

# Tunnelling Technology

## 발파에 의한 암석의 비산

### Fly Rock by Blasting in Construction Field



김선명

한북대학교  
에너지자원학과  
전임교원,  
공학박사/기술사

#### 1. 개요

발파시 암석이 불규칙하게 튀어나가는 것을 비산이라고 하며, 주변 구조물 및 인명 살상을 초래할 수 있으며 사고 발생 빈도는 적으나 사실상 가장 위험한 발파공해이다.

암석편의 비산은 터널발파 등에서도 위험한 요소이지만, 주로 노천의 벤치발파나 소할발파 등에서 주로 발생하는 재해이다. 화약이 장약공 내에서 폭발하면 그 충격압에 의해 장약공 주위의 암석은 분쇄 또는 파쇄되어 균열이 발생하고 지반 중으로 전파되는 응력파는 자유면에 반사되면서 홉킨슨(Hopkinson)효과에 의해 암석을 파괴시킨다. 이후 계속되는 고압의 가스압은 파쇄된 암석을 이동시키고, 발파에 의한 균열이 암반내에 존재하고 있던 불연속면을 통하여 고속으로 분출된다. 이때 가스의 압력과 분출속도에 의해 비교적 작은 암석편은 일정 초속도로 공중으로 비산되며, 비산되는 초속도와 각도에 따라 상당

히 먼 거리까지 날아가게 된다. 이렇게 비산된 암석편은 인근 구조물을 파손시키거나 기계류 등에 손상을 입히며 인체에는 치명적인 상해를 주게 된다. 이렇게 폭발에 의해 비산되는 암편을 비산석(혹은 비석, fly rock)이라고 한다.

발파 비산석으로 인한 사고 발생 원인을 분석하면 발파 작업으로 인한 불가피한 사고보다는, 기본적 발파기술과 안전수칙을 준수한다면 미연에 방지할 수 있는 사고가 대부분이었다는 것이 심각성을 더해주고 있다.

노천발파에서의 정상적인 발파 방법은 하향천공에 의한 BENCH 발파방법을 선택해야 함이 발파의 기본 상식이나, 국내 건설현장에서는 수평 천공에 의한 발파방법(일명 수구리방법)이 정상적인 발파방법으로 통용되고 있어 발파사고 증가는 물론, 발파 기술의 후진성을 더해주고 있다.

## 발파에 의한 암석의 비산

또한 발파 시공자가 천공비, 화약비의 원가 절감 등의 이유로 인하여, 과다한 장약량으로 많은 굴착량을 확보하기 위한 발파방법의 선택이 가장 큰 문제점으로 지적할 수 있다.

과장약의 경우 암석파쇄에 필요한 에너지보다 초과되는 에너지는 암석을 멀리까지 비산시키는 힘으로 작용한다. 발파공의 직경이 큰 경우에도 비석이 발생할 위험이 커지며, 암반내에 균열이 있거나 다른 부분보다 약한 부분이 있으면 이 부분으로 폭발가스가 분출되어 예상 외의 비산석이 발생하기도 한다. 또한 전색이 완전하지 못하여 저항이 부족하게 되거나 폭력이 부족하여 저항선 쪽의 암석을 파쇄하지 못하고 공발이 되는 경우, 또는 폭발 가스가 발파공 입구로 분출될 때에는 상당히 위험한 비산석이 발생할 수 있다. 천공시 잘못으로 인한 국부적인 장약공의 집중, 점화순서 착오에 의한 지나친 지발 시간 등도 비산석이 발생하는 주요한 원인이 된다.

계단 발파에서 발파 비산석 발생원인은 다음 그림 1과 같이 두가지 형태로 구분된다.

