

석회석 광산에서의 일반발파와 에어튜브(Air Tubes)발파 비교 연구

김용균, 이종식, 이신, 강대우¹⁾

A Study on the Comparison of Conventional Blasting vs. Air-Tubes Blasting in Limestone Quarry

Yong-Kyun Kim, Jong-Sik Lee, Shin Lee, Dae-Woo Kang

초 록. 본 연구는 일반건설현장에서와는 달리 천공경이 97mm Φ 이상이고 천공장이 21M이상인 상태에서 발파작업이 진행되고 있는 석회석 광산에서 기존의 발파공법과 Air tubes를 이용한 발파공법을 비교하여 기존의 발파로 인한 상부 대피를 감소시키고 폭약의 사용량을 줄이면서 진동 및 폭음을 최소화하여 보다 경제적인 작업수행을 하기 위해 연구하였다. 한편 에어층(Air deck)을 형성으로 인한 전색장의 길이 감소를 보완하기 위해 라바플러그(Rubber Plug)를 사용하므로 비석의 위험을 최소화 시키고 가스압이 암전체에 충분히 전달할 수 있도록 장치를 만들어 실험하였다. 그 결과 일반발파와 Air tubes를 이용한 발파방법을 비교하여 볼 때 Air tubes를 이용한 발파방법이 폭약을 약 15~30% 절감 할 수 있었으며, 또한 진동은 최대 50%정도의 감소와 폭음에서는 2~5dB정도로 감소되었다.

핵심어 : Air tubes, Air deck, 석회석 광산, Rubber Plug

1. 서론

최근 지하자원 개발을 위한 노천 채굴장, 채석장 등과 도로, 지하철, 건축 등의 토목 공사에 대한 개별적 발파 특성의 연구는 활발히 이루어지고 있다.

종래의 발파 방법은 공하부에 폭약이 집중될 뿐만 아니라, 전색의 길이가 너무 길어 폭약의 힘 즉 폭력이 파괴하고자 하는 자유면측으로의 암반에 끌고루 힘을 전달되지 않고, 파괴 작업에 있어서 하부 장약 집중되므로 인하여 진동을 크게 하고 피석을 발생시키는 단점을 갖고 있다. 외국의 경우에는 약 20년 전부터 Air Decking이란 방법으로 발파공 내 에어층을 형성시키기 위해 많은 방법이 연구되어 왔으나 그 형성방법이 현장에 적용시키는데 어려울 뿐만 아니라 공기를 단축시켜야 하는 발파 현장에 적용하는데 많은 불편한 방법으로 여겨졌다.

따라서 본 연구의 Air Tubes(이하 "에어튜브"라 한다)발파 방법은 기존 일반 발파와 터널 발파

에서 공내 하부에 집중된 폭약을 ANFO의 순폭도 성질을 이용하고 폭약이 폭발하는 순간에 자유면 쪽으로 폭약의 투사면적을 넓혀지도록 하고, 전색의 길이를 짧게 하여 폭발하는 순간에 폭약이 공내에서 분산효과가 발생하도록 하여 상부대피를 최소화하도록 하였으며 Rubber Plug로 보완하므로 가스압의 구축을 확실히 시킬 수 있도록 하였다.

그리고, 기존발파방법 특히 채석을 위한 대규모 석산(시멘트 광산 등)에서는 발파공 상부 전색길이의 증가로 대피의 발생이 많아 불필요한 2차 파쇄량 비용이 증가하므로 이 방법은 2차 파쇄로 인한 경제적 손실을 최소화시켜 채석의 경제적 이득을 얻고자 한다.

따라서, 본 연구는 충북 단양군 5양회 석회석 광산현장에서 실시한 발파작업에서 총 31회(일반발파:13회, Air Tubes:18회) 발파일반발파와 Air Tubes 발파를 실시하고 그들의 진동 및 폭음의 크기를 비교하여 경제성을 검토하였다.

2. 지질현황

2.1 연구대상 지역 지질현황

본 연구의 대상 지역인 충북 단양군 매포읍 매패

1) 동아대학교

접수일 : 2003년 4월 4일

포리는 캄브리아계 하부의 분포지와 거의 일치한다. 이들은 거의 전체가 석회질 암석으로 되어 있다. 대상지역의 지질도는 그림 1에 나타낸 바와 같다.

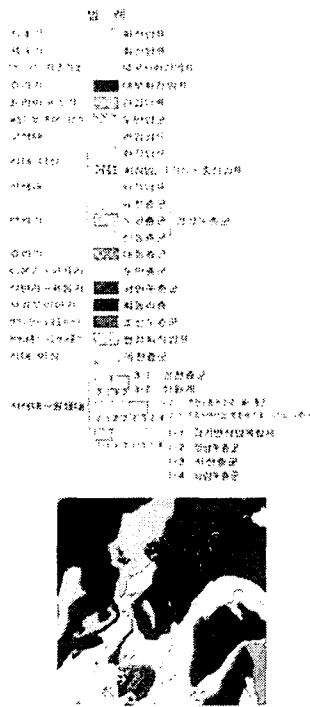


그림 1. 단양지역의 지질도

이 곳의 석회암은 그 성질에 따라 대체로 3대분할 수 있다. 즉 하부는 유백색의 석회암으로 되어 있고 중부는 그 풍화면에 특유한 모양을 보이는 층식석회암이 분포되어 있으나 상부에는 층식 석회암이 대단히 적다. 중부에는 사암 또는 규암층이 수층 협재되어 있으며, 사암 또는 규암 아래에는 두께 20~50m인 이회암과 자색 셰일이 있다. 상부는 회색 석회암으로 되어 있으며 일부는 고회질이다.

