

# 초유폭약속에 에어튜브(Air Tubes) 발파방법의 진동 및 폭음 연구

A Study on the Ground Vibration and Sound Level  
from Air Tubes Blasting using ANFO

김 용균, 이 천식, 강 대우  
Yong-Kyun Kim, Chun-Sik Lee, Dae-Woo Kang  
동아대학교

## 초 록

현재 발파의 수행은 채석, 채굴 및 지하철과 도로, 건축, 토목공사 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 이에 따라 발파특성의 연구와 관련하여 다양한 이론이 도출되고 있고 사용되지만 발파에 의한 공해인 진동 및 소음의 문제가 대두되면서 또한 이들의 취약점을 보완하기 위해 다양한 공법들이 시행되고 개선되어지고 있다.

본 연구에서는 기존의 발파공법과 Air tubes를 이용한 발파공법을 비교하므로 화약의 사용량을 보다 감소시키고, 기존 전색의 길이를 줄이므로 폭약의 투사면적을 증대시켜 진동 및 폭음을 감소시키고 상대적으로 양호한 파쇄입도를 얻고 상부의 대파를 최소화하는데 목적이 있다. 따라서 발생하는 진동 및 발파폭음을 크게 감소시킬 수 있으므로 기존 노천발파 및 진동, 소음에 민감한 도심지 발파에서 그 이점을 활용하여 보다 안전적이고 경제적인 발파작업을 수행하는데 연구의 목적이 있다.

핵심어 : Air tubes, 진동감소, 폭음감소, 화약사용량

## 1. 서 론

최근 지하자원 개발을 위한 노천 채굴장, 채석장 등과 도로, 지하철, 건축 등의 토목공사에 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 자유면 방향의 암반에 골고루 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 발파공내 공기층을 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 Tube (이하 "에어튜브"라 한다)발파 방법은 기존 일반 발파와 터널 발파에서 공내 하부에 집중된

폭약을 폭약의 순폭도 성질을 이용하고 폭약이 폭발하는 순간에 자유면쪽으로 폭약의 투사면적을 넓혀지도록 하고, 전색의 길이를 짧게 하여 폭발하는 순간에 폭약이 공내에서 분산 효과가 발생하도록 하는 발파 방법으로 제작과 사용이 간편하게 이용할 수 있도록 되어있다.

암석의 물리적 성질에 따라 일정 길이의 에어 튜브를 이용하여 정량적으로 에어의 양을 공내 장착되도록 하여 체적당 장약량을 최소화시킴으로써 진동과 소음을 감쇠시킬 수 있고 또한 전색 발생량을 줄이고, 도심지 발파에서 민원을 최소화하고자 하였다.

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

따라서 본 연구는 경남 통영시 A국가공단 조성공사 현장에서 실시한 발파작업에서 발생되는 일반 발파의 진동 특성이 구조물(가옥)에 미치는 영향과 Air Tubes 발파의 진동 특성을 각각 검토하고, 각기 다른 형태의 발파 특성을 비교하여 발파 진동, 폭음(소음)이 구조물에 미치는 영향을 검토하려고 한다.

## 2. 지질 현황

본 연구 대상 지역은 경남 통영시 광도면 안정리 지질은 하위로부터 중생대 백악기 하양층군의 퇴적암인 진동층, 유천층군의 화산암류(안산암질 화산력응회암, 안산암, 용결응회암), 그리고 상기 지층들을 관입한

불국사관입암군의 화강섬록암질 암류로 구성되어 있으며, 주로 저지대의 하상을 중심으로 발달한 제4기 충적층이 상기 지층들을 상기 지층들을 부정합으로 피복하고 있다. 상기 지층 중 연구지역은 기반암을 형성하고 있는 암석은 백악기 퇴적암류로서, 본 지층은 부지 남쪽 일부에서는 유천층군 화산암류인 안산암에 의해 부정합으로 피복당하며, 후기의 불국사관입암군으로 인한 열변성작용의 결과로 대부분 호온펠스화되어 있다.

