

제1장 발파공해의 종류 및 특성

1.1 발파진동

1.1.1 진동 기초이론

발파작업은 화약류를 사용하는 작업의 총칭이다. 따라서 발파작업이 실시되는 환경 즉, 작업현장은 깊은 산속에서의 댐, 공사현장에서 민가가 밀집하는 주택지역, 건물이 밀집하는 도심지역까지 위치하게 된다. 따라서 발파작업에 따르는 안전, 환경 문제는 무시할 수 없다. 발파공해(Blasting Pollution)란 앞에서 언급한 발파작업을 실시할 때 발생하는 발파에 의한 지반진동, 소음, 폭풍압, 비석 등을 말한다.

흔들려 움직이는 것을 진동이라고 하며, 물체의 위치, 전류의 세기, 전기장, 자기장, 기체의 밀도 등이 어떤 일정한 값 부근에서 주기적으로 변하는 것을 말한다. 일반적으로 기계, 기구의 사용으로 인하여 발생하는 강한 흔들림, 건설 현장에서 기계의 움직임이나 폭발에 의하여 땅이 흔들리는 것도 진동의 일종이다. 주택과 공장이 혼재되어 진동 문제가 발생하고, 기계 시설의 대형화가 진동 문제를 점점 심각하게 하고 있다. 또한, 많은 도로 건설, 시설물의 건축, 지하철 등의 건설로 진동에 의한 피해가 증가하고 있다. 공장에서의 활동, 건설 작업, 교통 기관의 운행 등과 같은 인위적으로 발생하는 지반 진동이 건물을 진동시켜 우리들의 일상생활에 영향을 준다. 이러한 공해 진동의 전달 거리는 특별한 경우를 제외하고는 진동원에서 100m 이내이며, 많은 경우 대개 10~20m 정도로 그 진동의 크기를 지진과 비교하면 아주 미약하다. 지면 진동의 발생원으로는 공장, 건설 현장, 도로, 철도 등이 있으며, 공장 진동의 발생 설비에는 프레스, 절단기, 압축기, 파쇄기, 직기 등이 있다. 건설 진

동이 발생하는 것으로는 디젤 파일 해머, 드롭 해머, 파쇄기 등이 있다. 우리는 생활 주변에 발생하는 이러한 소음과 진동 문제를 적극적으로 해결하는 태도를 기르고, 우리 자신도 다른 사람들에게 소음 피해를 주지 않아야 한다.

(1) 파동의 변위

거리, 변위-시간의 그래프 그림의 y 축을 변위로 하고, x 축을 거리로 표시하면 마루와 마루사이가 파장 λ , x 축을 시간으로 표시하면 주기 T 가 된다.

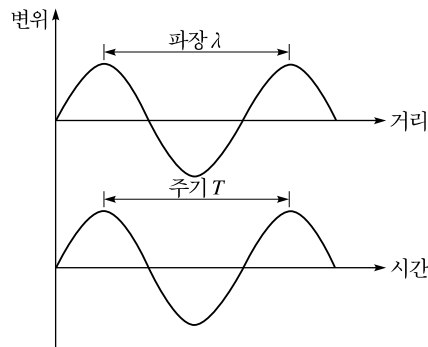


그림 1.1 파장과 주기

(2) 파장의 전파

매질이 진동할 때 평행점에서 변위의 최대값이 진폭이다. 변위가 (+)방향으로 최대인 점이 마루, (-)방향으로 최대인 점이 골이다. 마루에서 마루, 골에서 골까지의 거리는 파장이며, 보통 λ 로 표시한다. 매질의 각점이 1회 진동하는데 걸리는 시간을 주기 $T(s)$, 1초 동안에 진동하는 횟수를 진동수 $f(Hz)$ 라 한다. 주기를 T , 진동수를 f 라 하면 서로 역수 관계이므로 $Tf = 1 (T = \frac{1}{f}, f = \frac{1}{T})$ 로 표시된다. 파동의 전파 속도를 v 라 하면 파동속도 = 이동거리/시간 = 파장/주기가 되므로 속도 v 는 다음과 같이 표시된다.

$$v = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T} \quad (1.1)$$

(3) 호이겐스의 원리

파동이 전파되는 경우 매질의 변위와 운동 상태가 같은 점들을 위상이 같다고 말을 하며, 위상이 같은 점들을 이은 선이나 면을 파면이라고 한다.

파원이 점인 경우에는 파면이 원이나 구면이 되는데, 이런 파동을 구면파라고 하며, 파원이 직선인 경우, 파면이 직선이나 평면이 나오는데 이런 파동을 평면파라고 한다.

그림 1.2는 구면파의 경우 파동이 전파되는 현상을 설명한 것으로 호이겐스의 원리를 보여주는 것이다.

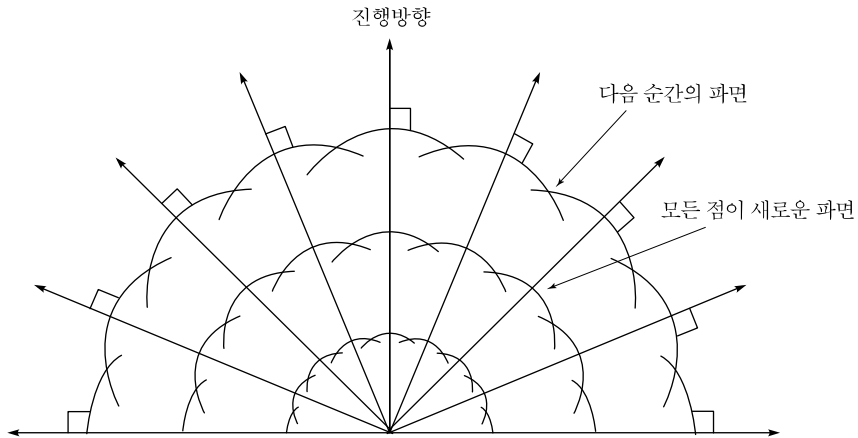


그림 1.2 구면파의 파동

호이겐스의 원리는 파동이 진행할 때, 파면상의 각 점은 원래의 파원과 같은 진동수로 진동하는 점파원이 되며, 이러한 무수한 점파원에서 발생하는 구면파가 겹쳐서 다음의 파면을 이룬다는 것이다.

호이겐스의 원리를 사용하여 구면파와 평면파의 전파과정을 설명하면 다음 그림 1.3과 같다. 즉, 각 파원에서 진행하는 파의 위상이 같은 점을 연결하면 새로운 파면이 형성되는 것이다. 파동의 반사, 굴절, 회절 등의 현상은 호이겐스의 원리로 설명하면 편리하다.

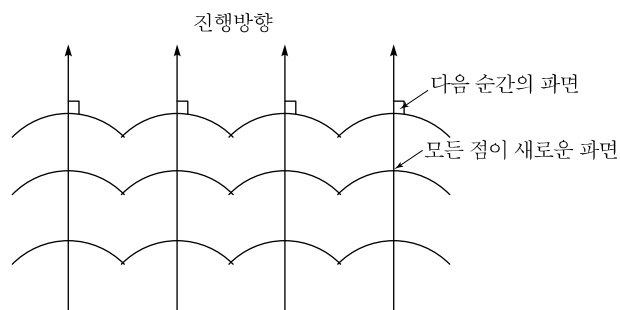


그림 1.3 구면파와 평면파의 전파과정

1.1.2 발파진동의 생성

폭약이 장약공내에서 폭굉하면 그 폭약은 기폭 후 수 μsec 에서 최고치에 달하고 그 압력은 5~20만 기압에 달하는 강력한 충격압과 연소된 화약에 의한 Gas압 및 3,000℃ 이상의 고온이 발생한다. 따라서 그림 1.4와 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수 mm~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고 연속되는 Gas압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생되어 전파되는 균열대가 형성된다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저하게 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5%~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반으로 전파되어 간다. 이렇게 전달되는 탄성파는 지반을 진동시키는데 이것이 발파진동(Blast Vibration)이다.

일반적으로 암반 굴착시 발파를 하게 되면 충격파가 발생하는데 이는 암반의 압축강도보다 더 큰 초기 폭발압에 의하여 발생되어 암반내의 소성영역을 그냥 지나서 유체역학적으로 격동한다. 이런 충격파는 비탄성 영역을 지나면서 속도가 줄어들고 안정한 유사 탄성영역에서 진동파 운동을 한다. 이때부터 진동파는 진로에 있는 매질을 교환할 만큼 충분한 에너지를 갖지 못하는데 이 영역을 탄성영역이라 한다. 이 탄성영역에서 암반이 충격을 받게 되면 변형을 일으키게 되는데 이 때 암반이 갖고 있는 질량은 변형을 계속시키려하나 암반이 내부에 갖고 있는 강성은 이 변형을 원래 상태로 되돌리려고 한다. 이렇게 하여 암반이 평형상태로부터 변형과 회복을 계속하게 되는데 이것이 발파에 의한 탄성파이며 곧 발파진동인 것이다. 이러한 발파진동은 암반위에서와 지반위에서 그 전달특성에 차이가 있다. 즉, 암반상의 진동파형은 비교적 단순하며 단시간 내에 전달되지만 지반상의 진동파형은 복잡하고

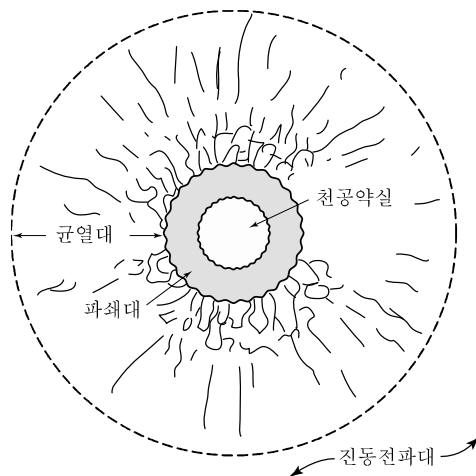


그림 1.4 발파공 주변의 균열과 진동전달

장시간에 걸쳐 전달된다. 특히 지반상의 경우 수평성분의 진동이 뒤쪽에서 커지기 때문에 진동을 상하성분만 측정해서 판단하는 것은 위험하다.

1.1.3 발파진동의 특성

최근 택지 조성, 항만 준설, 도로 공사, 시가지에서의 건물해체 공사 등 민가나 구조물 가까이에서 발파작업이 실시되는 경우가 많아지고 있다.

발파에 의해 발생한 지반진동은 어느 점에서 생각하면 시간경과와 함께 항상 진동의 크기가 변화하고 있지만, 지반운동은 일반적으로 변위(Displacement : D), 입자속도(Particle-Velocity : V), 가속도(Acceleration : A), 3성분과 주파수(frequency : f)로 표시된다. 변위는 시시각각의 이동거리를 말하지만 실제로 계측할 수 있는 것은 변위진폭(단위 mm, cm, μ)이다. 입자속도는 변위의 시간에 대한 변화 비율이며, 이것은 속도 진폭(단위 mm/s, cm/s(*kine*))으로 표시된다. 가속도는 입자속도의 시간에 대한 변화 비율이며, 이것은 가속도진폭(단위 mm/s², cm/s²(*gal*), $G(=980\text{cm/s}^2)$)로 표시된다. 정현진동에서 이들 상호간의 관계는 다음 식이 성립된다.

$$V = 2\pi f D \quad (1.2)$$

$$A = 2\pi f V = (2\pi f)^2 D \quad (1.3)$$

$$\text{진동속도} \Rightarrow V = \frac{dD}{dt} \text{ (즉, 변위를 시간에 대해 미분한 값)}$$

$$\text{진동가속도} \Rightarrow A = \frac{dV}{dt} \text{ (즉, 속도를 시간에 대해 미분한 값)}$$

$$f = 1/T, \quad \omega = 2\pi f$$

$$\begin{array}{lll} \text{여기서, } D : \text{변위,} & V : \text{입자속도,} & A : \text{가속도} \\ t : \text{시간} & T : \text{주기,} & \omega : \text{각속도} \end{array}$$

지반을 따라서 전파되는 발파진동은 진동파가 구조물과 인체에 대하여 미치는 영향이 문제가 되고 있으며, 발파공해의 반 정도는 발파진동이 점하고 있다.

발파소음에 대해서는 발파작업에 따라 발생하는 파동의 문제란 점에서 발파진동과 유사한 현상이지만 심리적인 것에 한정된다. 최근 문제시되고 있는 저주파 소음의 경우 발파규모, 발파형태에 의해 파생되는 경향이 심하므로, 충분한 대책을 필요로 한다.

발파에 의해 발생하는 폭풍압은 공기의 압력파로서 구조물의 운동을 일으켜 벽의 균열과 창문파괴를 유발할 수 있으며 인간에게 미치는 영향을 정량적으로 분석하기에는 매우 어려운 점이 있다.

(1) 발파진동의 이론

발파에 의해 발생하는 파들은 그림 1.5(a)와 같이 압축파, 전단파, 표면파의 세 가지 범주로 나눌 수 있다. 파동을 완전하게 설명하기 위해서는 그림 1.5(b)처럼 운동의 세 방향의 직교성분 즉, 보통 수평이나 폭원으로부터 반경방향인 종방향 성분(L), 그리고 반경방향에 대해 직교하는 수직성분(V)과 횡방향성분(T)을 측정하여야 한다.

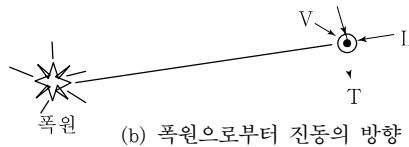
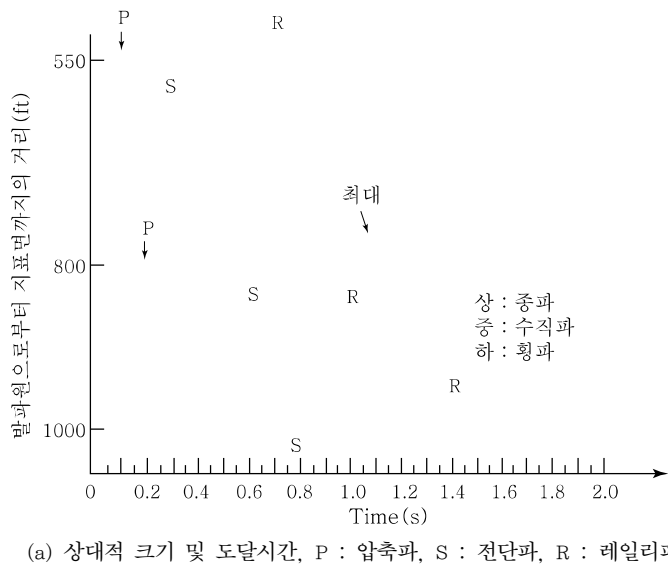


그림 1.5 발파 진동의 일반적인 형태

세 개의 중요 파형은 암석이나 토양 속을 진행하는 물체파와 상부 지표면을 따라 전파하는 표면파의 두 종류로 나눈다. 전달거리가 멀어질 때 가장 중요한 표면파는 그림 1.5(a)에서 R로 표시된 레일리파이다. 일반적으로 표면파(수직방향 성분)이 최고 진동치를 나타낸다. 때로는 진행성분이 수직성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세성분 중에서 가장 작은 값을 나타낸다(세가지 성분의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변함).

R파는 P파와 S파에 비하여 전파속도가 느리나 상대적으로 저주파의 진동이므로 진폭의 감쇠가 적어 멀리까지 전파된다. 따라서 폭원으로부터의 거리가 멀어질수록 표면파인 레일

리파가 더욱 중요하게 된다.

짧은 거리에서의 발파는 주로 물체파가 생성되는데 물체파들은 P로 표시하는 압축파와 S로 표시하는 비틀림파, 즉 전단파로 세분된다. 이러한 물체파들은 다른 암석, 토양층이나 지표면과 같은 경계면에서 전단 및 표면파가 생성된다.

짧은 거리에서는 세 개의 파가 모두 함께 도달하여 파의 형태를 구별하기가 대단히 복잡하다. 반면, 먼 거리에서는 느리게 움직이는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하므로 구별이 된다. 그러나 대부분의 발파는 밀리세컨드로 지발되는 일련의 적은 장약의 직렬기폭으로 이루어지고 진행경로와 지발시간의 차에 따라 전파면과 파형이 겹쳐지게 되어 발파진동학의 상세한 연구에 제약을 받고 있다.

