적이고, h_1공은 파

괴가 일어나지 않으며, h_3공은 파괴량이 아주 적어 비경제적 발파가 됨

2) 2자유면의 경우 : 그림 3.6에서와 같이 앞면과 밑면이 자유면인 암벽의 발파에 있어서는 2자유면을 동시에 이용하도록 설정. AB와 같이 파괴방향을 하부로 향하게 하는 것으로 보아, 그 방향에 대하여 장약실을 평행하게 하면 파괴효과가 가장 좋음. 그러나 AB'공은 2자유면을 이용할 수 있는 방향이기는 하나, 파괴량의 감소로 비경제적이며 하부의 자유면을 이용할 수 없음

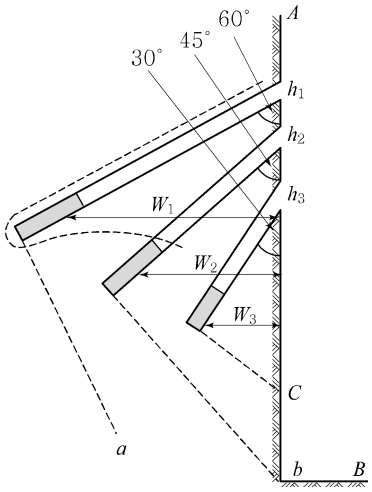


그림 3.5 1자유면 발파

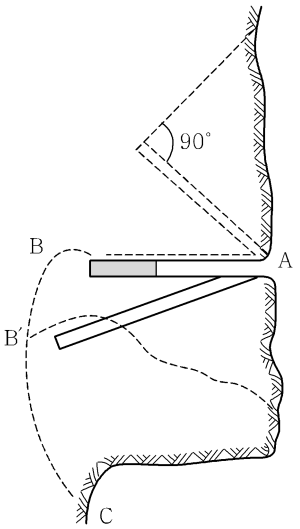


그림 3.6 2자유면 발파

3) 앞면이 경사진 2자유면의 경우 : 그림 3.7과 같이 암체의 발파공의 방향을 앞면에 경사지게 h공과 같이 천공하면 앞면에 대하여 장약실은 평행하게 되나 천공장이 증가하여 천공비가 비싸게 됨. 그러나 h_1공과 같이 상면의 자유면에 대하여 수직공을 천공하면 앞면에 대한 저항선이 길어져 폭파 방향이 윗면으로 되기 쉬우므로 양 자유면을 적당히 조절하여 앞면이 경사진 중간방향으로 천공의 위치를 설정하는 것이 효과적

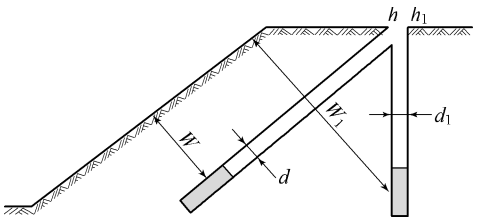


그림 3.7 앞면이 경사진 2자유면 발파

3.2 벤치발파 적용이론

3.2.1 기본 개념

○ 발파공의 형상은 발파공의 공 하부가 완성된 지반보다 아래에 있고, 공 하부가 구속되어 있는 경우와 구속을 받지 않는 경우가 있고 실제로 대부분의 발파법은 기본적으로는 벤치발파의 형태로 이루어져 있음. 트렌치 발파의 경우도 벤치발파와 동일하지만, 암반이

구속되어 있기 때문에 단위 체적당 폭약 사용량과 천공 길이가 증가하게 됨

○ 터널발파의 경우 1자유면만이 존재하기 때문에 이것도 갱도 굴진에 해당. 갱도 굴진의 위, 상부 반단면이나 선진도갱굴진이 끝난 후 남는 부분을 도갱 방향으로 향해서 벤치 발파를 하며, 절개 확장 방법이라고 함

○ 폭약이 폭굉했을 때 암석이 파쇄되기 위해서는 폭굉력이 암석 강도보다 커야 함

○ 혈암을 포함한 곳에서는 폭발 가스가 충분히 힘을 발휘하여 암반 파쇄에 작용할 수 없고 가스가 공극 사이로 분산해 버리기 때문에 비교적 강도가 약함에도 불구하고 발파 효과가 나쁘게 나타남

○ 경험으로 암석의 발파 특성을 가장 간단하게 표시할 수 있는 단위는 암석의 체적에 대한 폭약 사용량으로 표시: 체적당 폭약량 단위는 kg/m^3

○ 폭약량 단위를 근거로 하여 계산 방식을 사용하면 암석의 발파 특성에 관한 변수를 고려해 암석의 강도에 알맞은 장약량 산출 가능

○ 이론적인 계산에서 얻어진 장전 밀도를 실제발파에 적용할 수 있도록 하는 것이 중요

○ 벤치 발파의 경우 약량 산정은 저항이 큰 천공 하부를 파쇄하는 데에 필요한 약량으로 산정하며, 천공 하부 위의 부분, 즉 공의 상부를 파쇄할 때는 밀도가 낮은 약량으로도 충분히 파쇄가 되므로 실제로 천공 오차나 암석을 앞으로 밀어내는 것을 고려하여 약간의 과장약 상태에서 실시

○ 기폭 방법의 가장 중요한 것으로, MS발파에서는 인접공을 1,000분의 수초라는 짧은 시차로 발파하게 되며, 인접한 공과 공 사이의 매우 짧은 시간차는 서로 중첩되어 암석이 파쇄되는 것을 촉진시키는 역할을 담당하고, 그보다 빠른 앞의 시간차는 비석이 앞으로 나가는 것을 막아 그 자리에 비석이 쌓이는 역할을 함. 2~3초의 초시차를 가지고 시행하는 발파에서는 비석이 증가할 뿐만 아니라, 파쇄 효과가 나빠지고 흙도 많아짐. MS발파는 보통 1열 발파의 경우에 필요한 최소한의 약량보다 많아서 과장약 행해짐

3.3 저계단식 및 고계단식 발파

3.3.1 저계단식 발파

(1) 저계단식 제발발파(순발전기뇌관 사용)

○ 발파설계와 공사기간을 검토한 공간격 관계식

$$S=\frac{L+2B}{3} \tag{3.3}$$

여기서, S : 공간격(m), L : 벤치높이(m), B : 저항선(m)

- 공간격이 저항선보다 항상 적어야 함

(2) 저계단식 지발발파(MS, LP뇌관, 비전기식 뇌관, 전자 뇌관 사용)

○ 발파형태가 지발발파이면서 벤치 높이와 저항선의 비가 1~4일 때 공간격 설정

$$S=\frac{L+7B}{8} \tag{3.4}$$

여기서, S : 공간격(m), L : 벤치높이(m), B : 저항선(m)

- 계산된 공간격은 일상적으로 실제 공간격의 +15% 범위 안에 있어야 함

3.3.2 고계단식 발파

(1) 고계단식 제발발파

○ 높은 벤치가 그 역할을 다하기 위해서 벤치 높이와 저항선의 비는 4이거나 그 이상이어야 함. 발파 형태가 제발발파일 때 공간격 관계식

$$S = 2B \tag{3.5}$$

(2) 고계단식 지발발파

○ L/B의 조밀도가 4이거나 그 이상이고 발파 형태가 지발발파일 때, 공간격 관계식

$$S = 1.4B \tag{3.6}$$

3.3.3 기폭시차

○ 지연초시: 같은 열 내의 공간시차

○ 열내의 공간격의 지연초시: 열과 열사이의 기폭시간, 열과 열 사이 기폭 시간 사이의 지연은 고비용이면서 지반진동과 미세한 봉기의 생성을 감소시킴

○ 다양한 암석 종류에 대한 지연시간 상수(표 3.1)

표 3.1 공 사이의 지연시간(2개의 자유면에 대하여)

암석의 형태	지연시간 상수(ms/m)
모래, 석탄, 롬층	5.8~6.7
석회암, 세일	4.8~5.7
단단한 석회암, 대리석, 약한 화강암, 현무암, 석영	3.8~4.8
휘록암, 반암, 균질 편마암, 자철광	2.9~3.8

(1) 공간의 지연시간

$$tH = TH \times (S \div 3.2) \tag{3.7}$$

여기서, tH : 공간의 지연시간(ms), TH : 공간의 지연시간 상수, S : 간격(m)

(2) 열과 열 사이의 지연시간

○ 열과 열 사이의 지연초시에 따른 결과

- 짧은 지연시간은 자유면에 대해 더 큰 암괴 발생 시킴
- 짧은 지연시간은 하부가 발파되지 않을 수 있음
- 짧은 지연시간은 더 많은 폭력, 폭풍, 지반진동 야기
- 짧은 지연시간은 비산에 대한 더 많은 잠재력 가짐
- 긴 지연시간은 지반진동의 수준을 감소시킴
- 긴 지연시간은 여굴을 감소시킴

○ 열과 열사이에 적용되는 지연시간 결정(표 3.2)

- 지연시간은 열간 저항선의 m당 2 ms보다 적지 않고, m당 20 ms보다 크지 않음
- 벽의 조정이 복합 횡렬 폭파에서 부족할 때 열간 지연은 버럭 아래 파일의 횡렬에 대한 저항선의 40~80 ms/m만큼 확장됨

