

제1장 발파이론

1.1 발파의 개념

○ 발파

- 폭약을 사용하여 목적하는 물체를 파괴하는 것
- 폭발에 의해 생기는 충격파 및 가스의 팽창력을 이용하여 물체 파괴
- 충격파에 의한 물체의 균열 생성과 가스 팽창에 의한 균열 확장으로 불력 파괴와 비산

○ 발파 계획

- 어느 정도의 물량, 어느 정도의 크기, 사용 폭약 종류, 어느 정도의 양, 사용 방법을 고려한 발파 계획 필요
- 안정성, 효율성, 경제성을 고려한 발파 계획

○ 폭약 장전 방법

- 내부장약법(밀폐발파, 천공발파): 대상 물체의 내부에 폭약을 장전하는 방법으로 응용이 많고 중요함

- ✓ 천공 발파의 약실은 원통형 형상으로 측면에서 폭파력이 가장 강력하게 작용하며, 공 구 및 공저 방향은 비교적 약하기 때문에 천공방향은 가급적 자유면에 평행하도록 함
- ✓ 단일 자유면이면, 저항선은 45° 내외의 압력면을 갖도록 천공방향을 결정
- ✓ 약실은 자유면에 다이너마이트한 투영 면적이 클수록 파괴 효율성 높음

- 외부장약법: 대상 물체의 외부에 폭약을 장전하는 방법

○ 발파의 목적

- 터널, 지하갱도의 굴진 및 지하공간 굴착 도로, 택지 및 부지 조성 공사 등을 하기 위한 암반의 파쇄, 콘크리트의 골재 또는 석재의 채취, 대피인 암석의 소할, 콘크리트 건물, 강판의 절단, 주철의 주형을 파쇄, 발근, 석재 채취, 수중발파, 광석, 석탄의 채광, 군사, 토목 목적으로 시행

○ 발파 구분

- 단순한 발파 목적에 따른 파괴
- 일반산업과 공업 분야에 대한 응용
- 군용

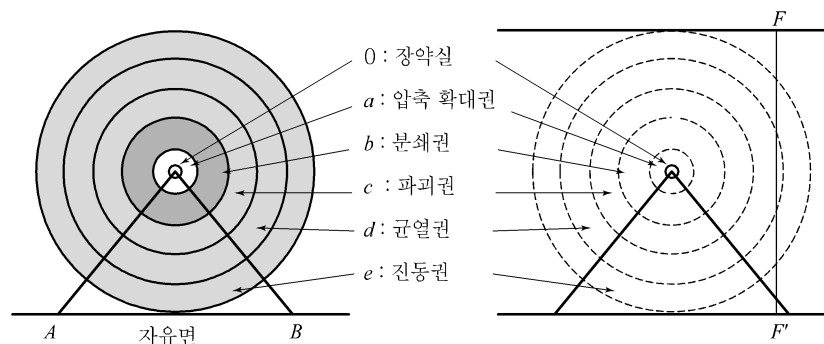


그림 1.1 암석의 폭발상황

1.2 장약량 계산

○ 시험발파

- 경제성, 안정성, 효율적인 발파를 위한 사전 발파로서 이를 통하여 발파대상지의 암석과 폭약에 대한 계수 결정
- 고려 요소: 파괴 암석의 크기, 채석량, 비산문제, 안전성, 효율성, 경제성
- 폭굉압 P_d : 폭약의 동적 효과를 나타내는 것

$$P_d = K \Delta D^2 \quad (1.1)$$

K:상수, D: 폭속, Δ : 장전 비중

- 폭발 효과를 향상시키기 위해서 장전 비중을 크게 하는 것이 필요
- 카알릿과 같은 분말 화약류는 너무 과도하게 밀도를 높이면 폭굉이 일어나지 않게 되는 사압현상(Dead Point)을 일으킬 수 있음
- Center Cut에서 Bun Cut의 장약공은 너무 폭력이 높아지면 빈공에 파쇄 암석이 고결되어 그 효과가 나타나지 않으므로, 인위적으로 장전을 느슨하게 하거나 저비중 폭약을 사용
- 2공발파에 있어서 채석량은 장약량에 비례함

$$L: L_1 = V: V_1$$

L: 공의 지름 d 일 때의 장약량

L_1 : 공의 지름 d_1 일 때의 장약량

$$\therefore \frac{L}{L_1} = \frac{V}{V_1}$$

채석 체적은 저항선의 3승에 비례하므로, $\frac{V}{V_1} = \frac{W^3}{W_1^3}$

$$\text{따라서, } \frac{L}{L_1} = \frac{W^3}{W_1^3}, L = \frac{W^3}{W_1^3} L_1, \left[\therefore \frac{L_1}{W_1^3} = C \right]$$

$$\therefore L = CW^3$$

C: 발파계수, 암석과 폭약의 종류에 따라 달라짐. 암석과 폭약이 동일한 경우에 이론적인 장약법이든 언제나 일정값을 가짐

$L = CW^3$: 암석의 단위 체적을 발파시키는데 필요한 폭약량, 암석 1m^3 당 장약량(kg)

- 발파계수 C: 시험발파에서 발파의 목적에 적합한 폭약을 선정하여 발파시킨 후, 그 때 파괴 암석의 크기, 파괴 암석의 비산 정도, 파괴면의 상황에 의해 결정
- 장약량을 결정하는 데 폭약의 장전상태, 전색상태, 암석의 파쇄 정도 등을 복합적으로 고려해야 하지만 많은 시험 결과 “자유면(자유면) 발파에서 표준발파의 장약량은 최소저항선의 세제곱에 비례함. 장약량 L, 최소저항선 길이 W

$$L = CW^3 \quad (1.2)$$

- 원뿔모양인 누두공의 부피 V는 $R = W$ 의 관계로부터 $V = W^3$,

$$L = CV \quad (1.3)$$

위 식은 1자유면 표준장약에 의한 표준발파 시에만 적용되며, 저항선이 1m인 경우 실제에 가깝고, 표준발파의 장약량은 원뿔모양 누두공의 부피에 비례

- 하우저(Hausser)의 공식: $L = CW^3$. $L = CV$ 를 이용하여 발파설계를 할 경우, 이 식이 표준장약에 의한 표준발파, 즉 $n=1$ 의 경우만 적용되므로 장약이 과장약 또는 약장약일 경우

에는 적용할 수 없음. 과장약 또는 약장약의 경우 보정식을 구하여 사용하는데, 누두지수의 함수 $f(n)$ 을 고려하여 n 값의 변화에 따른 장약량을 구함

1.2.1 발파계수(C)

- 누두공의 크기와 모양은 누두지수의 함수 $f(n)$ 과 관계되는 것으로 $L=f(n)CW^3$ 의 발파계수 C 값은 누두공의 크기나 모양과 관계가 없으며 발파에 필요한 장약량을 계산하는데 중요한 계수임
- 암석 강도와 비교하여 폭약의 힘이 약하고 전색이 불충분하면 발파효과가 적음. 암석의 저항성을 나타내는 계수 g , 폭약의 위력계수 e , 전색계수 d 일 때, 발파계수 C

$$C = g \cdot e \cdot d \quad (1.4)$$

(1) 암석계수(g)

- 암석의 발파에 대한 저항성을 나타내는 계수로서 암석 약 $1m^3$ 를 발파할 때 필요로 하는 폭약량
- Nitroglycerine 60%에 해당하는 Dynamite($e=1$)를 깊이 $1m$ 되는 곳에 장약하여 완전히 전색하였을 때, 표준발파를 위한 장약량을 $L(kg)$ 이라 하면 $L=g$ 가 되므로 장약량 L 로 암석 발파에 대한 저항성 계수 g 값을 구할 수 있음

표 1.1 광산의 갱도굴진에서 얻어진 암석계수(kg/m^3)

암 석 명	g 의 값 [폭약 소요량(kg/m^3)]		
	최 대	최 소	평 균
경 규 암	4.32	2.70	3.26
경 각 섬 암	3.08	2.56	2.88
규 암	2.85	2.54	2.68
경 석 회 암	2.55	2.34	2.46
경 사 암	2.35	2.16	2.26
경 점 판 암	2.16	2.16	2.16
화 강 암	2.31	1.85	2.09
섬 록 암	2.32	1.84	2.08
편 마 암	2.30	1.84	2.07
조 면 암	2.27	1.85	2.02
안 산 암	2.16	1.44	1.80
세 일	1.66	1.66	1.66
석 회 암	1.85	1.44	1.62
사 암	1.98	1.22	1.44
편 암	2.58	1.08	1.30
응 회 암	1.80	1.08	1.28
명 반 석	1.08	0.72	1.00

(2) 폭약계수(e)

- 어떤 특정의 폭약을 기준으로 하고, 이것과 다른 폭약과의 발파효력을 비교하는 계수로서 강력한 폭약일수록 e 값은 작게 됨

○ 폭약 발파효과를 나타내는 방법: 비에너지, 폭발압력, 맹도 등이 있으며 이에 따라서 e 의 값이 달라짐(표 1.2)