### ① 발파된 파쇄 암석 덩어리 전체가 전방으로 이동하는 형태

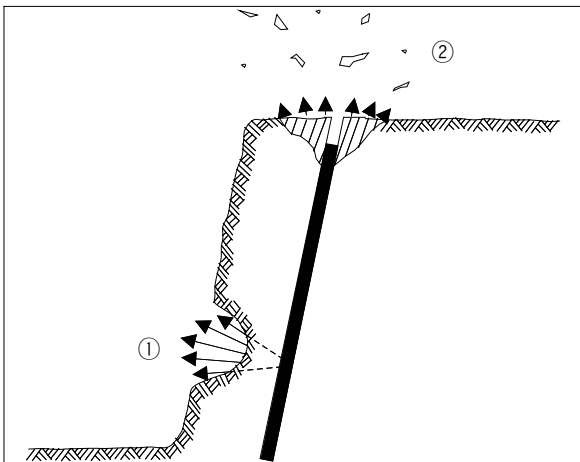


그림 1. Bench 발파에서 비산의 형태

### ② 암석의 파편이 암석 표면이나 사방으로 흩어지는 형태

## 2. 파쇄 암석 덩어리 전체가 전방으로 이동하는 형태

### 2.1 전방 이동 현상

발파에 의해 암석이 파쇄되면 체적은 약 50%까지 증가 되는데 이를 증적이라 한다. 체적이 증가된 파쇄암석들은 발파면 전방으로 이동하여 쌓이게 되므로 발파면 전방에는 어느 정도 공간 확보가 필요하다.

이러한 전방이동 현상은 발파가 정상적으로 이루어질 때 화약력과 파쇄암석의 체적 증가에 따라 발생하는 현상으로 체적당 단위 장약량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )에 따라 좌우된다. Swedish Detonic Research Foundation(스웨덴 폭파연구재단)의 연구에 의하면  $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ 의 체적당 단위 장약량에서는 암석을 전방 이동시키지 않고 단지 암석을 파괴할 뿐

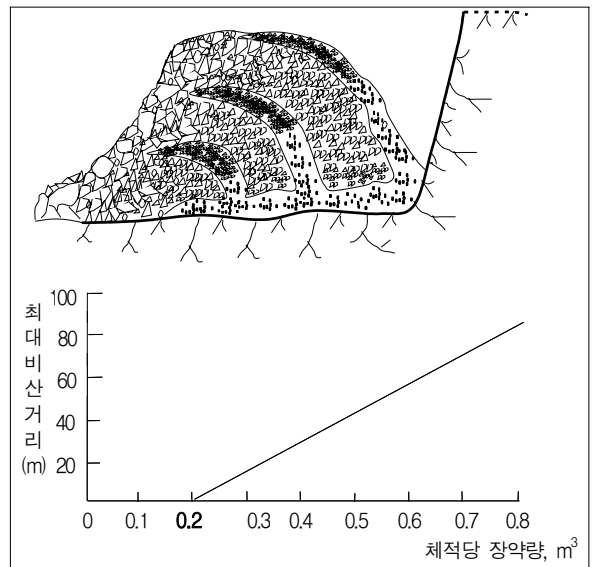


그림 2. 체적당 장약량과 최대비산거리

발파에 의한 암석의 비산

이며,  $0.4\text{kg/m}^3$  장약량에서는 20~30m 전방 이동이 발생한다고 한다.

### 2.2 파쇄 암석의 전방 이동 거리 산출

암편의 비산거리와 초속도는 장약량이나 발파공의 직경과의 관계로 나타낸 연구결과도 있다.

A. Persson은 25mm 발파공의 단발 벤치발파에 의한 비석을 고속카메라로 관찰하고 그 결과를 그림 3과 같이 나타내었다. 이 경우  $0.2\text{kg/m}^3$  이하의 장약량에서는 거의 암편의 비산이 발생되지 않았다.

이 때 파쇄 암석의 전방 이동거리는 다음 식에 따라 계산할 수 있다.

$$L = 143W - 28 \quad (1)$$

- L = 최대 전방 이동 거리(m)
- W = 체적당 단위 장약량( $\text{kg/m}^3$ )

최대 장약량(W)이  $0.38\text{kg/m}^3$ 일 경우의 전방 이동거리는 다음과 같다.

