

# 에어 튜브(Air Tube)에 의한 발파의 진동, 폭음 및 전석 제어 영향 연구

The Effect of the Vibration, Air Blast and Bould Size of Blasting  
by means of Air Tube

강 대 우  
Dae Woo Kang  
동아대학교 공과대학

## 초 록

“Air Tube” 발파공법에 대한 연구는 기존의 일반 발파 방법의 단점을 크게 보완하여, 이에 따른 진동, 폭음(소음), 전석 발생 등 이러한 문제점들을 해결하기 위해 고안된 것으로 기존 Air Decking 기술을 응용한 것이다. 본 연구는 폭약의 하부, 폭약과 폭약사이, 폭약의 상부와 전석 사이에 일정 길이의 “Air Tube” 를 장착시켜 폭약의 투사면적을 증가시키고, 진동의 감쇠와 전석이 감소되어 특히 도심지에서 발생하는 민원의 대상이 될 수 있는 진동 및 폭음도 크게 줄일 수 있는 효과적인 발파 기술이다.

핵심어 : Air Tube, Air Decking, 진동, 폭음, 전석

## 1. 서 론

중래의 발파 방법은 공 하부에 폭약이 집중될 뿐만 아니라, 전석의 길이가 너무 길어 폭약의 힘 즉 폭력이 파괴하고자 하는 자유면 쪽으로의 암반에 골고루 힘을 전달되지 않고, 파괴 작업에 있어서 하부 장약 집중되므로 인하여 진동을 크게 하고 괴석을 발생시키는 단점을 갖고 있다. 따라서 Air Tube(이하 “에어 튜브” 라 한다) 발파 방법은 기존 일반 발파와 터널 발파에서 공내 하부에 집중된 폭약을 폭약의 순폭도 성질을 이용하고 폭약이 폭발하는 순간에 자유면 쪽으로 폭약의 투사면적을 넓혀지도록 하고, 전석의 길이를 짧게 하여 폭발하는 순간에 폭약이 공 내에서 분산 효과가 발생하도록 하는 발파 방법으로 제작과 사

용이 간편하게 이용할 수 있도록 고안하였다.

일정 길이의 에어 튜브를 이용하여 정량적으로 에어의 양을 공내 장착되도록 하여 체적당 장약량을 최소화시킴으로써 저진동과 저소음으로 발파 작업이 되고 또한, 전석 발생량을 줄이고, 도심지 발파에서 민원을 해결하고자 하였다.

그리고, 특히 채석을 위한 대규모 석산(시멘트 광산)에서는 발파공 상부 전석 길이의 증가로 대괴(호박돌)의 발생이 많아 불필요한 2차 파쇄량 비용이 증가하므로 이 방법은 2차 파쇄로 인한 경제적 손실을 최소화시켜 채석의 경제적 이득을 얻고자 하는 것이다.

이 연구는 서울 행당동 A재개발 아파트 현장 터파기 공사장에서 기존 일반 발파 방법과 에어튜브 발파 방법을 비교 실험하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 개념

#### (1) 기초 이론

가. 폭약의 투사면적

장약공에 관한 이론은  $B = \frac{A}{CaR}$  이므로 (B:

저항선, A:투사면적, Ca:암석계수, R : 장약실 주변장)

나. 종래의 발파

$$A = 600\text{cm} \times 7.5\text{cm} = 4500\text{cm}^2$$

다. Air Tube 발파

$$A = 850\text{cm} \times 7.5\text{cm} = 6375\text{cm}^2$$

만일 폭약이 폭발할 때 작용 압력을  $6,000\text{Kg/cm}^2$  이라고 하면

라. 종래의 발파 투사면적 A에 있어서 전압력

$$P = A \cdot \rho = 4500\text{cm}^2 \times 6000\text{Kg/cm}^2 \\ = 27,000,000\text{Kg/cm}^2 = 27,000 \text{ ton}$$