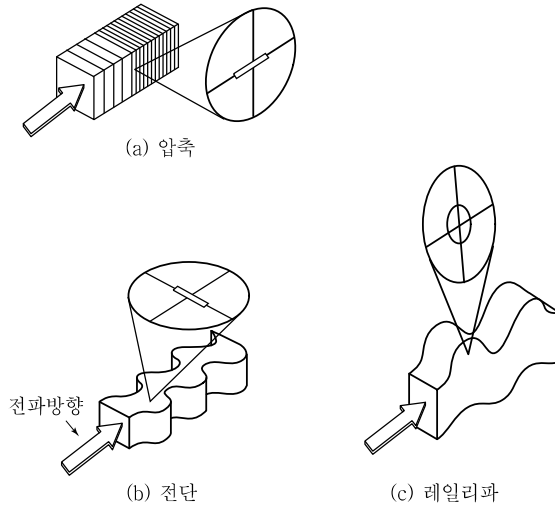
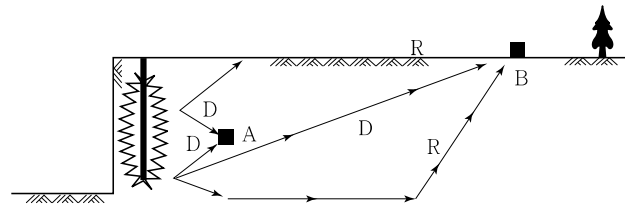


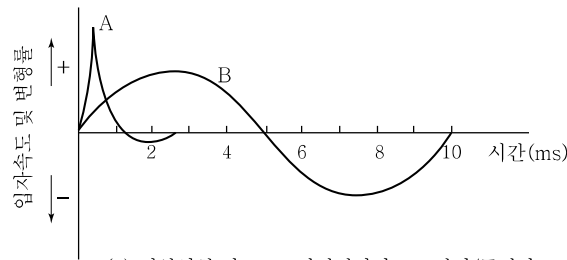
그림 1.6 파의 종류에 따른 입자의 운동모양

파형에 따라 달라지는 입자운동과 지각의 변형을 그림 1.6에 나타낸 것처럼 종파(압축파)는 그것이 진행하는 것과 같은 방향으로 입자운동을 한다. 반면 전단파는 파의 진행방향에 직각으로 움직이는데 그림에서 보이는 것처럼 수평일 수도, 수직일 수도 있다. 레일리파는 가장 복잡하는데 파의 진행방향에 대하여 평행하면서도 수직인 방향으로 움직인다.

대부분의 발파문제들은 그림 1.7(a)의 폭원에서 먼 위치 B지점에 해당하는 곳에 수진기를 두어 측정한 결과 직접 전달파, 반사파, 굴절파 등이 조합되어 대체로 사인파 B로 된다. 근접한 곳에서의 폭발은 A지점에 직접 전달되어 하나의 뾰족하게 1~2ms로 지속되는 일시적인 순간 파동 A를 만든다.



(a) 발파진동감지기 배치



(b) 이상화한 파 D : 직접전달파, R : 반사/굴절파

그림 1.7 두 가지 대표적인 발파배열에 대해 이상화한 파형

• 각 진동파의 일반적 요약

- ① P파 : 종파, 지표면을 통해서 가장 먼저 도착하는 파
- ② S파 : 횡파, 지표면을 통해서 중간에 도착하는 파로 자유면이나 다른 매질을 만나서 수직진동으로 변환하는 파
- ③ R파 : Rayleigh파라 하며 수직파로 전형적인 지표면 이동파
- ④ V : 수직성분을 말하며, R파가 이에 속하고 지반진동의 문제가 되는 파(Vertical)
- ⑤ R : 진행성분 방향을 말하며, P파가 이에 속한다(Longitudinal ; Radial)
- ⑥ T : 접선성분 방향을 말하며, S파가 이에 속한다(Transverse)

(2) 기록

속도이력을 나타내는 가장 중요한 변수들은 정점의 진폭, 고유주기(1/고유진동수), 진동 시간들이다. 이들 모두는 발파순서와 전달 매질에 좌우된다. 터널 굴착, 노천 광산과 건설 등 정규의 발파작업에서 이 인자들은 표 1.1에 나타난 범위로 변동한다. 근접발파와 같은 특수한 경우에는 지반운동이 더 높은 값들로 된다. 불행하게도 통상의 계측장비는 근접발파와 같은 극한 환경에 견딜 수 없고 이러한 운동은 측정하기도 어렵다.

표 1.1 발파 변수의 범위

변 위	$10^{-4} \sim 10\text{mm}$
입자속도	$10^{-4} \sim 10^3\text{mm}$
입자가속도	$10 \sim 10^5\text{mm/s}^2$
진동지속시간	$0.5 \sim 2\text{s}$
파 장	$30 \sim 1,500\text{m}$
진동수	$0.5 \sim 200\text{Hz}$
변형률	$3 \sim 5,000\mu$

진동의 크기는 진동하는 매질의 물리적인 변위, 속도 및 가속도로 표시할 수 있다. 변위는 기준치로부터의 이동거리를 나타내고 진동속도는 진동변위의 시간에 대한 변화율이며 진동가속도는 진동속도에 대한 시간의 변화율을 나타낸다.

표 1.2 발파진동의 단위

성 분	표 시 단 위
변 위	cm, mm, μ , inch
속 도	cm/sec(kine), mm/sec, inch/sec
가 속 도	cm/sec ² , gal(1gal=1cm/sec ²), G(1G=1000gal)
주 파 수	cycle/sec(c.p.s), Hz

발파진동과 지진 또는 핵폭발 진동을 구별하는 중요한 성질은 다음과 같다.

첫째, 발파진동은 지진 또는 핵폭발로 인한 지반진동보다 진동수가 더 높다. 둘째, 발파진동은 상대적으로 진동시간이 짧기 때문에 핵폭발이나 지진 등에 비해 작은 에너지를 수반한다.

셋째, 진동수의 범위로서 핵폭발은 지진운동보다 더 크다.

(3) 주 진동수

발파진동의 주 진동수는 $0.5 \sim 200\text{Hz}$ 범위로 다양하나 어떤 발파형태는 진동수의 범위가 더욱 제한되는 경우도 있다. 주 진동수를 그림 1.8의 속 그림처럼 최대 진폭의 파동에 대한 것으로 정의할 때 주 진동수는 발파가 적용되는 산업에 따라 다르다. 다소 큰 발파가 이루어지는 노천광산에서도 적당한 거리의 구조물에서 측정하면 건설 발파의 주 진동수 보다 더 낮은 진동수가 발생한다. 건설발파에서는 발파규모가 더 작으나 암석에서 암석으로 전달되는 경로와 마찬가지로 구조물과 폭원 사이의 거리가 짧을 때도 진동수가 아주 높아지는 경

향이 있다.

고 진동수의 운동은 암석에서보다 짧은 거리라도 토양 속에서 더 감쇠되고 여과되는 경향이 있듯이 주 진동수는 전달 매질에도 좌우된다. 또 층들은 파로효과(Wave Guide Effect) 때문에 특정진동수의 파를 진행시킬 수 있다. 예를 들어 전단파는 토양층 안에서

$$f = \frac{C_s}{4H} \quad (1.4)$$

의 주파수에서 공명될 수 있다.

여기서 C_s 는 전단파의 진행속도이고 H 는 층의 두께이다. 이러한 사항들을 고려한 결과 전형적인 거리에서 2~3m 이상의 토양층에서 측정된 주 진동수는 1~4Hz이고 암석에서는 10~100Hz 범위였다.

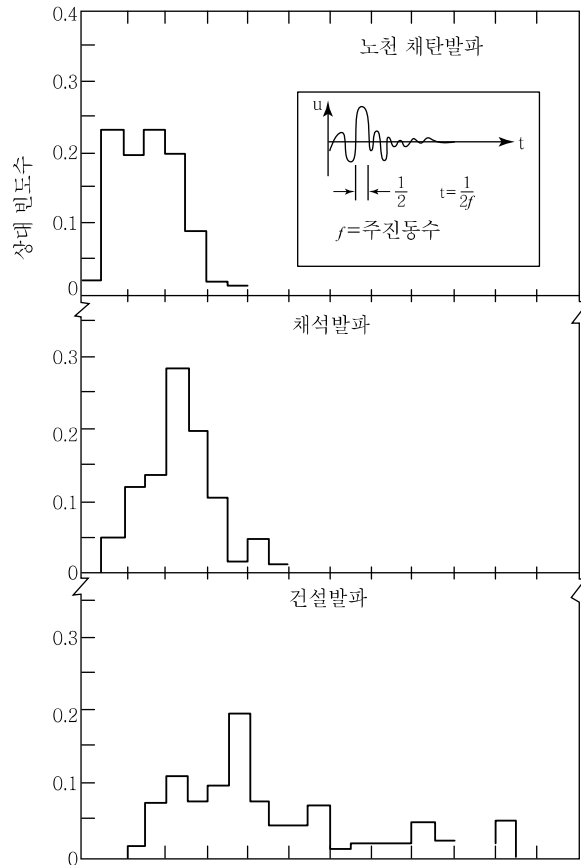


그림 1.8 진동을 받는 구조물의 우세 진동수(Siskind, 1980b)

진동수에 기초한 안전 발파규정을 이용하려면 정확한 진동수는 얼마인가? 라는 질문이 야기된다. 물론 그 답은 기록에 따라 다른데 세 개의 범주로 나눌 수 있다.

가장 쉬운 것은 주 진동수가 하나인 기록이다. 이 주 진동수는 수작업으로 결정하거나 푸리에 주파수 스펙트럼으로 결정할 수 있다.

해석하기 좀 더 어려운 형태의 기록은 두 개의 주 진동수에서 크기가 다른 정점이 있는 경우이다. 이런 경우에는 가장 큰 장점이 포함되어 있는 쪽이 주 진동수이다.

해석하기 가장 어려운 형태의 기록은 여러 진동수에서 같은 크기의 정점을 갖는 경우이다.

수작업으로는 스펙트럼이나 푸리에 주파수 분석을 대신할 수 없다. 반응 스펙트럼의 구조의 변형률과 관계가 있기 때문에 더 선호하고 있다.

(4) peak particle velocity(PPV)와 peak vector sum(PVS)의 적용

PPV(peak particle velocity)는 ‘지반진동(ground vibration)을 입자속도(particle velocity)로 측정하였을 때 직교하는 세 방향의 측정성분($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, t =시간)별 최대진폭’으로 정의하며 이들은 각각 L , V , T 로 표시한다. 따라서 3축 진동계를 이용하여 진동을 측정하면 진행방향(반경방향) 수평성분(L), 진행방향에 직교하는 수평성분(T), 연직성분(V)의 3개 PPV값을 얻게 된다.

또, 이들 세 개의 PPV값들 가운데 가장 큰 값을 다음 식 (1.5)와 같이 정의하며 이를 간단히 max PPV(maximum peak particle velocity)라 부르기도 한다.

$$\max PPV = \max(L, V, T) \quad (1.5)$$

최대의벡터합(peak pseudo vector sum, PVS_{PSEUDO})은 ‘지반진동의 세 측정성분($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)들의 PPV 값들(L , V , T 의 벡터합(vector sum)’을 말한다.

$$PVS_{PSEUDO} = \sqrt{L^2 + T^2 + V^2} \quad (1.6)$$

최대실벡터합(peak true vector sum, PVS_{TRUE})은 ‘지반진동의 세 측정성분($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)들을 샘플링 시간간격 단위로 실시간(real-time) 벡터합한 값들 중에서 최대값’으로 정의한다. 다음식에서 n 은 샘플링 횟수이다.

$$PVS_{TRUE} = \max(\sqrt{x(t_i)^2 + y(t_i)^2 + z(t_i)^2}) \quad (1.7)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

Dowding(1996)이 지적인 바와 같이 실험적으로 구조물의 손상은 PPV값 하나로 평가하므로 최대의벡터합에서 PPV값을 3개까지 사용하는 것은 의미가 없다. 하지만 최대실벡터합은 maxPPV가 나타나는 시점에서 얻어지는 경우가 많으므로 PPV와 마찬가지로 허용수준의 지표로 사용할 수 있다. 일반적으로 PVS(peak vector sum)라 하면 최대실벡터합(peak true vector sum, PVS_{TRUE})을 의미한다.

최대의벡터합과 최대실벡터합이라는 용어를 구분해서 사용하는 것은 벡터합(vector sum)의 의미를 명확하게 하기 위함이다. 하지만 표 1.3에서 보는 바와 같이 다른 연구자들의 용어도 모두 같은 뜻으로 사용할 수 있다.

표 1.3 벡터합(vector sum)에 대한 용어의 정리

제안자 \ 분 류	PVS_{PSEUDO}	PVS_{TRUE}
Siskind	의벡터합 (pseudo vector sum)	실벡터합 (true vector sum)
Dowding	최대벡터합 (maximum vector sum)	실벡터합 (true vector sum) 최대실벡터합 (peak true vector sum)
DIN 4150 (1986년 개정이전)	최대의벡터합 (peak pseudo vector sum)	

또, 연구자에 따라서는 최대실벡터합도 PPV 의 일종으로 보는 견해도 있다. 영국의 국가표준서(BS 7385, 1993)에서는 최대실벡터합도 지반운동의 속도의 시간이력(time history)으로 표시할 수 있으므로 그 peak 역시 PPV 라고 생각하여 성분별 최대속도를 ‘peak component particle velocity’로 정의하고 최대실벡터합을 PPV 로 정의하고 있다.

제어발파시 보안물건이 없다면 비경제적이고 비효율적인 제어발파를 사용할 필요가 없기 때문에 PPV나 PVS를 가지고 발파를 설계 및 관리한다는 것은 보안물건에 대한 규제기준에 맞추어 제어발파를 설계 및 관리한다는 것으로 말할 수 있다.

구조물에 대한 지반진동 허용기준과 관련하여 여러 국가나 연구자들의 제안하고 있는 일반적인 기준에서는 보안물건에 대한 허용수준과 그를 위한 기준인 입자변위, 입자속도, 입자가속도 등이 함께 규정되어 있다. 특히 구조물 손상에 대한 평가척도로 많이 사용되는 입자속도의 경우에는 허용수준에 대한 기준을 PPV(peak particle velocity, 최대입자속도) 또는 PVS(peak vector sum, 최대벡터합)로 세분하여 규정하고 있다. 이와 같이 입자속도를 PPV 나 PVS 로 세분하여 규정하는 것은 구조물의 손상이 PPV 와 관련이 있다는 USBM의

연구결과를 근거로 한 것이다.

하지만 국내의 경우에는 제안된 거의 모든 기준과 대부분의 시방서 등에서 허용기준을 입자속도로만 규정하고 PPV 나 PVS 로는 세분하지 않고 있다. 입자속도는 설계자에 따라 PPV 나 PVS 어느 쪽으로든 해석이 가능하게 됨으로써 발파의 설계나 관리과정에서 양자를 모두 고려하는 독특한 현상이 발생하고 있는 실정이다.

국내의 각종 시방서 등에는 허용수준은 있지만 그 기준은 막연히 입자속도로만 되어 있기 때문에 입자속도를 PPV 나 PVS_{TRUE} 또는 PVS_{PSEUDO} 등으로 해석할 소지가 있다.

보안물건의 허용수준을 설정하는 경우 PPV 나 PVS 중 하나를 선택하고 보안물건에 대한 허용수준을 설정해야 하지만 일반적인 설계방법에서는 PPV 나 PVS 가 단순히 지반진동의 높고 낮음을 예측하는 용도로만 사용되므로 PPV 의 170%는 PVS 의 100%와 마찬가지로 된다(이론적으로 PVS 는 PPV 의 최대 $\sqrt{3}$ 배까지 가능하지만 실제로는 이보다 훨씬 작은 값을 보임). 그러므로 PPV 를 기준으로 선택하고 보안물건에 대한 허용수준을 1.0kine으로 설정하는 경우 PVS 를 기준으로 선택하고 허용수준을 1.7kine으로 설정하는 것과 별다른 차이가 없는 것이다.

(5) 표면파의 특성

레이리 표면파의 입자운동은 그림 1.6과 같이 2차원적이며 표면파는 이름이 의미하는 바와 같이 표면을 따라 전파한다. 입자들은 표면파가 통과할 때 진행방향에 평행한 수직면에서 타원운동을 한다. 이러한 파동은 잔잔한 물에 돌을 떨어뜨렸을 때 생기는 파동과 유사하다. 파가 지나갈 때 물 위에 떠 있는 코르크의 운동은 암석에서 입자가 후퇴하는 타원형을 따르는 것과는 달리 앞으로 진행하는 원으로 설명되며, 이 때 수평 대 수직 변위의 비는 0.7이다. 이 2차원적 성질 때문에 레일리파는 수학적으로 압축파와 전단파의 조합으로 규정할 수 있다. 표면파의 운동은 겨우 1~2파장 심도만 땅 속을 침투하는데 심도에 따라 진폭이 줄어든다.

폭원으로부터 먼 거리에서의 진동시간은 기폭시간보다 더 길다. 이력이 길어지는 것은 거리가 멀어질수록 레일리파가 점점 더 우세해지고 다른 파로부터 분리되기 때문이다.

전단파의 파속은 압축파의 $1/2 \sim 2/3$ 정도이며, 같은 매질에 대하여 레일리파의 파속은 전단파의 0.9~0.95 정도이다. 보통 표면파는 암석 대신에 암석 위의 표토를 지나기 때문에 압축파와 전단파의 진행속도보다 더 느리다. 토양에서는 모든 파들의 파속이 감소되기 때문에 표면파가 제일 영향을 많이 받는다.