- NG 60%의 Strength Dynamite를 기준으로 할 때, NG 60% Strength Dynamite의 효력은 NG 35% Strength Dynamite보다 다소 강하게 나타남

※ 맹도(brisance)=폭굉 압력(P): 폭약의 동적효과(=파괴효과)를 나타내는 척도로서, 폭약의 위력은 충격파에 의한 동적효과와 가스압에 의한 정적효과로 구분 폭굉 압력(P)는

$$P = \frac{1}{4} \rho D^2 \text{로 표현되며, } \rho: \text{폭약의 비중, } D: \text{폭속(detonation velocity), 맹도 구하는 방법:}$$

i) 폭속 측정해서 구함, 실험적으로 ii) Kast의 맹도계, iii) Hess의 맹도계 이용

표 1.2 폭약계수(e)

폭 약	맹도에서 본 e	일량에서 본 e
NG 93% Strength Dynamite	0.5	0.6
NG 75% Strength Dynamite	0.8	0.8~0.9
NG 60% Strength Dynamite	1.0(기준)	1.0(기준)
NG 50% Strength Dynamite	1.2	1.1~1.2
NG 40% Strength Dynamite	1.4	1.2~1.3
NG 35% Strength Dynamite	1.5	1.3~1.4
NG 30% Strength Dynamite	1.6	1.4~1.5
Carlit	1.5~1.7	0.8~0.9
질산암모늄 Dynamite	4.0~5.0	1.3~1.5
탄광용 질산암모늄 폭약	3.0~4.0	1.2~1.4

(3) 전색계수(d)

○ 폭약을 발파공에 장전한 후, 모래나 점토로 발파공 틈을 메워 틈새를 없애 폭약을 발파공 안에 밀폐시킨 상태를 1(표준)로 하고, 그 밀폐상태가 불완전하게 됨에 따라, 즉 $d > 1$ 인 경우에 같은 발파효과를 얻기 위해서는 더 많은 폭약을 필요로 할 때 결정되는 계수

○ 전색의 목적: i) 발파 후 연기 발생을 적게 하고, ii) 가스 및 탄진에 대한 인화의 위험을 방지하고, iii) 폭발생성 가스압이 암석의 파괴에 이용되도록 하며, iv) 폭약의 폭발에 대하여 충분한 저항을 주어 완전히 폭발시키기 위함

○ 전색의 효과: 밀폐에 의한 천공내 폭약의 완폭과 폭약에너지의 밀폐에 의한 효과를 상승시키고, 탄광 등에 있어서 가스, 탄진에 대한 안정성 향상 (표 1.3, 그림 1.2)

표 1.3 전색계수(d)

전 색 의 상 태		전 색 계 수
적당히 깊은 장약공	완전전색	$d = 1.0$
	불완전전색	$1.0 < d < 1.25$
	전색하지 않음	$d = 1.25$
장약만이 장약실에 있음	장약실 위로 성토함	$d = 1.5$
	성토 하지 않음	$d = 2.0$
외 부 장 약	일반적인 경우	$2.0 < d < 4.5$
	특별한 경우	$d = 9.0$

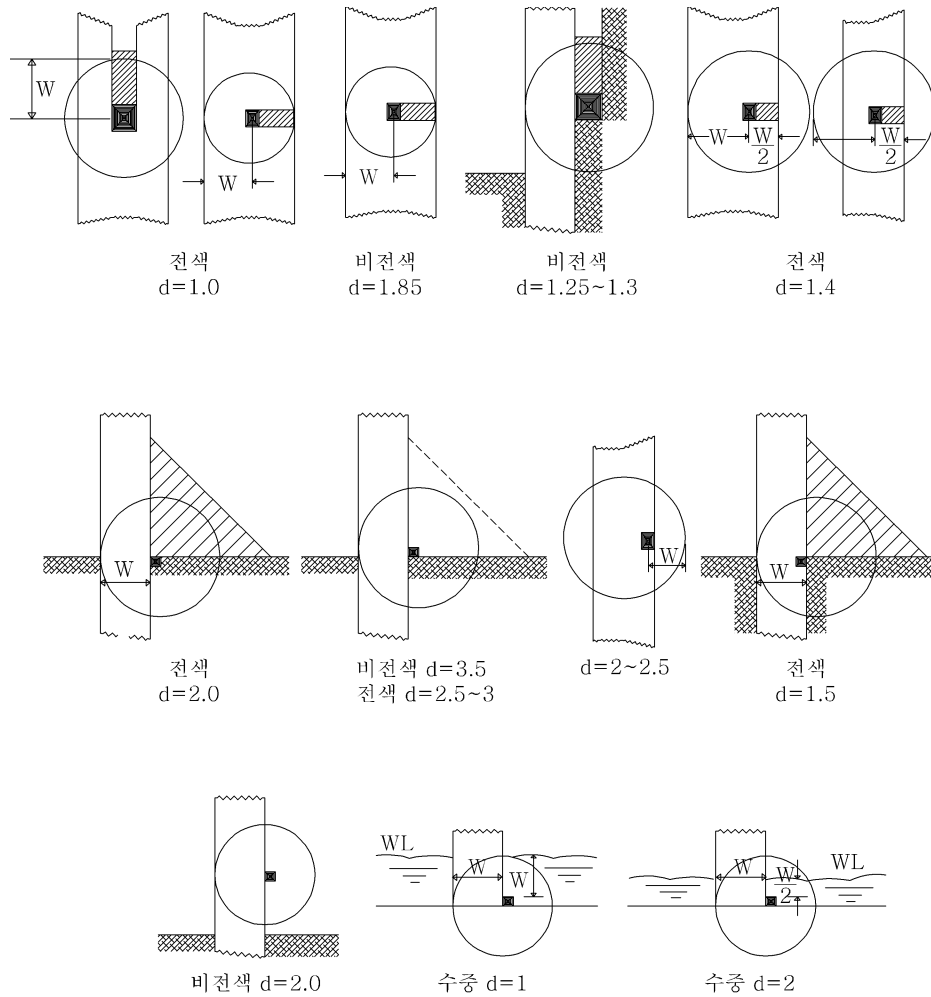


그림 1.2 전색모습과 d 의 값

1) 누두지수의 함수($f(n)$)

- 하우저(Hauser)의 발파식이 표준장약의 경우에만 적용되므로, 이를 임의의 누두공 형상으로부터 환산하는데 필요한 수정식 필요

- 과장약이나 약장약인 경우 누두지수(n)을 고려한 식 1.5

$$L = f(n)CW^3; \quad f(n): \text{누두지수 함수} \quad (1.5)$$

$$f(n) = \frac{1.0 + 4.4n^3}{5.4} \quad \text{Brallion} \quad (1.6)$$

$$f(n) = \frac{n^2 \sqrt{1+n^2}}{\sqrt{2}} \quad \text{Marescott} \quad (1.7)$$

$$f(n) = n^3 \quad \text{Hausr} \quad (1.8)$$

$$f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3 \quad \text{Dambrum} \quad (1.9)$$

- 장약량 수정함수: $f(n)$ 의 변화에 대한 장약량의 변화량을 환산하기 위한 함수식. 즉, 과장약 또는 약장약 발파가 된 경우 최소 저항선을 바꾸지 않고 약량을 어느 정도로 증감하면 표준장약이 되는지를 계산하는 식으로 대표적으로 Dambrum 식이 가장 많이 쓰이며, 실험적으로도 가장 타당 함

- 최소 저항선이 바뀌는 경우 장약량의 수정은 Lares가 함수 $f(w)$ 를 이용한 식 제안

$$L = f(w)CW^3 \quad (1.10)$$

$f(w)$: 발파규모의 수정항, $f(w) = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{w}} - 0.41 \right)^3$

1.2.2 누두공 이론

- 누두공(crator): 균질한 암반에 적당량의 폭약을 적당한 깊이에 장전하여 발파할 때 생기는 원뿔모양의 파쇄공
- 누두공의 모양과 크기는 암반의 종류, 폭약의 위력, 전색(매지)의 정도에 따라 달라짐
- 누두공 시험: 누두공의 크기와 모양을 관측하여 폭약량을 결정하는 데이터를 얻기 위한 시험
- 누두공 반지름 r , 장약의 중심에서 자유면까지의 최단 거리(최소저항선) W 일 때, 누두공의 형상은 r 과 W 의 비 인 누두지수 n 으로 표시

$$n = \frac{r}{W} \quad (1.11)$$

(1) 과장약(Over charge, 그림 1.3)

- 최소저항선의 길이에 비해 장약량이 많은 상태($n > 1$)

$$r/W = n > 1 (r > W) \quad (1.12)$$

- 암석의 파쇄정도가 심하고, 파쇄된 암석의 비산 우려, 발파환경 문제(진동, 비산, 소음)가 발생될 확률이 높음

(2) 표준장약(Standard charge, 그림 1.3)