$$L = 143W - 28 \text{에서}$$

$$L = (143 \times 0.38) - 28 = 26.34\text{m}$$

$$\therefore L = 27\text{m}$$

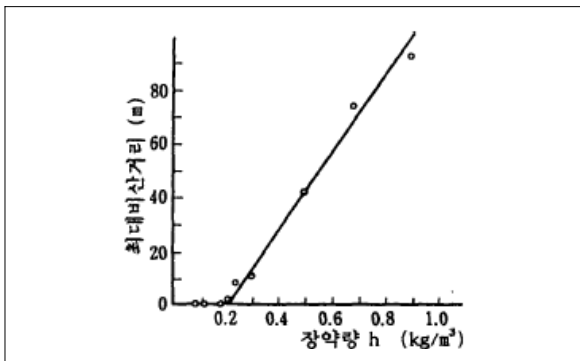


그림 3. 벤치발파에서의 장약량과 최대비산거리

또한 Dupont은 V-cut의 경우 암석의 비산에 대한 실험식으로서 (2)와 같은 식을 제시하였다(Dupont, 1978)

$$v = 34(LD)^{-0.5} \quad (2)$$

여기서,  $v$  : 최대 비산속도(m/sec)

$LD$  : 폭약의 단위 중량당 채석 중량(t/kg)

이 식을 이용하여 그림 4와 같은 Prism cut 심발발파를 모델로 계산해 보면 다음과 같다

암석 밀도를  $2.6\text{t/m}^3$ , 장약량을  $0.8\text{kg/공}$ 으로 하면

$$\text{굴착암석량} = (1/2)(1.5^2 \times 0.6) \times 2.6 = 1.775\text{t}$$

$$LD = 1.775 \div 3.2 \approx 0.548(\text{t/kg})$$

$$v_0 = 34 \times (0.548)^{-0.5} \approx 45.9(\text{m/sec})$$

여기서 심발높이를 2m로 하고 수평방향으로 암석이 비산되었다는 조건에서 식 (8)을 이용하여 계산해 보면 다음과 같다.

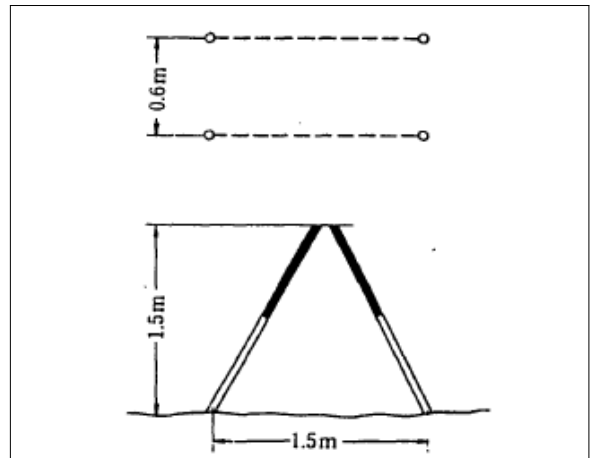


그림 4. Prism cut 천공도

## 발파에 의한 암석의 비산

$$l = v_0 \left( \frac{2h}{g} \right)^{1/2} = 45.9 \times (2 \times 2/9.8)^{1/2} = 29.3m$$

한편 Svédffo는 벤치발파에서 최대비산거리를 식 (3)과 같이 발파공의 직경의 함수로 나타낼 수 있다고 하였으며 장약밀도, 발파 직경과 비산거리와의 관계를 그림 5와 6과 같이 제시하였다. 이 결과에 의하면 비산거리는 발파공의 직경이 클수록, 장약밀도가 증가할수록 커짐을 알 수 있으며 직경 50mm의 발파공에서는 200~300m, 100mm의 발파공에서는 300~700m까지의 최대비산거리를 나타내고 있다.