표 1.4 발파진동 변수가 미치는 영향정도

변 수	항 목	영향을 미치는 정도			비 고
		심각	보통	미약	
조절 가능한 변수	a. 지연시차	○			
	b. 지발당 장약량	○			
	c. 화약류의 종류	○			
	d. 최소 저항선과 천공간격		○		
	e. 천공구경 각도		○		
	f. 전색상태			○	
	g. 기폭방향			○	
	h. 1발파당 장약량			○	
조절 불가능한 변수	a. 폭원과 구조물과의 거리	○			
	b. 일반적인 지형		○		
	c. 토피 두께 및 형태		○		
	d. 암반의 상태		○		
	e. 대기 상태			○	

(6) 발파진동의 전파특성

발파진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다.

입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등을 말하며, 발파조건은 사용하는 폭약, 장약량, 기폭방법, 폭원과의 거리 등이다.

이중에서 발파조건은 조절 가능한 변수로, 입지조건은 조절 불가능한 변수로 구분 가능하며, 발파진동의 영향을 최소한으로 하기 위해서는 조절 가능한 변수들을 잘 파악하여 이를 적극 활용하여야 한다.

1.1.4 발파진동이 인체 및 구조물에 미치는 영향

발파진동의 크기를 표시하는 척도는 지반이 움직이는 정도를 나타내는 변위(mm), 지반의 움직이는 속도(mm/sec)와 가속도(mm/sec²)의 세 가지가 있다. 유럽, 캐나다, 미국 등에서 수십 년간 행해진 일련의 연구를 종합하면 인체가 반응하는 정도는 가속도성분에 따라 변하고, 지상이나 지하의 구조물이 받는 피해의 정도는 지반의 진동속도성분과 직접적인 연관이 있는 것으로 보고되었다.

진동의 크기와 피해 정도와의 관계에 대해서는 지진의 경우와 같이 상당히 오래 전부터 검토되고 있다. 표 1.5에 일본의 중앙기상대에서 규정하고 있는 진도계와 발생하는 현상 및 발생한 경우의 진동가속도의 크기와의 관계를 제시한다. 표 1.5에 의하면 지진의 경우 인간의 유감한도는 0.8gal이며 피해가 발생하기 시작하는 것은 80gal 이상인 것을 알 수 있다.

이와 같이 지진의 경우에는 허용한계를 진동 가속도로 규정할 수 있지만 이 규정을 발파 진동에 그대로 적용할 수는 없다. 그 이유는 지진과 발파 진동 간에 진동 주파수의 차이와 진동 계속시간의 차이가 있기 때문이다.

주파수에 대해서는 지진이 수 Hz 정도 이하의 저주파 진동인 것에 비하여, 발파진동의 경우는 통상 지표면 암반에서 측정하는 경우 수십 Hz 이상인 고주파 진동이다. 또한 계속시간에 대해서는 지진이 수초에서 수분동안 계속되는 것에 비해 발파 진동의 경우에는 매우 순간적이며 길어도 1초 이내로 발생하는 진동이 많다.

발파진동이 문제로 되는 경우에는 발파작업을 실시하는 주변 지역 주민에 대한 심리적 또는 생리적인 것과 주변 구조물에 대한 피해에 관한 것의 2가지 경우가 있다.

인간에 대한 진동의 영향에는 심리적인 것과 생리적인 것이 있는데 심리적인 것에 대해서는 개인차가 크고 생리적인 것에 대해서는 개인의 차가 없다. 예를 들면, 진동에 대하여 현저히 불쾌감을 가지고 있는 사람이라면 조금의 진동이라도 불쾌하게 느낀다.

표 1.5 기상청 진도계

진도	표현방법	최대가속도 (cm/sec ²)	정 도
0	무감 (Unnoticeable)	0.8 이하	사람에게는 무감, 지진계에는 기록되는 정도
I	미진 (Slight)	0.8~2.5	정지하고 있는 사람이나 특히 주의 깊은 사람밖에 느낄 수 없는 정도
II	경진 (Weak)	2.5~8.0	일반사람이 느끼는 정도, 문이 약간 움직이는 정도
III	약진 (Rather strong)	8.0~25	가옥이 움직이고 문이 요동하고 전등이나 기물내이 수면이 움직인다.
IV	중진 (Strong)	25~80	가옥의 동요가 심하고 안전성이 나쁜 기물은 넘어지고 기물 내 물이 넘친다.
V	강진 (Very strong)	80~250	주위에 균열이 들어가고 묘석 등이 쓰러진다는지 굴뚝이나 광이 파손하는 정도
VI	열진 (Disastrous)	250~400	가옥 도괴가 30% 이하, 사면붕괴가 발생하고 성토나 도로 기타에서 파괴에 의한 갈라짐 발생.
VII	격진 (Very disastrous)	400 이상	가옥 도괴가 30% 이상, 심한 산사태나 땅의 갈라짐이 발생.

그러므로 발파진동의 경우 문제로 되는 것은 주로 심리적 영향에 의한 것이다. 구조물에 대한 진동의 피해, 영향을 논하는 경우에는 구조물 상태(납음, 강도), 지반 상황(구조물의 기초가 암반위인가 표토층인가, 기초 암반위에 존재하는 표토층 두께가 파동의 파장보다 두꺼운가 얇은가), 발파규모 등을 고려해야 하기 때문에 일률적으로 논하는 것은 어렵다.

발파진동이 인체 또는 구조물에 미치는 영향은 주로 진폭, 주파수, 계속시간 등의 요인에 의존한다는 것은 잘 알려지고 있지만, 그 평가 범위에 대해서는 아직 일반성 있게 얻어지고 있지 않다.

표 1.6 발파진동 진도계

진도	진도의 정도	진동속도 범위
I	발파진동은 거의 감지하지 못한다.	0.03cm/s 이하
II	발파진동은 감지할 수 있지만 불평은 적다.	0.03~0.1cm/s
III	발파진동은 현저하며 약간 불평이 있다.	0.1~0.5cm/s
IV	발파진동은 현저하며 불평이 많다.	0.5~1.0cm/s
V	구조물 등에 주의	1.0~2.0cm/s
VI	일반가옥, 모르타르 구조물에 피해의 가능성 있음	2.0~5.0cm/s
VII	제방, 기초콘크리트, 가옥 등에 피해의 가능성이 크다.	5.0cm/s 이상

(1) 구조물과 암반

콘크리트 구조물 등에 대해서 진동 허용치는 그의 인장강도, 탄성계수 등으로 적당한 안전율을 고려하여 어느 정도 이론적으로 유도할 수가 있다. 예를 들면 터널의 라이닝 콘크리트의 압축강도가 180kgf/cm^2 일 때 인장강도는 12kgf/cm^2 정도 이상이라고 생각되므로 여러 번의 발파로 진동 응력을 반복해서 받을 것을 고려하여 탄성한계 내에 포함시키기 위해 안전율을 5로 잡는다면 허용인장응력은 2.4kgf/cm^2 가 된다.

$$\sigma = \rho CV \quad (1.8)$$

여기서, σ : 파두응력, ρ : 매질의 밀도

C : 매질의 탄성과 전파속도

V : 탄성파의 전파에 의한 매질의 진동속도

라고 표시되므로 ρ 가 2.5, C 가 3km/sec, $\sigma \leq 3$ 이 되도록 V 를 구하면

$$V \leq \frac{2,400 \times 980 (\text{g/cm}^2 \cdot \text{cm/sec}^2)}{2.5 \times 300,000 (\text{g/cm}^3 \cdot \text{cm/sec})} = 3.14 (\text{cm/sec})$$

즉, 허용 진동치는 약 3.1kine 이라고 생각할 수 있다. 물론 이 계산은 상황을 단순화하고 가정도 상당히 포함되어 있지만, 대략적인 목표를 정하는 데에는 유용하며 불확정 요소에 대해서는 대상 구조물의 중요도에 따라 상기 안전율을 적당히 정함으로써 대처할 수 있다고 생각된다.

또한 위의 예(인장강도 12kgf/cm^2)에서 인장 파괴를 일으키게 되는 한계 진동치는

$$3.14 \times 5 = 15.7(\text{kine})$$

즉, 약 16kine 으로 계산되지만 실제로는 어느 정도의 진동치로 균열이 들어가기 시작하는가에 대한 실험 예에서는 헤어크랙(Hair Crack)이 들어가기 시작하는 진동치가 33.8kine 로 되어 있다.

(2) 가옥, 인체 감각

인가 등에 대해서는 가옥 그 자체가 천차만별이므로 그 자체에는 손상을 일으키지 않더라도 부분적으로 약한 곳에는 그 나름대로의 변형이 나타날 때도 있을 것이므로 그에 대한 사고방식도 일률적으로 정할 수 없지만 이하의 몇 가지 관계를 나타내었다.

표 1.7은 피해손상상태를 파동전파에 의한 동적변형의 크기에 의해 규정한 것이다.

표 1.7 진동속도차와 피해손상과의 관계

V/C	피해손상의 상황	
1.0	가옥	회벽칠이 떨어지는 일은 있지만 크랙은 들어가지 않는다.
1.7		크랙의 형적은 없다.
2.5		눈에 띄는 크랙은 없다.
3.3		미세한 크랙이 발생하고, 벽토의 붕락이 일어난다.
		- 한계치 -
5.0		크랙이 발생한다.
7.5		크고, 심각한 크랙이 발생한다.
10.0	갱도나 터널에서의 낙석	
10.0 이상	암반에 크랙이 발생	

1.1.5 진동레벨

발파공해 피해원인으로 되는 진동을 평가할 때 인간의 진동 감각치에 해당하는 낮은 Level의 진동까지가 대상으로 되지만 이와 같은 진동을 평가하고 기준을 결정하기 위해 어떤 단위를 사용해야 하는가에 대해서는 여러 가지 의견이 있다. 최근 발파진동을 평가하는 데에도 진동 Level을 사용하는 경우가 많아지고 있다.

또한, 구조물에 대한 피해의 평가단위로는 진동속도가 바람직하다는 의견도 있다. 진동 속도(Peak치)와 진동 Level 사이에는 이론적으로 주파수 8Hz이상의 연속 정현진동의 경우에는 다음 관계가 성립한다.

$$VL = 20.9 \log v + 69.4 \quad (1.9)$$

여기서, VL : 진동 Level(dB), v : 진동속도(mm/sec)

또한 대부분의 발파진동의 주파수는 8Hz 이상이기 때문에 양자 사이에는 상당히 높은 상관성이 있으므로, 구조물에 대한 피해에 대해서도 진동 Level을 사용하여도 큰 실수는 없다고 할 수 있다.

주파수 2~100Hz와 진동노출시간 $t=0.1\sim0.2\text{sec}$ 범위 내에서 진동크기의 상대치(VR)는

$$VR = 2.09 - 6.95 \log t \quad (1.10)$$

로 나타낼 수 있다.

따라서 주파수와 진동노출시간을 고려한 진동 상대치를 생활 진동규제 기준에 합한 값을 기준으로 허용진동레벨을 설정하여 허용 진동속도를 결정할 수 있다.

1.1.6 발파진동의 경감대책

발파를 통한 굴착은 화약의 폭발시 발생하는 충격압과 Gas압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 이 충격압과 Gas압은 암반 깊숙이 탄성파의 형태로 전파되어 지반의 진동을 유발하게 된다. 즉 폭약이 장약공내에서 폭발하면 강력한 폭굉충격과 함께 에너지가 주위의 암반에 전달된다. 이러한 충격파 에너지는 여러 형태의 암반의 파괴를 일으키게 되며, 이 때 발파에 의한 에너지의 5~20%가 탄성파의 형태로 암반 중에 전파되어 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동이라 한다.

이와 같은 발파진동은 원천적으로 제거할 수는 없으나 상당부분을 경감시킬 수 있다. 진동을 경감시키면서 실시하는 발파를 진동 제어발파라 하는데 여기서는 진동을 경감시키는 방안에 대하여 설명하기로 한다.

발파 진동을 경감하는 방법은 크게 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법과 전파하는 진동을 차단하는 방법으로 나눌 수 있다.

(1) 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법

1) 장약량의 제한

발파진동에 있어서 지발당 장약량은 가장 중요한 변수이다. 따라서 발파진동의 피해가 예상될 경우 발파진동을 허용 기준 이내로 억제하기 위해서는 지발당 장약량을 안전발파를 위한 한계 이내로 감소시켜야 한다. 지발당 장약량을 감소시키기 위해서는 터널 발파의 경우에 먼저 지발뇌관을 사용하여 제발약량을 감소시키고, 진동을 더 감소시킬 필요가 있을 때는 한 발파당 굴진장을 감소시키거나, 단면을 분할해서 발파하는 것이 효과적이다. 또한 최소저항선과 공간격을 축소시킴으로써 장약량을 감소시킬 수 있으며, 약경을 천공지름에 비해 작게 하여 디커플링 효과를 이용하는 것도 유용한 방법이다. 터널발파에서는 심빼기 발파에서 일어나는 진동이 주위 단발공의 진동보다 일반적으로 크므로 MS뇌관을 사용하여 진동의 상호 간섭을 이용하여 경감시키거나, 이중 심빼기를 하는 방법이 있다. 벤치 발파의 경우에는 벤치 높이를 감소해야 한다.

2) 점화 방법의 분할

발파를 몇 개의 block으로 분할하여 별도로 점화하는 방법과 지발뇌관을 사용하는 방법이 있다. 지발뇌관을 사용한 지발발파의 경우 발파진동은 각 발파 단계에서 발생하는 진동으로 분리되고, 장약량도 각 단계에서의 지발당 장약량으로 분할된다. 따라서 지발뇌관을 사용한 지발발파는 분할 점화방법에 비하여 작업능률을 저하시키지 않고 발파 진동을 경감시키는데 매우 효과적인 방법이다. 그러나 지발시간이 너무 짧은 경우에는 발파 진동의 경감효과가 감소하므로 유의해야 한다.

3) 저폭속 폭약의 사용

발파진동은 폭약 에너지의 충격파에 의한 동적 파괴의 경우에 더욱 커지게 되므로 발파진동을 경감시키기 위해서는 동적 파괴효과의 비율이 적은 폭약, 즉 저폭속 폭약을 사용하는 것이 효과적이다.

4) MS뇌관의 사용

지발당 장약량을 다시 MS뇌관을 사용하여 점화하면 제발발파에 비해 진동의 상호 간섭에 의한 진동을 경감시키고, 발파효과는 제발 발파와 같은 효과를 거둘 수 있다. 벤치 발파에 주로 이용된다.

그림 1.9에 표시된 바와 같이 미국 광무국에서 실시한 시험결과는 진동속도를 감소시키는

데 있어서 MS지발발파의 효과를 보여주고 있다. 같은 석회암 채석장에서 7공발파에서 지발 간격을 다르게 하면서 거리에 따른 최대진동속도를 측정하였다. MS지발발파를 한 결과 진행성분의 진동속도가 3~5배 정도 감소되었다. 접선성분에서는 진행성분이나 수직성분에서 만큼 감소효과가 크지 않았다.

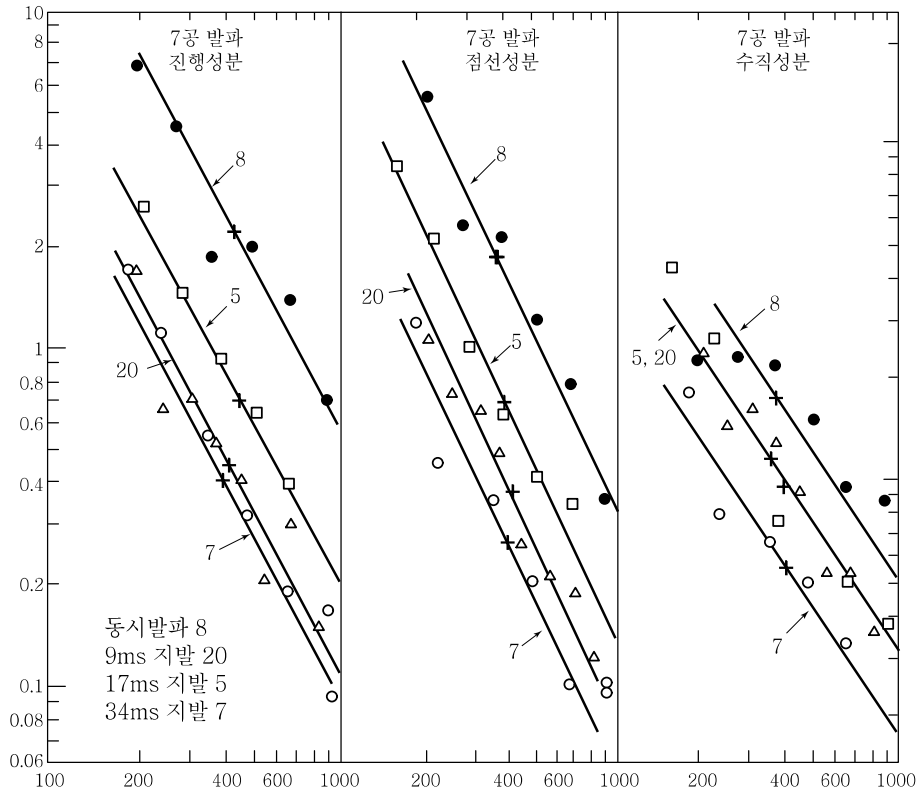


그림 1.9 MS지발에 따른 반응 속도의 감쇠(Nichols 등, 1971)

한편 발파진동의 모델링을 통해 지발간격을 달리하여 발파진동의 감소효과에 대하여 연구한 논문이 Hinzen(1988)에 의해 발표되었는데, 그 결과는 그림 1.10과 같다. 여기서는 30m 간격의 두 공에서 71kg의 장약량을 사용하여 동시 발파에서부터 1ms 씩 지발간격을 달리하여 발파진동의 중첩과 상호 간섭효과를 모델링 하였는데, 발파진동의 크기가 최저가 되는 것은 지발간격이 15ms일 때이며, 두 공에서 동시 발파하는 경우에 비해 37% 정도의 수준으로 나타났다. 한편 2ms의 지발시간에서는 동시 발파에 의한 최대진동속도의 수준으로 다시 커지는 것으로 나타났는데, 이는 두 공에서 발생 전파되는 발파진동이 중첩되어 증폭이 되는 것이다. 이렇게 몇 ms정도의 지발시간의 차이에도 상호 간섭효과가 매우 달라지므로 발파조건과 구조물의 상태에 따라 매우 정확하고 정밀하게 지발간격을 조정해야 한다.