마. 본 신기술의 Air Tube 발파의 투사면적 A'에 있어서 전압력

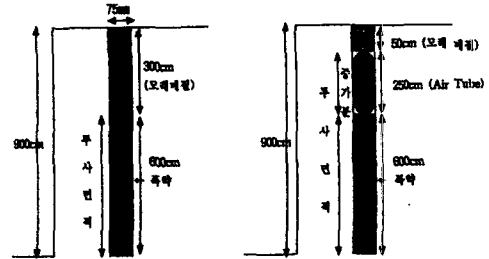
$$P = A_1' \times \rho = 6,375\text{cm} \times 6,000\text{Kg/cm}^2 \\ = 38,250,000\text{Kg} \\ = 38,250 \text{ ton}$$

두 개의 압력차

$38,250\text{ton} - 27,000\text{ton} = 11,250 \text{ ton}$   
(전압력이 에어튜브 이용으로 이론적으로 약 42% 증가)

그림 1의 (1)은 기존 노천발파의 파괴 형태이고 (2)는 에어튜브(Air Tube)를 장착시키고 발파한 후 파괴 정도를 나타낸 것으로 면적

A 만큼이 더 파괴력이 증가된다.



(1) 일반발파 (2) Air Tube 발파  
그림 1. 투사면적비교

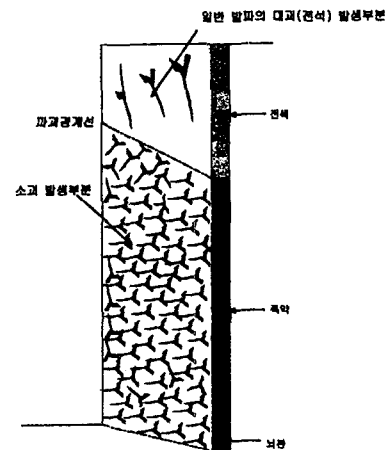


그림 2. 기존 노천 발파의 파괴 형태

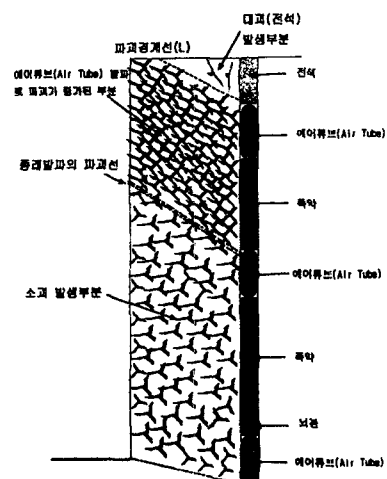


그림 3. 에어튜브 발파의 파괴 형태

바. 전색물 길이

日本の 青山, 下村씨에 의하면 점토질 전색물로 수분 23%인 경우는 전색물 길이와 저항의 관계는 그림 4에, 모래질 전색물의 그것은 그림 5에 제시한 바와 같다.

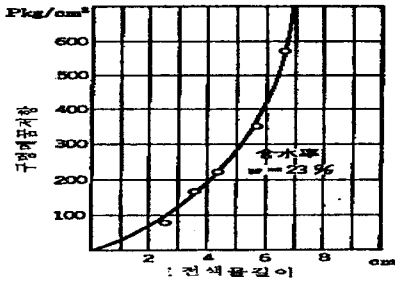


그림 4. 점토질 전색물 길이와 저항치

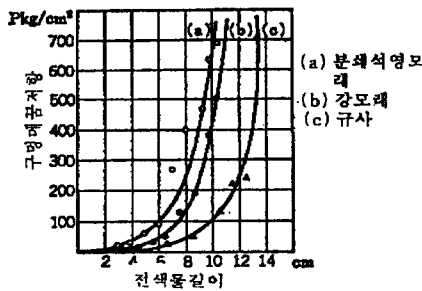


그림 5. 사질 전색물 길이와 저항치

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, 발파법 등에 따라 적당한 길이가 있다.