표 3.2 열과 열 사이의 지연시간

tR constant(ms/m)	결과
5.8~6.7	맹렬한 폭굉압, 후굴 있음 등
4.8~5.7	높게 쌓인 버럭, 보통의 폭굉압, 후굴 있음.
3.8~4.8	보통 쌓아 올린 듯한 높이 버럭, 평균 폭굉압, 후굴 있음.
2.9~3.8	흩어진 상태의 버럭

○ 열간 사이의 지연시간에 대한 방정식

$$tR = TR \times (B \div 3.2) \tag{3.8}$$

여기서, tR : 열간의 시간 지연(ms), TR : 열간의 시간 요소, B : 저항선(m)

3.4 Langefors의 벤치발파 계산

○ Langefors 이론: 벤치발파 이론 중 외국에서는 널리 이용되고 있으나 국내에서는 지형적인 영향과 암석의 물리적 성질이 다르기 때문에 현장에 이 이론을 적용시키기엔 여러 가지 어려움이 있음

○ 비장약량: 어떤 강도를 갖는 한 폭약의 암석 체적에 대한 양으로 정의되며, 암석의 발파특성과 가장 쉽게 대응하는 단위

- 비장약량에 기초한 계산체계를 사용하면 암석의 발파특성 변화를 고려한 암석에 대한 장약량 계산 가능
- 비장약량은 장약량 계산에 있어서 매우 중요하며 암석 내에서의 장약 분포도 매우 중요
- 같은 비장약량일 때에 작은 공을 좁은 간격으로 뚫을 때가 큰 공을 넓은 간격으로 뚫을 때보다 좋은 파쇄 가능

○ 실제로는 상당한 양의 초과장약이 천공오차를 보상하여 사용되며 그것은 팽창과 암석을 앞으로 이동시키는 데 필요한 힘을 제공. 짧은 시간의 지연발파는 암석이 인접공 사이에서 수백분의 일 초의 지발상태로 발파되는 원리를 이용하며 짧은 시차는 최소저항선을 파괴하는데 서로 돕는 것을 의미. 짧은 지발발파 작업 파쇄암석이 서로 부딪쳐 비산 방해.

○ DS 또는 MS발파는 일반적으로 한 예의 공에 대한 파괴한계치보다 상당한 양의 초과장약이 됨. 사용된 폭약의 양은 암석을 이완시키는데 필요한 최소량에 근접해야 함. 이것은 오랜 경험과 실험에서 폭약과 암석의 역학적 성질에 맞게 설계 장약해야 함

3.4.1 저항선 산출

○ Gustaffson 식

$$B_{\max} = 45D \tag{3.9}$$

○ Langefors 식

$$B_{\max} = \frac{D}{33}\left[\frac{P \cdot s}{C \cdot f \cdot (\frac{S}{B})}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.10}$$

여기서, P : 장전(다짐)밀도(kg/m), C : 암석의 상대계수(kg/m^3), s : 폭약밀도

$\frac{S}{B}$: 공간격(S) 대 저항선(B)의 비, f : 발파공의 구속정도

- 식 (3.9)의 천공경 D와 저항선 $B_{\max}$는 cm, 식 (3.10)의 천공경 D는 mm, 저항선 $B_{\max}$는 m

○ 식 (3.10)을 발파공저부분의 장약밀도, $I_b(kg/m)$와 천공경사도에 따른 계수(R_1) 및 상대 암석계수에 따른 보정계수(R_2)를 고려하면(표 3.3),

Dynamite의 경우 $B_{\max} = 1.47(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$ (3.11)

에뮤라이트의 경우 $B_{\max} = 1.45(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$ (3.12)

Anfo의 경우 $B_{\max} = 1.36(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$ (3.13)

- 최소저항선은 약실과 가장 인접한 자유면까지의 거리로서 첫 번째 발파되는 공과 계단면까지의 거리 또는 다열 발파의 경우 열과 열 사이의 거리 임
- 점화 순서에 따라 각 단별로 형성되는 자유면의 방향이 변화될 수 있고 실질적인 저항선의 길이가 달라질 수 있음
- 최소저항선이 너무 작으면 과도한 비산이 발생하거나 가스가 쉽게 방출되어 소음이 크고, 저항선이 너무 크면 파쇄도가 나쁘고, 지반진동이 크게 발생

표 3.3 Langefors식의 변수 범위

변 수	조 건	변수 범위
장약밀도 (kg/m)	발파공경보다 작은 규격의 장전봉	0.8~1.0
	발파공경과 거의 같은 규격의 장전봉	1.0~1.4
	공기 장전기	1.0~1.6
	장전기 없이 입자 ANFO	1.0~1.6
암석상대계수 (kg/cm^3)	단일공 초기 설계	0.45
	일열 초기 설계	0.36
	수평 층상 퇴적암	0.2~0.45
	경험적 범위	0.2~1.2
폭약 상대강도 (s)	35% NG Dynamite	1.0
	블라스팅 젤라틴	1.27
	ANFO	0.87
발파공의 구속정도 (f)	구속 없는 바닥	0.75
	구속된 2 : 1 경사면	0.85
	구속된 3 : 1 경사면	0.9
	구속된 수직면	1.0
공간격 대 저항선의 비 (S/B)	벤치발파	1.25, 1.4, 1.5
	Smooth Blasting(특수상황)	0.7

(1) 공저 장약밀도(I_b)

$$I_b = 7.85 D^2 P \quad (3.14)$$

여기서, D : 발파공 직경(cm), P : 장전밀도(kg/l)

폭 약	에뮤라이트	Dynamite	Anfo
장전밀도(kg/l)	1.05	1.25	0.80

(2) 천공경사도에 따른 계수(R_1)와 상대 암석계수에 따른 보정계수(R_2)

천공경사도	수직	10:1	5:1	3:1	2:1	1:1
R_1	0.95	0.96	0.98	1.00	1.03	1.10

상대암석계수	0.3	0.4	0.5
R_2	1.15	1.00	0.90

3.4.2 실질적인 저항선(B)

○ 천공오차

$$E = \frac{D}{100} + 0.03L \quad (3.15)$$

여기서, D: 착점 오차 = 천공경(cm), L: 천공오차, 천공장의 단위 m당 0.03m

○ 실질적인 저항선 B

$$B = B_{\max} - E \quad (3.16)$$

3.4.3 계단 바닥선의 아래 부분의 천공깊이(U)

○ 뿌리깍기를 잘하기 위해서 이 부분의 천공은 필수적

$$U = 0.3 B_{\max} \quad (3.17)$$

- 천공장이 긴 경우 최소 $U = 10D$ (D=천공경) 정도 유지하는 것도 좋음
- 계단 하부의 암반이 파쇄되지 않으면 파쇄물의 처리를 위한 장비의 접근이 어렵고, 다음 발파에도 영향을 미치므로, 바닥면의 턱을 없애기 위한 목적으로 실시

3.4.4 천공장(L)

○ 천공장(L) = 계단높이(H) + Sub-drilling(U)

$$L = H + U = 0.05(H + U)$$

$$L = 1.05(H + U) \quad (3.18)$$

○ 천공방향이 연직 방향과 θ각을 이룰 때,

$$L = (H + U)/\cos\theta \quad (3.19)$$

3.4.5 계단 높이(H)

○ 계단높이(H)와 폭약 직경 관계식

$$H = 60 D_e \quad (3.20)$$

여기서, H : 최소 계단높이(cm), D_e : 폭약 직경(cm)

- 계단높이(H)와 저항선(B)의 비가 $H/B < 4$ 일 때 낮은 벤치(Low bench), $H/B \geq 4$ 일 때 높은 벤치(High bench)

3.4.6 실제 천공간격(S)

○ 실제 천공간격(S)는 $1.25B$로 하고 있으나 계단높이(H)와 저항선(B)의 비, 제발 및 지발 발파로 구분

구분	$H/B < 4$	$H/B \geq 4$
제발발파	$S = (H + 2B)/3$	$S = 2.0B$
지발발파	$S = (H + 7B)/8$	$S = 1.4B$

3.4.7 공저장약길이(h_b)

○ 발파공 뿌리부분의 암석을 느슨히 하거나 파쇄시키기 위한 공저장약장(h_b)

$$h_b = 1.3 B_{\max} \quad (3.21)$$

3.4.8 공저장약 밀도(I_b)

○ 장약공 맨 끝 부근에 있는 암석을 파쇄시키기 위한 장약

$$I_b = \frac{d^2}{1000} (kg/m) \quad (3.22)$$

3.4.9 공저장약량(Q_b)

$$Q_b = I_b \cdot h_b \quad (3.23)$$

3.4.10 무장약 부분의 길이(=전색의 길이, h_o)

○ 전색의 길이(h_o)는 저항선과 같게 함

$$h_o = B \quad (3.24)$$

- $h_o < B$: 상부표면의 비석위험은 높아지지만 옥석의 발생량은 적어짐, $h_o > B$: 대괴의 양은 증가하나 비산은 적어짐

3.4.11 상부(주상) 장약밀도(I_c)