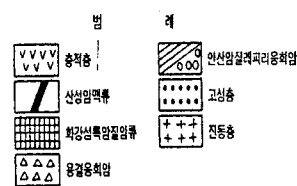
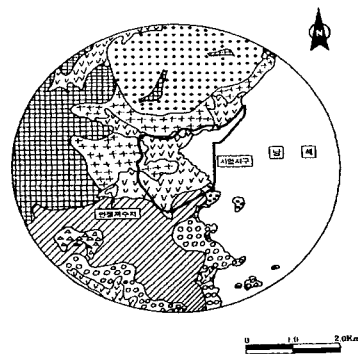


그림 1. 연구 대상 지역의 지질 형태도

## 3. 발파이론

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 녹아내리거나 잘게 파쇄 되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 충격압과 가스파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격과는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에 대한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중으로 전파되어간다. 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.

진동의 형태를 일정주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도, 가속도 사이에는 다음 식 (1)과 같은 관계가 성립한다. (Bollinger, 1980)

$$\begin{aligned}
 u &= U \sin(\omega t + \theta_1) \\
 v &= \frac{du}{dt} = U\omega \cos(\omega t + \theta_2) \\
 a &= \frac{dv}{dt} = \frac{d^2u}{dt^2} = U\omega^2 \cos(\omega t + \theta_3) \\
 \omega &= 2\pi(1/T) = 2\pi f
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 f 는 진동 주파수, T 는 진동 주기,  $\omega$ 는 진동수와 관련된 각속도,  $\theta$ 는 위상차를

의미한다. 지반 진동의 피해 여부와 관련된 상황에서는 대부분 최대치가 중요하므로  $u_{max}=U$  ,  $v_{max}=V$  ,  $a_{max}=A$  라 하면 진동변위, 속도, 가속도의 각 최대치 사이에는 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.

$$U = V/2\pi f \quad ; \quad V = A/2\pi f \tag{2}$$

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 실시된다.

일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(종파, primary wave)가, 접선 성분에는 S파(횡파, secondary wave)와 L파(혼합파, love wave)가 수직 성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다.

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 성분 중 가장 작은 값을 나타내고 있음이 알려져 있다. 그러나 각 성분에 대한 측정 예를 보면 접선 성분이 가장 크게 나타나는 경우도 있다.

한편 엄격한 의미에서 지반 진동과 구조물의 반응의 최대치는 세 성분 중 최대값이 발생하는 시점에서 세 성분의 벡터합인 최대 실벡터합(maximum vector sum)으로 나타난다. 최대 실벡터합은 각 성분의 최대값의 벡터합인 최대 의사 벡터합(pseudo maximum vector sum)과는 구분해야 한다. 최대 의사 벡터합은 최대 실벡터 합보다 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 의사 벡터합의 최대치를 사용하게 되면 안전율이 대단히 커지게 된다.

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.

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 한 가지 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.

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

한편 발파진동의 특성은 지진진동과 비교하여 설명할 수 있다.

발파진동은 지진진동에 비하여 지속 시간이 짧고, 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. 진동속도의 추정식이론

진동의 크기는 화약류의 종류에 따른 화약의 특성, 장약량, 기폭방법, 전색의 상태나 화약의 장전밀도, 자유면의 수, 폭원파 축점간의 거리, 지질조건 등에 따라 다르고, 지발뇌관의 사용으로 일정한 시간간격으로 기폭 하는 지발 당 최대 장약량과 폭원으로부터의 거리등이 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다. 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 주요변수를 하여 식 (3)과 같은 형태로 표시할 수 있다. 한편 일본에서는 입지 특성환산식이라 하여 식 (4)와 같은 형태로 표시한다.

$$V = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^n \quad (3)$$

$$V = KR^n W^m \quad (4)$$

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

(3) 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.

우리나라의 경우 서울 지하철 3, 4호선 공사시 채택된 발파진동 추정식은 식 (5)와 같다.

$$V = K \left[ \frac{D}{W^b} \right]^{-n} \quad (5)$$

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

이러한 발파진동 추정식을 구하기위한 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 다중회귀분석(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

$$\begin{aligned} \log V &= \log \left\{ K \left[ \frac{D}{W^b} \right]^{-n} \right\} \\ &= \log K + n \log \left( \frac{D}{W^b} \right) \\ &= \log K + n(\log D - \log W^b) \\ &= \log K + n \log D - n \cdot b \log W \end{aligned}$$

logK : A

-n : B

C에 bn을 대입하여

$Y_i = A + B X_{i1} + C X_{i2} + E_i$ 로 표시된다.