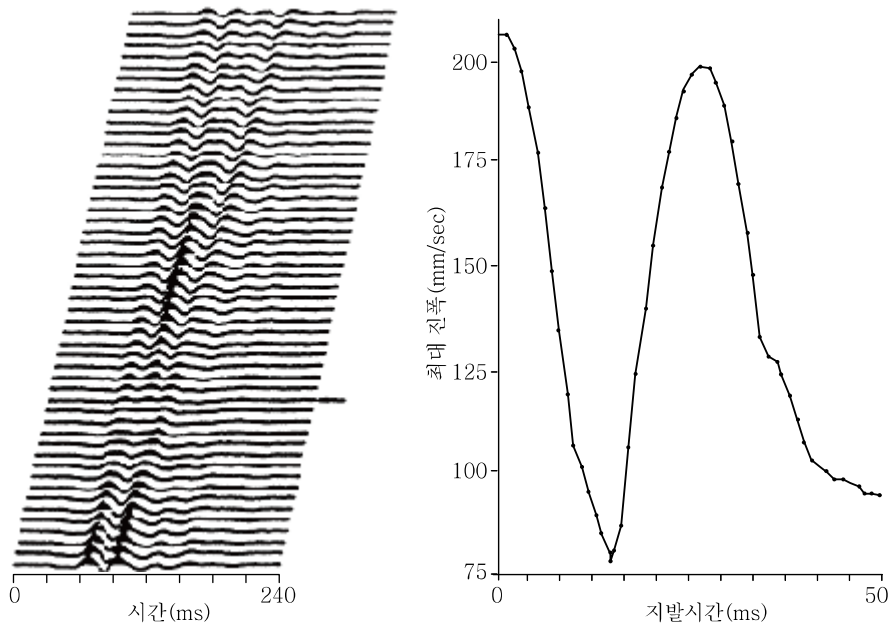


그림 1.10 지발시간에 따른 진동의 상호 간섭과 지연시차에 따른 진동의 최대진폭
(왼쪽 그림의 최하단은 지발시간이 0, 최상단은 51ms일 때이다.)

(2) 전파하는 진동을 차단하는 방법

발파원과 보호건물 사이에 Line Drilling이나 Pre-Splitting을 실시하여 진동의 전파를 차단하는 파쇄대나 불연속면을 만들면, 진동을 경감시키는데 유효하다. 따라서 인공적으로 Line Drilling이나 Pre-Splitting을 실시하면 그 부분에서 많은 진동이 반사되고, 통과하는 부분은 작아져 진동의 차단효과를 가져온다.

한편, 표면파의 경우에는 지표면을 따라 전파되므로, 전파되는 경로상의 지표면에 일정 깊이의 방진구(防振溝)를 파면 상당한 양의 진동이 더 이상 전파되지 못하고 감소된다.

1.2 발파 폭풍압

발파로 인해 발생하는 폭음은 일반 소음과는 달리 비교적 큰 압력을 갖기 때문에 폭풍압(Air Blast)이라고도 한다. 이 폭풍압은 주로 폭약의 폭발에너지가 파쇄되는 암괴를 통하여 대기중으로 방출되는 압축파에 기인한다. 이외에도 지반의 진동이 대기중으로 전달되는 경우와 폭발에 의해 형성되는 Gas나 전색물이 대기중으로 밀려나오면서 일으키는 경우가 있다,

이렇게 폭발로 인해 공기압으로 표출되는 폭풍압은 지반진동을 수반하며, 이들 파압은 진

동속도 대신에 공기의 압력으로 그 크기가 결정된다.

이 때 발생하는 진동은 고주파수와 저주파수 범위가 있다. 가령 주파수 범위(20~2,000Hz)의 고주파는 음파를 형성하고, 그 이하의 저주파 범위는 귀로 들을 수 없으나 구조물에 피해를 준다.

실제로 노천 발파나 석회석 채석장에서 발파에 의한 폭풍압의 주파수를 분석해 보면 40Hz 이하의 저주파가 우세하며 이 저주파에 대부분의 폭풍압 에너지가 실려 있고, 20Hz 이하에서는 구조물에 피해를 입히는 것으로 밝혀졌다.

이러한 폭풍압에 대한 관심은 대개 세 가지 이유에서인데, 첫째로 폭풍압은 지반 진동을 동반하는 것으로 구조물의 벽에 균열을 일으키고, 둘째로 건축물의 유리창을 파손하며, 셋째는 가장 관심 있는 것으로 인체에 대한 반응이다. 여기서 인체에 대한 감응은 아직도 그 정도가 정량적으로 계산되지 못하고 있다. 인체에 대한 폭풍압의 영향중에서 건물 안에 있을 때가 건물밖에 있는 것보다 그 영향이 증가된다. 그 이유는 건물에 낮은 주파수로 전달되는 폭풍압은 건물 자체를 진동시키므로 그 진동이 인체를 자극하기 때문이다.

1.2.1 공기 중의 충격파

유속 u 를 지닌 유한 진폭의 압력파가 공기 중을 전파해 가는 경우 압력파의 전파 속도 C 는

$$C = C_0 + \frac{(\gamma + 1)}{2} u \quad (1.11)$$

로 표현될 수 있다. 단, C_0 는 흠어지지 않는 일정한 상태하에서의 공기 중의 음속이며, γ 는 공기의 정압비열(定壓比熱)과 정용비열(正容比熱)과의 비(比)의 값이다.

식 (1.11)에서 명백하듯이 공기의 입자가 파동의 전파방향으로 u 의 속도로 움직임으로서 생기는 소란은 흠어지지 않는 공기 속을 전파하는 음의 속도 C_0 보다도 빠르게 전파되게 된다.

이렇듯 파면에 있어서 압력, 온도, 입자속도, 밀도 등이 급격하게 변화되는 파동을 충격파(Shock wave)라고 부른다.

그리고 유한진폭의 압축파는 시간이 경과하면 파면이 급격하게 되어 마침내는 불연속면을 만들게 되지만, 팽창파인 경우에는 반대로 파면이 완만하게 되어 불연속면이 생기지 않는다는 것을 알 수 있다.

또한 상기와 같이 해서 형성된 충격파도 전파와 함께 입자속도 u 의 값이 저하되면 그 전파속도 C 는 음속 C_0 에 가까워지고, 공기의 점성 등으로 파면도 불연속이 되지 않고 완만하게 되어 마침내는 음파가 되고 만다. 예를 들면 압력 최고치가 40기압인 충격파는 음속(약 330m/s)의 약 6배 즉, 약 2,000m/s의 속도로 전파되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 음압이 80dB 이하로 되면 음파로 생각해도 좋고, 통상의 발파작업에서의 소음 대상으로서는 주로 음파로서의 발파음을 생각하면 된다.

발파음은 계속시간이 매우 짧고 주파수는 50~2,000Hz에 분포하며, 주요 주파수는 50~150Hz이고 발파조건에 따라 주파수 및 음압이 변화한다. 소음을 생각하는 경우에는 음압 Level과 구별해서 생각해야 한다. 양자를 식으로 표시하면 양쪽 모두 다음 식으로 표시된다.

음압레벨의 단위는 일반적으로 dB(L)로 표시하며 소음레벨의 경우에는 dB(A)로써 나타내고 있다.

발파에 의해 발파 풍압의 세기는 압력의 단위나 사람의 청감보정을 가하여 음압수준(dB)단위로 표현할 수 있다. 이 두 단위 사이의 관계는 다음식과 같다.

$$S = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1.12)$$

여기서, S : 음압 Level

P : 음압 실효치

P_0 : 기준 음압 실효치

$$(P_0 = 2.9 \times 10^{-9} \psi = 2 \times 10^{-5} Pa = 2.04 \times 10^{-10} \text{kgf/cm}^2)$$

이러한 두 단위는 소음과 같은 가청영역에서 생각할 때는 구별을 해야 한다. 즉 압력의 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 있으며, 주파수에 관계없이 일정하다. 그러나 소음의 dB단위는 주파수에 따른 사람의 청감에 따라 보정을 가한 단위이다. 이는 발파풍압의 측정시 측정대상 주파수 영역에 따라 적절한 보정회로를 사용해야 한다는 것을 의미한다.

음압 P 의 단위가 atm일 때 다음 식으로 표현된다.

$$\text{음압수준 } S(\text{dB}) = 20 \log P + 194 \quad (1.13)$$

1.2.2 발파로 발생한 폭풍의 전파

(1) 공기 중 폭발

폭약이 공기 중에서 폭굉했을 경우에는 폭약 중을 진행해 온 폭굉파가 공기와 경계면에 도달하여 공기를 충격하게 된다.

이 때 폭굉파의 진행방향과 직교되는 면에 접하고 있는 공기는 폭굉파 내의 폭굉생성 Gas의 흐름으로 그리고 폭굉파의 진행방향과 평행한 면에 접해 있는 공기는 폭굉생성 Gas

의 팽창에 따른 Gas의 움직임으로 각각 격렬한 소란을 받아 그 때문에 강력한 충격파가 공기 중에 투사하게 된다.

그 결과에 의하면 표 1.8에 제시한 것은 폭굉 특성이 있는 PENT 및 Tetryl이 폭굉된 경우이고 표 1.9에 제시한 것과 같은 특성의 충격파가 약포 끝에서 공기 중으로 투사하게 된다.

표 1.8 폭약의 폭굉 성질

약 종	밀도 (g/cm ³)	폭속 (m/s)	입자속도 (m/s)	압력 (atm)	온도 (° K)
PENT	0.8	4,760	1,450	54,000	4,370
	1.2	6,300	1,650	125,000	3,900
	1.6	7,900	1,900	238,000	3,290
Tetryl	1.0	5,400	1,410	76,000	3,260
	1.2	6,100	1,560	115,000	3,000

표 1.9 약포 끝면에서 공기 중으로 투사되는 충격파의 특성

약종	폭약의 밀도 (g/cm ³)	압력 (atm)	입자속도 (m/s)	전파속도 (m/s)
PENT	0.8	450	5,900	6,500
	1.2	640	7,000	7,700
	1.6	820	7,800	8,900
Tetryl	1.0	510	6,200	7,000
	1.2	580	6,600	7,400

표 1.8과 표 1.9에서 다음과 같은 것을 알 수 있다. 즉, 공기의 쇼크임피던스의 값이 폭약의 특성임피던스(폭속×밀도)의 값보다도 대단히 적기 때문에 폭굉압이 238,000기압이란 폭굉파로 충격을 준 경우라도, 공기 중으로 투사되는 충격파의 압력은 820기압으로 저하되지만, 입자속도인 공기의 흐름의 속도는 7,800m/s라는 고속이 된다.

(2) 지표 폭발

대형폭발시험에서는 1kg에서 3ton까지 범위의 약량이 사용되고 있으며 폭굉압의 측정에 서 브라스티미터가 사용되었다.

그림 1.11은 폭약이 지표에서 폭발한 경우에 생성하는 폭굉압과 폭원에서의 거리 및 약량과의 관계를 제시한 것이다. 대형폭발시험에 의해 얻어진 결과에서는 압력치가 거의 10kg/cm²에서 0.1kg/cm² 범위 내에 있는 폭굉에 대해서는

$$P = 16.75 \left(\frac{D}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1.575} \quad (1.14)$$

가 성립되며 그 감쇄지수의 값은 1.575란 것을 알 수 있다.

식 (1.14)에 있어서, P 는 Blast meter로 측정한 폭풍압(kg/cm^2), D 는 폭원에서 거리(m), W 는 약량(kg)이다.

일반적으로 3차원의 공간인 공기 중에서는 폭풍압이 폭원근방에서는 거리가 거의 1.5승으로 폭원에서 상당히 떨어진 위치에서는 거리가 거의 1.0승으로 반비례해서 감쇄된다.

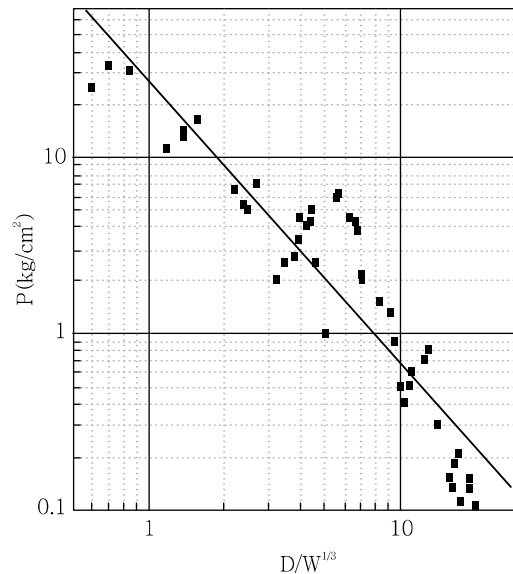


그림 1.11 폭약의 지표폭발인 경우의 폭풍압과 삼승근 환산거리와의 관계

(3) 터널 내 폭발

분기되지 않는 관통된 터널 내에서 폭약을 폭발시킨 경우에 생기는 폭풍에 대해 실측 예로서 연장 141m, 폭 3.4m, 높이 4m, 단면적 약 11m^2 의 소단면 암반터널 내에서 4각형의 TNT 22kg을 폭발시킨 경우의 터널의 폭풍압과 동일약량의 TNT를 야외의 지표에서 폭발시킨 경우에 발생한 폭풍압을 대비해서 제시하면 그림 1.12와 같이 된다.

또한 연장 181m, 폭 4.5m, 높이 5.4m, 단면적 약 22m^2 의 마제형 벽돌감기 터널 내에서 100g 및 22kg의 TNT를 폭발시켰을 때의 폭풍압을 나타낸 것이 그림 1.13이다.

그리고 그림 1.12에 제시한 터널 내에서의 폭풍압은 근사적으로 $P = 90.0/D$ 라는 식으로 나타낼 수가 있으며 또한 그림 1.13에 제시한 TNT의 터널 내에서 폭발에 대해서는 약량이 22kg인 경우의 폭풍압은 $P = 111.3/D$, 약량이 100g인 경우의 폭풍압은 $P = 6.8/D$ 라는

식으로 나타낼 수가 있다. 이들의 식에 있어서 P 는 폭풍압(kg/cm^2), D 는 폭원에서 거리(m)이다.

이들 식에서 보여주듯이 터널 내에서 폭약을 폭발시켰을 때에 생기는 폭풍은 동일약량의 폭약을 야외의 지표에서 폭발시킨 경우에 비해 압력의 감쇄가 완만하고, 터널 내에서의 폭풍압은 폭원에서 거리에 정비례해서 감쇄된다는 것을 알 수 있다.

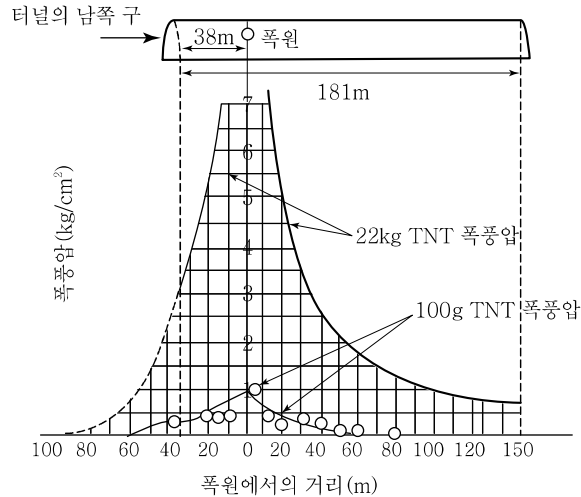
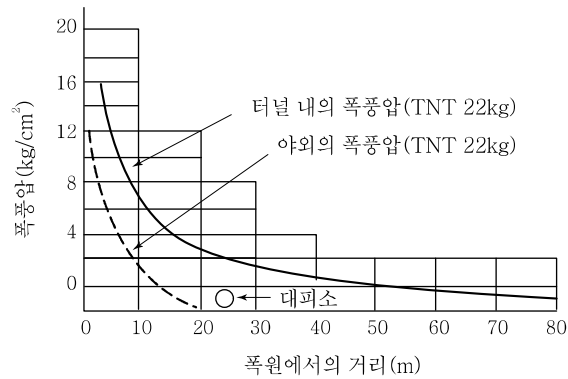


그림 1.13 단면적이 약 22m^2 벽돌감기 터널 내의 폭풍압과 터널외 터널축 연장상의 폭풍압

그림 1.13에서 폭풍이 터널 밖으로 나왔을 때의 폭풍압의 감쇄상황과 터널갱구근방과 터널 내에서의 감쇄상황이 대개 유지된다고 할 수 있다.