○ 하부 장약공 윗부분 암석을 파쇄시키기 위해서는 주상장약밀도를 크게 해야 하며, 상부 부분의 발파공은 하부 장약공보다 오차가 적기 때문에 장약 밀도는 적게 해도 무방함

$$I_c = (0.4 \sim 0.6) I_b (kg/m) \quad (3.25)$$

3.4.12 상부장약길이(h_c) 및 장약량(Q_c)

상부 장약길이는 $h_c = L - (h_b + h_o)$ (3.26)

상부 장약량은 $Q_c = h_c \cdot I_c$ (3.27)

3.4.13 공당 총장약량(Q_{tot})

○ 공당 총장약량(Q_{tot}) = 공저 장약량(Q_b) + 상부 장약량(Q_c)

$$Q_{tot} = Q_b + Q_c \quad (3.28)$$

3.4.14 단위 체적당 폭약량(=비장약량, Q_s)

○ 발파당 n 개의 발파공을 천공하여 발파할 경우 비 장약량은(Q_s),

$$Q_s = \frac{nQ_{tot}}{nBSH}(kg/m^3) \Rightarrow \text{골재 채석장 및 노천채굴에 이용} \quad (3.29)$$

○ 발파당 전체 폭을 W라 하면,

$$Q_s = \frac{Q_{tot}}{WSH}(kg/m^3) \Rightarrow \text{도로 발파 등 발파가 한정된 곳} \quad (3.30)$$

3.4.15 단위 체적당 천공장(= 비천공장, L_s)

○ 발파당 n개의 발파공을 천공하여 발파할 경우 비천공장(L_s),

$$L_s = \frac{nl}{nBSH}(m/m^3) \Rightarrow \text{골재 채석장 및 노천채굴에 이용} \quad (3.31)$$

$$L_s = \frac{nl}{WBH}(m/m^3) \Rightarrow \text{도로 발파 등 발파가 한정된 곳} \quad (3.32)$$

3.5 파쇄입도 조절

○ 파쇄입도: 발파 후 얻어진 암석의 크기를 나타내며, 이에 대한 일반적인 측정방법이 없어서 정확한 정의를 내리기 어려움

- 파쇄계수: 스웨덴의 수력발전협회에서 파쇄 정의를 나타내는 시스템으로 파쇄암석의 50%가 통과하는 Mesh로써 나타냄
- 상대파쇄계수: 발파로 생기는 암편의 파쇄도로 Langefors가 가장 큰 옥석의 크기를 측정하여 파쇄입도 측정의 가능성을 제시

○ 파쇄입도에 영향을 미치는 요인: 암반특성, 비장약량, 단위천공률, 점화순서, 점화지연간격 등

3.5.1 폭약

○ 폭발속도는 폭파효과에 큰 영향을 미치며, 폭발속도가 빠른 폭약은 굳은 암석에 적합하고 반응속도가 느린 폭약은 가스방출이 많아서 균열된 암반이나 단층이 존재하는 암반의 발파에 적합(표 3.4)

표 3.4 폭약과 암석의 상호관계

암 반 명	탄성파의 속도(m/sec)	폭발속도(m/sec)	폭 약 명
균질한 화강편마암	5,000~6,000	6,300	Dynamite
경질석회암	3,000~4,500	4,000	초안폭약 및 함수폭약
연질석회암	1,000~2,500	2,200	ANFO

3.5.2 암반의 특성

○ 단층이 많이 발달된 암석에서는 단층의 발달방향에 따라 천공계획을 세워야 함(그림 3.8)

- 수평 방향의 단층일 경우, 폭약이 가능한 유효하게 작용할 수 있도록 단층면에 교차할 수 있게 천공 각도를 맞추어야 함
- 거의 수직인 단층의 경우, 단층과 직각에 하중을 갈라놓도록 발파하는 것이 좋은 방법

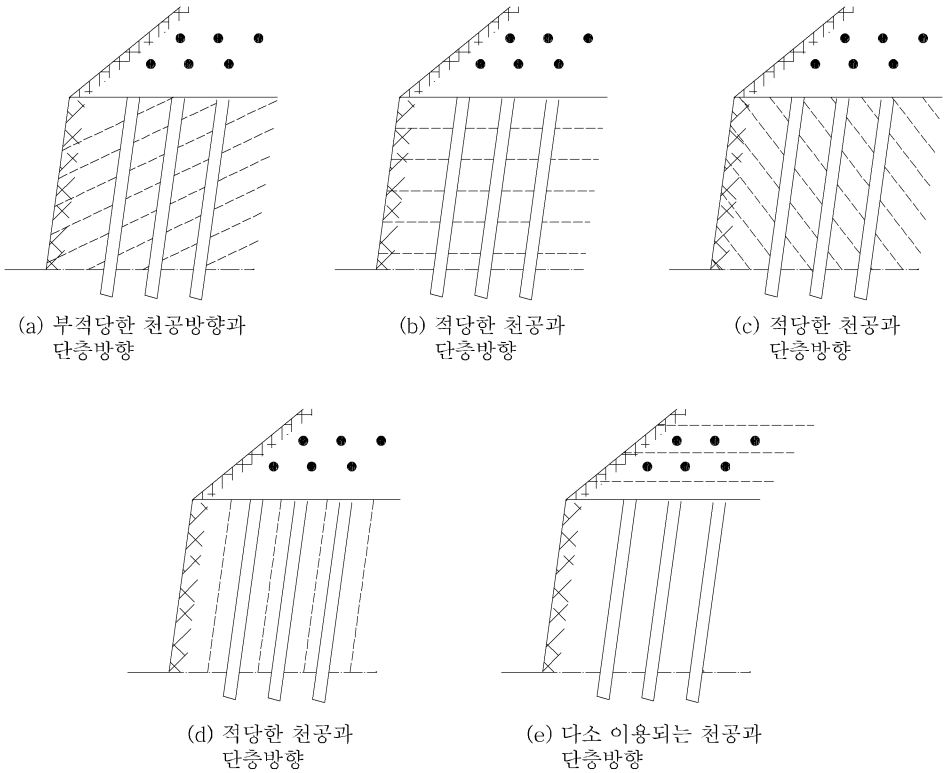


그림 3.8 단층의 발달방향과 천공방법(Gustafsson)

3.5.3 비장약량

○ 단위체적당 장약량(kg/m^3), 비장약량을 증가시키면 파쇄효과도 좋아짐

(1) 공저장약(주장약)

○ 발파공 하부의 암반이 충분히 파쇄될 수 있도록 하부에 체적당 장약량을 증가시켜 충분한 힘 부여

○ 폭굉압이 암석의 일축압축강도를 초과하는 발파공 근처에서 암석 파쇄

○ 장약밀도와 파쇄암석 직경과의 관계(표 3.5)

표 3.5 장약밀도와 파쇄암석의 직경과의 관계(강한 암석의 경우)

공 경(mm)	장약밀도(kg/m)	파쇄암석의 직경(mm)
30	0.9	35
50	2.5	70
100	10.0	150

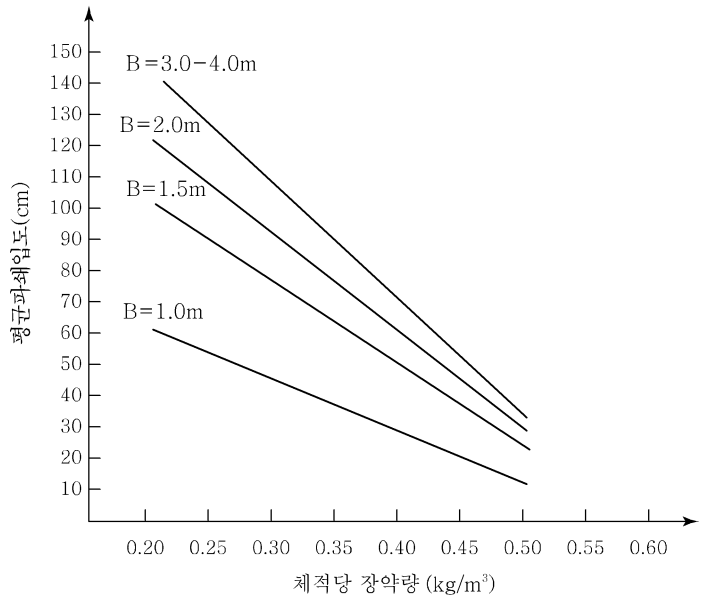


그림 3.9 저항선별 파쇄입경과 약량

(2) 상부장약

○ 공저 경우에 비해 장약밀도와 하부구속력이 적기 때문에 분쇄량도 적으며 단위 길이당 장약량이 증가하면 파쇄입도도 작아짐(그림 3.9). 암석에 균열이 없고 균질한 경우도 파쇄입도와의 관계에서 정확한 값을 보여줌

(3) 무장약 부분

○ 파쇄입도에 그다지 영향을 주지 않으나 이 부분이 크면 옥석을 형성하게 되므로 좋은 결과를 얻기 위해서는 고밀도의 상부장약을 하거나 무장약 부분에 보조공을 뚫어 되도록 작은 옥석이 형성되도록 해야 함