- 누두공의 꼭지각이 90° 가 되는 경우($n = 1$)

$$r/W = n = 1 (r = W) \quad (1.13)$$

- 다른 장약법에 비해 안정성 확보

(3) 약장약(Under charge, 그림 1.3)

- $n < 1$ 의 누두공이 생기는 경우의 장약

$$r/W = n < 1 (r < W) \quad (1.14)$$

- 공발현상이 발생되거나 부석이 남게 됨
- 공발(empty blasting) 현상: 철포라고도 하며 폭약은 폭발했지만 그 폭약량의 파괴력이 극히 미소하거나 또는 전혀 파괴가 일어나지 않고 폭발 가스만 균열층을 통해서 새어나가는 현상
- 공발의 원인
 - ✓ 균열, 부석과 발파위치의 부적당에 의한 발파공 입구의 절단과 장공, 장약장, 매지불량 등의 부적당에 의한 후단 발파의 입구절단
 - ✓ 자유면에 수직천공을 했을 때 장약실에 많은 균열층이 존재할 때
 - ✓ 심발발파의 실패에 의한 자유면 형성이 불량할 때
 - ✓ 기폭전원의 전력부족, 각선간 절연저항 증가에 의한 MS발파, 지발시간의 단이 맞지 않는 경우와 약장약이나 과장약이 되었을 때

- 최근에는 표준장약보다 약간 큰($n=1.2\sim1.5$) 것으로 사용하는 경향
- 발파효과는 자유면의 수에 따라 증가하는데, 자유면 쪽은 저항이 없어서 폭발에너지가 암반에 미치는 응력이 다른 면보다 더 많이 작용하기 때문

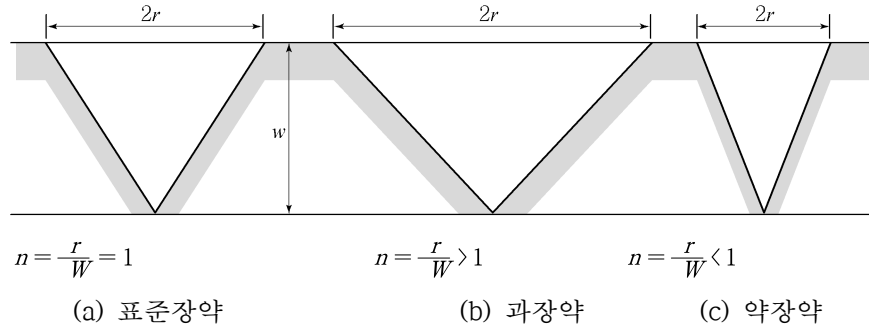


그림 1.3 발파공의 비교

(4) Free face(자유면)의 수와 파괴상태

- 그림 1.4의 자유면 AB가 있을 때 OA 및 OB로 되는 부분이 파괴되는 부분이며, CB에 자유면이 동시에 있다고 가정하면 OB 및 OC로 되는 부분도 동시에 파괴가 일어남
- 따라서 동일한 약량에 대하여 채석량은 증가하게 되므로 유리함
- 그러나 약실로부터 각 자유면에 이르는 저항선은 전부 동일하게 하는 것을 원칙으로 하며, 이 자유면의 수효 및 저항선의 길이는 발파 계획에 있어서 가장 중요한 인자임

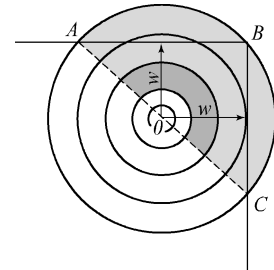


그림 1.4 파괴형태

1) 단일자유면

- 그림 1.5에서 AB로 되는 단일 자유면으로서 저항선은 약실 중심으로부터 AB면까지의 거리이며, AOB는 누두공 또는 폭파공이라 함

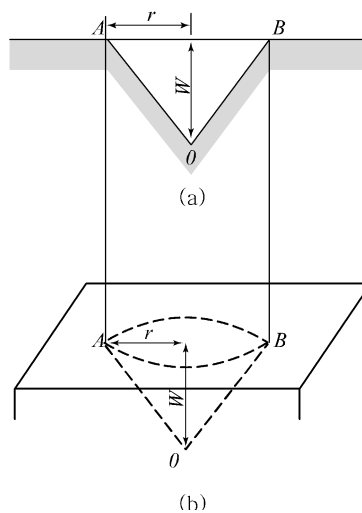


그림 1.5 1자유면

2) 2자유면

- 그림 1.6의 2자유면으로서 윗면과 앞면이 직교하였을 때를 말하며, 앞면에 평행하게 h 를 천공하고, 천공 h 의 위치 및 깊이는 어느 자유면에 대해서도 최소 저항선 W 를 동일하게 함

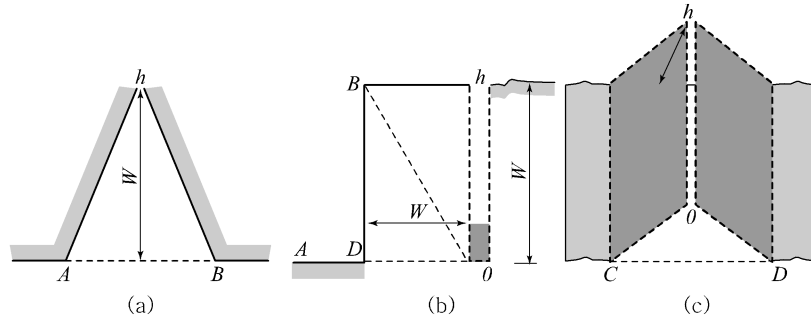


그림 1.6 2자유면

3) 3자유면

- 그림 1.7의 윗면 AB, 앞면 BE 및 측면 AE의 3자유면, (a)는 평면도, (b)는 입체도, (c)는 파괴 상황을 그린 입체도
- 암질은 절리 등이 없는 균질이라면 약실로부터 각 자유면에 이르는 거리는 동일하게 정해야 함