#### 사. 순폭도

충상 장약으로 이루어진 발파 방법에서는 폭약과 폭약사이에 에어튜브(Air Tube)를 끼울 시 순폭도를 이용하면 뇌관이 추가적으로 소요되지 않는 이점이 있는데, 이 순폭은 폭약

의 약경에 의하여 정해지는데, 일반적인 폭약의 순폭도는  $n = \frac{S}{D}$  [S : 최대거리 (mm), d : 약포 지름(mm)] 로 공기 속에서는 n값이 2.5배이나, 공 내에서는 n값이 폭약에 따라 다르지만 16~20배 이상으로 훨씬 높아져서 현장에서 실험한 결과 공경 45mm~75mm의 공 내에서 32mm~50mm 약경의 폭약은 순폭거리가 50~100cm 이상으로 나타나 n값이 10~20배까지 가능하며, 이에 따라 에어튜브(Air Tube)의 길이(L<sub>2</sub>)는 50~300cm까지 가능하도록 공기 충상을 구성할 수 있다.

### 3. 에어튜브 발파의 적용 방법

#### 3.1 장착 방법

(1) 장약공 내의 폭약이 폭발할 때 공내 장착된 에어튜브가 파괴되면서 암반 투사면적을 증가시켜 암반을 파쇄시키는데만 폭발에너지가 작용하고, 에너지가 암반에 진동으로 전달되는 것을 최소한 억제시킬 수 있도록 공내 에어 튜브를 설치하는 것이다.

(2) 에어튜브는 공저, 폭약과 폭약사이 및 폭약과 전색 사이에 장착시키고 폭약과 폭약사이는 경제성과 비산 등을 고려한 일정길이의 에어튜브를 장착한다.

(3) 계단발파에서 상부 쪽으로 갈수록 자유면이 크게 되어 폭약의 에너지가 암석을 파괴시키는데 적은 에너지가 필요함을 이용하려는 것이다. (※외국의 경우 하부장약과 상부 장약으로 구분시키나 국내에서는 거의 구분이 없음)

(4) 일반발파에서 장약시 에어튜브를 이용함으로써 폭약이 폭발할 때 자유면 쪽으로 투사면적이 증가되어 상부 장약과 전색 사이에서 발생하는 전석의 발생량을 감소시켜 2차 파쇄암량을 감소, 경제적 이득을 기대할 수 있는 것이다.

(5) 선균열(Presplitting)발파에서 인접공의 에어튜브(Air Tube) 부분이 자유면 역할을 할 수 있도록 장착하여 절단 능력이 우수하도록 폭약과 에어튜브(Air Tube)를 상대 장착시키는 것이다.

바. 분산장약(Deck Charge) 발파에서 중간의 모래 전색부분을 폭약이 순폭할 수 있는 길이의 에어튜브로 장착하여 이중 뇌관을 사용하지 않아 경제적인 효과를 기대 할 수 있는 것이다.

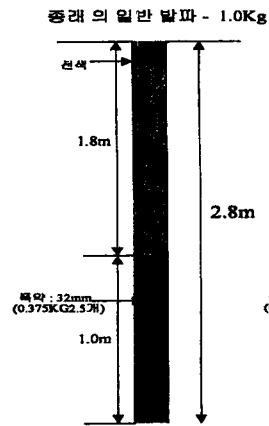


그림 6. 일반발파 Pattern

### 3.2 발파 제원

- (1) 위치 : 서울 행당동 재개발 아파트 건설 현장
- (2) 압중 : 화강암
- (3) 먼저 일반적으로 천공하는 발파 형태 즉 현장 조건에 적합한 천공깊이, 천공간격 및 저항선을 정하여 총 40공을 표 1과 표 2의 제원에 따라 천공하여 장약과 전색하여 시험 발파를 실시하였다.

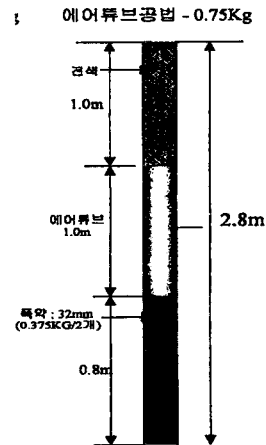


그림 7. Air Tube 발파 Pattern

표 1. 일반 발파 제원

총천공수	천공장	지발당장약량	총장약량	장약장	전색장	천공경	저항선	공간격	Air Tube 장	Air Tube 경
20	2.8 m	1.0 kg	20 kg	1.9 m	1.6 m	45 mm	1.0 m	1.0 m	0	0