표 3.6 별도 상부장약밀도, 공경, 폭약에 따른 무장약부분

별도 상부장약(*kg/m*)	폭 약 명	무장약 부분(*m*)
1.00	29mm Dynamite	1.80
0.65	25mm Dynamite	1.50
0.50	22mm Dynamite	1.40
0.40	22mm 초안폭약	1.25
0.16	17mm ANFO	0.80

3.5.4 단위 천공률

○ 일정한 비장약량에서 최소저항선이 클수록 파쇄입도도 증가함

○ 최소저항선이 짧으면 장약량은 암석 내에 잘 분포되고 옥석의 형성 정도도 천공간격에 의해 제한됨

○ 큰 직경의 천공에 집중장약을 할 경우 파쇄 되는 범위는 넓어지지만 파쇄암석의 입도 크기는 커짐

○ 장약량이 적을 때에는 최소저항선에 따른 파쇄입도의 차는 크게 나타나지만 비장약량이 높을수록 이 차는 줄어듦
○ 천공의 정확도도 매우 중요한데, 천공이 불규칙하거나 잘못 뚫렸을 때에는 파쇄입도의 결과도 좋지 않음

3.5.5 발파의 지발시간
○ 단발초시는 전체 발파효과에 커다란 영향을 주고 파쇄도의 관점에서도 매우 중요함
○ 저항선이 짧은 경우, 암석은 급속하게 전방으로 움직이고, 만약 초시간격이 짧으면 암석은 인접 발파공이 폭발하기 전에 이동하는 시간이 충분하지 않음
○ 인접공간의 초시차가 지나치게 짧은 것은 다음 열의 공간에 대한 파쇄암이 확장되어 공간을 만드는 시간을 방해함
○ 저항선이 큰 경우, 방위의 이동이 완만해져 균열 형성 및 폭발 가스의 진입에 시간이 오래 걸림
○ Langefors의 지발시간과 최소저항선의 관계식

$$\tau = K \cdot V \tag{3.33}$$

여기서, V : 최소저항선, K : 5~12의 값을 갖는 상수, τ : 지발시간(ms)
- Janelid의 경험에 의하면, 정수가 높은 쪽의 값은 큰 저항선(5~8m)을 취할 경우에 적합하다고 서술하고 있으며, 강추원은 식 3.33의 관계가 1열 발파나 2열 발파 일 때 최적이라고 제시. 그러나 세 번째 열 발파의 경우 식 3.34 관계 성립

$$T = kB \tag{3.34}$$

여기서, k = 약 12

3.5.6 파쇄를 좋게 하기 위한 방법
○ Langefors의 Plexiglass를 이용한 모델실험을 기초로 하여 스웨덴의 폭발연구소에서 균질한 화강암을 대상으로 천공간격이 파쇄에 미치는 영향에 대해 조사
- 기본이론: 천공간격 S와 저항선 B와의 관계에서 종래의 표준 $S/B = 1.25$를 더 큰 값으로 변화시켜 파쇄를 개선하는 것으로 시험발파 결과, 일정의 천공경과 장약비에서 S/B의 비가 커지게 되면 파쇄의 흙 입경이 작아짐을 앎
- 이 개량은 $S/B = 8$이 되기까지 종속적으로 실시되었고, 확대발파법으로 불림
○ 확대발파법의 천공배치와 점화순서 예(그림 3.10~3.11)
○ 2개 발파 장소에서 재래식과 개량식 방법에 따른 결과 비료(표 3.7)

표 3.7 발파방법에 따른 결과의 비교

발파방법	발파 장소	발파수 (round)	파석 m^3당의 천공장(m/m^3)	파석 m^3당의 장약량(kg/m^3)	파석 1,000중의 옥석개수 (평균개수)	일간운반량 톤수 (평균톤수)
재래식	I	7	0.17	0.53	121	–
개량식 (넓은천공 간격)	I	3	0.15	0.48	63	–
재래식	II	6	0.16	0.49	163	1,560
개량식 (넓은천공 간격)	II	6	0.18	0.63	97	1,988

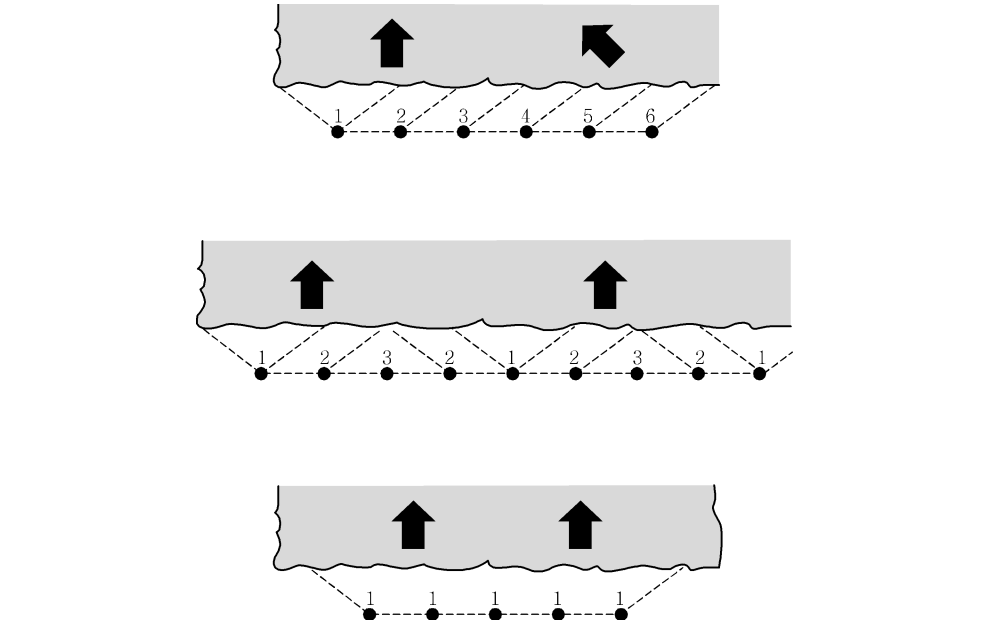


그림 3.10 파쇄입도를 작게 하기 위한 점화 패턴

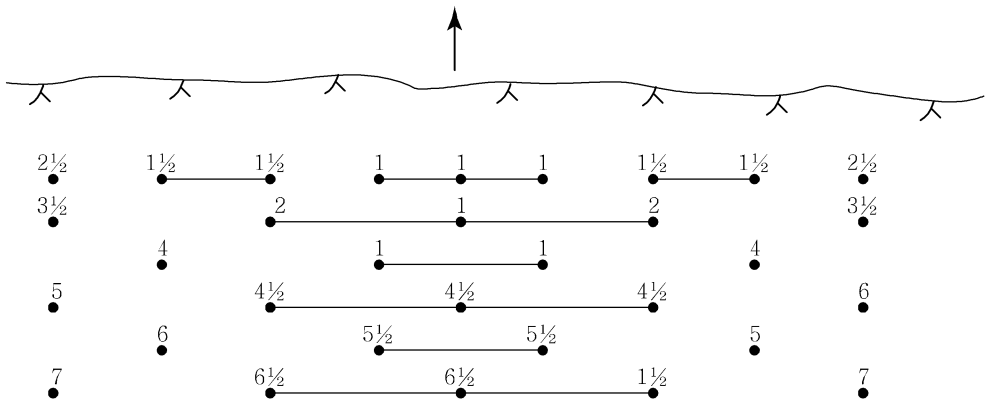


그림 3.11 확대발파법

3.5.7 큰 파쇄도를 얻는 방법

○ 파쇄입도가 큰 것을 필요로 하는 경우: 댐의 원석 채석, 항만의 매립, 교각들의 건설에 사용하는 재료

○ 방법

- 낮은 비장약량: 상부장약이 감소하면 파쇄암석의 크기가 증가하는데, 상부 장약의 부분이 너무 작으면 공저장약에 의해 암석이 부서지므로 유의
- 천공간격: 최소저항선이 천공간격보다 아주 크면 파쇄암석도 커짐. E/V 값이 1 이하인 것이 바람직한데 조절발파인 경우에는 $E/V=0.8$이며 이 경우에는 0.5가 바람직(E : 최소저항선, V : 천공간격)
- 일제점화: 지발발파보다 큰 파쇄암석을 얻을 수 있으며, $E/V=0.5$ 일 때와 함께 사용
- 1회당 1열씩 기폭시킴

3.6 벤치 발파 수준(Bench Blasting Leveling)

○ 바닥고르기 발파: 바닥 수평을 만들기 위한 발파로 낮은 계단의 발파를 의미하며, 계단식 발파와 바닥고르기는 구분이 확실하지 않음. 보통 계단 높이가 1~2m이하인 것을 바닥암반이라 하며 계단식발파에서 생기는 잔여부분을 말하는 경우가 많음

○ 계단식 발파와 바닥고르기는 천공직경에 의해 구분하는데 100mm 공경의 계단식 발파 경우에 계단높이가 5m 이내이면 수평바닥이라 할 수 있음. 하지만 $2\times B_{\max}$ 이하의 높이에 대한 계단식 발파를 바닥고르기라고 정의

○ 소구경 발파에서 천공간격과 장약(표 3.8)

○ 계단 높이가 낮으므로 짧은 지발시간이 필요하나 너무 짧으면 지발효과가 없어져서 비산의 위험이 따름(표 3.9)