강원도의 하부 고생대층은, 화석에 의하면 화절층은 상부 캄브리아계에 속하는 것으로 보이며 동점규암은 캄브리아계의 최상부로 보인다. 두부골

셰일 중에서는 오오도비스기 초엽의 화석이 산출되며 적운산 셰일에서는 Diplograptus, Parabasilicus, Orthis, Rafinesquina가 발견된다. 이들 화석에 의하면 직운산 셰일은 중부 오오도비스의 하부에 속하는 지층이다.

평안남도 성천의 하부 고생대층은, 은산석회암 및 그 상위의 층은 모두 석회암 또는 석회질암석으로 되어 있고 그 두께는 약 900m이다. 초산통 최하부에는 두께 약 80m의 임촌점판암이 있으며 그 중에서는 캄브리아기 중엽의 화석이 많이 산출되므로 대석회암통과 양덕통을 나누는 데 좋은 기준이 된다. 만달통은 두께 300m에 달하는 석회암층으로서 오오도비스기 중엽을 가리키는 화석을 포함하며 홍점통에 의하여 부정합으로 덮여 있다.

2.1 석회암 (石灰岩 , limestone)

탄산칼슘을 주성분으로 하는 퇴적암의 총칭. 석회석이라고도 한다. 일반적으로 세립(細粒) 괴상의 무구조의 암석이다. 백색 또는 회색인데, 불순한 것은 암회색이나 흑색 등을 띤다. 초상(礁狀)이라 하는 산호초 같은 괴상 또는 돔상의 암체를 이루는 경우와 지층 사이에 끼워져 층상(層狀)을 이루는 경우가 있다. 육지로부터 공급되는 쇄설물(碎屑物)이 적고, 비교적 pH가 높은 곳에서, 탄산석회질의 껍데기를 분비하는 생물에 의하여 유기적으로 침전 고정되거나, 바닷물에서 직접적으로 무기적 화학작용에 의하여 침전하여 생성된 것으로 생각된다. 그러나 그 작용의 과정이나 대량 침전이 왜 이루어졌는지에 대해서는 확실히 알려져 있지 않다.

이 밖에 석회질 쇄설물 및 화석의 파편으로 된 것도 있으며, 입도(粒度)로 보아 석회질 루다이트(지름 2mm 이상), 석회질 아레나이트(1~2/16mm), 석회질 루타이트(1/16mm 이하)로 분류된다. 지질 시대 전반을 통하여 보면, 석회암은 오르도비스기(紀)에서 실루리아기까지, 석탄기에서 페름기 전기까지, 쥐라기에서 백악기에 걸쳐 잘 발달되어 있다. 화석은 유공층 석회조(石灰藻) 바다나리 산호 쌍패류(雙貝類) 등 탄산칼슘의 껍데기를 가진 것이

많아서 지질시대를 결정하는 데 사용된다. 퇴적 당시의 고환경이나 생물계의 모습을 암시하므로 지사학적 고생물학적으로 중요하다. 석회암의 이용면은 넓으며, 시멘트, 제철, 카바이드, 비료, 석재 등에 대량으로 사용된다. 그림 2는 대상지역의 암석 사진으로 주요성분은 방해석, 점토판이며 강원, 충북, 경북지역에 분포한다.

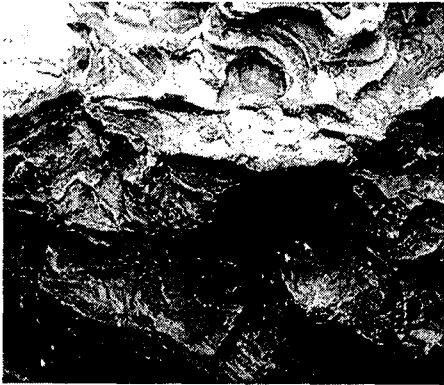


그림 2. 대상지역의 암석

3. 발파이론

3.1 발파진동 특성

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착 단면의 암석을 제거하게 된다. 즉 폭약이 장약공내에서 폭발하게 되면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압 (또는 폭굉압)과 연소된 화약에 의한 가스압, 그리고 3000℃ 이상의 고온이 발생한다. 이 때에는 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수mm~수십mm 이내에 인접한 암반은 녹아 내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 충격압과 가스압의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 여기까지의 영역을 소성 영역이라 하고, 이후 탄성파가 전파해 가는 영역을 탄성영역이라 한다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에

대한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중으로 전파 되어간다. 이러한 탄성파는 외부의 암반에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동(blast vibration)이라고 한다.