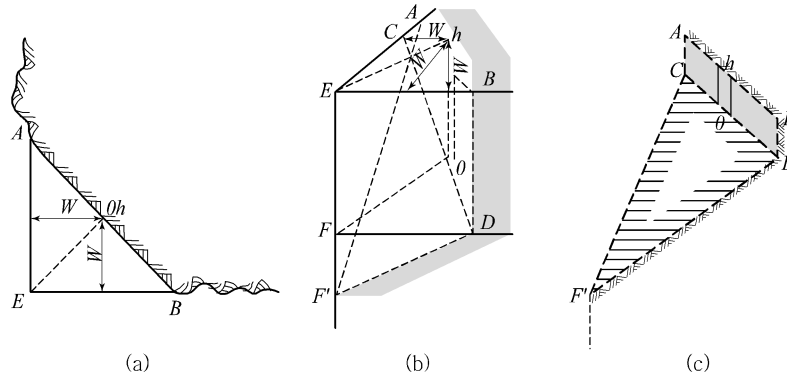


그림 1.7 3자유면

4) 4자유면

- 그림 1.8이 4자유면으로 앞면, 양측면 및 윗면 외에는 모암과 접촉하였을 때

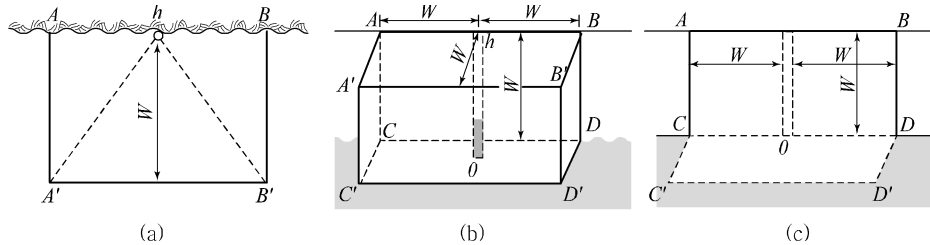


그림 1.8 4자유면

5) 5자유면

○ 그림 1.9의 배면만이 모암과 접속한 5자유면의 경우

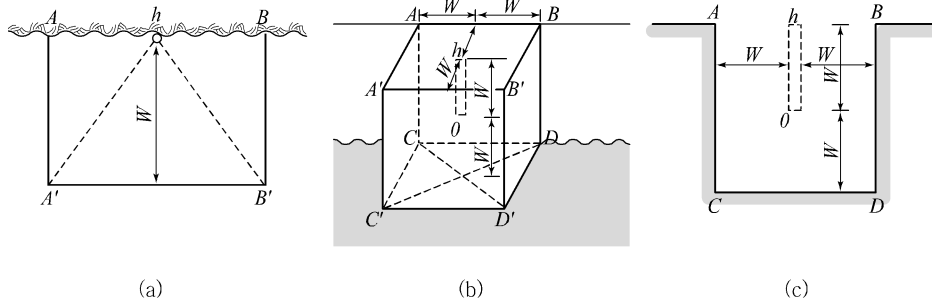


그림 1.9 5자유면

6) 6자유면

○ 그림 1.10의 6자유면을 가진 입방체

- 약실 중심에서 각 자유면에 이르는 최소 저항선은 전부 같은 거리에 있도록 발파 계획을 수립

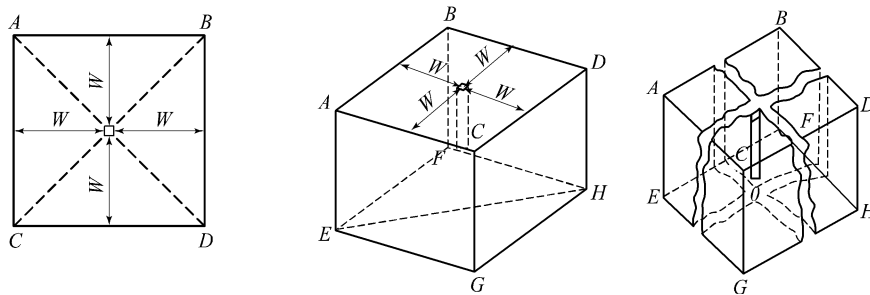


그림 1.10 6자유면

1.2.3 응력과 이론

(1) 충격하중의 특성

- 충격하중은 하중이 순간적으로 극히 높은 유한치로 상승하였다가 그 후 급속히 감소되어 가는 하중으로 작용시간이 마이크로초나 밀리초 단위로 나타낼 정도의 것
- 충격하중인 경우에는 그 하중이 작용하는 물체의 반응에 따라 하중 그 자체도 큰 영향을 받음
- 충격하중에 의해 물체 내에 유발된 응력분포는 일반적으로 과도적이며 극히 국한됨
- 충격하중은 그 작용하는 물체에 운동을 일으킴
- 충격하중을 받은 물체 내에는 과도적 교란이 발생하게 되며, 물체 내의 응력은 응력파의 형태로서 전달됨으로 충격하중 하에서 물체의 동작을 알기 위해서는 응력파의 성질에 대해 기초적인 지식을 가지는 것이 필요

(2) 응력파의 전파 특성

- 어떤 물체에 급격히 하중을 가할 경우 그 물체에 생기는 응력이나 변형이 즉시 그 물체의 모든 부분에 전달되는 것은 아니며, 하중점에서 이격된 부분에서는 어떤 일정한 시간이 경과 할 때까지 어떠한 교란도 받지 않음
- 이때 물체에 생기는 응력이나 변형은 파동의 형식을 취할 정도의 과도적 응력으로 그 물체 내에 일정한 속도를 가지고 전달되어 감
- 충격하중을 받은 물체 내에서는 세로파와 가로파의 2종류의 응력과 발생. 세로파(종파, P파)인 경우에는 그 세로파 내의 입자운동은 진행방향과 평행이 되는 방향으로 단순한 신축의 변형이 발생되며, 가로파(횡파, S파)인 경우에는 그 가로파 내의 입자운동은 진행방향과 직각방향으로 전단변형이 발생

1) 응력파의 전파속도

- 어떤 물체 내에서의 세로파(P파) 및 가로파(S파)의 전파속도는 그 물체의 밀도와 탄성정수와 밀접한 연관이 있음

$$P\text{파} = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

$$S\text{파} = \left[\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

여기서, E : 물체의 동탄성계수, ν : 포와송비, ρ : 밀도, G : 강성률($G = E/2(1+\nu)$)

2) 응력파의 반사

- 응력파가 자유면에 직각으로 입사할 경우
 - 응력파는 그 전파 중에 매질의 자유면에 도달하면 그 곳에서 반사됨
 - 응력파가 자유면에 직각으로 입사하는 경우 자유면과 직각방향인 응력의 합력은 0이 되어야 하므로 세로파가 입사한 경우에는 자유면에서 반사합과 동시에 그 응력파의 극성이 변함
 - 자유 단면 부근 응력상태의 예로 그림 1.11에 제시하는 모형을 고려한다면 자유면에 입사하는 입사응력파(σ_i)가 자유면에 도달할 때까지는 파의 진행에 따라 매질이 그 파형으로 특정 지어지는 압축응력을 받게 되지만, 파가 자유면에 도달하면 동시에 반사응력파(σ_R)로 되어 파두 응력치나 파형도 거의 같은 인장파로 극이 바뀌어 매질 속으로 되돌아감
 - 반사파의 진행에 따라 원래의 압축응력상태에서 해방됨과 동시에 자유단면 부근에는 새로운 인장응력 상태가 발생

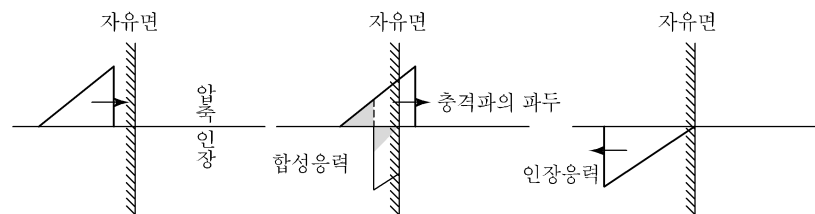


그림 1.11 자유면에서의 응력파의 반사와 응력상태

- 응력파가 자유면에 대해 경사지게 입사할 경우

- 응력파가 자유면에 대해 경사지게 입사할 경우 자유면에 세로파 또는 가로파의 응력파가

입사하면 자유면에서 반사될 때 어떤 경우에도 세로파와 가로파 2개의 반사파가 생성되는데, 세로파가 자유면에 대해 경사지게 입사할 경우 반사에 의해 생성되는 세로파의 반사각은 입사각 α 와 같고, 가로파의 반사각 β 와의 사이에는 Snell의 법칙 성립

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{C_L}{C_T} = \left[\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

- 입사된 세로파의 입사응력 (σ_I)와 반사에 의해 생긴 세로파 및 가로파의 반사응력 (σ_R) 및 (τ_R)과의 사이의 관계식

$$\sigma_R = R_0 \cdot \sigma_I \quad (1.18)$$

$$\tau_R = [(R_0 + 1) \cdot \cot 2\beta] \cdot \sigma_I \quad (1.19)$$

단, R_0 는 반사계수

$$R_0 = \frac{\tan\beta \cdot \tan^2 2\beta - \tan\alpha}{\tan\beta \cdot \tan^2 2\beta + \tan\alpha} \quad (1.20)$$

1.2.4 인장파괴이론

(1) 폭굉압

- 폭약은 기폭되면 폭발반응이 폭약분자 사이에 연쇄적으로 일어나 미반응부로 그 반응이 진행되고 그 결과 폭굉압이 발생

1) 폭굉압의 전개상태

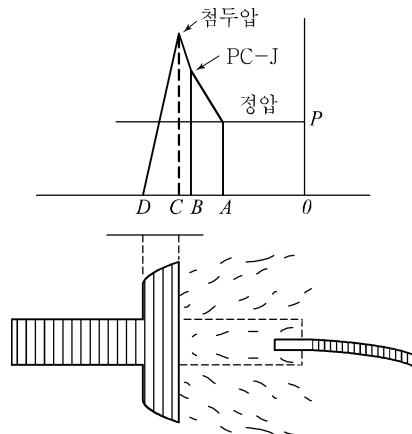


그림 1.12 폭약의 폭굉압 전개상태

- B점 : 폭발반응이 끝난 직후의 점, 샤프만쥬계(Chapman-Jouguet)면에서의 압력(PC-J)
- BC대 : 폭발반응이 일어나는 부분
- CD대 : 미분해충으로 반응이 일어나기 전 큰 충동을 받아서 이로 인하여 첨두압이 생기고 C점에서의 첨두압은 PC-J에 비해서 몇 %의 증가로부터 2배에 가까운 수치를 나타내지만 곧 PC-J의 값으로 저하되며 이 PC-J 압력이 동적 폭굉압으로 추정
- AB대 : 폭발반응에 의한 Gas 생성물이 팽창유동하고 있는 부분
- AO대 : 가스 유동이 완료된 후의 가스압의 상태로 정적압력이라 함

2) 폭굉압의 전달

- 밀폐폭파(천공발파)작업에 있어서는 폭약은 암석 속에 밀폐되며 폭발에 의하여 폭약 속으로 전파해온 폭발파가 암석과의 경계면에 도달하면 암반에 강한 충격을 주고 이때 암반속의 각점에는 충격파의 통과로 특이한 응력상태를 나타나게 되며 계속해서 장약실내에 균일하게 분포하는 가스압력(정적압력)은 암석을 압축하게 됨
- 충격작용에 의해서 암반에 균일파괴를 일으키고 가스압력에 의해 더욱 균열이 조성되어 파괴되어 비산되는 것

(2) 암반의 인장파괴

- 폭약의 폭굉으로 인하여 폭원근방에 강력한 충격압으로 분쇄되고, 그 바깥쪽은 어느 정도 파쇄되며, 충격파가 전파되면서 자유면 근처에서는 최소저항선을 중심으로 방사상으로 인장파괴를 일으키고, 충격파가 자유면에 도달된 후에는 그 반사파로 인하여 자유면에 평행인 판상으로 인장파괴를 일으킴