표 2. 에어튜브 발파 제원

총천공수	천공장	지발당장약량	총장약량	장약장	전색장	천공경	저항선	공간격	Air Tube 장	Air Tube 경
20	2.8 m	0.75 kg	15 kg	1.2 m	0.9 m	45 mm	1.0 m	1.0 m	1.0 m	38 mm

※ 사용폭약류 : Newmite 32mm  $\phi$  전기뇌관 (지발뇌관)

이들은 일반 발파기에 모선을 연결하여 발파 하였으며 뇌관의 종류는 시험결과를 정확히 알기 위해 순발전기뇌관을 각각의 공에 넣고 1공씩 동일 위치에서 40회씩 측정한 결과는 표3, 4, 5와 같다.

표 3. 20M 지점에서의 측정 결과

구 분	공수 (공)	지발당 장약량(kg)		20M 지점 (BLAST III)	
		일반	Air Tube	일반	Air Tube
1회	1	1.0	0.75	0.508/76.5	0.215/72.4
2회	1	1.0	0.75	0.332/74.1	0.245/70.0
3회	1	1.0	0.75	0.750/79.6	0.351/73.7
4회	1	1.0	0.75	0.296/57.7	0.639/75.2
5회	1	1.0	0.75	0.756/83.0	0.341/73.2
6회	1	1.0	0.75	0.827/79.3	0.482/74.0
7회	1	1.0	0.75	1.29/81.7	0.487/77.9
8회	1	1.0	0.75	1.12/84.0	0.852/83.4
9회	1	1.0	0.75	0.873/79.8	0.296/77.8
10회	1	1.0	0.75	1.01/81.3	0.247/73.8
11회	1	1.0	0.75	1.04/83.2	0.882/83.1
12회	1	1.0	0.75	2.40/85.9	0.680/79.2
13회	1	1.0	0.75	1.72/85.9	0.863/78.8
14회	1	1.0	0.75	3.17/86.3	0.307/78.4
15회	1	1.0	0.75	2.37/87.5	0.269/74.0
16회	1	1.0	0.75	0.713/77.0	1.56/85.0
17회	1	1.0	0.75	1.20/82.1	0.666/77.7
18회	1	1.0	0.75	0.863/84.6	0.981/80.2
19회	1	1.0	0.75	1.15/86.8	0.771/80.4
20회	1	1.0	0.75	1.02/85.9	0.649/78.9

표 4. 40M 지점에서의 측정 결과

구 분	공수 (공)	지발당 장약량(kg)		40M 지점 (BLAST 677)	
		일반	Air Tube	일반	Air Tube
1회	1	1.0	0.75	n/a	n/a
2회	1	1.0	0.75	0.225/70.0	0.397/72.4
3회	1	1.0	0.75	n/a	n/a
4회	1	1.0	0.75	0.438/73.6	0.333/72.0
5회	1	1.0	0.75	0.137/69.4	0.257/71.6
6회	1	1.0	0.75	0.297/73.6	0.352/72.4
7회	1	1.0	0.75	0.478/75.0	0.591/76.2
8회	1	1.0	0.75	0.260/69.8	0.330/71.8
9회	1	1.0	0.75	0.487/78.2	0.198/71.0
10회	1	1.0	0.75	0.189/69.8	0.313/72.6
11회	1	1.0	0.75	0.705/79.8	0.395/74.0
12회	1	1.0	0.75	0.216/70.0	0.259/73.4
13회	1	1.0	0.75	0.692/82.2	0.275/70.6
14회	1	1.0	0.75	0.511/77.6	0.319/74.0
15회	1	1.0	0.75	0.625/78.0	0.227/77.0
16회	1	1.0	0.75	0.670/80.2	0.259/78.4
17회	1	1.0	0.75	0.651/82.0	0.395/76.4
18회	1	1.0	0.75	0.772/79.4	0.176/71.4
19회	1	1.0	0.75	0.138/70.6	0.187/78.2
20회	1	1.0	0.75	0.210/70.0	0.200/70.0