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질, 즉 암반의 변위(particle displacement, 또는 진동 입자 변위) 진동속도 (particle velocity, 또는 진동 변위 속도, 진동 입자 속도), 진동 가속도 (particle acceleration, 진동 변위 가속도, 진동 입자 가속도)로 표시 할 수 있다.

표 1. 진동 표시 단위

성 분	표시 단위
변 위	cm, mm, μm, inch
속 도	cm/sec (kine) , mm/sec , inch/sec
가속도	cm/sec ² , gal(1gal = 1cm/sec ²), G (1G = 1000gal)
주파수	cycle/sec(c.p.s),Hz

파형과 관계없이 전형적인 발파진동은 시간이나 거리에 따라 변하는 사인파로 근사할 수 있다. 발파진동의 사인파 적인 특성은 물에 떠서 까닥거리는 코르크와 비교함으로써 잘 설명할 수 있다. 발파진동에 의해 야기된 지표운동은 물 속에 던진 돌의 의해 발생한 파의 진행으로 야기된 코르크의 운동과 비슷하다. 코르크의 정지 위치로부터의 변위는 지표 내의 입자 변위 u와 같다. 마찬가지로 코르크의 속도 u'도 지표내 입자의 속도와 유사하고 그래서 "입자속도"라 칭한다.

코르크를 움직이는 물결파는 파장 즉 골 사이의 거리 λ, 돌의 충격점으로부터 밖으로 이동하는 속도 c, 코르크가 초동 상하로 움직이는 회수를 나타내는 주파수 f 등으로 묘사할 수 있다. 진파속도 c를 입자속도 u' 혼동해서는 안 된다. c는 물결파가 코르크를 지나가는 속도이고 반면 입자속도

u' 는 파가 통과하는 동안 상하로 움직이는 코르크의 속도이다. 발파진동파도 물결과와 마찬가지로 파장, 전파속도와 진동수로 설명할 수 있다.

사인파 근사의 일반적인 형태는 변위 u 의 식으로부터 시작하여 쉽게 설명할 수 있다.

발파진동의 사인파 근사

$$u = U \sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

여기서 U 는 최대변위, K 는 진동수라 불리는 상수, ω 는 원진동수라 불리는 또 다른 상수, 그리고 t 는 시간이다. 시간과 진동수가 일정할 때, 거리 x 에 따른 변위 u 의 변화량을 생각하자.

$$u = U \sin(kx + \text{const.})$$

만일 파가 반복되는 거리를 파장으로 정의하면, K 는 $2\pi/\lambda$ 와 같아야 x 가 λ 만큼 증가할 때마다 반복하는 사인 함수로 된다.

마찬가지로 위치와 파장이 일정하다면 고정점에서 시간에 따른 변위는

$$u = U \sin(\text{const.} + \omega t)$$

가 된다. 파가 주기 T 라 부르는 일정한 시간 뒤에 반복되므로, ω 는 $2\pi/\lambda$ 와 같아야 시간이 한 주기 지날 때 반복하는 사인함수로 된다. Hz의 단위로 쓰는 진동수는 매초마다 파가 반복하는 횟수이다.

주기 T 는 반복되는 사인의 시간이므로 진동수는 $1/T$ 이고, 원진동수 ω 는

$$\omega = 2\pi \left[\frac{1}{T} \right] = 2\pi f \quad (2)$$

이다. Hz 단위인 주파수 f 는 원진동수 ω 와 다르며, 사인파 근사로 최대가속도와 변위를 계산할 때 혼동하면 안 된다.

사인파 근사에서 파장 λ , 진동속도 c 와 주기 T 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\lambda = cT = c \left[\frac{1}{f} \right] \quad (3)$$

그리고 전달시간으로 전달거리를 나누면 전파속도 c 가 된다.

입자변위 u , 입자속도 u' 및 가속도 u'' 사이의 관계도 사인파 근사로 아주 단순화할 수 있고, (1) 식을 시간으로 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = U \sin(Kx + \omega t)$$

$$u' = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(Kx + \omega t)$$

$$u'' = \frac{du'}{dt} = -U\omega^2 \sin(Kx + \omega t)$$

대부분의 상황에서는 최대운동의 절대치만이 중요하며 이는 사인 함수가 1이 될 때마다 나타날 것이다. 따라서

$$u_{\max} = U \quad (4)$$

$$u'_{\max} = U\omega = 2Uf = 2\pi f = 2\pi f u_{\max} \quad (5)$$

$$u''_{\max} = U\omega^2 = 4U\pi^2 f^2 = 2\pi f u'_{\max} \quad (6)$$

그러므로 최대 입자운동의 어떤 요소라도 진동수 f 가 알려져 있고 파형이 대략 사인파이면 쉽게 구할 수 있다.