$X_{i1}$  : 두 독립변수

$X_{i2}$  : logD, logW의 i번째 측정치

$Y_i$  : ( $X_{i1}, X_{i2}$ )에 대한 logV의 측정치

$E_i$  : Error Term

위 식에서 n개의 자료를 회귀평면으로 대표시키기 위해서는

$$S = \sum_{i=1}^n \langle Y_i - (A + B X_{i1} + C X_{i2}) \rangle^2$$

를 최소로 하는 A, B, C의 값을 구하면 된다.

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.

## 5. 진동속도와 Air Tube 발파의 이론적 배경

### 5.1 폭약의 투사면적

그림 2는 기존 노천발파의 파괴 형태이고 그림 3은 에어튜브(Air Tube)를 장착시키고 발파한 후 파괴 정도를 나타낸 것으로 면적 A만큼이 더 파괴력이 증가된다.

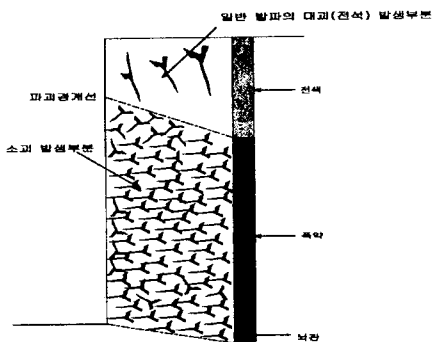


그림 2. 기존 노천 발파의 파괴 형태

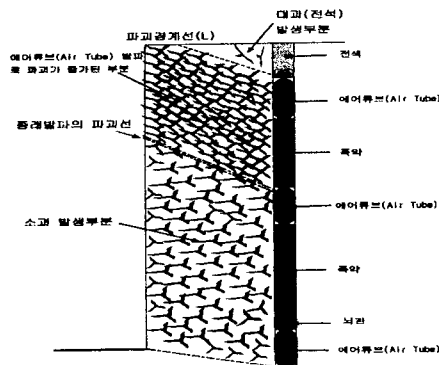


그림 3. 에어튜브 발파의 파괴 형태

### 5.2 전색물 길이

日本の 青山, 下村씨에 의하면 점토질 전색물로 수분 23%인 경우는 전색물 길이와 저항의 관계는 그림 6에. 모래질 전색물의 그것은 그림 7에 제시한 바와 같다.

또한, 大川씨에 의하면 전색물이 돌출하기까지의 시간은 표 1과 같이 된다.

전색물의 길이는 공경(經孔)에 관계되며, 공경 25mm, 50mm, 70mm에 대해 각각 18cm, 45cm, 50cm가 필요하다.

전색물의 길이는 사용하는 폭약종류, 암석의 종류, 천공지름, 발파법등에 따라 적당한 길이가 있다.

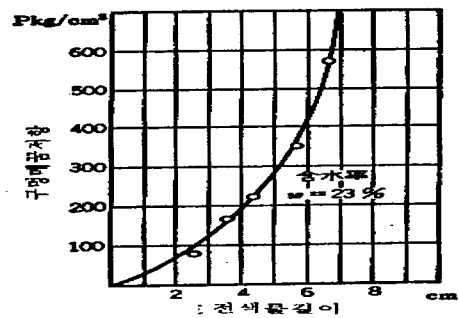


그림 4. 점토질 전색물 길이와 저항치

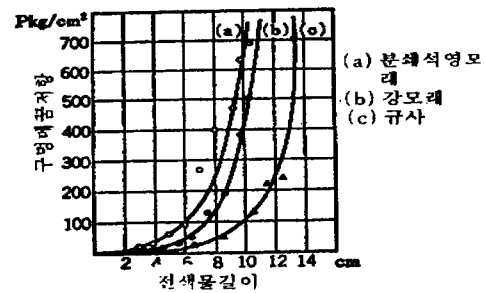


그림 5. 사질 전색물 길이와 저항치

### 5.3 순폭도

층상 장약으로 이루어진 발파 방법에서는 폭약과 폭약사이에 에어튜브(Air Tube)를 끼울 시 순폭도를 이용하면 뇌관이 추가적으로 소요되지 않는 이점이 있는데, 이 순폭도는 폭약의 약경에 의하여 정해지는데,