(3) 홉킨슨 효과(Hopkinson Effect)

- 폭약이 폭발하면 그 폭굉에 따라서 응력파가 발생하고 이 응력파가 전파되어 자유면에 도달하면 인장파로 반사되며 암석은 일반적으로 인장강도가 압축강도보다 훨씬 낮으므로 (압축강도의 1/10~1/20) 입사할 때의 압력파에는 그다지 파괴되지 않아도 반사할 때의 인장파에는 보다 많이 파괴되는 현상
- 암석이 유효 장력점 즉, 인장파의 크기와 잔여 압축파의 크기 차이가 암석의 인장강도보다 크게 되는 지점에서 파괴되는 현상

1.2.5 전단파괴이론

(1) 전단파괴

- 석고나 시멘트 벽돌 등에 작은 지름으로 천공하고 강철봉을 삽입하여 외력을 가하면, 전단파괴에 의한 원뿔 모양의 형체 생성
- 외력 대신 공저에 폭약을 장전하고, 가는 모래로 채워 덮고 폭발시켜도 동일한 원뿔 모양의 형체 생성되며, 이 때 생기는 원뿔 모양 구멍이 열리는 각도는 90~130°

(2) 자연 암석의 파괴

- 암석은 인장력에 대해 가장 약하고 그 다음으로 전단력이며 압축력에 대해서는 가장 강함(압축력>전단력>인장력)
- 암석 파괴가 인장력에 의하여 파괴되는 경우는 특수한 조건하이며 일반적인 자연암의 파괴는 전단파괴에 의하여 일어나는 경우가 가장 많음

1.2.6 Daw이론

(1) Daw의 기본 이론

- 절단면에 대한 전압력 P 는 전단 저항선 W 와 전단면의 주변 길이 S , 전단계수 K 사이에서 다음 식으로 표현

$$P = SWK \quad (1.21)$$

○ 압력의 작용면적 A , 전단면 단위 면적에 대한 압력 P , $P=A \cdot p$ 이므로

$$W = \frac{P}{KS} = \frac{A \cdot p}{KS} \quad (1.22)$$

$K/P=C$ 라고 하면,

$$W = \frac{A}{CS} \quad (1.23)$$

- $P=A \cdot p$ 에서 전압력(파괴력)인 P 를 크게 하려면 약실의 투사면적 A 와 약실의 단위면적에 작용되는 압력 p 를 크게 하면 됨
- 약실 투사면적을 크게 하여 전압력을 증대시키려면 파괴면에 대하여 약실을 평행으로 설치하면 최대투사면적을 갖게 할 수 있으므로 파괴효과는 다른 어떤 경우에 비하여도 최대
- 천공방향과 파괴면과의 관계는 효과면에서 볼 때 막대한 차이를 가져오므로 자유면에 대하여 약실의 투사면적이 가장 크게 되게 천공방향 결정
- 약실의 단위면적에 작용하는 압력 p 를 크게 하여 파괴력을 증대시키려면 폭약의 장전비중을 크게 하여 주어야 하며, 같은 종류의 폭약일 때에는 되도록 폭약을 천공에다 압입시켜 주면 되나, 유의할 것은 폭약비중을 증대시켜줄 목적으로 폭약을 압입시킬 때 지나치게 가압시키면 폭약 비중의 증대로 인하여 불발의 경우가 야기될 수 있음

(2) 폭발에 의해 발생하는 힘의 결정조건

- 전압력 P 는 암석 속에 작용하는 밀폐 약실 속의 폭약의 점폭에 의해 얻어지며, 이 폭발에 의해 발생하는 힘은 발생하는 가스의 절대량, 가스의 온도, 폭발열에 의한 가스의 팽창, 최대팽창 또는 최대압에 이르는 시간 등은 화약에 있어 특성이며, 이 밖에 약실의 크기 정도, 주위의 매체로의 열전도율에 따라 결정할 수 있음

(3) P 와 S 및 W 의 비

- 여러 상태의 경우에 있어서 파괴면의 형상 여하를 불문하고, 전단 파괴가 서로 닮은꼴로 일어날 경우는 외력(P)와 이것이 작용하였다고 생각되는 면의 주변 길이(S) 및 그 면에서 파괴면까지의 거리 W 의 비는 항상 일정한 전단계수(K_1)가 됨

$$\frac{P}{SW} = \frac{P_1}{S_1 W_1} = \frac{P_2}{S_2 W_2} = K_1 \quad (1.24)$$

조건이 동일한 전단파괴에서는 항상 동일 값이 됨,

$$P = SWK_1 \quad (1.25)$$

- 이 P 는 전단 파괴에 요하는 힘의 정미량을 표시하므로, 암석의 전단파괴에서 폭약 폭발시 발생하는 힘과 동등하지 않음. 왜냐하면 암석 발파시 상당히 많은 에너지 손실이 있어서 직접 파괴의 역할을 하는 힘은 그 일부에 불과하기 때문

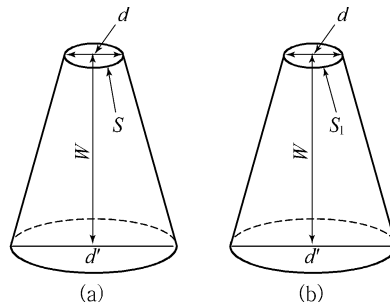


그림 1.13 전단파괴에 의한 누두공

(4) Daw의 전단이론의 결점

- 압력으로만 파괴가 일어난다는 데 무리가 있음. 전단 조건은 (압력)×(이동거리)
- 전단은 누두공 주변에서만 생성

(5) 자유면의 수와 파괴량과의 관계식(Daw의 실험식)

$$1\text{자유면 } V = \frac{4}{3} W^3 \quad 4\text{자유면 } V = 3 W^3 \quad (1.26)$$

$$2\text{자유면 } V = \frac{5}{3} W^3 \quad 5\text{자유면 } V = 4 W^3 \quad (1.27)$$

$$3\text{자유면 } V = \frac{7}{3} W^3 \quad 6\text{자유면 } V = 8 W^3 \quad (1.28)$$

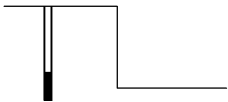
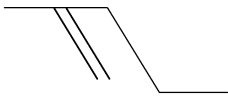
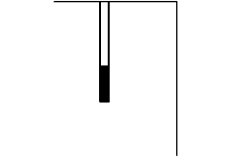
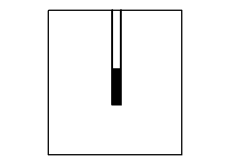
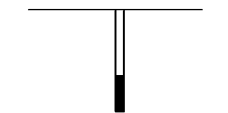
1.3 발파효과

- 발파작업은 착암기로 천공한 다음, 구멍 안에 폭약을 장전하고 전색을 한 후에 점화하여 이루어지는데, 발파 결과는 사용 폭약의 종류, 폭약의 장전방법, 점화방법 및 암반의 특성에 따라 달라짐
- 발파 결과에 영향을 미치는 요소
 - 천공지름
 - 천공 깊이 및 경사
 - 전색 깊이 및 전색 재료
 - 천공 방법
 - 최소 저항선의 길이와 공 간격
 - 폭약의 종류와 특성
 - 기폭 방법 및 기폭 순서
 - 장약 방법
 - 자유면의 수
 - 지질 조건
 - 암석의 물성 및 역학적 특성
 - 암반 내에 존재하는 불연속면의 정도 및 방향
 - 출수 조건
- 발파효과를 좋게 하기 위해서는 대상 암반에 따라 적당한 폭약을 선정하고 적당한 방법을 이용하여 발파하는 것이 필요. 발파효과는 자유면, 약경, 공간격 및 사용너판의 시차 등에 의해 달라짐

1.3.1 자유면과 발파효과

- 누두공 시험의 경우 평탄한 지반에 일정한 깊이까지 구멍을 뚫고 폭약을 장약한 다음 발파 실시: 1자유면 발파
- 누두공 시험에서 폭약을 장약한 깊이가 지표면, 즉 자유면에서부터 어느 깊이 이상 멀어지면 장약공 주위에만 약간 파쇄될 뿐 균열대가 멀리 확장되지 못함. 이와 같이 장약공에 인접한 자유면은 발파효과에 매우 중요한 역할함

표 1.4 자유면 형상과 소요 장약량의 상대적인 비교

여러 가지 조건의 발파	자유면 형상	자유면 수	상대적인 장약량
일반 계단 발파(수직)		2	1
경사 계단면의 발파		2	0.85
계단 하부가 구속되지 않은 경우의 발파		2	0.75
옥석 발파		6	0.25
누두공 발파		1	2~10