$$L_{\max} = 260 \left( \frac{d}{25} \right)^{2/3} \quad (3)$$

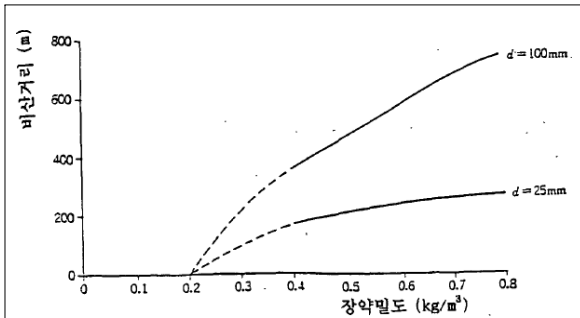


그림 5. 발파공의 직경과 장약밀도가 최대비산거리에 미치는 영향

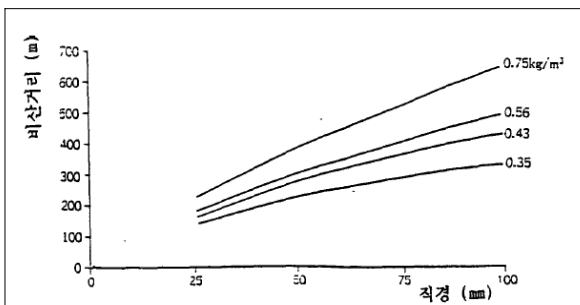


그림 6. 공경이 25mm, 100mm인 발파공에서의 장약밀도와 최대비산거리의 관계

여기서,  $L_{\max}$  : 최대 비산거리(m)

$d$  : 발파공의 직경(mm)

### 3. 암석의 파편이 암석 표면이나 사방으로 흩어지는 형태

이러한 형태의 비산은 응력파에 의한 비산과 폭발 가스압의 분출로 인한 비산으로 분류할 수 있다. 응력파에 의한 비산의 경우는 최대속도가 3~4m/sec 정도이므로 그리 위협적이지는 않으나, 폭발 가스압의 분출로 인한 비산은 빠른 속도로 긴 거리를 비산하므로 큰 사고를 유발하는 요인이 될 수도 있다.

이러한 현상에서는 그 초기 비산속도(혹은 초속도)와 비산거리가 주요 관심대상이 되며 이들에 의해 비산에 의한 피해 범위가 결정된다.

#### 3.1 비산속도 산출

암반이 균질하다고 가정하면 발파 과정 초기에 자유면 부근에서 발생하는 응력파에 의한 암석의 비산속도는 암반 내의 P파 속도와 응력파에 의한 최대 변형률로써 다음 식에 의해 예측할 수 있다(Petkof, 1961).

$$V = 2c\varepsilon \quad (4)$$

여기서,  $c$  : P파의 전파속도

$\varepsilon$  : 응력파에 의해 발생하는 최대 변형률

발파후 형성되는 가스압은 파쇄암을 가속시키는 추진력을 부가하여 발파공 부근에서 발생하는 암석파편 비산의 주원인이 되는데, Chieppetta 등은 현장에서의 고속촬영 시험결과를 해석하여 사용 화약의 에너지 등을 주요 변수로 하는 다음과 같은 식을 제시하였다(Chieppetta, 1985).

## 발파에 의한 암석의 비산

$$V = K \left[ \frac{B}{E^{1/3}} \right]^b \quad (5)$$

B : 최소 저항선

E : 화약 에너지

K, b : 상수(암석의 경우 K=40, b=-1.5)

따라서 앞에서 언급한 바와 같이 응력파에 의한 비산의 경우 최대 속도가 3~4m/sec 정도이므로 그 영향이 크지 않다. 따라서 비석문제는 응력파보다는 폭발가스압과 가스의 분출에 의한 영향이 주요한 요소가 된다고 보아도 무방할 것이다.

현재까지 파쇄 암편의 비산 속도에 대해 실측한 결과보고를 요약하며 표 1과 같다.

가스압에 의한 비산속도에 대해 실측한 각종 보고서에 의하면 사용 화약량, 화약의 종류, 발파 방법 등의 편차가 커서 비교할 수 없지만 일반적인 경향을 소개하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 정상적 발파 조건 : 10~30m/sec
- 비정상적 발파조건 : 100m/sec

보통 규모의 발파에서는 정상발파에서는 문제가 없지만 비정상적으로 큰 경우도 있었으므로 발파설계시 항상 주의해야 한다.