표 3.8 낮은 벤치 발파의 장약량

벤치의 높이 (m)	천공장 (m)	저항선 (m)	천공간격 (m)	기저부장약 (kg)	주상장약 (kg)
0.2	0.6	0.40	0.50	0.035	–
0.3	0.6	0.40	0.50	0.035	–
0.4	0.7	0.45	0.55	0.050	–
0.5	0.8	0.50	0.65	0.100	–
0.8	1.1	0.60	0.75	0.150	–
1.0	1.4	0.80	1.00	0.300	–
1.5	1.9	1.00	1.25	0.550	0.05
2.0	2.5	1.00	1.25	0.700	0.25

표 3.9 낮은 벤치 발파의 예

	보통의 경우(m)	좀더 낮은 경우(m)
벤 치 높 이	0.5	0.7
천 공 장	0.8	1.4
저 항 선	0.5	0.8
m^3당 천공장	4.9	3.5
m^3당 천공수	3.1	1.3

○ 계단식 발파에서 뿌리깎기를 잘하기 위해서는 Sub-drilling 또는 Toe hole식 천공 실시

- Sub-drilling: $0.3\sim0.35\,W_{\max}$로 바닥면 보다 약간 깊게 천공
- Sub-drilling을 하지 않으면 바닥이 솟아 오른 것과 같이 남게 되고 Sub-drilling을 행하면 $2u$에 상당하는 장약이 집중장약으로 작용하여 점선부가 절삭되어 뿌리깎기가 잘됨(그림 3.12)
- Toe hole(=Snake hole): 막장을 향해서 수평 혹은 약간 하부(5~10°)로의 천이 천공으로 뿌리깎기를 잘해서 상부계단을 편평하게 하며 쇼벨 등의 중기류 움직임을 원활하게 함(그림 3.13)

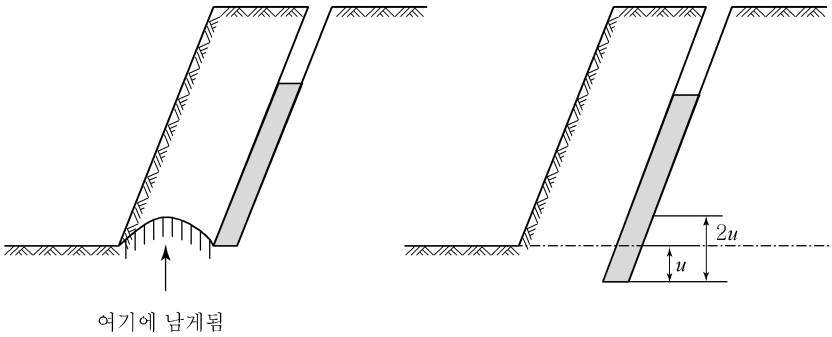


그림 3.12 Sub-drilling

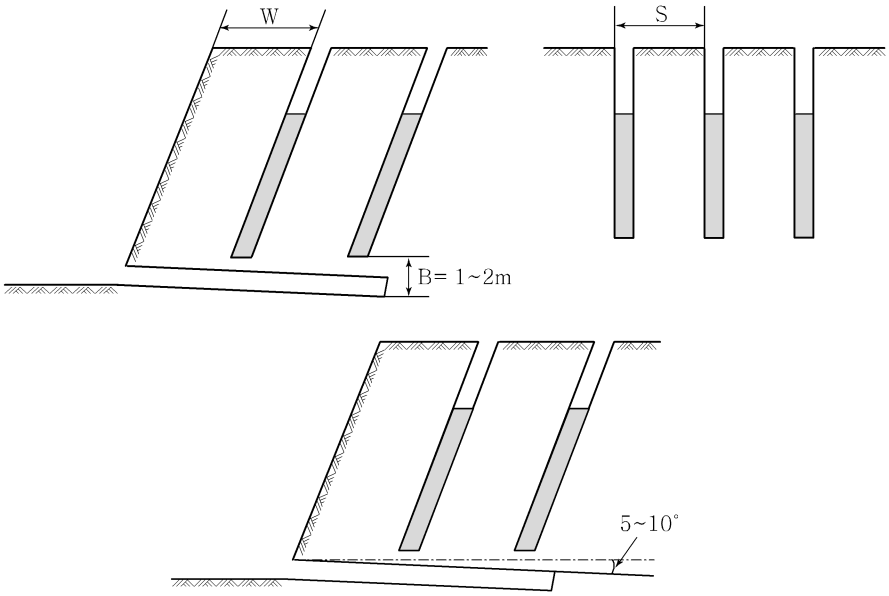


그림 3.13 Toe hole

3.7 천공직경의 선택

○ 계단식 발파에 큰 영향을 미치는 것이 천공직경이며, 직경의 선택에 영향을 주는 요인은 다음과 같음

3.7.1 발파의 경제적 측면

○ 계단높이에 비해 공경이 클 경우 공간격도 줄어들어야 하므로 경제적인 면이 문제가 되므로, 천공을 충분히 이용하려면 계단높이는 적어도 $2 \times B_{max}$ 가 되어야 함(표 3.10)

3.7.2 파쇄도

○ 공경이 클수록 파쇄암석의 크기는 커지므로 큰 공경을 택하는 것은 바람직하지 않음

3.7.3 비산의 위험

○ 공경이 커질수록 비산의 위험도 커지므로 발파작업기간이 길거나 건물밀집지역에서는 이러한 면을 잘 고려해야 함

표 3.10 공경과 계단높이와의 관계

천공직경(mm)	낮은 계단의 높이(m)	적합한 계단의 높이(m)
series 11, 34~26	0~3.0	0~4.0
35	3.2	3.2~5.0
series 12, 40~28	3.5	3.5~5.0
38	3.5	3.5~5.0
41	3.7	3.7~8.0
45	4.0	4.0~8.0
51	4.6	4.6~10.0
64	5.8	5.8~12.0
75	6.7	6.7~15.0
100	9.0	9.0~20.0

3.7.4 균열발생

○ 발파 바닥 연장선 하부의 균열발생도 공경이 클수록 증가함

3.7.5 옥석이 생기는 빈도

○ 공경은 적재운반과 분쇄 등의 관련 작업에 적합한 옥석이 생기도록 선택

3.8 W.S.B(Wide Space Blasting)

○ Wide Space Blasting(W.S.B): 천공간격은 일반적인 벤치발파의 경우보다 넓히고 반대로 저항선을 작게 함으로써 파쇄버럭을 작게 또는 비교적 균일하게 하는 발파법

○ 벤치발파의 경우 천공간격은 저항선 길이의 1.0~1.5배

○ 천공 패턴의 결정은 암질, 천공경, 사용 폭약 종류에 의하여 취할 수 있는 최대저항선 길이(B)×천공간격(S)의 파쇄면적을 벤치발파의 경우와 같은 크기로 취하고, S/B의 비율을 2~8배로 하는 현 경우와 비교했을 때 매우 크게 취하는 천공 형태로 하는 것이며, 천공장과 장약량은 변경하지 않음

3.8.1 원리

○ Rock Blasting(1963)에서 Langefors는 아크릴 수지판에서의 모델 실험을 통하여 저항선이 크고 천공 간격이 좁으면 버럭은 크게 되고, 반대 경우에는 파편이 잘게 된 사실을 제시

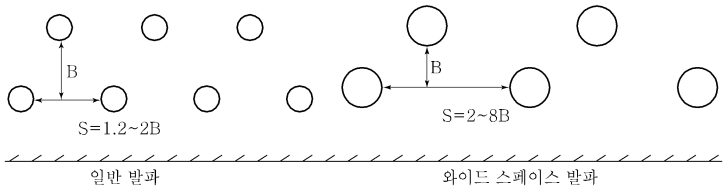
○ Sasa 등의 견해에 의하면,

- 1공 발파와 같은 주상 장약의 경우 폭약이 폭굉하면 폭원 근방에 발생하는 반경방향의 응력 σ_r는 주로 압축응력으로서 작용하고, 그에 직각한 접선방향에는 주로 인장응력 σ_θ가 작용. 인장응력 σ_θ가 암석의 인장강도 σ_t 보다 상회하면 그 곳에서 인장균열이 발생하기 때문에 폭원을 중심으로 하여 반경방향(방사선 상태)의 균열이 발생
- 2공 사이의 천공간격이 좁은 경우는 2공 사이를 연결하는 직선상의 접선방향의 인장응력이 가장 크게 되어 이것에 따른 균열이 상당히 빨리 발생하고, 이 균열이 발생함으로써 주변응력이 해방되어 폭원 사이를 연결하는 절단면으로부터 내부로 향하는 균열 발생
- 천공 간격이 크게($S/B > 1.6$) 되면 각각의 폭원에서 발생하는 균열이 방사 상태로 발달하고 내부로 향하는 균열이 상당히 많이 발생하여 다음 열의 발파공은 자유면 부근에 균열이 많이 발생한 상태로 발파되기 때문에 버럭이 잘게 됨