- 자유면의 수가 많아질수록 발파 효과가 증대되며 발파환경문제 감소 사용화약류의 사용량 감소 등 여러 측면에서 유리한 점이 많아짐
- 동일한 부피를 파쇄하기 위해서 자유면의 수가 많을수록 적은 장약량으로도 파쇄가 가능함
- 지하에 터널을 굴착할 경우 자유면은 작업장이 1자유면이며, 노천의 계단식 발파의 경우 자유면은 2 이상

(2) 약실의 형상과 발파효과

- 전단 파괴 이론으로부터 최소저항선(W)은 약실의 주변장(S)에 반비례하고, 약실의 투사 단면적(A)에 비례(식 1.29)

$$W = \frac{A}{Ca \cdot S} \quad (1.29)$$

여기서, W : 최소 저항선

Ca : 암석 계수

A : 약실의 투사 단면적

S : 약실의 주변 길이

- 암석 계수(Ca)가 동일한 경우 최소저항선을 크게 하려면 약실의 투사면적과 주변 길이의 비(A/S)를 크게 해야 함
- 약실의 주변 길이(S)가 일정할 때에 원형의 투사 면적이 최대이므로 원형 약실이 유리
- 천공 지름을 d 라 하고, 천공 길이를 지름의 n 배로 하면,

$$A = nd \times d$$

$$S = 2(nd + d)$$

$$W = \frac{nd^2}{Ca \cdot 2(nd + d)} = \frac{nd^2}{ca \cdot 2d \cdot (n + 1)} = \frac{nd}{2 \cdot Ca(n + 1)} \quad (1.30)$$

- 만약 장약길이(m)를 천공지름(공경)의 12배라고 하면,

$$W = \frac{12d}{2Ca(12 + 1)} = \frac{12d}{26Ca} = \frac{0.46d}{Ca} \quad (1.31)$$

- 장약량(L)의 계산에 있어서 일반식으로는 $L = \frac{\pi d^2}{4} ndg$ 식을 인용하게 되나 $m = 12d$ 로 하면

$$L = \frac{\pi d^2}{4} \times 12 \times d \times g = 9.42d^3g \quad (1.32)$$

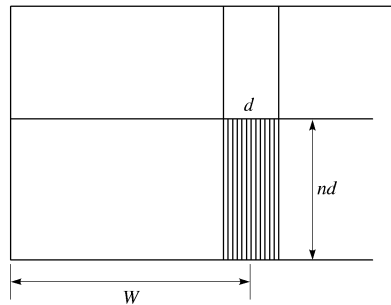


그림 1.14 최소저항선

- 동일한 발파 조건에 대하여 천공경의 변화에 대한 최소 저항선의 변화를 보면 천공경이 d_1 일 때에 최소저항선을 W_1 이라 하고, 천공경이 d_2 일 때에 최소저항선을 W_2 라 하면, 최소 저항선의 비,

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{nd_2}{2 \cdot Ca(n + 1)} \times \frac{2 \cdot Ca(n + 1)}{nd_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (1.33)$$

- 천공경을 크게 하면 최소저항선을 그와 비례하여 크게 할 수 있음. 천공경에 대하여 장약 길이(m)을 8~12배로 하는 것이 가장 유리한 표준장약이라고 할 수 있음($m = (8 \sim 12)d$)
- 최소 저항선과 구멍 깊이는 두 자유면이상의 발파에 있어서 천공장(D)는 최소 저항선(W)에 장약길이 m의 1/2을 더한 것이 적당

$$D = W + \frac{m}{2}$$

1.3.3 약포직경과 발파효과

- 폭약이 천공 내벽과 틈새가 없도록 장전하고 잘 다져 넣어졌을 경우 밀폐장전, 틈새가 있게 장전되었을 경우 부분장전
- 암석을 파괴시키는 것은 폭발로 인하여 발생하는 충격파이므로 밀폐장전의 경우는 폭약 으로부터 암반 속에 직접 충격파를 전달시키고, 부분장전은 폭약이 폭발할 때 발생하는 고온, 고압의 폭굉압이 폭약과 공벽사이의 틈새 때문에 일부 완충되므로 발파효과는 저 하
- 파쇄 효과보다는 장약공 주위의 손상을 작게 하고, 파단면만을 형성시키려는 목적의 조 절발파에서는 부분장전 이용하여 설계
- 동일 천공경에서는 약포경이 클수록 폭발력이 커짐.
- 측벽효과(Channel Effect): 폭굉 압력은 기폭지점으로부터의 폭약내를 전달해 감과 동시 에 폭약의 측면과 천공내벽 사이에 틈새가 있으면 틈새를 통해서도 전달해 가는데, 공기 중을 전달해 가는 충격파의 속도는 폭약 속에서의 속도보다 느리기 때문에 천공 안의 공 기 속을 통해 간 느린 충격파가 폭약 속의 충격파를 방해하여 둔감하게 함으로써 완전폭 발을 하지 못하고 잔류하게 되는 현상

1.3.4 장약량과 발파효과

- 최적의 파쇄입도는 암석의 최종용도와 운반 및 분쇄장비 등 모두의 함수이기 때문에 이 를 단정하여 정의하기가 어려움
- 화강암이나 편마암에 대한 발파에서 Langefors 공식에 따른 평균 파쇄입도와 이의 수정 값(그림 1.15)

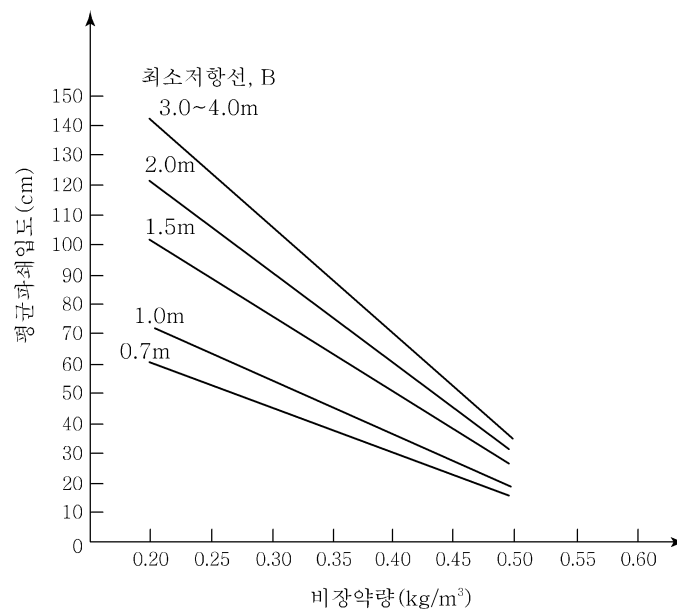


그림 1.15 비장약량과 저항선이 평균파쇄입도에 미치는 영향(Gustafsson, 1981)

$$S_1 = 215.0 - 355(SC) \quad (1.34)$$

$$S_2 = 183.0 - 300(SC) \quad (1.35)$$

$$S_3 = 153.0 - 250(SC) \quad (1.36)$$

$$S_4 = 92.0 - 150(SC) \quad (1.37)$$

$$S_5 = 65.0 - 100(SC) \quad (1.38)$$

여기서, $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5(cm)$: 평균파쇄입도(최소저항선 3.0~4.0, 2.0, 1.5, 1.0, 0.7m),
 SC : 비장약량(kg/m^3), $0.2 \leq SC \leq 0.5$ 범위

- 저항선이 일정할 때, 비장약량이 증가하면 파쇄입도는 작아짐. 즉, 파쇄석 단위체적당 총 장약량이 증가하면 평균파쇄입도는 작아짐
- Gustafsson은 발파 시 저항선이 3m를 초과하게 되면 파쇄입도는 조절할 수 없고, 특히 장약밀도가 최저인 발파공 상부의 파쇄입도 조절은 어렵다고 제시

1.3.5 천공간격과 발파효과

- 균열이 있는 암반에서는 천공간격이 좁으면 발파 시에 인접공의 폭발열과 압력에 의해서 폭약이 유폭되는 경우도 있음
- 도화선발파 또는 지발전기뇌관발파의 경우에는 인접공의 영향을 받지만, 순발전기뇌관에 의한 제발발파에서도 이 현상이 일어날 가능성이 있음. 순발전기뇌관이라 하더라도 2개의 폭발시간에는 제조과정에서 차이가 있고, 한쪽 폭발에 의한 충격파가 도달하는 시간은 폭원으로부터의 거리가 가까우면 인접공 전기뇌관의 폭발시간의 차이보다 짧으므로, 이 경우 인접공 발파의 영향을 받게 됨
- 컷오프(Cut off) 현상: 인접공 발파에 의해 옆 도화선이 뚝뚝나가거나 전기뇌관 또는 도화선이 붙은 기폭약포가 폭발하기 이전에 공중으로 튀어나가서 공중에서 폭발하고 나머지 폭약은 잔류하는 현상
 - 원인: 천공간격의 협소, 기폭약포의 위치가 너무 공구 가까이 있을 때, 갱내의 심발발파에서 주변공의 장약이 길 때, 암반에 예기치 못한 균열이 있을 때 등
- 뇌관에 흐른 전류가 약할수록 폭발시간의 오차가 큼(표 1.5)