## 3.2 가스압에 의한 비석의 궤적

파쇄 암석의 비산현상은 매우 다양한 형태로 나타나는 데 공중으로 비산할 때는, 공기 저항에 의해 감속되기 때문에 비석의 궤적을 계산에 의해 구하는 것은 쉽지 않은 일이지만, 일단 공기 저항을 무시한 경우 비석의 운동궤적은 다음과 같이 생각해 볼 수 있다.

암편이 초속  $V_0$ , 사각(射角)  $\theta$ 로 위쪽으로 내던졌다고 하면 그 암편이 내던져진 지점과 같은 수평면상에서의 비거리  $l$ 은 다음 식으로 나타난다(윤지선, 1992).

$$l = \left( \frac{V_0^2}{g} \right) \sin 2\theta \quad (6)$$

여기서,  $l$  : 수평거리(m)

$V_0$  : 초속(m/s)

$\theta$  : 사각(도)

$g$  : 중력 가속도( $9.8\text{m/s}^2$ )

표 1. 비산파편의 초기속도의 실측 예

연구자	암종	화약종류	화약량	발파형태	천공장 (cm)	최소 저항선 (cm)	비산 초속도 (m/sec)
T. Okawa	석회석	dynamite	35	MS발파	34	60	3.6
			85		120	75	3.5
C. H. Noren	화강편마암	dynamite		제발팔파	180	18	94
					180	23	77
					180	28	52
					180	54	34
E. M. Patterson	석탄 사암 세일	Unigel Gelnignite	570	wedge cut	140	97~110	11.5
			570	wedge cut	120	90	15.0

발파에 의한 암석의 비산

비거리  $l$ 은  $\theta$ 가  $45^\circ$ 일 때 최대치를 나타내므로 다음 식과 같이 된다.

$$l_{\max} = \frac{V_o^2}{g} \quad (7)$$

이 식에서 초속도와 최대 비산거리와의 관계는 그림 7과 같이 된다. 이 그림에서 공기저항이 없을 경우 40m/sec로 비산된 암편은 160m 이상의 거리까지 도달하는 것으로 나타났으며, 이보다 큰 초속도에서는 자승의 비율로 더 멀리 날아가게 된다.

또한 수평의 지표면이 아닌 산이나 구릉의 정상에서 발

파를 할 때에도 역시 더욱 먼 거리를 비산하게 되며 암편이 높이 비산하는 경우에는 바람의 세기와 방향도 고려하는 것이 좋다.

노천발파에서는 이러한 관계가 성립하지만 터널 발파의 경우 터널 상부에 암반이 위치하고 있어 위쪽방향으로의 비산은 이것에 의해 차단된다. 따라서 그림 8과 같이 최대 장약량이 사용되는 심발발파의 높이  $h$ 에서 거의 수평으로 비산하는 암편의 비산거리가 가장 크다고 생각하는 것이 타당하다. 이 때의 비산거리  $l$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$l = v_o \left( \frac{2h}{g} \right)^{1/2} \quad (8)$$

여기서,  $l$  : 수평거리(m)

$v_o$  : 비석의 초속도(m/sec)

$h$  : 비산높이(m)

$g$  : 중력가속도( $9.8\text{m/sec}^2$ )

실제 발파에 있어서 암석편의 형상은 복잡다양하며 그 표면도 매우 거친 상태이다. 이러한 암석편이 비산할 경우에 매우 큰 공기저항이 암석편에 작용하므로 이러한 점이 고려되어야 한다. 일반적으로 비산하는 물체에 대한 공기의 저항은 그 속도의 자승에 비례하므로 아래와 같은 관계의 식이 적용된다.