운동의 단위는 일반적으로 두 개의 그룹으로 되어 있다. 세계의 대부분은 다음과 같이 쓴다.

$$\begin{aligned} u &= \text{mm} \\ u' &= \text{mm/s} \\ u'' &= \text{mm/s}^2 \end{aligned}$$

그리고 미국에서는 다음의 단위들을 사용한다.

$$u = \text{in. (inches)}$$

$$u' = \text{in./s 즉 ips}$$

$$u'' = \text{in./s}^2$$

일반적으로 가속도는 9814mm/s^2 또는 386.4in./s^2 인 지구표면의 중력가속도로 나누어 표준화한다. 그러므로 2000 mm/s^2 즉 79in./s^2 의 가속도는

$$\frac{2000}{9814} = \frac{79}{386} = 0.2g$$

즉 중력의 2/10이 된다.¹⁾

발파 진동의 측정은 그 방향에 따라 수직 성분 (vertical), 진행 성분(longitudinal) 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선 성분(transverse)의 세 성분에 대해 실시한다.

일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(중파, primary wave)가, 접선 성분에는 S파(횡파, secondary wave)와 L 파(혼합파, love wave)가 수직 성분에는 표면파인 R 파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다.²⁾

이 세 가지 성분의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호 간섭에 따라 변하나 일반적으로 가장 큰 값을 나타내는 것이 수직 성분이며 때로는 진행성분이 수직 성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세 성분중 가장 작은 값을 나타내고 있음이 알려져 있다. 그러나 각 성분에 대한 측정 예를 보면 접선 성분이 가장 크게 나타나는 경우도 있다.

엄격한 의미에서 지반 진동과 구조물의 반응의 최대치는 세 성분중 최대값이 발생하는 시점에서 세 성분의 벡터합인 최대 실벡터합(maximum vector sum)으로 나타난다. 최대 실벡터합(maximum vector sum)은 각 성분의 최대값의 벡터합인 최대 의사벡터합(pseudo maximum vector sum)과는 구분해야 한다. 최대 의사벡터합은 최대 실벡터합보다 약 40% 가량 더 크며, 최대 실벡터합 역시 단일 성분의 최대치보다 약 5-10% 더 큰

값을 가진다. 일반적으로 발파 진동에 의한 균열 발생을 경험적인 방법으로 관측, 기록할 때에는 단일 성분의 최대치를 사용해 왔으므로 의사벡터합의 최대치를 사용하게 되면 안전율이 대단히 커지게 된다.³⁾

최근에 이르러 발파 진동의 허용치에 주진동수의 영향치를 고려하는 경우가 많아지고 있다. 발파진동의 주진동수는 0.5-200Hz 의 범위에서 다양하나 발파 형태에 따라 진동수의 범위가 더욱 제한되는 경향이 있다.¹⁾

노천탄광에서는 다소 대규모의 발파가 이루어지는데 일정한 거리의 구조물에서 측정하면 건설 발파의 주진동수보다 더 낮은 진동수가 발생한다. 건설발파에서는 발파규모가 더 작으나 일반적으로 노천 채광발파에 비해 구조물과의 거리가 가깝기 때문에 진동수가 아주 높아지는 경향이 있다.

여기서 한가지 부인하자면 주진동수가 높다고 해서 반드시 건물에 대한 피해가 더 커지는 것은 아니다. 일반적인 건물의 고유진동수는 5-20Hz 이므로 오히려 저진동수의 발파진동에 의해 건물이 공명을 일으키게 된다.³⁾

따라서 지반을 통과하는 파에너지의 대부분이 구조물의 진동을 확대시키는 에너지로 흡수되기 때문에 저진동수의 발파진동이 더욱 위험한 것이다.

또, 주진동수는 전달 매질에도 좌우된다. 고진동수 운동은 암석에서보다 짧은 거리라도 토양 속에서 더 감쇠되고 여파되는 경향이 있다. 또 층들은 파로효과(波路效果, wave guide effect) 때문에 특정 진동수의 파를 진행시킬 수 있다. 예를 들어, 전단파는 토양층(또는 암석층) 안에서

$$f = \frac{c_s}{4H}$$

의 주파수에서 공명될 수 있다. 여기서 c_s 는 전단파의 진행속도이고, H는 층의 두께이다. 이러한 사항들을 고려한 결과, 전형적인 거리에서 2~3m 이상의 토양층에서 측정된 주진동수는 1~40Hz이고 암석에서는 10~100Hz 이었다. (Leet, 1960)

구조물의 고유 진동수는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$p = 2\pi \sqrt{\frac{L}{0.05h}} \quad (7)$$

여기서 L은 구조물의 폭이고, h는 높이이다.(Newmarkdhk Hall, 1982). (7)식은

$$p = \frac{2\pi}{0.1N}$$

$$\text{즉 } f = \frac{1}{0.1N} \quad (8)$$

로 더 단순화할 수 있다. 여기서 N은 층수이다. N에 1과 2를 대입하면 f값은 10과 5Hz가 되는데 이는 1층과 2층 구조물에 대한 실제 계측결과와 비슷하다.