표 5. 60M 지점에서의 측정 결과

구 분	공수 (공)	지발당 장약량(kg)		60M 지점 (BLAST 477)	
		일반	Air Tube	일반	Air Tube
1회	1	1.0	0.75	0.206	0.148
2회	1	1.0	0.75	0.129	0.168
3회	1	1.0	0.75	0.111	0.079
4회	1	1.0	0.75	0.105	0.093
5회	1	1.0	0.75	0.108	0.085
6회	1	1.0	0.75	0.079	0.111
7회	1	1.0	0.75	0.119	0.082
8회	1	1.0	0.75	0.105	0.077
9회	1	1.0	0.75	0.073	0.079
10회	1	1.0	0.75	0.085	0.071
11회	1	1.0	0.75	0.096	0.090
12회	1	1.0	0.75	0.074	0.076
13회	1	1.0	0.75	0.175	0.084

3.3 측정 결과 분석

(1) 진동 크기에 의한 분석

본 현장에서 각각 40회에 걸쳐 일반발파와 Air Tube 발파공법을 비교하여 시험발파를 실시한 결과 발파원에서 약 20, 40, 60m 거리에 진동, 폭음 측정기를 설치하여 측정한 결과 진동 최대크기는 일반 발파시에는 0.508 cm/sec로 나타났고, Air Tube 발파시에는 진동 최대크기는 0.215cm/sec로 나타났다. 따라서 진동 감소율은 약 60%이상 감소되었음을 알 수 있다.

본 현장에서 총 40회에 걸쳐 실시하여 측정한 DATA를 면밀히 회귀 분석한 결과 다음과 같은 식을 산출하였다.

가. 일반 발파 작업시 진동 추정식  
 $V = 569 \cdot (SD)^{-1.06}$  (1)

나. Air Tube 발파 작업시 진동 추정식  
 $V = 603 \cdot (SD)^{-1.44}$  (2)

위 식 1.2는 모두 근거리 산출 방식인 삼승 근환산거리로 분석한 것이며, 진동 추정식 산출 Graph는 그림 8과 같이 일반발파와 Air Tube 발파시 비교한 추정식 Graph이다.

(2) 폭음(소음) 크기에 의한 분석  
 폭음 측정치도 일반발파시 소음 최대 크기는 76.5dB/(A), Air Tube 발파시 소음 최대 크기는 72.4dB/(A)로 나타나 약 3dB/(A)정도로 감소되었다.

(3) 에어튜브 공법과 기존 발파 기술의 조건 대비 효과분석.  
 조건 A : 소음, 진동대비  
 조건 B : 비용, 시간의 대비  
 조건 C : 효과대비 (Air Tube 발파, 일반발파 Deck charge 발파, presplitting)

가. 조건 "A" : 동일공경과 천공간격으로 발파효과와 장약량, 진동 및 폭음을 대비  
 (a) 천 공 경 :  $\phi 45\text{mm}$  Crawler drill.  
 (b) 천공간격 : 1.0M  
 (c) 저항선 : 1.0M  
 (d) 천 공 장 : 2.8M  
 (e) 천 공 수 : ① 일반발파 : 20공  
                   ② 에어튜브(Air Tube) 발파 : 20공  
 (f) 효과분석 : 진동, 폭음.  
 (g) 대 비 : 신기술과 기존기술의 시공효과를 계측 값으로 분석

(4) 조건 "B" : 동일작업에서 비용 · 시간을 재료비로 대비  
 압중 : 화강암, 연암.