(4) 천공내 폭발

발파 폭풍압의 네 가지 주요 구성요인은 ① 발파지점의 직접적인 암반 자체의 변위로 인한 기압파(Air Pressure Pulse, APP) ② 발파지점에서 약간 떨어진 곳의 지반 진동으로 인한 반압파(Rock Pressure Pulse, RPP) ③ 파쇄된 암반의 틈을 통해서 누출되는 Gas누출파(Gas Release Pulse, GRP) ④ 불완전한 전색에 의해 전색물이 분출되면서 발생하는 전색물 분출파(Stemming Release Pulse, SRP) 등으로 밝혀졌다. 기압파는 각각의 발파공에서 발생하여 각 지발마다 각각 정점을 형성한다. 거리가 멀어지면 각각의 지발 정점은 발파공에서 발생하여 각 지발마다 각각 정점을 형성한다. 거리가 멀어지면 각각의 지발 정점은 서로 합해진다. 반압파는 지반의 수직진동에 의하여 생성되는데, 지반진동과 함께 동시에 도달한다. 반압파는 기압파보다 작으며 발파풍압의 하한을 형성한다.

각 파동의 크기는 누출Gas파와 전색물 분출파에 의해 조정되며 공발의 가능성에 좌우된다. 이 공발은 보통 예기치 않은 높은 발파소음과 발파풍의 원인이 된다. 공발은 발파공 상부의 전색이 부적절할 때 가끔 발생한다.

일반적으로 행해지고 있는 발파의 경우와 같이 암반에 천공해서 내부장약 상태로 하여 폭약을 폭발시켰을 때 생기는 폭풍에 대해 고찰한다.

파괴면 암반면의 이동속도는 발파조건에 따라 당연히 크게 변하지만 통상적인 발파의 경우에는 5~50m/s 정도일 것이라고 생각된다. 그러므로 이제 $P = \rho u w$ 의 관계를 이용해서, 암반이 상기의 속도로 이동한 경우에 발생하는 공중충격파(폭풍)의 압력을 계산하면, 그 값은 거의 $0.02 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$ (약 160~180dB)가 된다.

단, 이 계산에서는 공기의 밀도 ρ 값에는 $1.3 \times 10^{-1.3} \text{ kg/m}^3$, 공기 중에서의 충격파 전파 속도 u 의 값에는 18℃일 때의 음속 342m/s 값을 이용하였다. w 는 충격파 배후의 입자속도이다.

(5) 충격파의 속도와 Peak압

공기중에서 폭약이 폭발했을 때 생기는 폭풍은 폭풍점을 중심으로 하여 구면상으로 넓어져 간다. 충격파는 공기중을 전파하는 중에 약해져서, 최후에는 음파로 된다. 공기중의 충격파에서는 충격파속도와 Peak압 사이의 다음과 같은 식이 중요하다. 대기압과의 차이 $P_1 - P_0$ 를 P 로 표시하면 $\frac{P}{P_0} = \frac{2r}{r+1} (M^2 - 1)$ 이라고 쓸 수가 있다. 공기의 비열비 r 는, 보통의 충격파에서는 1.4로 취하면 좋다. M 은 mach 수를 나타내며 $M = \frac{D}{C_0}$ 로 표현된다(D : 충격파 속도, C_0 : 음속도, 약 340m/sec).

(6) 장약량과 거리에 따른 Peak압

일반적으로 어떤 폭약량에 있어서, Peak압을 거리의 함수로 하여 $P \propto R^{-n}$ 와 같이 썼을 때 지수 n 을 감쇠지수라고 부른다. 폭풍압의 Peak압 측정하여 그 결과로부터 $P = kW^m R^{-n}$ (W : 최대 지발당 장약량, R : 거리)의 형의 실험식을 만들 때가 있다.

여기서, k , m , n 은 폭약의 종류로 정해지는 정수이다. 이 경우 상이법칙이 성립한다고 하면, 두 개의 지수 m , n 의 사이에는 $m = \frac{n}{3}$ 의 관계가 없으면 안된다.

1.2.3 폭풍에 의한 피해

발파음의 인간에 대한 영향이 크게 됨에 따라 불쾌감, 일상생활의 방해, 생리기능 변화, 청력 장애, 고막 손상 등의 피해를 가져오며 구조물에 대한 영향으로서는 창유리 파손, 창틀이나 덧문의 파손, 건조물 손해 등의 모양으로 나타난다. 발파음이 인간에 대해 미치는 영향은 통상 발파의 경우 불쾌감, 일상생활의 방해 등의 심리적 피해이며, 대부분의 소음 공해 또한 이 정도의 크기이다. 폭풍에 의한 구조물의 피해에 관해서는 일본 통상산업성 주최의 대형 폭발실험에 있어서 얻어진 실험결과에 대해 공표된 자료를 정리하면 표 1.10과 같다.

표 1.10에 의하면 창문유리의 파손은 폭풍압의 강도가 $0.06 \sim 0.08 \text{ kg/cm}^2$ 정도에서 생기기 시작한다고 추정되고 있으나, 창유리의 크기와 두께에 따라 다르므로 폭풍압이 0.02 kg/cm^2 (160dB) 정도라도 창문유리의 파손이 일어날 수 있고, $0.15 \sim 0.20 \text{ kg/cm}^2$ (약 177~180dB) 정도에서는 창틀이나 덧문이 파손 될 수도 있다.

일반적으로 인간에 대한 난청문제는 개인의 청력차, 연령에 의한 청력변화 등 많은 인자가 관계되기 때문에 복잡하므로 어느 정도의 음이 오랫동안 들어도 무방할 것인가에 대한 판단은 어렵다.

표 1.10 폭풍압과 피해상황

피해의 상황	폭풍압(kg/cm ²)
창문 유리가 파손될 때가 있다.	0.06
수압면의 창문유리는 대개 파손된다.	0.08~0.10
창틀이나 덧문이 절손 될 때가 있다.	0.15~0.20
대개의 창문틀이나 덧문을 절손한다.	0.25~0.35
기와가 무너져서 판벽판자가 부서진다.	0.40~0.50
지붕골조가 비틀려서 하부 기둥이 부러진다.	0.60~0.70
건평 15평 정도의 가옥이 파괴된다.	1.50 이상

음압레벨이 150~160dB에 이르면 순간적으로 귀에 손상을 입게 된다고 하지만 그 이하의 음압이라도 장시간 시달리면 청력이 피로하고, 이를 반복하면 영구적인 난청이 된다.

1.2.4 발파폭풍 경감대책

발파풍압의 경감대책으로는 발파진동의 경감대책과 유사한 점이 많으나 발파풍압의 경우 바람이나 온도의 영향을 많이 받기 때문에 이러한 점을 고려해야 하며, 발파진동의 경우에는 전파경로에서 차단하는 방법이 비교적 효과가 적지만 발파풍압의 경우에는 매우 효과적이고 실용적인 방법이 될 수 있다.

발파풍압의 감소방안으로 이용할 수 있는 방법들은 다음과 같다.

- ① 완전 전색이 이루어지도록 해야 한다.
- ② 벤치 높이를 줄이거나 천공지름을 작게 하는 등의 방법을 통해 지발당장약량을 감소시켜야 한다.
- ③ 방음벽을 설치함으로써 소리의 전파를 차단한다.
- ④ 불량한 암질, 풍화암 등에서 폭발Gas가 새어 발파풍압이 발생하는 것에 주의하고 전색 효과가 좋은 전색물을 사용한다.
- ⑤ 온도나 바람 등의 기후조건이 인근 구조물에 발파풍압의 집중을 초래할 가능성이 있는 장소에서는 발파를 연기하거나 피해야 한다.
- ⑥ 기폭방법에서 정기폭(Top Hole Initiation)보다는 역기폭을 사용한다.
- ⑦ 소할 발파에 붙이기 발파를 하지 말 것과 짧은 천공발파를 하는 경우 모래주머니 등으로 덮는다. 또한 도폭선 사용을 피한다.
- ⑧ 뇌관은 MS전기뇌관을 이용하여 지발 발파를 실시해야 한다.
- ⑨ 벤치발파에서는 앞 열의 발파에 의해 생성된 파쇄암이 낙하하지 않았을 때 다음열 발파가 행해지면 이 파쇄암들이 방음벽의 역할을 하게 되고, 다음열의 발파에서 발생하는 발파풍압은 상당히 감소될 것이다.

1.3 발파에 의한 비산

발파에 의해 생긴 암석의 파쇄 조각은 그것에 주어진 에너지크기에 따라 원위치에서 불규칙적인 방향으로 날아서 상당히 먼 곳까지 비산한다. 일반적으로 이를 비석(飛石)이라고 부르고 있다.

비석은 비산의 방향이나 거리 여하에 따라서는 인체나 구조물 등에 대해 피해를 주게 된다. 최근 화약류 소비 중에서의 총 사고건수나 비석에 의한 사고건수가 해마다 감소되는 경

향이 있으나 여전히 비석에 의한 사고수는 총 사고건수의 60~70%를 차지하고, 그 비율은 반드시 감소경향을 나타내고 있지만은 않다. 이와 같이 비석에 의한 사고는 화약류 사용 중에 생기는 사고 중 가장 큰 비율을 차지하는 것이므로 발파를 실시할 때에는 비석방지에 충분히 주의를 기울여 공해발생을 미연에 방지하도록 해야 한다.

1.3.1 비석발생

주변 구조물에 영향을 주거나 위험을 초래할 수 있는 비석은 약량의 증가에 따라 증가한다. 비석의 중요한 원인으로는 점화순서와 뇌관시차선택의 착오에 의한 지나친 지발시간, 그리고, 단층, 균열, 연약면 등에 의한 암반의 강도 저하, 과다한 장약량과 또 천공시 잘못으로 인한 국부적인 장약공의 집중현상 등을 생각할 수 있다.

한편 기술적인 측면에서 볼 때에 비석은 뇌관배열의 영향에 의한 비산과 전체발파면(Round)에서의 전방비산, 그리고 공구에서의 비산, 장약공의 장약폭발에 의한 비산 등으로 분류 할 수 있다.

(1) 뇌관배열의 영향에 의한 비산

점화순서 계획은 비산에 중요한 요인으로서 밀리세컨드(MS) 지발발파가 유리하다. 즉, 앞 단계의 파쇄암석이 다음 열의 발파시에 장벽으로 작용하기 때문이다. 지발시간이 너무 길면 이러한 장벽효과는 없어진다. 따라서 한 발파면에서 인접공간의 지발시간은 100ms를 초과해서는 안 된다. 최소저항선이 1m 이하이고, 계단의 높이도 작은 경우에는 지발시간이 이보다 훨씬 짧아야 한다.

(2) 발파면의 전방비산

비장약량은 암석의 전방비산에 있어서 매우 중요한데 최저한계 장약량에 가까울수록 암석의 전방비산은 적어지지만 이것이 바람직한 방법은 아니다. 즉, 장약량 조절로 비산문제를 모두 해결할 수는 없다.

암석비산에서 가장 중요한 것은 발파면의 적절한 점화방식이다. 최소 저항선에만 어느 정도 균열을 발생시키거나 불발인 발파면은 암석의 상당한 비산을 초래할 수 있다. 또 균열의 방향도 어느 정도의 비산만 허용하도록 잘 계획하여 실시하여야 한다. 그러나 실제로 최소 저항선의 균열방향을 변화시켜 전방비산이 일어나지 않도록 하는 것이 불가능할 때에는 한 계 값에 가까운 약장약으로 한 쌍의 열을 동시에 점화하는 것이 바람직하다. 그렇게 하면 발파된 암석이 다음 발파면의 장벽으로 작용하게 된다. 지면보다 훨씬 높이 있는 암석은 파괴 후 미끄러져 내려와 장벽역할을 하지 못하여 비산이 커질 수 있으므로 이와 같은 암석계단은 약장약을 할 필요가 있다.

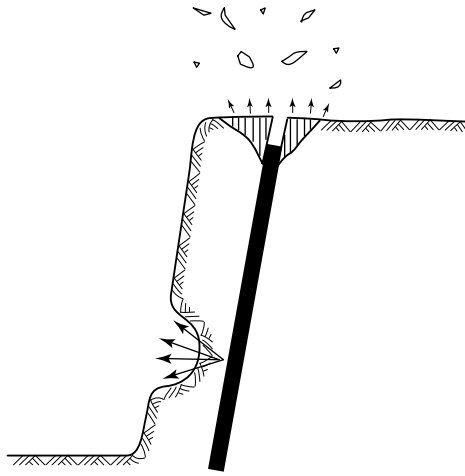


그림 1.14 Bench 발파에서 비산의 형태

(3) 공구에서의 비산

장약량을 계산할 때에는 무장약 부분을 남겨 놓는데 이 부분이 아주 작으면 비산의 위험이 커진다. 암석에 균열이 많을수록 Gas압력에 의한 작은 암석조각들이 주위로 비산될 위험성이 크다. 또 무장약부분이 커도 위험이 따를 수 있는데, 강력한 공저장약과 큰 무장약 부분이 존재하는 것보다 약한 폭약으로 많은 부분을 장약하는 것이 바람직하다.

(4) 장약폭발에 의한 비산

대부분의 경우 암석의 비산은 발파면의 첫째 열과 공저장약 부분으로부터 일어나는데, 이것은 근본적으로 큰 지름의 구멍을 사용할 때이므로 구멍의 지름이 클수록 비산의 위험도 크다. 공저장약에 의한 비산의 요인으로는 두 가지가 있는데 첫째는 천공시의 오차이고, 둘째는 암석내의 균열이다. 지름이 큰 구멍과 지름이 작은 구멍과의 비산 위험차이는 장약공의 단위 길이당 장약량에 의한 것이다.

첫째 열로부터의 비산은 첫째 열의 신중한 장약과 발파면 전방에 파쇄암석을 그대로 방치하여 두는 올바른 발파계획으로 피할 수 있다(그림 1.15 참고).

천공의 공저부분의 최소저항선이 적당한지를 잘 검토하여야 하며, 장약을 할 때 공저 장약은 보정 없이 실제 최소저항선으로 계산하고 주상장약도 실제 최소저항선을 이용하여 장약밀도를 저하시킬 수 있다.

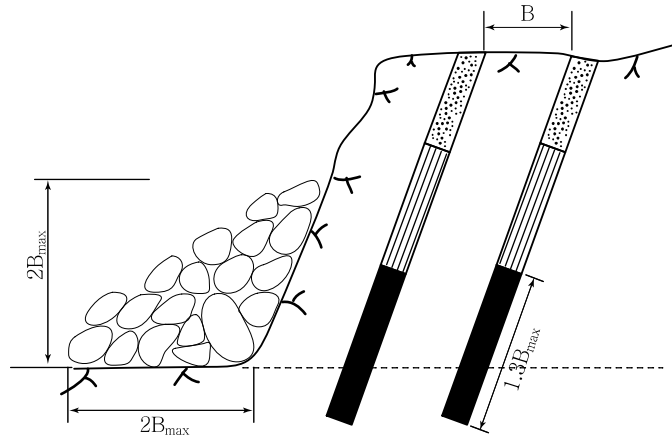


그림 1.15 공저부분으로부터의 암석비산을 막는 방법

(5) 터널 내 비산

비석의 사고는 대부분 야외 발파에서 문제시되지만 터널발파에서 사망재해를 일으키는 경우도 있다. 터널발파는 원칙적으로 중앙부분에 자유면을 형성하도록 하기 위하여 중앙부터 점화되기 때문에 비교적 원거리 비산하고, 파쇄석은 흩어지게 된다. 비산은 점화방법에 따라 영향을 받으며, 지발발파로 점화되는 발파에서는 감소하는 경향을 보인다. 만일 좁은 단면의 터널에서 1발파당 굴진을 5m 이상으로 하면, 이때의 모든 발파는 거의 지발로 점화시켜서 발파시 충분한 팽창을 일으키도록 하는 시간적 여유를 주어야 한다.

천공방법에서 번컷(Burn-cut) 심빼기는 다른 방법에 비하여 비산정도가 적고 파쇄가 고르다. 파쇄가 된 암석은 항상 중앙부에서 반대쪽을 향하여 큰 힘으로 비산되는데, 이는 비산에너지가 내부에너지로 변환되어 암석의 파쇄에 기여하기 때문이다. 근거리 비산과 고른 파쇄를 유도하기 위해서는 모든 발파공의 발파 방향이 천반부를 향하도록 뇌관을 배열하는 것이 바람직하다.

1.3.2 비석의 궤적

발파에 의한 암반의 파괴는 화약류의 발파에 의해 암반 내에 유기(誘起)되는 응력파는 자유면 가까이에서의 암반의 파괴에 중요한 역할을 하며 스폰링에 의한 파괴가 탁월하다고 생각된다. 그러므로 이 사고방식에 따라 자유면 가까이에서는 파쇄조각이 어느 정도의 초속으로 비상하려는 가능성이 있는가를 검토해보자.