감쇠율은 건물구조의 함수이나 어느 정도는 진동강도의 함수이다. 따라서 고유진동수처럼 쉽게 단순화할 수 없다. 계측결과 주거구조물위 감쇠율은 평균5%이나 변동이 컸다. 이 값도 고층을 포함한 구조물들의 초기 추정치로 쓸 수 있다. 이들 구조물에 관한 세부사항은 Newmark 와 Hall의 연구(1982)에서 찾아 볼 수 있다. 벽과 바닥은 상부구조와 무관하게 진동하지만 기본진동수는 유사하다. 벽의 고유진동수를 상세하게 계측한 결과 그 범위는 12~20Hz 사이로 평균은 15Hz이었다. 바닥, 특히 폭이 넓은 사무실 건물의 바닥은 고유진동수가 낮은 경향이 있다.

어떤 종류의 높은 단독 구조물은 (8)식으로 동적 응답 특성을 계산할 수 없다. 저단조, 석유증류탑, 암석침탑과 같이 높고 홀쭉한 구조물위 경우와 p 값은 외팔보에 대한 공식으로부터 계산할 수 있다.

$$p = \frac{(0.6\pi)^2}{h^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} = 2\pi f \quad (9)$$

여기서 m은 질량, E는 영률, I는 관성모멘트, h는 구조물의 높이이다.

한편 발파진동의 특성은 지진진동과 비교하여 설명할 수 있다.

발파진동은 지진진동에 비하여 지속 시간이 짧

고, 주파수 범위도 수십에서 수백Hz 인 고주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어나며, 파형이 비교적 단순하다. 또한 지진에 의한 진동피해의 경우 그 정도를 보통 가속도로 표시하고 있으나, 발파진동에 의한 구조물의 피해정도는 진동속도에 비례하기 때문에, 세계 각국에서는 대부분 발파진동의 규제 기준을 진동속도의 최대치로 정하고 있다.⁴⁾

발파 진동과 지진 진동을 비교해보면 다음의 표 3와 같다.

표 2. 특정 구조물의 자유진동수

형태	높이(m)	p/2(Hz)
라디오 송신탑	30	3.8
석유 증류탑a	21	1.2
저단조	60	0.6
Bryce Canyon 암괴b	27	3

자료: a Medearis(1975b)

b Dowdig과 Kendorski(1983)

표 3. 발파 진동과 지진 진동과의 비교

	발파 진동	자연 지진
에너지원	화약류	지각 변동
진원의 깊이	지표, 심도가 낮은 지역	지하 10km이상
에너지 방출 형태	compress stress (strain)	shear stress (strain)
전파 경로	표토층, 한 두층 암반	여러 층의 암반
주주파수	수십hz - 200hz	수 hz 이하
진동지속 시간	0.1 - 2sec	10 sec 이상
구조물의 피해	구분하기 어렵다.	주로 전단력에 의한
진동 수준 표시	cm/sec, hz	gal
피해 분류	다양	진도 (MSK, 1-3)

3.2 진동속도의 추정식이론

진동의 크기는 화약류의 종류에 따른 화약의 특성, 장약량, 기폭방법, 전색의 상태나 화약의 장전 밀도, 자유면의 수, 폭원과 측정간의 거리, 지질조건 등에 따라 다르고, 지발너관의 사용으로 일정한 시간간격으로 기폭하는 지발당 최대 장약량과 폭원으로부터의 거리등이 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다.⁵⁾ 한편 진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 계속되어져 왔다. Hendron, Devine, Oriad 등 많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석을 근거로 하여, 많은 발파진동의 측정경험을 토대로 지상구조물의 피해의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리를 매개변수로 하여 경험적 관계식을 나타낼 수 있음을 제시하였다. 이들의 연구와 다른 연구자들의 경험적 연구결과를 종합하면 지발당 최대장약량과 발파원으로부터의 거리를 주요 변수를 하여 (10)식과 같은 형태로 표시할 수 있다. 한편 일본에서는 입지 특성환산식이라 하여 (11)식과 같은 형태로 표시한다.⁶⁾

$$V = K \left(\frac{R}{W^b} \right)^n \tag{10}$$

$$V = KR^n W^m \tag{11}$$

V : 지반의 진동속도 (particle velocity, cm/sec)

R : 발파원으로부터의 거리 (m)

W : 지발당 장약량(charge per delay, kg)

K, n, m : 지질의 암반조건, 발파조건 등에 따르는 상수

b : 1/2 또는 1/3

(10) 식에서 R/W^b 를 환산거리(scaled distance, SD)라 하며 $b=1/2$ 이면 자승근 환산거리이고 $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리라고 하며 일반적으로 가까운 거리에서는 삼승근이, 먼 거리에서는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 연구 발표된 발파 진동추정식은 다음과 같다.