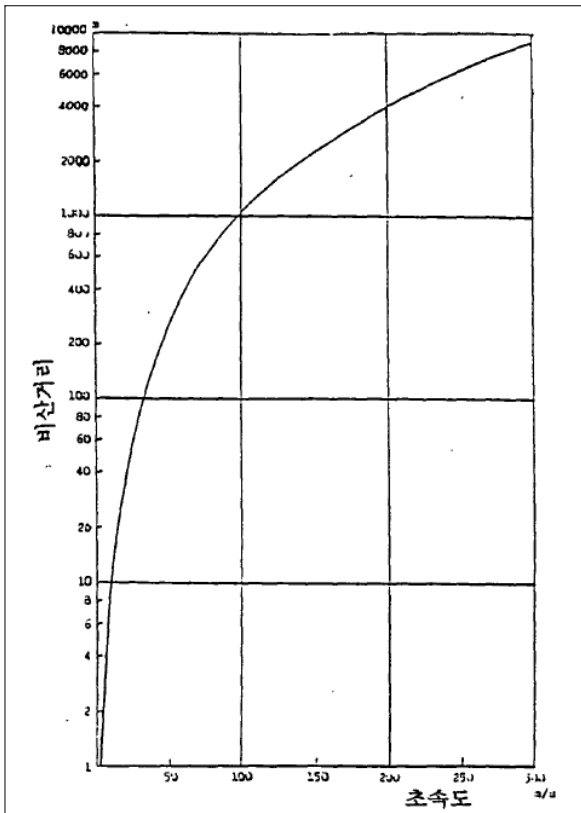


그림 7. 공기저항이 없는 경우 얻어진 초속도와 최대비산거리의 관계

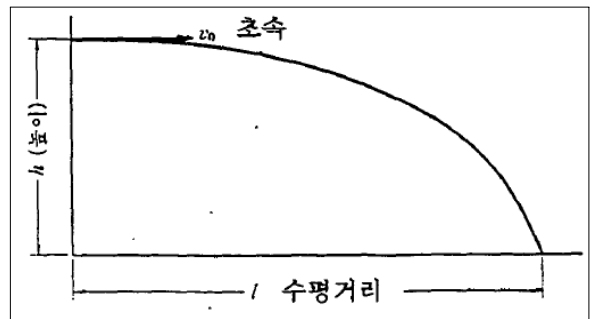


그림 8. 높이와 수평거리의 관계

발파에 의한 암석의 비산

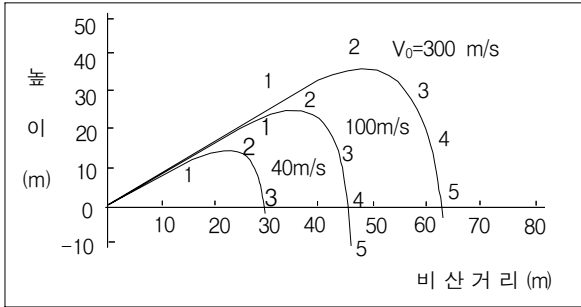


그림 9. k값이 0.05일 때 초속도에 따른 암편의 비산거리

$$\text{수평방향 } m \frac{du}{dt} = m k v^2 \sin \phi \quad (9)$$

$$\text{수직방향 } m \frac{du}{dt} = m k v^2 \cos \phi - m g \quad (10)$$

여기서, m : 암석편의 질량

v : 비산속도

$\phi$  : 연직방향과의 각도

k : 저항의 비례상수

여기에서 ‘저항의 비례상수 k 값을 얼마로 정하는가?’는 상당히 어려운 문제이지만, 많은 연구 결과에 의하면 노천 발파의 경우 k=0.05가 적절하다고 한다. 따라서 k=0.05일 때 초속도에 따른 암편의 비산 거리는 그림 9와 같다.

#### 4. 비산석에 의한 영향거리 산출

발파작업시 비산방지 조치를 취하지 않고 발파작업을 수행하였을 때 최대로 비산할 수 있는 가능거리를 의미하며, 매 발파마다 비산석이 발생한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 따라서 정상적 Bench 발파작업시 최대 비산가능 거리는 다음과 같다.

#### 4.1 발파비산석의 속도

- ① 정상적 발파조건 : 10~30m/sec
- ② 비정상적 발파조건 : 100m/sec이하

#### 4.2 계단발파에서 비산거리

- ① 최대 수평 이동거리
  - 응력파에 의한 영향거리 : 27~65m범위
  - 가스압에 의한 영향거리 : 30m미만
- ② 최대 수직 이동거리
  - 가스압에 의한 영향거리 : 15~40m범위

#### 5. 비산석에 대한 안전대책

암편의 비산에 대한 안전대책으로는 비산의 원인이 되는 요소들을 제거하는 것이 가장 근본적이다.