파두응력치가 σ_w 인 톱날형의 평면압축파가 자유면에 수직으로 입사해서 단일 스폰링이 발생할 경우를 고려한다면, 파쇄조각의 비상 초속도 V_o 는 다음 식으로 부여된다.

$$V_o = \frac{2\sigma_w - S_t}{\rho C} \quad (1.15)$$

단, S_t 는 암반의 동적인장강도, ρ 는 암반의 밀도, C 는 암반 중에서의 평면압축파의 전파 속도이다.

σ_w 의 값이 S_t 의 몇 배 이상일 경우에는 스펙링은 연속적으로 생기지만 2회째 이후, n 회째의 스펙링에 의한 파쇄조각의 비상 초속도는 V_{on} 은

$$V_{on} = \frac{2\sigma_w - (2n-1)S_t}{\rho C} \quad (1.16)$$

으로 주어지기 때문에 스펙링에 의해서 생긴 파쇄조각 비상의 초속도가 가장 큰 값을 취한다는 것을 알 수 있다.

식 (1.16)에서 알 수 있듯이 암반에 따라 다르지만 어떤 특정한 암반에 대해 고려하면 S_t , ρ , C 의 값은 거의 일정하다고 생각되므로 스펙링에 의해 생긴 파쇄조각 비상의 초속도는 자유면으로 입사되었을 때 응력파의 파두응력치 σ_w 의 값으로 결정된다.

발파 대상이 되는 암반은 결코 균질한 것이 아니라 균열이나 점토층 등이 협제하고 있는 암반을 대상으로 발파가 진행될 때도 많다.

이와 같은 구조적 약선(弱線)을 많이 포함한 암반을 대상으로 한 발파인 경우에는 구조적 약선부터 파괴가 전체적인 파괴에 선행하고, 그 때문에 극히 강대한 에너지를 지닌 폭발생성 Gas가 파쇄조각과 함께 구조적 약선부를 통해 돌출하게 되므로, 파쇄조각에는 큰 초속이 주어져 예상 이상의 원거리에 도달하게 된다. 또한 경우에 따라서는 스펙링에 의해 생긴 파쇄조각이 비상 중에 구조적 약선부를 통해 돌출되어 온 고속 파쇄조각과의 충돌로 가속되어 보다 멀리까지 날아갈 가능성도 많다.

이렇게 생각하면 공해와 관련해서 비석현상을 고려할 경우에는 스펙링에 의해 생긴 파쇄조각의 비상보다도 오히려 폭발생성 Gas의 추진 작용에 의해 주어지는 파쇄조각의 비상 현상 쪽이 중요하나, 후자의 현상은 극히 복잡하여 그 이론적인 해명은 극히 곤란하다.

사용약량이나 발파조건에 따라 실측치에 대한 상당한 분산이 있지만 100m/s에 가까운 비상속도가 기록되어 있는 예도 있다. 따라서 실제발파에 있어서는 발파의 방법이나 암반 조건연하에 따라 정사적인 발파에 있어서 예상되는 것보다 훨씬 빠른 속도로 파쇄조각이 비상하려는 가능성을 충분히 고려해야 될 것을 잘 인식하며, 만전의 대책을 강구해야 한다.

파쇄 암석의 형상은 가지각색이며 공중을 날아갈 때는 각각 복잡한 공기 저항을 받고 감속되기 때문에 비석 궤적을 계산으로 구하는 것은 매우 어렵다. 일단 공기 저항을 무시한 경우의 비석의 운동을 생각해 보자.

암편이 속도 V_o , 사각 θ 로 위쪽에 내던졌다고 하면 그 암편을 내던진 지점과 같은 수평

면상에서의 비거리 L 은 다음 식으로 주어진다.

$$L = \frac{V_o^2}{g} \times \sin 2\theta \quad (1.17)$$

여기서, L : 수평 비산거리(m)

V_o : 초속(m.s)

θ : 사각(°)

g : 중력가속도(9.8m/s^2)

이론상으로 수평 비산거리 L 은 θ 가 45° 일 때 최대치를 나타내고 다음 식으로 된다.

$$L_{\max} = \frac{V_o^2}{g} \quad (1.18)$$

야외 발파에서는 이 사고방식이 성립되지만, 터널발파의 경우 어느 높이의 아치부가 있으므로 비스듬한 윗 방향에의 비석은 이것으로 차단된다. 따라서 일반적으로 최대장약량을 사용하는 심빼기 발파 높이 h 에서 거의 수평방향에의 비석을 최대비산거리로서 고려하는 것이 타당하다. 따라서 수평거리 L 은 다음 식으로 주어진다.

$$L = V_o \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.19)$$

A.Persson은 25mm 천공경의 단발 Bench 발파에 의한 비석을 고속도 카메라로 관찰을 하고 약량과 암편의 최대비산거리를 그림 1.16과 같이 제시하고 있다.

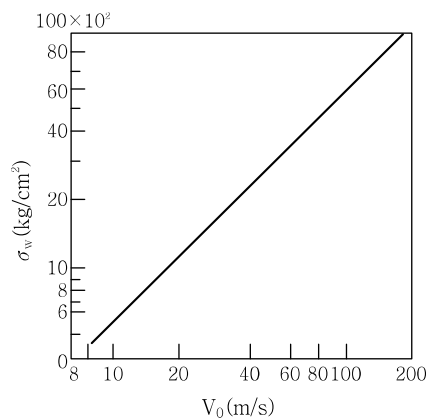


그림 1.16 Bench 발파에서의 장약량과 최대비산거리

이 경우 0.2kg/m^3 의 비장약량이 한계이며, 이 이하의 장약량이라면 정상적인 발파의 경우 거의 비석은 발생되지 않는다. 이 그래프로부터 판단하면 다음 식으로 제시된다.

$$L = 143q - 28 \quad (1.20)$$

여기서, L : 최대비산거리(m), q : 비 장약량(kg/m^3)

(단 $0.9 \geq q \geq 0.2$ 범위의 Data)

또한 V-cut의 경우 비석의 실험식으로서 Dupont社는 다음 식을 제시하고 있다.

$$V = 34(LD)^{-0.5} \quad (1.21)$$

여기서, V : 최대 비산속도(m/s)

LD : 폭약 단위중량 당의 채석중량(t/kg)

한편, 스웨덴의 SUEDEFO의 연구에 의하면 비석의 최대 비산거리는 발파공 직경과 함수 관계이다.

$$L_{\max} = 260 \left(\frac{d}{25} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1.22)$$

L_{\max} : m d : mm

1.3.3 발파에 의한 비석대책

발파에 의한 비석의 발생을 방지 및 피해를 감소시키기 위한 기본대책으로는 다음과 같은 대책이 필요하다 하겠다.

비석의 발생방지와 피해감소를 위한 기본대책으로서는 저항선, 천공방향을 보안물건 방향에 취하지 말아야 하며, 과장약을 피하고 약간 약장약을 취하며, 공발이 되지 않도록 전 색물을 충분히 해야 할 것이며, 천공 오차를 극히 작게 해야 하고, 장약공을 충분히 청소를 한 후 소정의 위치에 장약이 되어야 하며, 전폭약의 Cut-off가 발생하지 않도록 천공 배치 및 전폭약의 위치에 주의해야 하며, Blasting Mat와 같은 직접 방호를 할 경우는 순발이나 MS 단발로 하는 것이 좋다.

간격이 긴 단발 발파를 하면 초기 발파로 Cover가 날아가서 후단에서의 비석이 나오는 경우가 있다.

비석 발생을 완전히 억제하기 위해서는 방호를 할 수 밖에는 없다. 암석의 자유면 또는 비석을 방지하고 싶은 방향 쪽의 암반을 직접 덮는 Blasting Mat가 가장 유효하다. 무거운 쪽이 억제효과가 있지만 작업 중 배선을 손상시키지 않도록 하는 것도 중요하다. 또한 Wire

Rope로 만든 방호 Cover나 금속부가 있는 Cover로서는 불발 가능성이 있으므로 결선부에 그들이 접촉하지 않도록 해야 한다.

1.4 발파에 의한 분진

국내의 대기환경보전법 시행규칙 제 9조에 의하면 건설공사장에서 발생하는 먼지는 120gm/m^3 이하로 규정되어 있으므로 굴착공사 진행 중에 이러한 기준이 만족될 수 있는 조치를 취하여야 한다. 또한 발파에 의한 발생하는 분진은 95% 이상이 $5\mu\text{m}$ 이하로 미세하기에 사람의 건강에 악영향을 줌과 동시에 시계를 방해하는 특성을 가지며 여타의 공해들과는 달리 드러나는 피해가 적은 것으로 평가되는 경우가 많다 하겠다.

발파작업장에서의 분진은 발파자체로 발생하는 경우도 있지만 사업장등에서 사용되는 장비 및 기계기구의 사용에 의해서도 발생되고 있다.

1.4.1 분진저감 대책

분진의 발생량과 관련 있는 흥미로운 사실은 폭약의 사용량과 비례관계에 있다는 것이다. 발파작업에 있어서 폭약의 사용량이 늘어날수록 분진이 증가됨을 감안하여야 하지만 효과적인 발파작업을 수행하기 위하여 분진의 예상 발생량을 설계 시 고려되지 않는 실정이다.

분진저감 기술과 대책은 다음 표 1.11과 같다.

표 1.11 분진저감의 대책

공법	공법의 설명
분무법	고압분무로 미세한 수적을 만들어 분진에 충돌시켜 부유하고 있는 미세한 분진을 침강시키는 방법
커버설치법	발파시 발파공에 젖은 가마니들을 덮어서 적절한 방지시설을 설치한 상태에서 발파를 실시하는 방법
살수법	분진 발생을 억제하는 측면에서 직접 발생 부분에 수평 살수식으로 물을 뿌려 준다.
간접대책	방진시트나 분진 차단막 등의 방진벽을 설치한다.

1.5 소음 및 대책

소음은 건강에 미치는 장기적인 영향 이외에도 당장 느끼는 생활상의 불편 때문에 가장 직접적으로 감지되는 감각 공해 문제 중의 하나로 일반적으로 “바람직하지 못한 음”을 총칭하며 소음이라 정의하고 있는 바와 같이 주관적인 관점의 판단이 상당히 연관되어 있다.

현행 소음, 진동 규제법에서는 “소음이라 함은 기계, 기구, 시설 기타 물체의 사용으로 인하여 발생하는 강한 소리”라고 정의하고 있다.

오늘날 소음 공해는 산업혁명이 일어나고 난 뒤부터 시작되어 20세기 중반부터 선진 공업 국가들을 중심으로 사회문제화 되었다. 우리나라는 60년대 이후 급속적인 공업화로 인해 옛날에는 상상도 하지 못했던 공장 소음, 교통 소음, 건설 소음, 생활 소음 등이 발생하여 많은 피해가 발생하였으며, 이에 대한 민원도 증가되어 공해 진정건수 중에서 가장 많은 부분을 차지하게 되었다. 이에 대처하기 위하여 우리나라도 환경보전법상 소음에 대한 규정을 계속 추가 강화하고 있으며 소음 방지에 대한 계획을 수립, 추진해 나가고 있다.

1.5.1 음파

음파의 탄성파로 진동체 및 공기의 교란에 의해 발생하고 공기와 같은 매질을 통하여 전파된다. 탄성파의 전파속도는 그 매질의 탄성 및 밀도의 두 가지 특성에 따라 변한다. 고체 및 액체 매질을 통하여 음파의 전파속도는 다음과 같다.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.23)$$

여기서, C : 전파속도(m/sec)

E : 영률(N/m^2)

ρ : 매질의 밀도(kg/m^3)

수중에서의 전파속도는 1,410m/s, 강철 중에서는 5,000m/s, 납 중에서는 1,200m/s이다.

음파가 공기 중을 통과할 경우 전파속도는 공기온도에 관계가 있다.

$$C = 20 \sqrt{K} = \sqrt{^{\circ}C + 273} \quad (1.24)$$

여기서, K : 절대온도

$^{\circ}C$: 섭씨온도

실온 $22^{\circ}C$ 중에서 공기 중을 통과하는 전파속도는 약 344m/s이다. 전파속도 C 와 주파수 f 및 파장 λ 와의 관계는 다음과 같다.

$$C = \lambda \cdot f \quad (1.25)$$

음파가 장애물 없이 공기 중을 전파할 때의 파를 자유진행파라 하고 음파가 표면에 부딪히면 그 경로가 바뀌게 된다.

반사법칙은 그림 1.17에서와 같이 음의 반사(Deflection)는 음파가 반사체에 어떤 각도로 입사되느냐에 따라 변화한다. 여기서 음파의 방향을 파선(Wave Ray)이라 하며 입사각은 θ_1 , 반사각은 θ_r , 굴절각은 θ_2 이다.

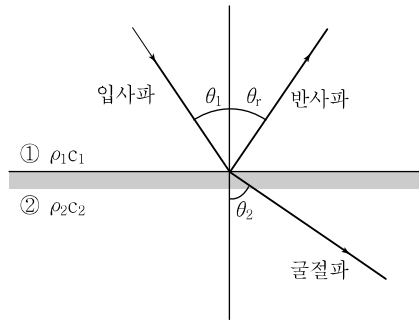


그림 1.17 반사 및 굴절

입사파의 파장에 비해 경계면이 아주 넓으면 회절현상은 일어나지 않고 소리가 잘 반사된다. 또한 경계면이 굴곡이 파장에 비해 작으면 가시광선이 거울에서 반사하는 것과 같이 정반사한다. 역으로 굴곡이 파장보다 크면 난반사하고 소리는 확산한다.

그림 1.17에서 ①의 매질과 ②의 매질의 밀도를 ρ_1, ρ_2 , 음의 속도를 C_1, C_2 이라하면 $\theta_1 = \theta_r$ 일 때 반사율 α_r 은 다음과 같다.

$$\alpha_r = \left(\frac{\rho_1 C_1 \cdot \cos \theta_2 - \rho_2 C_2 \cdot \cos \theta_1}{\rho_1 C_1 \cdot \cos \theta_2 + \rho_2 C_2 \cdot \cos \theta_1} \right)^2 \quad (1.26)$$

$\theta_1 = 0$ 일 때 직각입사에서는

$$\alpha_{ro} = \frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (1.27)$$

이다.

여기서 $\rho_1 C_1$ 은 입사측 매질의 임피던스이고, $\rho_2 C_2$ 는 경계면에서 다른 매질의 임피던스이다.

이 두 매질의 관계에서 $\rho_1 C_1 \gg \rho_2 C_2$ 또는 $\rho_1 C_1 \ll \rho_2 C_2$ 인 관계를 가지면 $\alpha_r \approx 1$ 이 되며 음파는 경계면에서 완전 반사한다. 공기는 $\rho_1 C_1 = 413 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{S}$ 인데 비하여 물의 경우는

$\rho_2 C_2 = 1.43 \times 10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 강철의 경우는 $\rho_2 C_2 = 4.8 \times 10^7 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 이므로 반사율은 99.9% 이상임을 알 수 있다.

하나의 매질 속을 전파하던 음파가 다른 매질과의 경계면에 도달하게 되면 일부는 반사하고 나머지 부분은 투과하여 제2의 매질로 들어가 진행방향을 바꾸어 투과한다. 굴절파(Refraction Wave)의 속도는

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (1.28)$$

의 관계가 있고 경계면에서 반사하지 않는 음파는 제2의 매질 속을 지나며, 수직투과인 경우 투과율 α_t (투과파의 세기/입사파의 세기)는 경계면에서 흡수하지 않는다는 가정 하에서 다음식이 성립한다.

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r = \frac{4\rho_1 C_1 \cdot \rho_2 C_2}{(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2} \quad (1.29)$$

투과율 α_t 를 dB로 표시하면 다음과 같은 관계식이 성립되다.

$$T \cdot L = 10 \log \left(\frac{1}{\alpha_t} \right) = -10 \log \alpha_t (\text{dB}) \quad (1.30)$$

여기서 $T \cdot L$ 은 Transmission Loss의 약자이며 투과손실 또는 투과손실률이라 부른다. 예를 들어 음파가 공기 중에서 콘크리트 벽면으로 투과하고 있을 때 투과율 α_t 를 구해보면 콘크리트의 비중을 2.5, 음속을 $4,000 \text{m/s}$ 라 하면 $\rho_2 C_2 = 1 \times 10^7$ 이 되고, $\rho_1 C_1 = 413$ 이다. 이 값으로 α_t 를 구하면 0.000165가 된다. 즉, 입사음에 대하여 약 만분의 1.65만이 투과된 것이 되며, 약 37.83dB 정도의 에너지가 감소된다.