- 연구 발표된 발파 진동속도 공식⁷⁾ -

(1) Crandell (1949년)

$$E \cdot R = K W^2 \left(\frac{50}{D} \right)^2$$

K : 발파 진동 상수

E · R : 에너지비

(2) Atfewell (1965년)

$$V' = K \left[\frac{W}{D^2} \right]^n$$

V' : 진동속도의 최대값 (peak to maximum particle velocity)

K : 발파 진동 상수(0.05-0.23)

N : 상수(0.64-0.96)

(3) Devine (1996년)

$$V = KW^{0.75} D^{-0.15}$$

V : 진동 속도(cm/sec)

K : 진동상수

W : 장약량(kg)

D : 폭원과 측정간의 거리(m)

(4) Langefors

$$V = KW^{0.5} D^{-0.75}$$

(5) 이토(伊藤)

$$V = K W^{0.67} D^{-2.0}$$

(6) 요시카와(吉川)

$$V = K W^{0.75} D^{-2.0}$$

(7) USBM (미광무국)

$$V = K(D/W^{0.5})^{-n}$$

n : 상수 (1.083~2.346)

K : 발파진동상수 (12~550)

(7)의 경우는 Devine의 여러 학자가 20여 개의 채석장, 여러 토목 공사현장을 대상으로 조사한 것을 미광무국에서 1966년 발표한 것으로 근래에 가장 많이 적용되고 있다.

우리나라의 경우 서울 지하철3, 4호선 공사시 채택된 발파진동 추정식은 (12)식과 같다.

$$V = K \left[\frac{D}{W^b} \right]^{-n} \quad (12)$$

- n : 감쇄지수
- b : 장약지수
- K : 상수 (발파진동상수)
- D : 폭원에서 측정간거리 (m)
- V : 발파진동속도치 (cm/sec, kine)

이러한 발파진동 추정식을 구하기 위한 과정은 다음과 같다.

발파현장에 적합한 진동추정식을 구하기 위해서는 장약량, 감쇄지수, 발파진동상수를 알아야 한다. 이러한 값을 구하기 위해 발파현장에서 임의로 장약량, 진동측정거리를 달리하면서 발파를 시행하여 측정된 진동자료를 가지고 중회귀분석(Multiple Regression Analysis)에 의해 일반식을 유도하고 자승근(Root Scaling)과 삼승근(Cube Root Scaling)에 대한 회귀선(Regression Line)을 구하여 이에 적합도가 높은 쪽을 택해서 비교 검토한다.

즉, 진동속도식의 양변에 log를 취하여 직선형으로 바꾸어 쓰면

$$\begin{aligned} \log V &= \log \left\{ K \left[\frac{D}{W^b} \right]^{-n} \right\} \\ &= \log K + n \log \left(\frac{D}{W^b} \right) \\ \log K &\text{에 } A, n \text{에 } B, C \text{에 } bn \text{을 대입하여} \\ &= \log K + n(\log D - \log W^b) \\ &= \log K + n \log D - n \cdot b \log W \end{aligned}$$

$$Y_i = A + B X_{i_1} + C X_{i_2} + E_i \text{로 표시된다.}$$

X_{i_1} : 두 독립변수

X_{i_2} : logD, logW의 i번째 측정치

Y_i : (X_{i_1}, X_{i_2})에 대한 logV의 측정치

E_i : Error Term

위 식에서 n개의 자료를 회귀평면으로 대표시키기 위해서는

$$S = \sum_{i=1}^n \langle Y_i - (A + B X_{i_1} + C X_{i_2}) \rangle^2$$

를 최소로 하는 A, B, C의 값을 구하면 된다.

이 방법을 최소자승법이라 하며 S를 최소로 하는 A, B, C의 값은 $\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0,$

$\frac{\partial S}{\partial C} = 0$ 로 되는 정규방정식의 근이다.

자료가 많아서 계산과정이 복잡해지면 실험측정 자료들은 컴퓨터를 이용한다. 자승근과 삼승근의 경우 각각

$$\log V = A + B \left(\log S - \frac{1}{2} \log W \right)$$

$$\log V = A + B \left(\log D - \frac{1}{3} \log W \right)$$

로도 표시되며 log-log좌표에서 직선(회귀선)으로 표시되고 이때 A는 절편 B는 기울기를 나타낸다.

일반적으로 이와 같은 방법으로는 현장에 적용하기 힘들므로 log-log그래프에서 거리와 장약량의 변화에 따른 진동 속도치를 표시하여 컴퓨터로서 가장 적합한 직선을 선택해 진동속도식으로 사용한다.

4. Air Tube 발파의 이론적 배경

그림 3.은 기존 노천발파의 파괴 형태이고 그림 4.는 에어튜브(Air Tube)를 장착시키고 발파한 후 파괴 정도를 나타낸 것으로 면적 A 만큼이 더 파괴력이 증가된다.