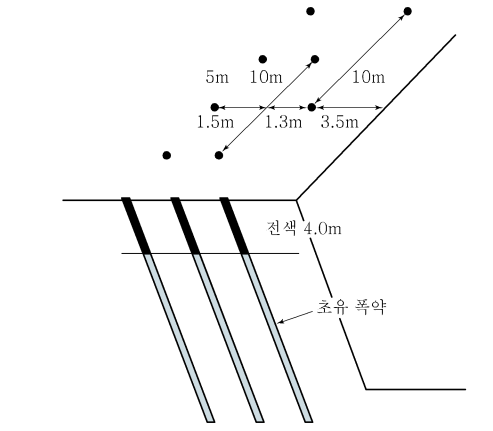
○ Nakagawa 등은 시멘트 모르타르의 시료를 대상으로 저항선(B) × 천공간격(S)의 면적을 일정하게 하여 2열째부터는 갈지자(之) 모양의 천공 배치로 하여 S/B을 1.15, 1.73, 3.08, 6.92의 4종으로 3열까지 발파한 경우를 각 모델로 균열의 발생 및 발달 제시

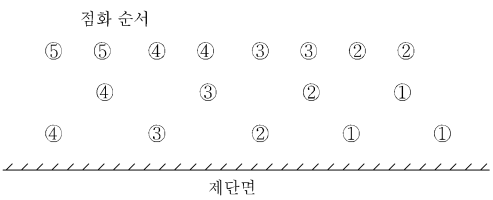
- $S/B=1.15$의 경우 2공 사이에 직선적으로 Crack에 의해 연결되고 스무스 발파(Smooth Blasting)가 실시된 것과 같은 상태로 되며, 이 균열이 연결된 선 이외의 큰 균열은 다른 모델에 비교해서 적음. 이것은 인접공의 압축파에 의한 균열의 억제효과가 큰 것을 뜻함
- $S/B=3.08$의 경우, 1열째는 2공 사이를 연결하는 균열의 발달이 보이지만 2열째부터는 전(前)열 발파에 의해 발생한 균열의 영향을 받아서 균열이 발달하여 거의 전(全)면이 균열로 덮인 모양으로 극히 양호한 파쇄성을 나타냄
- $S/B=6.92$의 경우, 1열째라도 2공 사이를 연결하는 균열은 발생하지 않음. 따라서 인접공과의 상호 연결하는 균열이 발생하지 않게 되는 공 간격 즉, 갈지자(之) 배치로 하였을 대 $S/B \fallingdotseq 4$ 정도가 적절

3.8.2 천공 패턴 비교



(a) 일반 발파와 와이드 스페이스 발파에서 공간 간격





(b) 와이드 스페이스 발파법

그림 3.14 와이드 스페이스 발파법과 점화순서의 예

3.9 소할발파(Secondary Blasting)

○ 소할발파(또는 2차 발파): 적재 또는 파쇄로 인해 매우 큰 암괴를 파쇄하는 것

○ 소할 발파를 할 경우 특히 주의해야 할 것은 비산에 대한 대책이며, 소할발파에 의한 비산은 일반발파에서보다 많으며 이것은 전석(옥석)의 크기나 형상에 따라 많은 차이가 남

○ 붙이기 발파: 완전히 오픈된 상태에서의 장약이기 때문에 건물이 있는 곳에서 멀리 떨어진 곳에서 사용 가능한 발파법으로, 장약량의 표준은 $1.0kg/m^3$

3.9.1 소할발파의 방법

○ 소할 발파는 천공법, 사혈법 및 붙이기 발파법이 있으며 천공법이 가장 많이 사용됨

(1) 천공법

○ 천공법은 암괴에 직접 천공을 하고 발파하는 방법(그림 3.15)

- 25~35mm의 작은 지름으로 중심을 향하여 2/3~3/4 깊이까지 천공을 하고 장약 실시
- 암괴는 바깥쪽이 모두 자유면이므로 1차 발파보다 작은 양의 폭약을 사용
- 비장약량은 대략 $60\,g/m^3$ 정도
- 암괴가 매우 큰 경우 몇 개의 천공을 하여 분산 장약 실시

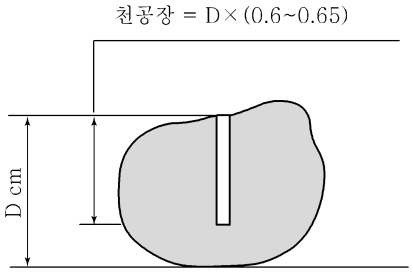


그림 3.15 천공법

(2) 사혈법

○ 암석 하부에 뱀굴과 같이 구멍을 파고 폭약을 장전한 다음 발파하는 방법(그림 3.16)

- 전색을 철저히 해야 하며, 암석 천공이 어렵거나 나무 뿌리 제거시 사용

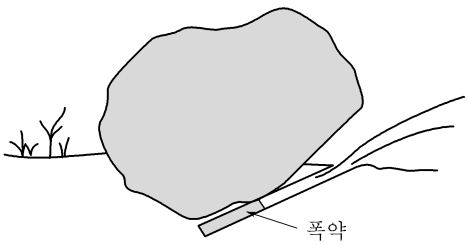


그림 3.16 사혈법

(3) 외부장약법(붙이기발파법)

○ 파쇄하고자 하는 전석의 표면에 가능한 중앙위치에 굴곡부가 있는 장소를 선택하여 장약하고 장약한 곳의 주위를 완전히 복토하여 발파하는 방법(그림 3.17)

- 점토는 가능한 두텁게 복토하는 것이 필요하며 사용되는 화약은 가능한 폭속이 빠른 것이 효과적

- 천공법에 비해 7~8배의 화약량 필요

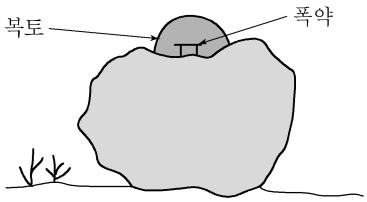


그림 3.17 외부 장약법

3.9.2 소할발파의 장약량 계산법

○ 소할발파 장약량 계산

$$L = CD^2 \tag{3.35}$$

여기서, L : 약량(g), C : 발파계수, D : 암석의 짧은 쪽 직경(cm)

전석의 직경(D): 형상이 천차만별이므로 정확한 측정 곤란

3.9.3 발파계수

○ 소할발파에서 발파계수 C의 값은 발파방법에 따라 다름(표 3.11)

표 3.11 소할발파에서의 발파계수(C)

소할발파	C의 값
천공법	0.007~0.01
사혈법	0.03~0.07
붙이기 발파법	0.08~0.20

3.10 채석발파(Quarry Blasting)

○ 채석발파는 채석작업 단계별로 대형의 원석을 모암으로부터 분리시키기 위한 발파작업과 1차 분리된 대형 암석 블록의 분할을 위한 2단계 발파작업으로 구분

○ 작업 형태별로 보면 형성되어 있는 자유면과 화약발파를 이용하여 분리하는 면에 따라 1면발파, 2면발파(양면발파), 3면발파로 구분

○ 국내에서 적용한 방법은 하부면을 화약발파를 이용하여 형성시키는 1면발파 방법이 가장 많으며 양면 또는 3면 발파방법은 자연적으로 절리가 형성되어 있을 경우 절리면을 자유면으로 하여 실시하는 경우가 일반적

3.10.1 천공작업

○ 석재의 채석에 필요한 천공작업은 모암으로부터 암석 블록을 채취하기 위한 1단계 천공과 채취된 암석 블록을 작은 크기로 분할하기 위한 2단계 천공으로 구분되며 필요한 경우 규격석을 만들기 위한 3단계 천공작업 실시

○ 모암에서 분리를 위한 천공작업은 한 면에 수직 방향의 균열이 있거나 또는 인공적인 방법으로 자유면을 형성시키고 나머지 3면에 발파를 위한 천공을 실시할 때는 떼어내는 블록이 주위 모암으로부터 자유롭게 이동할 수 있도록 하는 것이 필요

- 수평천공을 하여 아래 면을 구성하고 수직천공은 한쪽면의 각도가 90°를 넘도록 하향천공
- 뒷면을 이루는 천공 열과 절단면과의 사잇각이 90°를 넘게 함.
- 수평천공과 수직천공이 만나게 될 경우 만나는 부분에 장약이 집중됨에 따라 집중장약에 의한 영향이 모암에 손상을 주게 되므로 수직천공은 수평천공보다 깊이 천공해서는 안되며 수평 천공선의 높이보다 15~20cm 정도 떨어지도록 하는 것이 좋음
- 가장 경제적인 천공 지름은 32mm 정도로 제안, 일반적인 천공간격은 수직공 15~40cm 범위이고, 수평공이 20~50cm 범위가 많이 사용
- 공간격은 암반의 조건 및 발파 조건에 따라 달라지지만 대체로 보통 공지름의 10~15배 범위이며 암석에 따라 20배까지도 사용 가능

3.10.2 발파

○ 폭약과 천공 벽면 사이에 공간을 형성할 경우 공기가 일종의 완충작용을 하게 되어 손상범위를 최대한 국한시킬 수 있게 되며, 가스압에 의한 파단면의 형성을 유도할 수 있게 됨