일반적인 폭약의 순폭도는

$$\text{순폭도}(n) = \frac{S}{D}$$

여기서 S는 최대거리(mm), d는 약포 지름(mm)이고 공기 속에서는 n값이 2.5배이나, 공내에서는 n값이 폭약에 따라 다르지만 16~20배 이상으로 훨씬 높아져서 현장에서 실험한 결과 공경 45mm~75mm의 공내에서 32mm~50mm 약경의 폭약은 순폭거리가 50~100cm 이상으로 나타나 n값이 10~20배까지 가능하며, 이에 따라 에어튜브(Air Tube)의 길이(L)는 50~300cm까지는 공기 충상을 구성하여도 순폭이 가능하다.

## 6. 측정방법 및 측정기기

본 연구 대상지역에서 사용된 발파진동 계측기는 CANADA INSTANTEL INC.에서 제작한 BLASTMATE-II DS-677) 2대와 BLASTMATE-III 1대로써 이들 계측기는 계측치가 디지털 및 아날로그 형태로 나타낼 수 있으며 진행방향, 횡방향, 수직방향 및 이들 속도성분에 대한 벡터합의 측정이 가능하고, 또한 진동 DATA의 컴퓨터 분석(주파수분석, 뇌관 시차분석, 진동추정식 설정 등)이 가능한 기기이다.

## 7. Air Tubes 발파방법의 장착방법

(1) 장약공내의 폭약이 폭발할 때 공내 장착된 에어튜브(Air Tube)가 파괴되면서 암반 투사면적을 증가시켜 암반을 파쇄시키는 데에만 폭발에너지가 작용하고, 에너지가 암반에 진동으로 전달되는 것을 최소한 억제시킬 수 있도록 공내 에어 튜브(Air Tube)를 설치한다.

(2) 현장에 적용한 도면

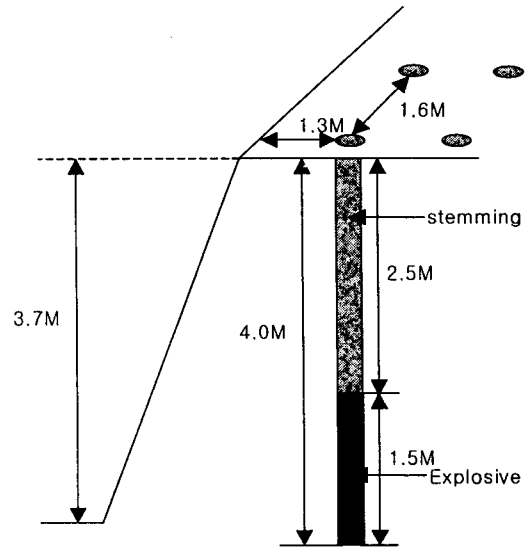


그림 6. 일반발파(천공장 4.0M)

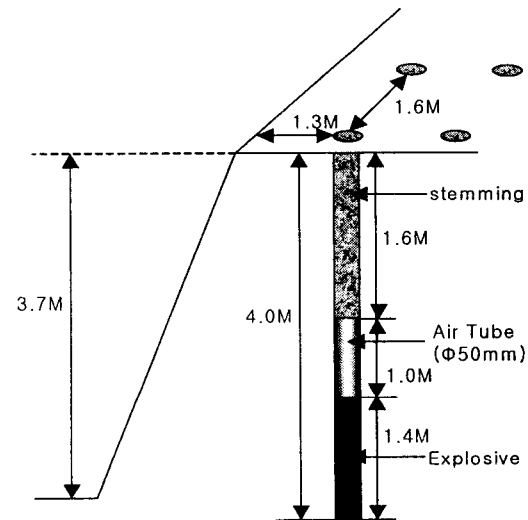


그림 7. Air Tubes발파 (천공장 4.0M)