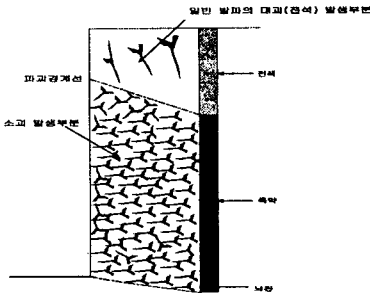


그림 3. 기존 노천 발파의 파괴 형태

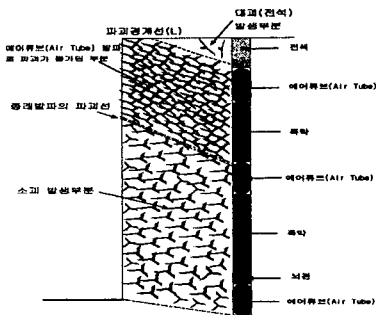


그림 4. 에어튜브 발파의 파괴 형태

(Air Tube)를 이용하므로 폭약이 폭발할 때 자유면 쪽으로 투사면적이 증가되어 상부 장약과 전석 사이에서 발생하는 전석의 발생량을 감소시키므로 해서 2차 파쇄압량을 감소시킬 것이다.



그림 5. ANFO 장약



그림 6. 에어튜브 장착

5. 본 연구에 적용된 Air Tubes 발파방법의 장착방법 및 패턴

에어튜브(Air Tube)는 공저, 폭약과 폭약사이 및 폭약과 전석 사이에 장착시키고 폭약과 폭약사이 또는 폭약의 최상단부에 장착하고 전석하여 경제성과 비산 등을 고려한 일정길이의 에어튜브(Air Tube)를 장착한다. 일반발파에서 장약시 에어튜브

표 4. 발파제원

발파 방법	천공장 (m)	공간격 (m)	발파 공수	지발당 장약량 (kg)	Air Tube 사용량 (개)	측정 거리 (M)
일반 발파	15	3.5	10	60	-	80~300
Air Tube	15	3.5	10	40~50	3	60~150

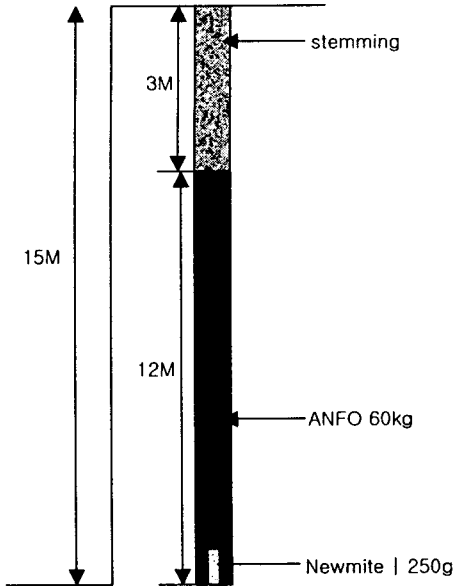


그림 7. 일반발파 패턴



그림 9. 일반발파후의 파쇄도

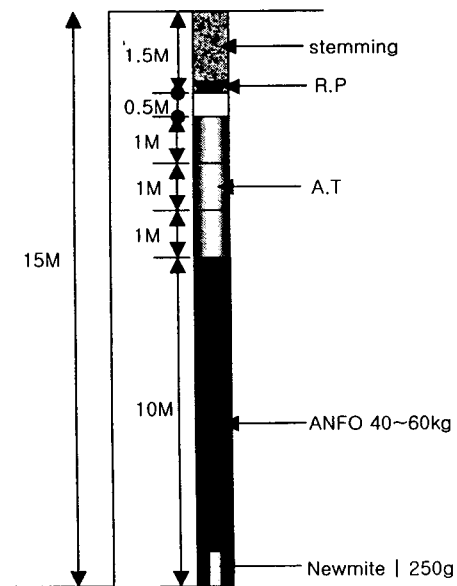


그림 8. 에어튜브발파 패턴

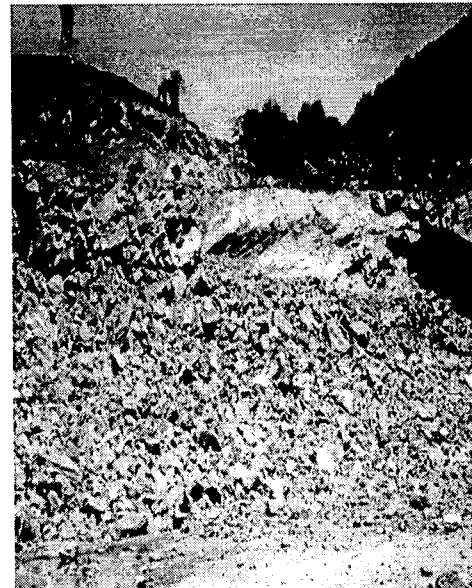


그림 10. 에어튜브발파후의 파쇄도

6. 측정 자료 분석

발파제원 및 측정거리는 앞의 표 4와 같다. 측정 결과는 표 5에 나타난 바와 같으며, 일반발파는 13회, Air Tubes 발파는 18회로 총 21회에 걸쳐 측정이 되었다.