○ 공과 공 사이를 잇는 파단면은 주로 발파압에 의한 인장력을 이용함으로 암석의 역학적 특성에서 인장강도 값은 공간격을 결정하는데 매우 중요

○ 채석발파에서 성공을 좌우하는 요소 중 하나가 천공오차. 표면에서의 천공간격이 파단면을 형성할 수 있는 적정 치수이더라도 천공의 정확도가 뒷받침되지 않으면 내부에서 간격이 좁아져서 집중장약이 되어 과도한 파괴를 가져오거나, 또는 너무 넓어지게 되어 공과 공 사이를 잇는 파단면이 형성되지 아니함은 물론 예상하지 않는 방향으로 파단면이 진행하는 경우가 발생

3.10.3 도폭선을 이용한 채석발파

○ 도폭선을 연결하는 특별한 장치가 없는 경우 겹치는 부분이 적어도 10cm 이상 되도록 하여 비닐테이프로 감고, 폭굉의 전달방향과 분기되는 선을 일치시켜 지선으로 전달되도록 해야 하며, 분기되는 도폭선의 구부리는 부분은 각도를 90°에 가깝도록 해야 함

○ 도폭선 발파를 이용하여 채석에 성공적으로 수행되었던 결과들을 통계적으로 분석하여 식 3.36 제안

- 현장자료로부터 유도된 경험식이며 비장약량 개념에 근거. 비장약량은 파쇄효율의 경제적 지표로 사용되고 있으며 채석발파에서는 분리할 암반의 단위체적당 화약소모량으로 나타냄

$$C = a + b\frac{S}{V} + cs \tag{3.36}$$

여기서, C : 비장약량(g/m^3), S : 절단면적(m^2), V : 절단체적(m^3),
s : 분리된 암석 블록의 이동변위(m), a, b, c : 화강암에 대한 상수

- 이탈리아에서 실험한 화강암에 대한 상수 a, b, c의 최적 값

a : $10.52g/m^3$, b : $26.47kg/m^2$, c : $28.74g/m^4$

3.10.4 5자유면의 채석발파

○ 5자유면 암석파괴의 경우 나머지 한 개의 자유면을 절단하면 되므로 인장파괴에 의하여

파괴. 파괴단면과의 방향은 90 ° 이룸

(1) 절단면적

○ 시험발파에서 얻은 암석계수(Ca_1), 구멍지름(d_1), 그 때의 절단면적(F_1)의 값을 기준으로 해서 다른 암석 Ca와 d에 의해 얻은 절단면적을 구하는 공식

$$F = \frac{Ca_1}{Ca} \times \frac{d^2}{d_1^{\,2}} \times F_1 \tag{3.37}$$

$d_1 = d$ 일 때,

$$F = \frac{Ca_1}{Ca} \times F_1 \tag{3.38}$$

동일한 암체에 공경을 달리 할 때, 즉 $d_1 \neq d$ 일 때,

$$F = \frac{d^2}{d_1^{\,2}} \times F_1 \tag{3.39}$$

○ 제발발파 공간의 거리와 상하 2자유면간의 거리를 eW로 할 때 절단면적(그림 3.18),

$$eW \times eW = e^2 W^2 \tag{3.40}$$

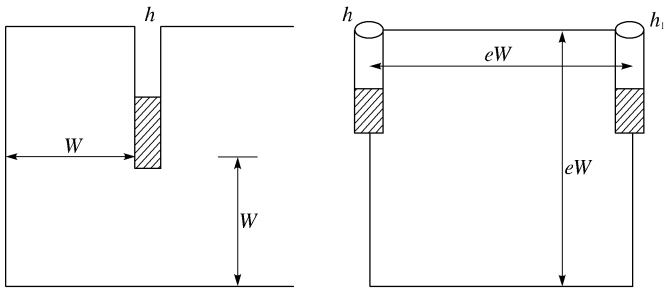


그림 3.18 제발발파 공간의 거리와 상하 2자유면간의 거리를 eW로 할 때의 절단면적

○ 파괴암체의 높이가 발파공간의 거리 eW보다 작을 때, 즉 eW>t일 때 절단면적(그림 3.19),

$$F = e \times W \times t \tag{3.41}$$

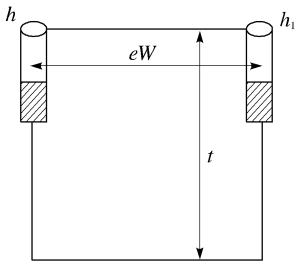


그림 3.19 파괴암체의 높이가 발파공간의 거리 eW보다 작을 때 절단면적

(2) 절단면적과 장약량과의 관계

1) 절단면적과 장약길이의 관계

○ 절단면적은 장약량에 비례하거나 공경이 동일한 ($d = d_1$) 2개의 발파공에 장전되는

장약량은 장약길이에 비례

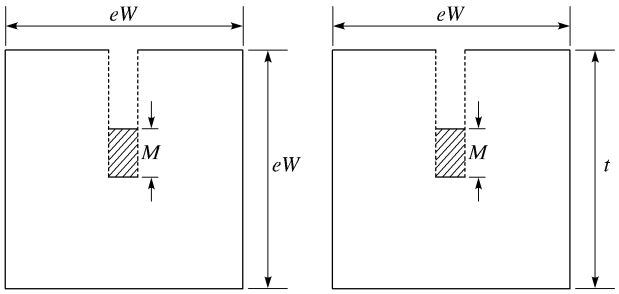


그림 3.20 절단면적과 장약량과의 관계

$$F = eW \times eW = e^2 W^2, \quad F_1 = e \times W \times t \tag{3.42}$$

$$F : F_1 = L : L_1, \quad L : L_1 = m : m_1 \tag{3.43}$$

$$\therefore m : m_1 = F : F_1 = e^2 W^2 : eWt \tag{3.44}$$

$$m_1 = \frac{eWtm}{e^2 W^2} = \frac{tm}{eW} \tag{3.45}$$

2) 장약길이와 장약량의 관계

$$L = \frac{\pi d^2}{4} \times m \times g \tag{3.46}$$

$$L_1 = \frac{\pi d^2}{4} \times m_1 \times g, \quad m_1 = \frac{tm}{et} \tag{3.47}$$

$$L_1 = \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{tm}{eW} \times g \tag{3.48}$$

3.11 정향발파(Direction Blasting)

○ 정향발파: 댐, 항만, 도로 등의 건설에 있어서 산이나 구릉지 하부에 대규모 장약을 한 후 발파하여 암석을 적당한 크기로 파쇄 시키면서 소정의 위치로 이동시키는 것

- 산악지형과 같이 지형이 복잡해서 차량의 근접이 어렵고, 대량의 매입재료를 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 경우 적용
- 수력발전용댐, 폐재댐, 홍수조절댐 등에 사용

3.11.1 장점

○ 시공기간을 단축하고 노동력을 절감하여 상당한 경제력 효과와 환경 보호 효과

○ 댐 재료들이 이상적인 투수율을 갖도록 입도를 바꿀 수 있기 때문에 강하고 안정된 댐을 만들 수 있음

3.11.2 댐 등의 건설작업에서 중요한 문제점

○ 장약량과 배열, 점화순서 등을 결정하기 위한 암석의 이동거리(Thrawing Cast)와 이동 후 적재높이(Stacking) 계산

○ 이동거리와 적재높이를 계산하는데 사용되고 있는 방법

- 체적 평형법(volume balance method)

- 분할체 비산 궤도법(trajectory of divided masses method)
- 총 파쇄율 비산 궤도법(trajectory of overall blasted masses method)

3.12 글로리홀 발파(Glory Hole Blasting)

○ 글로리홀 발파: 우리나라에서는 시멘트 원료인 석회석 채석장에서 많이 사용하는 일종의 노천 채굴법의 하나

- 채석장의 중앙 부분에 수갱을 굴착하고 그 상부에서 발파된 암석을 수갱으로 낙하시키는 방법
- 수갱내에 대괴의 파괴암석이 걸려 막히는 것을 방지하기 위해 레일 등의 철재로 그리즐리(grizzly)를 설치하고 그 하부에는 그리즐리를 통과한 암석을 필요한 크기로 분쇄시키는 분쇄기를 설치해야 하며, 분쇄된 암석을 광차나 벨트 컨베이어(belt conveyer)로 필요한 장소까지 운반하는 계통
- 그리즐리에 걸린 대괴의 암석은 2차 발파로 그리즐리를 통과시키도록 함

○ 계단식일 때 계단 수가 많으면 상하계단의 작업이 서로 방해가 되고 파쇄광석의 투입작업이 어려워지므로 가급적 계단 수를 줄이는 것이 능률적이고 안전

○ 채석장의 지형이 험준하고 운반도로의 개설이 곤란하거나 채석장 주위의 건축물이나 농작물로 인하여 운반로를 개설하는데 적당하지 않거나 또는 운반거리가 너무 멀 때 이용하면 매우 경제적

○ 장공발파와 같은 대발파가 불가능하며, 갱이 파쇄광석에 의해 폐쇄될 우려가 있으며, 우기에 작업장 침수 문제 발생

3.13 협동장약(Cooperating Charge)

○ 지발뇌관을 사용하면 지발당 더 높은 총 장약량으로 발파가 가능하다. 지발 단수를 더 늘이면 지연시간의 분산이 미세한 지연시차를 가지고 증가하기 때문에 지발당 더 높은 총 장약량을 사용할 수 있음