또 공기의 고유음향 임피던스가 섭씨 20℃에서 $413 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 일 때 공기 중에서 물속으로 소리가 수직 투과할 경우의 투과손실을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{투과율 } \alpha_t &= \frac{4\rho_1 C_1 \cdot \rho_2 C_2}{(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2} = \frac{4 \times 413 \times 1.43 \times 10^6}{(413 + 1.43 \times 10^6)^2} \\ &= 1.15 \times 10^{-3} \\ \text{투과손실 } T \cdot L &= 10 \log \left(\frac{1}{\alpha_t} \right) = -10 \log (1.15 \times 10^{-3}) \approx 29.4 (\text{dB}) \end{aligned}$$

음파가 장애물을 통과하여 주위로 전파하는 능력을 회절(Diffraction)이라 한다. 회절의 정도는 음의 파장과 장애물의 크기에 따라 변화한다. 장애물의 크기에 비해 파장이 길수록

구멍이 작을수록 회절이 크다. 소리의 주파수는 파장에 반비례하므로 낮은 주파수의 음파는 고음에 비하여 회절하기 쉽다.

그림 1.18은 완전 반사 벽체의 틈 사이에서 형성되는 평면파의 두 경우를 보여주고 있다. 그림 1.18(a)는 파장에 비해 틈이 적은 경우로서 회절파는 틈 사이에 점음원이 있어 저감되는 음 에너지처럼 전개되고, 이때의 에너지는 대부분이 반사파에 포함된다. 그러나 그림 1.18(b)는 큰 틈 사이로 회절파가 음의 세기의 손실 없이 투과되고 있음을 보여주고 있다.

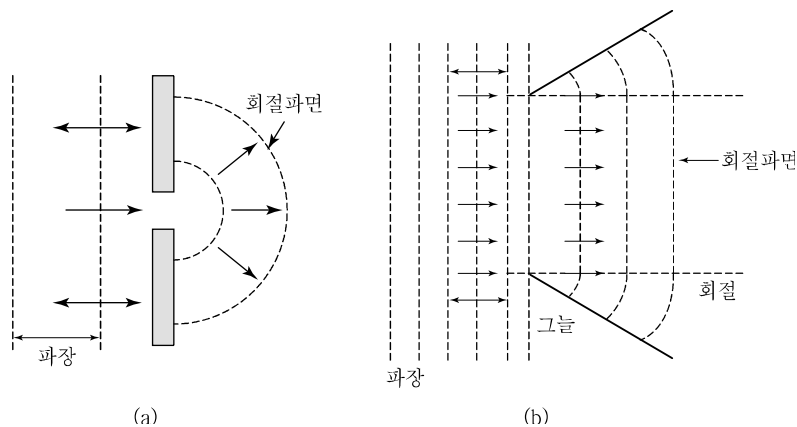


그림 1.18 틈 사이의 평면파 회절

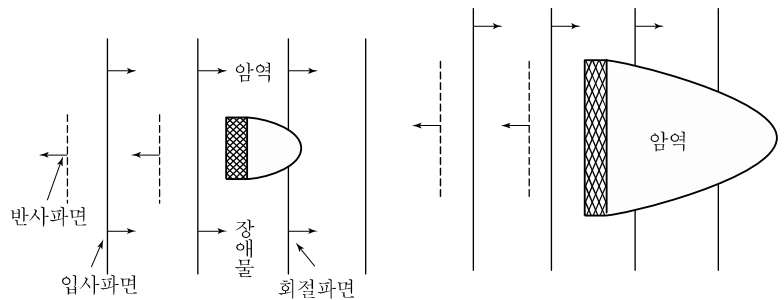


그림 1.19 장애물에 의한 평면파 회절

그림 1.19은 크고 작은 장애물에 평면파가 마주칠 때의 각각의 회절현상을 보여주고 있으며, 빗금친 부분은 각 장애물 뒤쪽으로 전개되는 암역(Shadow Zones)을 보인 것이다. 이러한 암역은 동일 길이의 파장에 대해서도 장애물의 크기에 따라 변화하며 음파가 전파되지 않는 영역임을 보여준다.

음파가 매질을 통과할 때 기온과 풍속의 변화로 굴절한다. 그림 1.20(a)의 경우는 바람이 없고 온도가 일정한 상태에서의 음속은 고도에 따라 일정하게 분포함을 나타내고 있다.

주간에는 햇빛에 의해 지표면이 가열되어 지표면의 온도가 상승하므로 그에 접하는 공기도 온도가 오르며 가볍게 되어 상승하고 대류가 생긴다. 상승기류는 단열적으로 팽창하여 온도가 낮아지기 때문에 일반적으로 기온은 상공이 낮고 아래쪽이 높게 되어 온도경사가 생기게 되며 이것을 기상학에서는 Lapse라 부른다.

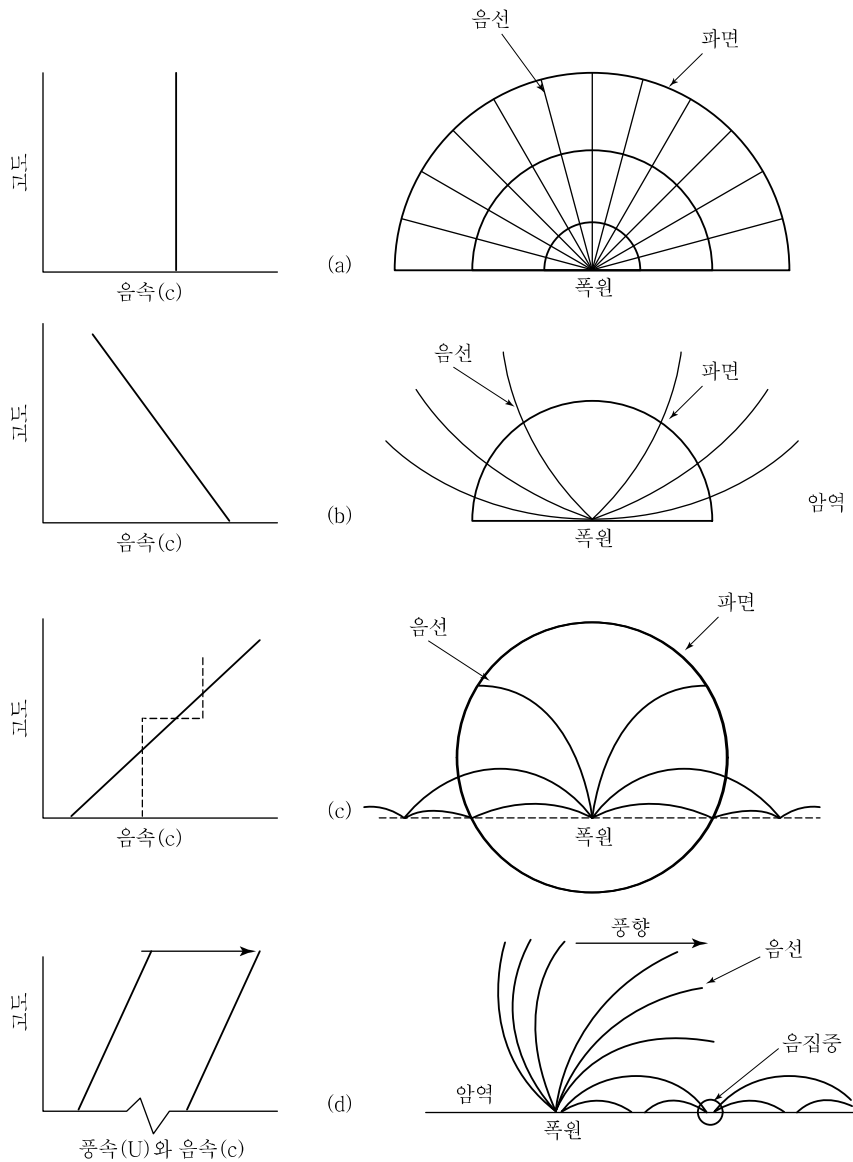


그림 1.20 음파면 전파에 미치는 기온과 풍속의 영향

야간에는 지표면에서 야간복사에 의해 열을 빼앗기어 냉각되기 때문에 그에 접하는 공기의 온도가 하강하여 무겁게 되어 대류가 생기지 않아 바람이 약할 때는 기온은 상공이 높고 아래쪽이 낮은 온도경사가 생기며 이것을 기온의 역전(Inversion)이라 부른다.

음파의 전파방향을 표시하는 것을 음선(Sound Zones)이라 하는데 온도와 풍향에 따라 굴절한다. 주간(日間)의 경우 음선은 그림 1.20(b)에서 보는 바와 같이 상향으로 굴절하며 어느 거리에서는 암역(Shadow Zones)이 생겨 음이 전파하지 않는다. 이 구역은 회절과 산란에 의해 음이 어느 정도 전해지나 그 감쇠는 대단히 크다. 야간에는 음선이 그림 1.20(c)와 같이 하향 굴절하여 주간과는 반대로 아무 곳에도 암역이 생기지 않으므로 멀리까지 소리가 전달된다. 이와 같이 온도구배에도 음의 굴절에 영향을 미친다. 즉, 음의 전파속도는 기온이 높을수록 빠르게 된다.

바람이 불 때, 지표면 가까이는 점성저항 때문에 풍속이 낮고 상공으로 갈수록 풍속이 높은 것이 보통이다. 음의 전파속도는 풍속과 벡터합이 되므로 그림 1.20(d)와 같이 바람이 불어오는 방향의 음선은 상향굴절하고 바람이 불어가는 쪽에서는 음선이 하향 굴절한다. 따라서 바람이 불어오는 방향에는 음이 전파하지 않는 암역이 생기나 바람이 불어가는 쪽에서는 암역이 생기지 않으므로 먼 곳까지도 잘 전달된다. 특히 바람이 불어가는 방향에 음의 집중 현상이 생기는 곳도 발생하게 된다. 이와 같이 바람구배(Wind Gradient)도 역시 굴절에 영향을 미치게 된다.

소리가 지면에 연(沿)하여 전해지는 경우는 지표면의 음향 특성이나 요철의 영향을 받는다. 지표면상에서 음을 방사할 때 지표면이 반사성일 때와 흡음성일 때 큰 차이가 있다. 특히 흡음성 지표면상에서는 지표면 근방에서의 감쇠가 현저하다. 첫 눈이 쌓인 지표면은 흡음성이 있으므로 지표면에 가까운 전파음은 감쇠가 크지만 차츰 굳어져 흡음성이 약하게 된다. 비가 올 때는 빗방울의 충격에 의한 발생음이 생기고 암소음이 증대되는 데에 주의할 필요가 있다.

1.5.2 음파의 분석

먼저 데시벨(decibel : dB)의 정의에 대해 언급하면 deci는 1/10이라는 의미이고, Bel은 두 양의 비의 단위이다. 즉 어느 한 개의 기준량 A_0 에 대한 상대량 A 의 데시벨의 정의는

$$dB = 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (1.31)$$

데시벨은 음의 세기레벨(Sound Intensity Level), 음압레벨(Sound Pressure Level) 및 음향파워레벨(Sound Power Level)과 같은 소음공해에 사용된다.

(1) 음의 세기 레벨(Sound Intensity Level)

음의 세기라는 것은 음파의 진행방향에 직각인 단위면적(1m^2)을 1초간에 통과하는 에너지의 양이다. 음의 세기를 I 라고 하면

$$I = \rho C V^2 = \frac{P^2}{\rho C} = P \cdot V (w/m^2) \quad (1.32)$$

의 관계가 있다. 여기서 P 및 V 는 음압 및 입자속도로서 그 실효치 값을 나타내고 있다.

P 를 음압의 실효치 또는 단순히 음압이라고 하며, 순음의 경우 음압진폭 $= \sqrt{2} P$ 관계가 있다.

음의 세기레벨 L_I 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) (\text{dB}) \quad (1.33)$$

여기서, I 는 음의 세기(w/m^2)이고 I_0 는 기준음의 세기($10^{-12} w/m^2$)를 나타내고 있다.

예를 들어 공기 중에서 피크 입자속도가 $5.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 일 때 음의 세기 레벨을 구해 보자. 이 때 공기 밀도 및 음속은 1.20kg/m^3 및 340m/s 라고 한다.

$$\text{속도 실효치 } (V) = \frac{V_{\text{피크}}}{\sqrt{2}} = 0.707 \times 5.0 \times 10^{-3} (\text{m/s}) = 3.535 \times 10^{-3} (\text{m/s})$$

가 되므로 식 (1.32)에서

$$\begin{aligned} \text{음의 세기 실효치 } (I) &= \rho C V^2 = 1.2 \times 340 \times (3.535 \times 10^{-3})^2 \\ &= 5.1 \times 10^{-3} (w/m^2) \end{aligned}$$

로 된다. 따라서 음의 세기 레벨은

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \left(\frac{5.1 \times 10^{-3}}{10^{-12}} \right) \approx 97 (\text{dB}) \text{ 이 된다.}$$

점음원의 경우 음의 세기는 거리에 따라 약해진다. 중심으로부터 r 만큼 이격된 거리의 구표면적 $4\pi r^2$ 로 퍼져나갈 때 음원의 파워를 W 라고 하면 r 인 지점의 음의 세기는 다음과 같다.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} (w/m^2) \quad (1.34)$$

이때 반구면일 경우 분모 $4\pi r^2$ 은 $2\pi r^2$ 으로 된다.

예로써, 출력 약 $0.3w$ 의 작은 음원이 단단하고 평탄한 지상에 있는 경우 음원으로부터 10m 이격된 지점에서의 음의 세기는

$$I = \frac{W}{2\pi r^2} = \frac{0.3}{2\pi \times 10^2} = 0.00048 (w/m^2) \text{이다.}$$

2) 음압레벨

음의 세기레벨과 음압레벨은 실제 의미상 같은 것으로 근래에는 주로 음압레벨로서 사용하는 경우가 많으며 음압레벨의 표기 기호는 SPL 또는 L_p 이다. 기준음의 세기는 $I_0 = 10^{-12} (w/m^2)$ 를 취하고 있다. 이 세기는 대체로 귀의 감각으로 1,000Hz 부근의 최소 가청치와 거의 비슷한 값으로서 음압이 실효치는

$$P_0 = \sqrt{\rho C I_0} = \sqrt{400 \times 10^{-12}} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 (Pa)$$

가 되는데 이 값을 음압의 기준치로 한다.

음압의 제곱은 음의 세기에 비례하므로 음압레벨 L_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \text{ (dB)} \quad (1.35)$$

여기서, P : 음압의 실효치

P_0 : 기준음압의 실효치 ($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 2 \times 10^{-5} P_a$)

표 1.12 음압과 음압레벨과의 관계

음 압(Pa)	음압레벨(dB)	음 원
6.32	110	오르막길 열차 근처
2.00	100	제병공장
0.632	90	완전한 심포니
0.200	80	자동차 내
0.0632	70	도시도로의 모퉁이
0.0200	60	대화
0.00632	50	일반사무실
0.00200	40	거실
0.000632	30	야간침실

표 1.12은 일상생활에 밀접한 음들의 음압 크기와 음압레벨의 관계를 나타내고 있다. 표에서 음압이 10배수로 증가할 때마다 음압레벨은 20dB씩 증가함을 알 수 있다. 또 음압이 2배로 증가하면 음압레벨은 6dB 증가하고, 음압이 1/2로 되면 그 레벨은 6dB 감소한다.

음의세기가 10배수 증가할 때마다 음의 세기레벨은 10dB씩 증가한다. 또 음의 세기가 2배로 증가하면 음의 세기레벨은 3dB 증가하고, 세기가 1/2로 되면 그 레벨은 3dB 감소한다.

1.5.3 소음의 전파

(1) 지향성(Directivity)

Directivity은 음원에서 방사되는 음의 강도 또는 마이크로폰의 감도가 방향에 변화하는 상태를 말한다.

음원의 Directivity을 수치로 나타내기 위하여 전음향 출력이 같은 무지향성의 음원으로 바뀌놓았을 때의 각 방향의 강도를 기준으로 하여 각 방향의 강도를 비로 나타낸 것을 지향계수(Directivity Factor)라 하면 보통 Q 로 나타낸다. Directivity의 측정은 점음원으로 간주될 정도로 음원에서 충분한 거리를 취해야 한다. Directivity은 음원의 형태, 크기와 주파수에 의해서 변화하므로 복잡하지만 소음대책상 소음원의 Directivity을 파악하고, 그것을 이용하는 것은 중요한 수단이 될 수 있다.

지향지수(指向指數 : Directivity Index)는 Directivity이 큰 경우 특정방향의 음압레벨 SPL_i 와 평균 음압레벨 SPL_a 와의 차이를 지향지수로 정의한다.

$$\text{지향지수 } (D.I) = SPL_i - SPL_a = 10 \log Q (dB) \quad (1.36)$$

자유공간에 있는 지향성 점음원의 특정방향이 임의의 거리 r 에서 음압레벨이 SPL_i 라면 음향파워레벨 PWL 은

① 구면파 전파의 경우

$$PWL = SPL_i + 20 \log r + 11 - D.I \quad (1.37)$$

② 반구면파 전파의 경우

$$PWL = SPL_i + 20 \log r + 8 - D.I \quad (1.38)$$

로 된다.

무지향 음원의 경우일지라도 음원이 놓인 위치에 따라 지향성은 달라진다.