- (1) 장약량의 조절 : 암석에 균열이 많거나 벤치높이가 높을수록 비산의 위험이 커질 수 있으므로 한계 값에 가까운 약장약이 필요하다. 즉 천공지름을 작게 하거나 최소저항선의 조절에 의해 장약밀도를 저하시킨다.

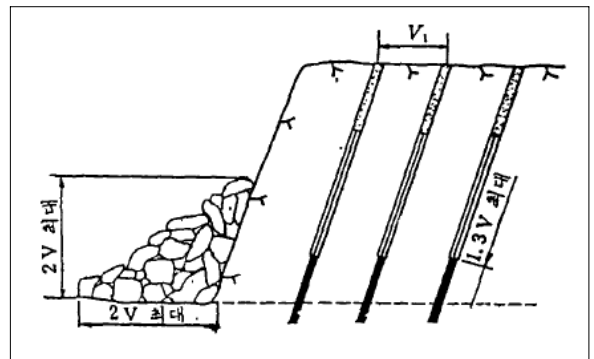


그림 10. 장약부분으로부터의 비산을 막는 방법

- (2) 지발발파 : MS 지발발파의 경우 앞 단계의 파쇄암석이 다음 열의 발파 시에 장벽으로 작용할 수 있으므로 비산을 감소시킬 수 있다.
- (3) 벤치발파에서 공저부분의 비산을 막기 위해서 그림 10와 같이 이전 발파의 파쇄암석을 남겨두는 것이 유효한 방법이 될 수 있다.
- (4) 천공오차를 줄여 국부적인 장약공의 집중을 피한다.
- (5) 저항선, 천공방향(공구방향)을 보안건물이 있는 방향으로 하지 않는다.
- (6) 전색을 충분히 하고 공발이 되지 않도록 한다.
- (7) 발파공에 불순물이 많이 들어 있어 예정된 위치에 장약을 못하는 경우가 발생하지 않도록 충분히 청소한 후 장약한다.
- (8) ANFO의 bulk 충전의 경우는 공내에 연결되는 공동을 특히 주의해야 한다.
- (9) 전폭약의 cut-off가 발생하지 않도록 천공배치 및 전폭약의 위치에 주의한다.
- (10) 방호 : 위의 방법에 의해서도 발파작업의 특성상 비산을 완전히 억제하지는 못한다. 완전히 억제하는 것도 경우에 따라서는 바람직하지 못한 것이 될 수도 있다. 따라서 비산거리 등을 안전한 범위 이내로 조절하는 것이 중요하다.

그러나 아주 가까운 거리에 보호건물이나 사람이 거주하고 있다면 거의 완전한 정도로 최대한 비산을 억제해야 하는데 이때 가장 효과적인 방법은 발파되는 암석에 직접 방호를 하는 것이다. 방호에는 암석의 자유면 또는 비석을 방지하고 싶은 방향 쪽의 암반을 직접 덮는 blasting mat가 가장 일반적이다.

### 참고문헌

1. 강원대학교 산업기술연구소, 1993, 암발파 설계에 관한 연구, 한국토지개발공사.
2. 건설교통부, 2002, 암발파공법 설계적용 기준(안).
3. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계시공지침.
4. 윤지선, 1992, 최신발파기술, 구미서관, pp.158-195.
5. 이상곤 외, 2010, 발파하중 및 비석의 충격에 의한 광주의 지반 진동의 예측연구, 화약발파(대한화약발파공학회지)n제 28권 제1호, pp.1-10.
6. 청석엔지니어링, 1997, 부산구평지구 택지개발사업 발파영향권 분석 및 암반발파 설계보고서, 대한주택공사.
7. Langefors U., Kihlstrom B., 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & Sons.
8. Piyush Rai et al, 2010, Blast Design for controlled Augmentation of Muck Pile Throw and Drop, Tunnel & Underground Space, Vol. 20, No. 5, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, pp.360-368.
9. Rune Gustafsoon, 1973, Swedish Blasting Technique, Sweden, pp.83-88, 117-12.