○ 협동장약은 지발당 총 장약량에 사용된 단수에 해당하는 적당한 감소인자의 곱으로 정의

○ 지표면 진동의 특정 주파수가 60Hz 이상일 경우 감소인자(표 3.12)

- 우세 주파수(주 진동수)가 낮아짐에 따라 감소인자가 1에 가까워짐
- Langefors and Kihlström(1973): 다른 주파수들에서 다양한 분산을 가진 뇌관들에 의한 감소인자를 설명

표 3.12 단차에 따른 감소인자

지연시간	단차	감소인자
25 *ms*	1~10	1/2
25 *ms*	11~20	1/3
500 *ms*	> 20	1/6

○협동장약은 정확한 거리에서만 적용되므로 다소 부정확

○ 거리와 관련된 협동장약(그림 3.21): 동일한 단차 시간을 가진 뇌관을 가진 두개의 분리된 장약량을 발파 할 때, 만약 진동이 짧은 거리에서 관찰되어 진다면 장약량이 서로 협

력이 되지 않은 반면, 먼 거리에서 관찰되어지면 간섭과 두 진동의 증폭이 일어남

○ 하나의 장약공에서 시작한 후 다른 하나로 갈 때 두 장약 공 사이의 협력 유무 결정 요소

- 기폭점 사이의 시간 간격
- 모암에서의 진동 전달 속도
- 진동 감쇠 속도
- 장약공까지의 거리
- 장약 형태
- 폭속
- 구속도

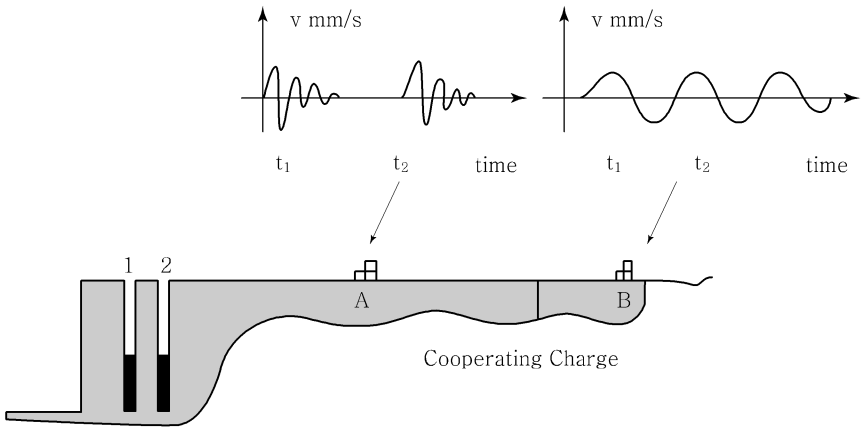


그림 3.21 거리에 관련된 협동장약

○ 제어발파(Cautious Blasting)의 감소인자 효과

<전제조건>

- •암질 : 화강암
- •발파종류 : 벤치발파
- •발파공지름 : 드릴시리즈 11(34~29mm)
- •벤치높이 : 4.0m
- •공당장약량 : 1.95kg
- •최대허용제발약량 : 5.0kg

3.13.1 감소인자를 고려해 넣지 않은 발파

○ $2\times1.95kg=3.9kg$

- 결론 : 최대 2개의 발파공이 제발하는 것이 허용, 즉 이 예의 경우 같은 단수 뇌관 2개가 사용가능

3.13.2 감소인자를 고려해 넣은 발파

○ 단수 1~10의 MS뇌관의 감소인자는 1/2이며, 이것은 단수 내에서 반수의 뇌관이 제발하는 것이 됨

- 이 경우 제발하는 폭약량은 $(4\times1.95)\times1/2=3.9kg$
- 예를 들면, 5개의 같은 단수뇌관이 사용되었다고 한다면 5개 중 3개의 뇌관이 겹쳐서 제발할 폭약량은 $3\times1.95=5.85kg$이 되며, 최대허용제발약량 $5.0kg$을 초과하므로 과장약이 되어 위험
- 결론 : 단수 1~10의 MS뇌관에서는 같은 단수인 뇌관 최대 4개까지 과장약의 위험없이 사용가능

○ 단수 11~20까지의 MS뇌관은 감소인자 1/3이며, 같은 단수라도 1/3의 뇌관만 제발

- 6개의 같은 단수의 뇌관이 사용되었다고 한다면 그 중 2개는 겹치므로 이 경우, 제발하는 폭약량은 $(6\times1.95)\times1/3=3.9kg$
- 결론 : 단수 11~20의 MS뇌관으로는 같은 단수의 뇌관 최대 6개까지 과장약의 위험없이 사용가능

단원정리

1. 전색장

S_d = $6D$

S_s = $12D$

S_d : 건조한 발파공의 삽입 전색장(cm)

S_s : 습윤된 발파공의 삽입 전색장(cm)

D : 발파공의 직경(cm)

2. 계단 발파의 공간격

(1) 저계단 제발발파

$$S=\frac{L+2B}{3}$$

(2) 저계단 지발발파

$$S=\frac{L+7B}{8}$$

S : 공간격(m), L : 벤치높이(m), B : 저항선(m)

(3) 고계단 제발발파

$S=2B$

(4) 고계단 지발발파

$S=1.4B$

3. 저항선 산출식

(1) Gustaffson의 식

$B_{\max}=45D$

D : 천공경(cm), $B_{\max}$: 저항선(cm)

(2) Langefors의 식

$$B_{\max} = \frac{D}{33}\left[\frac{P \cdot s}{C \cdot f \cdot \left(\frac{S}{B}\right)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

D : 천공경 (mm), $B_{\max}$: 저항선 (m), P : 장전(다짐)밀도 (kg/m)

C : 암석의 상대계수(kg/m^3), s : 폭약밀도

$\frac{S}{B}$: 공간격(S) 대 저항선(B)의 비, f : 발파공의 구속정도

4. Langefors식

(1) 공저 장약밀도(I_b)

$I_b = 7.85D^2P$

D : 발파공 직경(cm), P : 장전밀도(kg/l)

폭 약	에뮤라이트	dynamite	ANFO
장전밀도(kg/l)	1.05	1.25	0.80

→ 천공경사도에 따른 계수(R_1)와 상대 암석계수에 따른 보정계수(R_2)

천공경사도	수직	10:1	5:1	3:1	2:1	1:1
R_1	0.95	0.96	0.98	1.00	1.03	1.10

상대암석계수	0.3	0.4	0.5
R_2	1.15	1.00	0.90

(2) 최소저항선(W)

Dynamite의 경우 $B_{\max} = 1.47(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$

에뮤라이트의 경우 $B_{\max} = 1.45(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$

ANFO의 경우 $B_{\max} = 1.36(I_b)^{\frac{1}{2}} \times R_1 \times R_2$

(3) Sub-Drilling(U)

$U = 0.3B_{\max}$

(4) 천공장(L)

$L = (H + U) / \cos\Theta$

(5) 천공오차(E)

$E = D/100 + 0.03L$

(6) 실제저항선(B)

$B = B_{\max} - E$

(7) 실제 천공간격(S)

구분	$H/B<4$	$H/B\geq4$
제발발파	$S=(H+2B)/3$	$S=2.0B$
지발발파	$S=(H+7B)/8$	$S=1.4B$

(8) 공저 장약장(h_b)

$h_b=1.3B_{\max}$

(9) 공저 장약밀도(I_b)

$I_b=\frac{d^2}{1000}(kg/m)$

(10) 공저 장약량(Q_b)

$Q_b=I_b\cdot h_b$

(11) 무장약공의 길이(전색장= h_0)

$h_o=B$

(12) 상부 장약밀도(I_c)

$I_c=(0.4\sim0.6)I_b(kg/m)$

(13) 상부 장약장(h_c)

$h_c=L-(h_b+h_o)$

(14) 상부 장약량(Q_c)

$Q_c=h_c\cdot I_c$

(15) 공당 장약량(Q_{tot})

$Q_{tot}=Q_b+Q_c$

(16) 단위 체적당 장약량(비장약량= Q_s)

$Q_s=\frac{nQ_{tot}}{nBSH}(kg/m^3)$ ⇒ 골재 채석장 및 노천채굴에 이용

$Q_s=\frac{Q_{tot}}{WSH}(kg/m^3)$ ⇒ 도로 발파 등 발파가 한정된 곳

(17) 단위 체적당 천공장(비천공장= L_s)

$L_s=\frac{nl}{nBSH}(m/m^3)$ ⇒ 골재 채석장 및 노천채굴에 이용

$L_s=\frac{nl}{WBH}(m/m^3)$ ⇒ 도로 발파 등 발파가 한정된 곳

5. 소할발파

$L=CD^2$

L : 약량(g), C : 발파계수, D : 암석의 짧은 쪽 직경

6. 암석의 절단면적

$$F = \frac{Ca_1}{Ca} \times \frac{d^2}{d_1{}^2} \times F_1$$

시험발파에서 얻은 암석계수(Ca_1), 구멍지름(d_1), 그 때의 절단면적($F_1 = e^2 W^2$)의 값을 기준으로해서 다른 암석 Ca와 d에 절단면적(F)을 구함