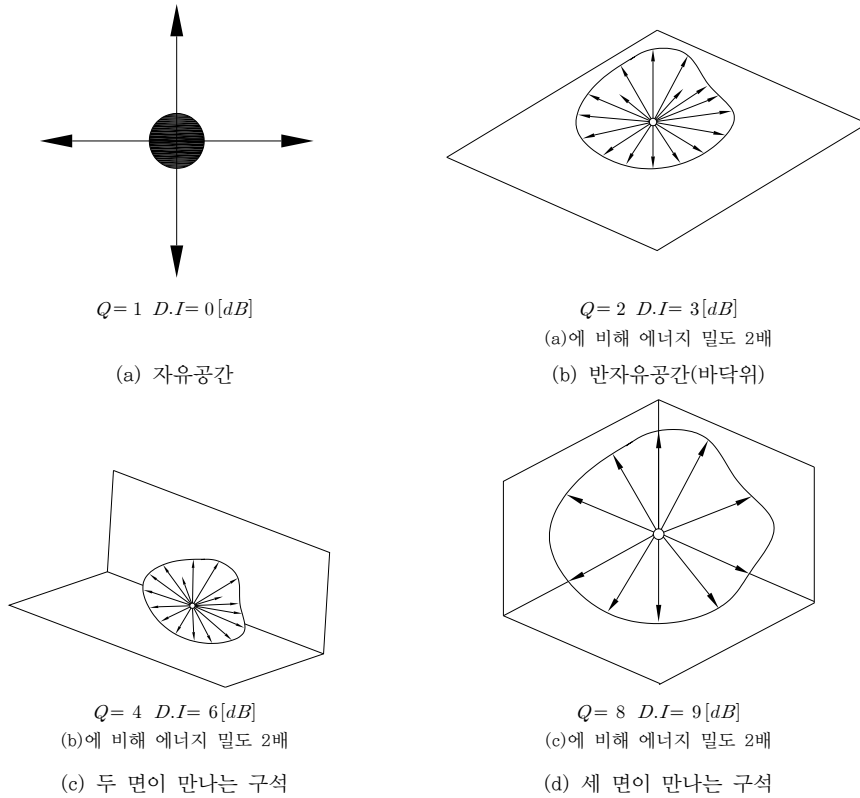


그림 1.21 음원의 위치별 지향성표 202

(2) 점음원

음원은 보통 어떤 크기를 가지고 있으나 그 치수에 비해서 충분히 이격된 지점에서는 1개의 점으로 볼 수가 있다. 점음원에서 나오는 음파의 파면(Wave Front)은 구면상으로 펼쳐 지므로 구면파라고도 한다. 그림 1.22의 구면파에서 거리가 r 인 점의 음의 세기 I 는

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} (w/m^2) \quad (1.39)$$

로 된다. 이것은 음의 세기가 거리의 2승에 반비례하여 감소되는 것을 의미한다.

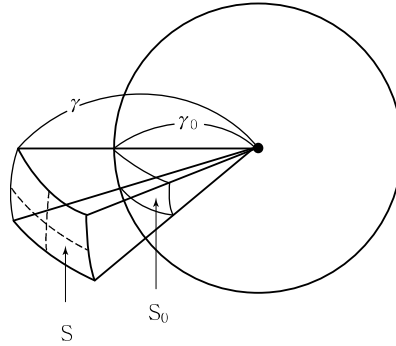


그림 1.22 점음원

또한 측정거리 r_o 에서 음압레벨을 L_o 라고 할 때, 거리 r 에서의 음압레벨 L_p 는 다음과 같다.

$$L_p = L_o - 20 \log \frac{r}{r_o} \quad (1.40)$$

구면파 전파의 경우

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \quad (1.41)$$

반구면파의 경우

$$L_p = L_w - 20 \log r - 8 \quad (1.42)$$

(3) 선음원

선음원은 점음원의 집합이라 생각할 수 있다. 즉, 자동차 도로와 같이 소음원이 다수 연속하여 이어지는 경우이다. 음파는 그 선음원을 축으로 원통상으로 전파되므로 원통이라고도 한다. 음의 간섭 등의 현상이 무시되고 그 에너지만이 가산되는 것으로 가정하여 단위길이당 음향출력을 W 로 하면 거리 r 인 지점의 음의 세기는 반경 r 의 원통면을 고려하여

$$I = \frac{W}{2\pi r} \quad (1.43)$$

가 되어 거리의 1승에 반비례한다.

그림 1.23에서 거리 r_o 에서 음압레벨이 L_o 일 때 거리 r 에서의 음압레벨 L_p 는 선음원의 길이 l 이 거리 r 에 비해 아주 큰 ($r < \frac{l}{\pi}$) 경우에는

$$L_p = L_0 - 10 \log \frac{r}{r_0} \quad (1.44)$$

이다. 즉, 거리가 2배로 되면 3dB씩 감소한다.

또, $r > \frac{l}{\pi}$ 인 경우에는

$$L_p = L_0 - 20 \log \frac{\pi r}{l} - 10 \log \frac{l}{\pi r_0} \quad (1.45)$$

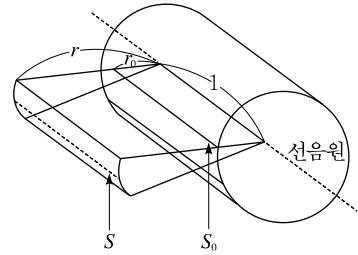


그림 1.23 선음원

을 실용적으로 사용한다.

(1.40)식과 (1.44)식을 그림으로 표시하면 그림 1.24와 같다.

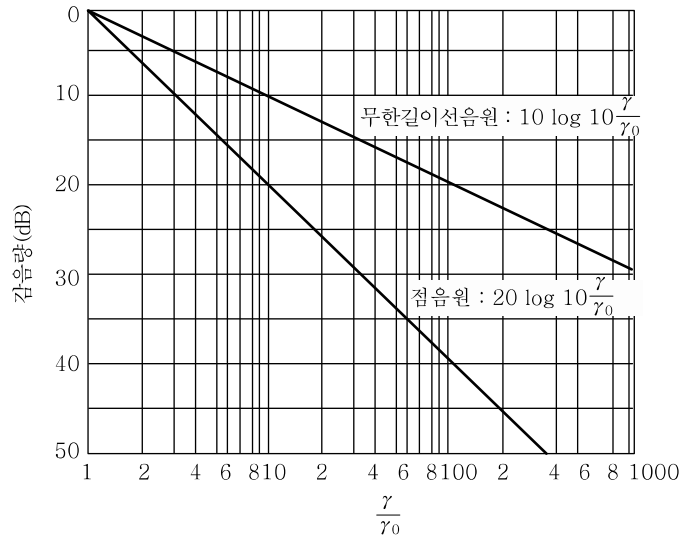


그림 1.24 거리에 비해 따른 감음도

단위 길이당 파워레벨을 L_w 라 하면 음압레벨 L_p 는

① 구면파 전파의 경우

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \log 2\pi r \\ &= L_w - 10 \log r - 8 \end{aligned} \quad (1.46)$$

② 반구면파의 전파인 경우

$$L_p = L_w - 10 \log \pi r$$

$$= L_w - 10\log r - 5 \quad (1.47)$$

③ $\frac{1}{4}$ 구면파 전파의 경우

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10\log \frac{\pi r}{2} \\ &= L_w - 10\log r - 1.96 \end{aligned} \quad (1.48)$$

(4) 면음원

면음원이란 벽을 투과하여 소음이 생기는 경우처럼 음원이 넓게 펼쳐진 경우를 말하며, 이상적으로 점음원이 무수하게 연속적으로 분포하는 것으로 생각된다.

짧은 면이 a 이고, 긴 변이 b 인 장방형 음원으로부터 거리 r 이 되는 지점의 음압레벨은 면에 가까운 거리 r_0 지점의 음압레벨을 L_0 (dB)라고 하면

$r < a/3$ 일 때

$$L_p = L_0 \quad (1.49)$$

$a/3 < r < b/3$ 일 때

$$L_p = L_0 - 10\log \frac{3r}{a} \quad (1.50)$$

$r > b/3$ 일 때

$$L_p = L_0 - 20\log \frac{3r}{b} - 10\log \frac{b}{a} \quad (1.51)$$

로 나타낼 수 있다.

이들의 식을 그림으로 표시하면 그림 1.25와 같다.

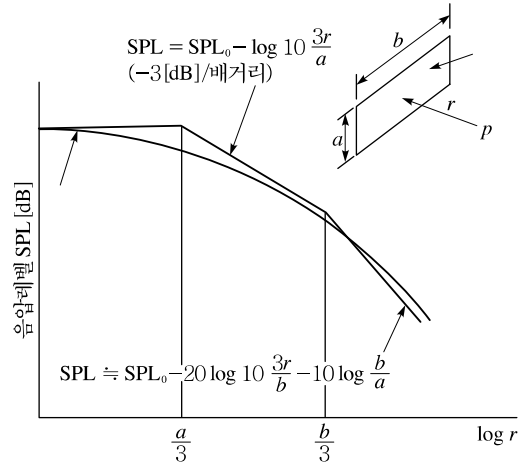


그림 1.25 직사각형 면음원의 거리 감쇠

(5) dB의 계산

몇 개의 음원에서 발생하는 각각의 소리를 임의의 지점에서 들었을 때 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 의 소리의 세기를 나타낸다고 하자. 이 때 임의의 점에서의 소리 세기의 총합은 $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots, I_n$ 이 되고, 이 소리의 세기 레벨 L_i 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 10 \log \frac{I_1}{I_0} \text{에서 } I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} \\
 L_2 &= 10 \log \frac{I_2}{I_0} \text{에서 } I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} \\
 L_3 &= 10 \log \frac{I_3}{I_0} \text{에서 } I_3 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_3}{10}} \\
 &\vdots \\
 L_n &= 10 \log \frac{I_n}{I_0} \text{에서 } I_n = I_0 \cdot 10^{\frac{L_n}{10}}
 \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \\
 &= I_0 \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right]
 \end{aligned} \tag{1.52}$$

이것을 dB로 나타내면

$$\begin{aligned} L &= 10 \log \frac{I}{I_0} \\ &= 10 \log \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right] \end{aligned} \quad (1.53)$$

가 된다. 그러므로 서로 다른 소리의 세기레벨을 갖는 소음이 동시에 발생할 때 소음원으로 부터 이격된 임의의 지점에서 소음을 계산할 때 사용한다.

또, 동일 소리의 세기레벨(L_i)을 갖는 소음이 n 개 있으면 다음과 같이 된다.

$$L = 10 \log(n) \left[10^{\frac{L_i}{10}} \right] = L_i + 10 \log n \quad (1.54)$$

1.5.4 소음이 인체 및 가축에 미치는 영향

소리의 물리적인 강약은 음압에 의해 정해지지만 인간이 어떤 소리를 들었을 때 감각적으로 느껴지는 강약은 음압뿐만 아니라 소리의 주파수에 따라 서로 달라진다.

주파수가 커지면 높은 음성으로 느껴지게 된다. 인간의 귀가 들을 수 있는 음압레벨은 0~120dB 정도이고 그 이상이 되면 통증을 느끼게 된다. 주파수로는 건강한 20세 전후 남녀의 경우 20~20,000Hz의 공기의 진동을 느낄 수 있다. 청감은 4,000Hz 부근에서 감도가 좋으며, 100Hz 이하의 주파수에서는 급속히 청감이 나빠진다. 음압을 차츰 작게 하여 겨우 들을 수 있는 최소 가청치는 1,000Hz 순음에서 음압이 0.002(dyne/cm²)이다.

음의 크기를 수치화하는 방법의 하나는 1kHz의 순음을 비교 대조의 기준으로 삼는 방법이다. 어떤 음과 1kHz의 순음을 듣고 비교해 크기가 같다고 판단될 때 전자의 크기를 후자의 음압레벨로서 표시하는 것을 Dam의 크기레벨(Loudness Level)이라 하고 단위로서 phon이라고 한다.

귀의 감도는 항상 일정한 것이 아니며 그 전에 들은 음에 의해서 변화한다. 큰 음을 들은 직후는 감도가 저하되고 시간의 경과와 함께 회복된다. 즉, 큰 음을 들으면 일시적인 난청을 발생시키는데, 이것을 소음유발 일시역변위(Noise Induced Temporary Threshold Shift : NITTS)라고 한다. 또 영구적으로 회복할 수 없는 청력 손실을 소음유발 영구역변위(Noise Induced Permanent Threshold Shift : NIPPTS)이라고 한다.

음을 감지하는 능력을 청력이라 하며, 청력레벨은 개인차가 커서 10~15dB정도의 청력레벨이 있으면 정상이라고 간주된다. 청력손실은 어떤 주파수에 대해 정상귀의 최소가청치와

피검자와의 최소가청치와의 차를 dB로 나타낸 것으로 500~2,000Hz 범위에서 청력손실이 25dB 이상이 되면 난청이 됨을 의미한다.

$$\text{평균청력손실(dB)} = \frac{a + 2b + c}{4} \quad (1.55)$$

여기서, a : 옥타브밴드 중심주파수 500Hz의 청력손실(dB)

b : 옥타브밴드 중심주파수 1,000Hz의 청력손실(dB)

c : 옥타브밴드 중심주파수 2,000Hz의 청력손실(dB)

소음은 동물에게도 크고 작은 영향을 준다. 모르모트, 토끼, 친칠라, 개, 고양이들은 소음 환경을 연구하는데 유용한 동물이다. 이들 동물을 장시간 낮은 소음레벨로 폭로시킨 다음에 상대적으로 단시간 높은 소음레벨에 폭로시킨 피시험체로 동물의 청감기능, 혈액의 화학적 성질 및 긴장반응 등을 조사한다.

표 1.13 청력손실과 음성청취

청력손실(dB)	음 성 청 취
20 이하	정상으로 들음
20~30	적은대화 또는 목소리는 듣기 어려움 보통 회화는 부자유스럽지 않음
30~40	1 대 1의 회화는 곤란하지 않지만 틀리게 들을 때가 많다. 3~5m 이상 떨어진 경우나 회의를 할 경우 보통 목소리는 청취가 곤란함
40~60	1m 거리에서 큰 소리는 듣지만 틀리게 들을 때가 많아 집단 회화시 청취곤란, 발성에도 영향이 나타난다.

특히 몸집이 큰 말, 소, 돼지 같은 대부분의 가축들은 소음에 잘 적응하는 것으로 보이나 가끔은 불특정의 큰 소음에 잘 적응하지 못한다.

표 1.14 건설소음과 가축피해 관계

소음 [dB]	축종	피 해 정 도		비 고
		0~5(%)	5~10(%)	
50~60	젖소	성장지연	유생산성 저하	
	돼지	유·사산, 자돈폐사, 산자수 감소		
	닭	이상란율 증가, 수정란율 저하	산란율 저하	
60~70	젖소		유·사산, 번식효율 저하, 성장지연, 폐사율 증가	유생산성 저하 (10~30%)
	한우	유·사산, 폐사율 증가	번식효율 저하, 성장지연	
	돼지		유·사산, 자돈압사, 성장지연, 번식효율 저하, 자돈압사	
	닭		폐사율 증가, 산란율 저하, 이상란율 증가, 수정란율 저하	
	개	유·사산, 자견폐사, 산자수 감소, 번식효율 저하	성장지연	
	사슴	유·사산, 수태율 저하, 폐사율 증가	성장지연, 녹용생산성 저하	
	곰	수태율 저하	유·사산, 성장지연, 질병이환율 증가	
	염소	쌍자율 감소, 수태율 저하	성장지연, 폐사율 증가	
70~80	젖소	5~10(%)	10~30(%)	
		폐사율 증가	유·사산, 성장지연, 번식효율 저하	
	한우	유·사산, 폐사율 증가	번식효율 저하, 성장지연	
	돼지	모든 폐사, 성장지연	유·사산, 자돈압사, 폐사, 산자수 감소, 번식효율 저하	
	닭		폐사율 증가, 이상란율 증가, 수정란율 저하, 성장지연, 산란율 저하	
	개	유·사산, 폐사율 증가, 번식효율 저하, 산자수 감소	성장지연	
	사슴	수태율 저하, 폐사율 증가	유·사산, 성장지연, 녹용 생산성 저하	
	곰	수태율 저하, 성장지연, 폐사율 증가	유·사산	산자수 감소 (0~5%)
	염소	쌍자율 감소, 폐사율 증가, 수태율 저하, 성장지연		

표 1.14 건설소음과 가축피해 관계(계속)

소음 [dB]	축종	피 해 정 도		비 고
		0~5(%)	5~10(%)	
80~90	젖소	10~30(%)	30~40(%)	유생산성 저하 (40% 이상)
		폐사율 증가	번식효율 저하, 성장지연, 유사산	
	한우	유사산, 폐사율 증가	번식효율 저하, 성장지연	
	돼지	유사산, 모돈폐사	자돈폐사, 번식효율 저하, 성 장지연, 산자수 감소	
	닭		폐사율 증가, 산란율 저하, 이 상란율 증가, 성장지연, 수정 란율 저하	
	개	유사산, 폐사율 증가, 산자수 감소, 번식효율 저하	성장지연	
	사슴	수태율 저하, 폐사율 증가	유사산, 성장지연, 녹용 생산 성 저하	
	곰	수태율 저하, 폐사율 증가	유사산, 성장지연	산자수 감소 (5~10%)
	염소	쌍자율 감소, 성장지연, 수태율 저하, 폐사율 증가		