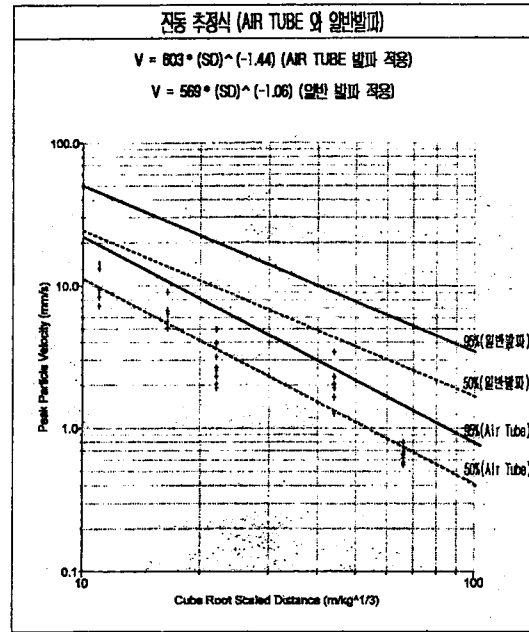


그림 8. 일반발파와 Air Tube 발파 진동 추정식 Graph 비교

표 6. 대비 결과표

구 분	에어튜브 (Air Tube) 발파	일반발파
천공수	20공	20공
천공경	$\phi 45\text{mm}$	$\phi 45\text{mm}$
천공장	2.8M	2.8M
천공간격	1.0M	1.0M
저항선	1.0M	1.0M
단위장약량	0.28kg/m'	0.35kg/m'
공당장약량	0.75kg	1.0kg
총장약량	18kg	24kg
폭약감량	6kg	0

(5) 조건 "C" : 에어튜브 적용시와 적용하지 않을 경우 효과대비.

표 7. 비교 분석 현황

구 분	에어튜브발파	일반 발파
진 동	0.5~0.7	1
폭 음	0.8~0.9	1
파쇄도	0.5	1

표 8. 종래 발파 방법과 에어튜브 발파 방법의 장·단점

	종래의 노천발파방법	신기술의 에어튜브 (Air Tube) 발파 방법
장점	· 장약 방법이 신기술보다 비교적 간단하다	· 진동은 20%~50% 감소. · 소음은 5~10dB감소 · 전석의 발생을 50% 감소 · 시공원가를 절감 · 동일 폭약량의 장약장 길이진다 · 공내 자유면을 형성 · 장전작업이 용이
단점	· 진동 소음 조절이 어려움 · 전석의 발생량 조절할 수 없다 · 비경제적	· 물이 고여 있는 장약공에서 사용하기 어렵고, 효과도 없다.

## 4. 결 론

### 4.1 진동에 의한 분석

본 에어튜브 공법연구는 서울 행당동 재개발 아파트 건설공사에서 각각 40회에 걸쳐 시험발파를 실시한 결과 발파원에서 약 20, 40, 60m 거리에 진동, 폭음 측정기를 설치하여 계측한 결과 진동 최대크기는 일반 발파 작업시 약 20m 거리에서 3.17cm/sec로 나타났고, 에어튜브 발파 작업시 약 20m 거리에서 1.56cm/sec로 나타났다. 약 40m 거리에서 0.772cm/sec으로 나타났고, 에어튜브 발파 작업시 약 40m 거리에서 0.591cm/sec로 나타났다. 약 60m 거리에서 0.206cm/sec로 나타났고, 에어튜브 발파 작업시 약 60m 거리에서 0.148cm/sec로 나타났다. 따라서 20m, 40m, 60m거리에서 진동 감쇠율은 약 60%이상 감

소되었음을 알 수 있다.

### 4.2 폭음(소음)에 의한 분석

폭음 측정치도 일반 작업시 약 20m 거리에서 최대 소음 크기는 87.5 dB/(A), 에어튜브 발파 작업시 소음 최대 크기는 85.0 dB/(A), 약 40m 거리에서 최대 소음 크기는 82.2 dB/(A), 에어튜브 발파 작업시 약 40m 거리에서 소음 최대 크기는 78.4 dB/(A)으로 각각 나타났다. 따라서, 2.5~4.2 dB/(A)정도로 감소되었다.

### 4.3 전석 크기에 대한 분석

2차 파쇄량을 감소시켜 경제적 효과뿐만 아니라 2차 파쇄시 발생하는 소음 및 진동의 환경적 문제도 해결할 수 있었으며 향후 대발파에서도 동일한 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Liqing Liu & P.D.Katsabanis(1996) "Numerical modelling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting" Rock fragmentation by blasting. P319~330.
2. A.K chakraborty & J.L Jethwa(1996) "Feasibility of air decking blasting in various rock mass conditions-A case study, Rock fragmentation by blasting. P343~349.
3. 金榮遠 外 6人(1984) "火藥學, 發破學" 文選堂 P120~122.
4. 山海堂 "新發破 Hand book" (1989) 工學火藥協會論, P89~91.
5. 강대우(1998) "토목기술자를 위한 알기쉬운 발파공학" 구미서관, P108~114.