표 1.5 2개의 전기뇌관의 폭발시간차와 충격파의 도달시간

2개의 전기뇌관의 폭발시간차		충격파의 도달시간 (모래펄에서의 질산암모늄폭약)	
전류(A)	폭발시간차(ms)	폭원으로부터의 거리(cm)	도달시간(ms)
1.0	1.63	10	0.42
1.5	1.26	15	0.69
2.0	0.52	20	1.10
3.0	0.49	30	2.34
5.0	0.53	40	3.75

- 천공간격을 변화시켰을 때의 폭약의 사압에 관한 시험결과는 Nitroglycerine을 함유한 질산암모늄 폭약은 천공간격이 좁아도 사압에 의한 불폭은 없는 반면, Nitroglycerine을 함유하지 않은 질산암모늄 폭약은 천공간격 30cm에서도 제2 약포는 불폭이 될 수도 있음
- Ash(1973): 벤치높이(H)와 저항선(B)의 비(H/B)가 파쇄에 미치는 영향을 결정하기 위한 축척모형 연구 실시

- 파쇄는 저항선과 벤치높이로 표시되는 함수라는 가정
- 장약 공간격과 저항선의 비도 중요하며 단위면적당 발파공수가 발파 가스압을 좌우함
- 발파공경을 고정하고 벤치배열을 달리한 현장실험결과 실험실에서 구한 큰 값의 최적 S/B 비는 매우 다양. MS지발 발파에 대하여 $1 < H/B < 4$ 일 때 최적관계 식 1.39

$$S = (BH)^{\frac{1}{2}} \quad (1.39)$$

여기서 S : 천공간격,, $H/B = 3$ 이면 $S = 1.7B$, $H/B = 4$ 이면, $S = 2B$, $S/B = 1.25$ 라는 Langefors의 최적조건도 벤치의 높이가 저항선에 비해 커지면 증가될 수 있음

1.3.6 전색과 발파효과

- 전색: 발파공에 폭약을 장전한 후, 이 구멍에 암석분이나 모래, 황토, 점토 등으로 장약이 되지 않은 자유면까지의 빈 공간을 메우는 것으로 폭약을 밀폐시키고 가스의 방출을 막아 가스압의 효과를 높여 주는 역할

1.3.7 시차에 의한 발파효과

- 발파작업에서는 단일발파공을 가지고 발파하지 않으며, 많은 발파공을 동시에 또는 시차를 두고 발파하게 되는데, 동시에 모든 발파공을 발파하는 방법을 제발발파법고, 일정한 시차를 두고 순차적으로 발파하는 방법을 지발발파법 또는 단발발파법이라 함
- 지연시차가 없는 전기뇌관이나 공업뇌관과 도화선 또는 도폭선을 사용하여 발파하는 방법은 도화선이나 도폭선의 길이에 따라 지발효과를 얻을 수 있으나 정확하게 시차를 조절하기 어려우므로 지발발파를 목적으로 하는 발파법으로는 적당하지 않음
- 시차간격이 짧을수록 파쇄도는 좋으나 비산이 큼

1.3.8 암반 조건과 발파 효과

- 발파 대상 암반이 발파 효율에 미치는 영향은 압축강도, 인장강도 등 강도 특성과 동적 하중에 대한 변형 특성이 중요한 역할을 하고 있으나, 아직 정량적인 평가까지는 이루어지지 못함

(1) 강도 특성과 탄성 계수

- 암석의 인장강도와 압축강도는 인장이나 압축의 힘으로 암석을 파괴시키는데 필요한 힘의 크기를 나타내므로 강도가 클수록 폭약도 많은 양이 필요함
- 같은 에너지 수준에서 압축강도가 높은 암반이 파쇄도가 나쁘게 나타나며, 압축강도와 인장강도의 비는 발파지수의 하나로 사용됨
- 영율(탄성계수)이 크면 가스압이 암반을 압축 혹은 인장시키기 어려워 파쇄도에 영향을 미침

(2) 불연속면의 영향

- 암반 내에 존재하는 단층면, 틈, 절리 등 불연속면(Discontinuity)의 영향은 발파 효율과 관련된 매우 중요한 변수임
- 암반 내 구조적 특성은 에너지의 전달, Gas의 누출에 영향을 미침
- 전파하는 응력파가 불연속면을 만나면 불연속면의 상태에 따라 반사되면서 스펙링과 같은 부분적으로 파괴가 발생하거나 불연속면을 경계로 한 매질의 성질에 따라 반사와 굴절

이 동시에 발생하며, 응력파의 반사 및 굴절은 식 1.40~1.41로 계산

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \cdot \sigma_1 \quad (1.40)$$

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \cdot \sigma_1 \quad (1.41)$$

여기서, σ_R : 굴절하는 응력파의 세기(kgf/cm^2), σ_T : 반사하는 응력파의 세기(kgf/cm^2)

ρ_1 : 매질 1의 밀도(kgf/cm^3), ρ_2 : 매질 2의 밀도(kgf/cm^3)

C_1 : 매질 1에서의 탄성과 속도(m/s), C_2 : 매질 2에서의 탄성과 속도(m/s)

(3) 절리 발달과 자유면

○ 절리의 발달 방향과 자유면 방향은 30~60°를 이루는 범위에서는 파쇄도가 매우 나쁘게 나타나므로 가능한 한 자유면의 방향은 절리 방향과 평행하게 하는 것이 바람직

(4) 기타

○ 풍화 정도는 암석의 강도를 약화시키기 때문에 풍화대에서 과대한 파쇄와 암반의 손상을 방지하기 위해 천공 간격 및 장약을 줄일 필요가 있음

1.4 발파 계산식 정리

1.4.1 Hauser의 발파식(발파의 기본식)

$$L = CW^3 \quad (1.42)$$

여기서, L : 장약량, C : 발파계수, W : 최소저항선, 1자유면 표준장약에 의한 표준발파시에만 적용

1.4.2 발파계수(C)

$$C = g \cdot e \cdot d \quad (1.43)$$

여기서, g : 암석의 항력계수, e : 폭약의 위력계수, d : 전색계수

1.4.3 최소저항선(W)의 기본식

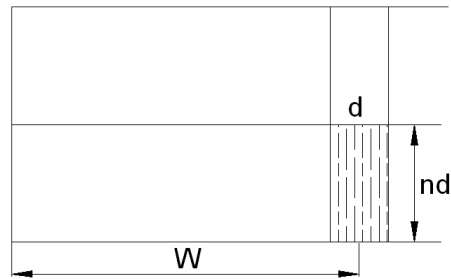
$$W = \frac{A}{Ca \cdot S} = \frac{nd^2}{Ca \cdot 2d \cdot (n+1)} = \frac{nd}{2Ca(n+1)} \quad (1.44)$$

$$m=12d \text{ 일 경우 } \Rightarrow \frac{0.46d}{Ca}$$

여기서, A : 약실 단면적, Ca : 암석계수, S : 약실의 주변장

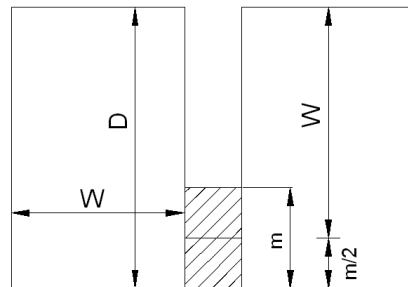
장약량(L)의 계산에 있어서 일반식으로는 $L = \frac{\pi d^2}{4} ndg$ 식을 인용하게 되나 $m=12d$ 로 하면

$$L = \frac{\pi d^2}{4} \times 12 \times d \times g = 9.42d^3 g$$



1.4.4 천공심도(D)

$$D = W + \frac{m}{2} \quad (m = \text{장약장}) \quad (1.45)$$



1.4.5 최소저항선이 일정한 경우의 누두공의 수정

$$L = f(n)CW^3 \quad (1.46)$$

여기서, $f(n)$: 누두지수 함수($f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3 \Rightarrow$ Dambrun

1.4.6 최소저항선이 바뀌는 경우의 장약량 수정

$$f(w) = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{w}} - 0.41 \right)^3 \Rightarrow \text{Lares의 수정식} (W \neq 1 \text{ 일 때}) \quad (1.47)$$

여기서, $f(w)$: 발파규모의 수정항

1.4.7 Hauser의 기본식에서 $n \neq 1$ 일 때 누두지수를 이용한 장약량 계산

$$L = f(n)CW^3 \quad (1.48)$$

$$\text{Dambrun 식: } f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3 \quad (1.49)$$

$$\text{Brallian 식: } f(n) = \frac{1 + 4.4n^3}{5.4} \quad (1.50)$$

$$\text{Marescott 식: } f(n) = \frac{n^2 \sqrt{1+n^2}}{\sqrt{2}} \quad (1.51)$$

$$\text{Monze 식: } f(n) = n^2 \quad (1.52)$$

$$\text{Guillemain 식: } f(n) = n^3 \quad (1.53)$$

1.4.8 갱도 굴진시 단위부피당 폭약량

$$L = \frac{(n+1)^2}{n^2} \cdot f(w) \cdot C \quad (1.54)$$

여기서, $n = \frac{\sqrt{A}}{W}$, A : 굴착단면적(m^2)