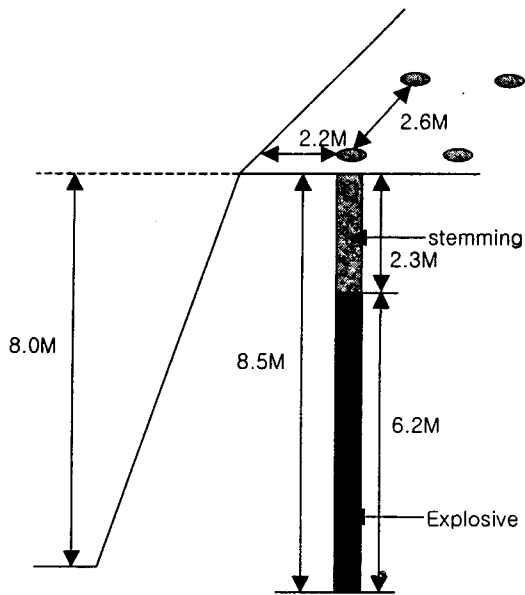


그림 8. 일반발파 (천공경 8.5M)

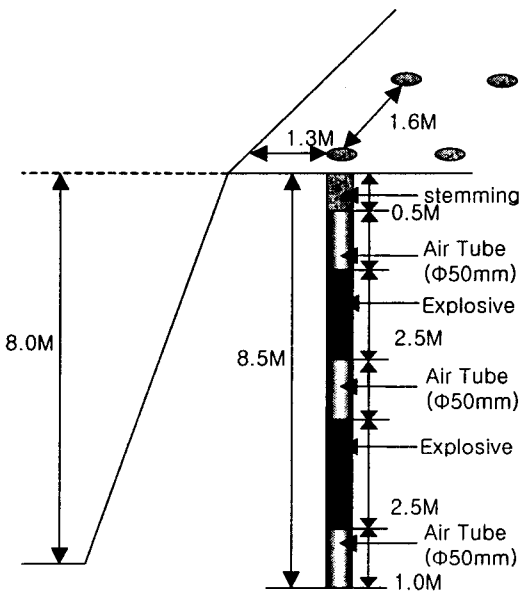


그림 9. Air Tubes 발파 (천공경 8.5M)

(3) 에어튜브(Air Tube)는 공저, 폭약과 폭약사이 및 폭약과 전색 사이에 장착시키고 폭약과 폭약사이 또는 폭약의 최상단부에 장착하고 전색하여 경제성과 비산 등을 고려한 일정길이의 에어튜브(Air Tube)를

장착한다.

(4) 일반발파에서, 장약시 에어튜브(Air-Tube)를 이용하므로 폭약이 폭발할 때 자유면쪽으로 투사면적이 증가되어 상부 장약과 전색 사이에서 발생하는 전색의 발생량을 감소시키므로 해서 2차 파쇄암량을 감소시킬 것이다.

(5) 만일 분산장약(Deck Charge) 발파에서 중간의 모래 전색부분을 폭약이 순폭할 수 있는 길이의 에어튜브(Air Tube)로 장착하여 이중 뇌관을 사용하지 않아 경제적인 효과를 기대 할 수 있는 것이다.

## 8. 발파제원 및 계측자료

표 1. 발파제원

발파 방법	천공장 (M)	공간격 (M)	발파 공수	지발당 장약량 (kg)	Air Tube 사용량 (개)
일반 발파	4.0~8.5	1.6~2.2	30~55	3.3~14.0	
Air Tube	4.0~8.5	1.6~2.2	30~55	2.5~12.0	1~3

발파횟수 : 4회, 6회, 8회

폭약종류 : Emulsion 500mm $\phi$ , ANFO

사용뇌관 : 비전기식(공내뇌관 U400, U425,

표면뇌관 UB 17, UB25, UB42, UB67)