표 5. 측정결과

횟수	발파방법	진동치 (cm/sec)	소음치 (dB)
1	일반발파	2.550	83.1
	Air Tube	1.410	80.8
2	일반발파	1.270	81.0
	Air tube	0.623	71.2
3	일반발파	1.960	82.0
	Air Tube	0.883	72.2
4	일반발파	0.174	94.7
	Air Tube	1.360	89.2
5	일반발파	0.235	94.0
	Air Tube	1.510	84.8
6	일반발파	0.260	93.8
	Air Tube	1.420	82.6
7	일반발파	0.221	94.6
	Air Tube	1.660	87.6
8	일반발파	0.206	95.4
	Air Tube	1.530	89.8
9	일반발파	0.857	79.0
	Air Tube	0.716	77.8
10	일반발파	0.640	78.3
	Air Tube	0.650	71.0
11	일반발파	1.140	77.4
	Air Tube	0.622	68.8
12	일반발파	1.060	78.2
	Air Tube	0.465	76.2
13	일반발파	0.949	77.4
	Air Tube	0.810	75.6
14	일반발파	-	-
	Air Tube	0.754	78.5
15	일반발파	-	-
	Air Tube	1.040	78.2
16	일반발파	-	-
	Air Tube	0.586	78.4
17	일반발파	-	-
	Air Tube	0.846	77.8
18	일반발파	-	-
	Air Tube	0.857	79.0

그림 11, 12의 회귀분석식에 의해 일반발파 K=412, n=-1.51로 에어튜브발파 K=375, n=-1.68로 나타났으며 SD값을 100, 200 가정시 일반발파의 예상진동은 각각 8.66mm/sec, 3.04mm/sec으로 나타났고, 에어튜브발파의 예상진동은 각각 4.38mm/sec, 1.37mm/sec 나타났다. 이는 에어튜브가 일반 발파에 비해 SD 값 100에서는 약 50.58%, SD 값 200에서는 45.07%의 감소를 보였다.

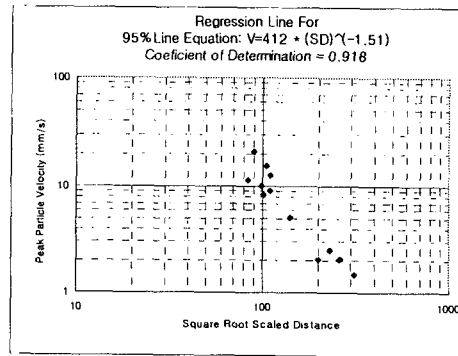


그림 11. 일반발파의 회귀분석식

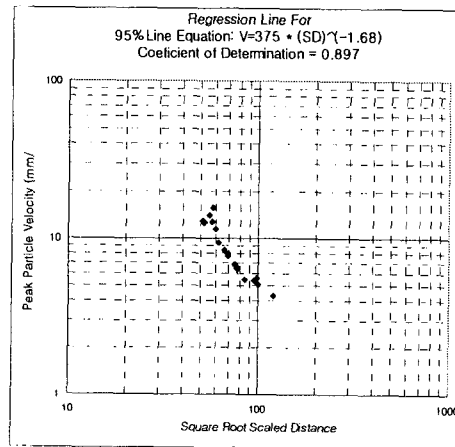


그림 12. Air Tubes발파의 회귀분석식

7. 결론

충북 단양군 S양회 현장에서 일반발파(13회)와 발파공내 에어튜브를 이용한 발파(18회)방법에서 각각의 진동 및 폭음을 계측하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반발파와 에어튜브를 이용한 발파에서 폭약량을 약 15~30% 절감할 수 있었다.
- 2) 진동 및 폭음에서는 일반발파보다 에어튜브를 이용한 발파방법이 진동은 최대 약50%정도 감소되었고 폭음의 경우는 2~5dB정도 감소되었다.
- 3) Rubber Plug를 사용시 상부 구속력을 높이므로써 비석의 위험을 감소시키고 파쇄도가 개선되었다.
- 4) 상기 결과에서 폭약량의 감소, 진동·폭음의 감소 및 전석 발생량 감소 등에 의해 큰 경제적, 환경적 이익을 얻을 수 있다고 생각되나 석회석 광산의 경우 일부에서 상부층이 잔류하는 현상을 나타내어 개선이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. C.H. Dowding, 1995, "Blast Vibration Monitoring and Control", 양형식 역 pp.10-17)
2. S.O. Olofsson, "Applied Explosives Technology for Construction and Mining" Printed by Nora boktryckeri AB , pp.202-201
3. U. Langefors & Björn Kihlström, 1978, "The Modern Technique Rock Blasting" AWE/GEBERS, Stockholm, p.265
4. E.I. duPont de Nemours & Co., Inc. (Wilmington, DE), 1978, "Blaster' s Handbook", 16th Ed., p.494.
5. 토지개발공사, "岩發破 設計技法에 관한 연구", p.254~256, p.257, p.301~304
6. Ground Vibration from Single-hole, Cast Blasts(ISEE April, 1999)
7. REBOUND SHOCK WAVES CLEANLY PRESPLIT HIGHWALLS (EEMU December, 1987)