[$W=(0.8\sim0.9)I$ 또는 ($I-0.1$), 굴진장]

$\frac{(n+1)^2}{n^2}$: 갱도굴착단면계수, $f(w)$: 발파의 규모계수

1.4.9 갱도 굴진시 1발당 폭약량(L)

$$L = \frac{(n+1)^2}{n^2} \cdot f(w) \cdot C \cdot A \cdot W \quad (1.55)$$

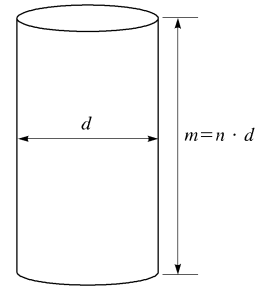
1.4.10 원통형 약실일 때의 장약량 계산

L = 장약실의 체적(V) \times 폭약의 비중(g)

$$L = \frac{\pi d^2}{4} \times n \times d \times g = \frac{\pi d^2}{4} \times m \times g \quad (1.56)$$

여기서, $m = 12d$ 일 때 $\Rightarrow L = 9.42d^3 g$

g : 폭약의 비중



1.4.11 자유면의 수와 관계식(Daw의 실험식)

$$1\text{자유면 } V = \frac{4}{3} W^3, \quad 2\text{자유면 } V = \frac{5}{3} W^3 \quad (1.57)$$

$$3\text{자유면 } V = \frac{7}{3} W^3, \quad 4\text{자유면 } V = 3 W^3 \quad (1.58)$$

$$5\text{자유면 } V = 4 W^3, \quad 6\text{자유면 } V = 8 W^3 \quad (1.59)$$

1.4.12 제발발파의 공간격

$$S = eW, \quad e = \sqrt{-\frac{S}{W} \times 2.84} \quad (1.60)$$

여기서, e : 공간거리계수, 2.84 : 전단계수와 인장계수의 비

1.4.13 암석의 절단면적

$$\frac{F'}{F} = \frac{Ca}{Ca'} \times \frac{nd'^2}{nd^2} \quad (1.61)$$

여기서, F : 처음 1발파당 절단면적 $F = (eW)^2$

F' : 나중 1발파당 절단면적

1.4.14 집중발파시 저항선의 비

$$q = \frac{N \cdot S}{2[m + Nd + (N-1)K]} \quad (1.62)$$

여기서, N : 공수, K : 공간간격

1.4.15 갯도 굴진발파시 소요공수

$$\frac{N_1}{N} = \frac{Ca}{Ca_1} \times \frac{V_1}{V} \quad (1.63)$$

여기서, N : 기준공수, N_1 : 구하고자 하는 공수, V : 갯도체적(m^3)

1.4.16 심발발파에 있어서의 소요공수

$$G = \frac{12 + \operatorname{cosec} b}{13} \times \frac{W_1}{W} \quad (1.64)$$

여기서, W_1 : 경사공(심발공의 최소저항선)

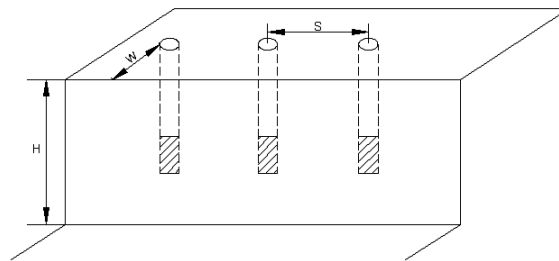
W : 평행공(신자유면에 대한 저항선)

1.4.17 천공경의 변환에 따른 최소저항선의 비

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{nd_2}{2 \cdot Ca(n+1)} \times \frac{2 \cdot Ca(n+1)}{nd_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (1.65)$$

1.4.18 벤치발파에서의 장약량

$$L = C \cdot W \cdot S \cdot H \quad (1.66)$$



여기서, H : 벤치높이, S : 공간격, W : 최소저항선

1.4.19 갯도대발파

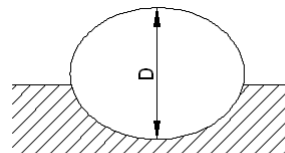
$$L = f(L) \times I \times g \times W^3 \quad (1.67)$$

여기서, $f(L)$: 대발파 수정값, I : 폭약계수, g : 암석계수

1.4.20 소할발파의 장약량

$$L = CD^2 (gr) \quad (1.68)$$

여기서, D : 최소지름(cm)



1.4.21 강제절단

$$L = CA (gr) \quad (1.69)$$

여기서, A : 절단면적(cm^2)

1.4.22 보안거리

$$D = K \cdot \sqrt[3]{W} \quad (1.70)$$

여기서, D : 거리(m), K : 계수, W : 화약량

K 값 \Rightarrow 1종=16, (16), 2종=14, (10), 3종=8, (5), 4종=5, (4), ()안은 토제를 저장소의 5/4로 쌓았을 때

1.4.23 전압(V)

$$\text{직렬} \quad V = I(R_1 + aR_2 + R_3) \quad (1.71)$$

$$\text{병렬} \quad V = b \times I(R_1 + \frac{R_2}{b} + R_3) \quad (1.72)$$

$$\text{직, 병렬} \quad V = b \times I(R_1 + \frac{a}{b} R_2 + R_3) \quad (1.73)$$

여기서, I : 전류(A), a : 직렬수, b : 병렬수, R_1 : 모선저항, R_2 : 뇌관저항, R_3 : 발파기저항

단원정리

1. 응력파의 전파속도

$$P\text{파} = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S\text{파} = \left[\frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

E : 물체의 동탄성계수, ν : 포와송비, ρ : 밀도, G : 강성률

2. 스넬의 법칙

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_L}{C_T} = \left[\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \right]^{\frac{1}{2}}$$

C_L : P 파 속도, C_T : S 파 속도, ν : 포와송비, α : 입사각, β : 반사각

3. 세로파의 입사응력(σ_I)와 반사에 의해 생긴 세로파 및 가로파의 반사응력(σ_R) 및 (τ_R)과의 사이의 관계

$$\sigma_R = R_0 \cdot \sigma_I$$

$$\tau_R = [(R_0 + 1) \cdot \cot 2\beta] \cdot \sigma_I$$

4. 반사계수

$$R_0 = \frac{\tan \beta \cdot \tan^2 \beta - \tan \alpha}{\tan \beta \cdot \tan^2 \beta + \tan \alpha}$$

α : 입사각, β : 반사각

5. Daw의 기본이론

$$P = SWK_1$$

$$W = \frac{P}{KS} = \frac{A \cdot p}{KS} = \frac{A}{CS} (K/p = C)$$

A : 작용면적, P : 전단면 단위 면적에 대한 압력, W : 전단 저항선

S : 전단면의 주변 길이, K : 전단계수

6. P와 S와 W의 비

$$\frac{P}{SW} = \frac{P_1}{S_1 W_1} = \frac{P_2}{S_2 W_2} = K$$

P : 외력

S : 외력이 작용하는 면의 주변 길이

W : 외력이 작용하는 면에서 파괴면까지의 거리

7. 응력파의 반사파 및 굴절파의 세기

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \cdot \sigma_1$$

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \cdot \sigma_1$$

σ_R : 굴절하는 응력파의 세기 (kgf/cm^2)

σ_T : 반사하는 응력파의 세기 (kgf/cm^2)

ρ_1 : 매질 1의 밀도 (kgf/cm^3)

ρ_2 : 매질 2의 밀도 (kgf/cm^3)

C_1 : 매질 1에서의 탄성파 속도 (m/s)

C_2 : 매질 2에서의 탄성파 속도 (m/s)

8. 매질에 따른 진동속도 및 응력

(1) 이중매질

$$\text{반사파 진동속도} \quad V_R = \frac{1-n}{1+n} v_1$$

$$\text{반사파 응력} \quad \sigma_R = \frac{n-1}{1+n} \sigma_1$$

$$\text{투과파 진동속도} \quad V_T = \frac{2}{1+n} v_1$$

$$\text{투과파 응력} \quad \sigma_T = \frac{2n}{1+n} \sigma_1$$

여기서, 임피던스 비 $n = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1}$

반사율 $a_r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$, $V_2 = \sqrt{\frac{E(N/m^2)}{\rho(kg/m^3)}}$

투과율 $\tau = \frac{4n}{(1+n)^2} = 1 - \text{반사율}$

(2) 끼어있는 이중매질

투과파 진동속도 $V_T = \frac{4n}{(1+n)^2} v_1$

투과파 응력 $\sigma_T = \frac{4n}{(1+n)^2} \sigma_1$