표 2. 계측 DATA

거리(m)	발파방법	진동최고치 (cm/sec)	소음최고치 (dB)
130~150	일반발파	0.0652	50
	Air Tube	0.391	50
150~180	일반발파	0.429	69.8
	Air tube	0.398	69.0
200~220	일반발파	0.028	71.8
	Air Tube	0.028	70.8
200~250	일반발파	0.419	79.4
	Air Tube	0.162	77.4
280~300	일반발파	0.456	77.4
	Air Tube	0.291	68.6
290~300	일반발파	0.100	78.2
	Air Tube	0.076	76.2
300~310	일반발파	0.121	66.6
	Air Tube	0.111	65.2
300~320	일반발파	0.233	83.4
	Air Tube	0.119	76.2
310~330	일반발파	0.168	74.4
	Air Tube	0.135	64.6
310~340	일반발파	0.137	68.4
	Air Tube	0.074	69.2
320~350	일반발파	0.129	74.4
	Air Tube	0.105	70.8
350~370	일반발파	0.143	75.0
	Air Tube	0.084	69.4
350~380	일반발파	0.028	75.0
	Air Tube	0.023	74.8
350~480	일반발파	0.121	75.0
	Air Tube	0.098	75.2
380~400	일반발파	0.028	71.8
	Air Tube	0.028	70.8
400~420	일반발파	0.025	61.0
	Air Tube	0.023	65.2
420~450	일반발파	0.033	74.2
	Air Tube	0.023	74.2
450~470	일반발파	0.098	79.0
	Air Tube	0.057	68.2
450~480	일반발파	0.050	81.4
	Air Tube	0.039	76.2
480~500	일반발파	0.088	74.2
	Air Tube	0.055	71.8

일반발파 :  $V = 33.5 \cdot (SD)^{-0.882}$

Air Tube :  $V = 25.8 \cdot (sd)^{-1.03}$

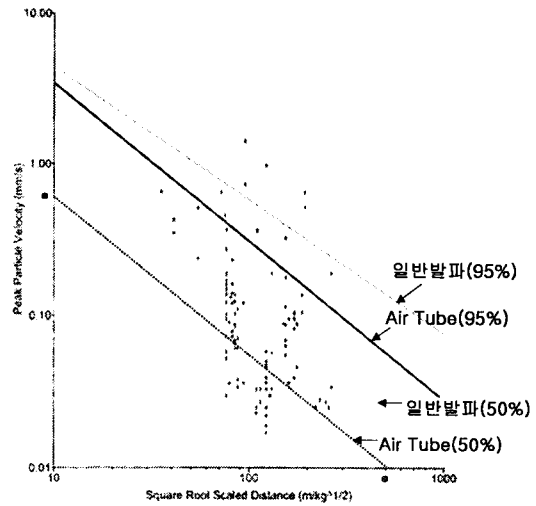


그림 10. 회귀분석 그래프

### 9. 결론

경남 통영시 A국가공단 현장에서 약 6개월간 일반발파와 발파공내 에어튜브를 이용한 발파방법에서 각각의 진동 및 폭음을 계측하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일반발파와 에어튜브를 이용한 발파에서 폭약량을 10~20% 절감할 수 있었고 특히 ANFO의 폭약량 감소는 20%이상이었다.

2) 진동 및 폭음에서는 일반발파보다 에어튜브를 이용한 발파방법이 진동은 20~50%정도 감소되었고 폭음의 경우는 2~5dB정도 감소되었다.

3) 상기 결과에서 폭약량의 감소, 진동·폭음의 감소 및 전석 발생량 감소 등에 의해 큰 경제적, 환경적 이익을 얻을 수 있었다.

※이 논문은 2002년도 동아대학교 교내 학술연구비로 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 산학인을 위한 발파공학, 기술도서 技工社, pp.137~224,
2. 工學火藥協會論, 新發破 Hand book, 山海堂, pp.89~91
3. 류창하, 암굴착을 위한 제어발파설계의 영향변수분석
4. 토목기술사를 이한 알기 쉬운 발파공학, 구미서관, pp.108~114
5. 金榮達 外 6人, 火藥學, 發破學, 文遇堂, pp.120~122
6. Nicholas P. Chironis, Air-Shock Idea Blasts Riprap
7. Ground Vibration from Single-hole Cast Blasts(ISEE April, 1999)
8. REBOUND SHOCK WAVES CLEANLY PRESPLIT HIGHWALLS (EEMU December, 1987)