

에어튜브(Air Tube)를 이용한 발파공해 (진동, 소음, 비산) 제어와 공사비 절감을 위한 암 발파공법

“Air Tube” 발파공법은 기존의 일반발파 공법의 일부 단점을 보완하여 장점화 시켰으며 이로 인해 발파작업 시 유발되는 발파공해 즉 지반진동, 폭음, 비산 등을 제어하고 발파 후 발생하는 대피의 발파암에 수행될 2차 파쇄(소할)작업을 최소화함은 물론 폭약의 감소와 전색제(구멍 메꾸재료)의 경비 등을 절감시켜 공기와 공사비를 최소화 하는데 적합한 발파공법으로서 각종 발파 현장에 적용 가능하다. 따라서 본 공법의 원리와 사례에 따른 효과를 검토한다.



01 서론

종래의 발파 방법은 공 하부에 폭약이 집중될 뿐만 아니라, 전색의 길이가 너무 길어 폭약의 힘 즉 폭력이 파괴하고자 하는 자유면 쪽으로의 암반에 전반적으로 폭력이 전달되지 않고, 장약이 집중된 공저(공 하부)방향으로 폭력이 쏠리는 관계로 진동 및 소음을 크게 하고, 대피의 발파암을 발생 시키는 단점이 있다. 따라


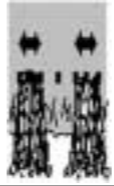
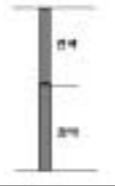
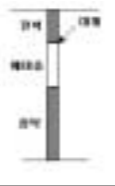
서 이러한 단점을 보완코져 개발한 것이 “Air Tube”로서 일반발파에서 공저에 집중되는 장약 방식을 폭약의 순폭도 이론에 Air Tube를 사용하여 정량적으로 에어의 양을 공내에 장착되도록 하며 이로 인해 체적당 장약량을 최소화함으로써 폭약의 투사면적을 증가시키고 전색의 길이를 짧게 하여 폭발하는 순간에 폭약이 공 내에서 분산하는 효과에 의하여 저진동과 저소음 또한 발파 후 대피 발생을 줄이고 민원의 발생을 최소화 할 수 있는 발

파 방법이다.

특히 채석을 위한 대규모 발파(시멘트 광산, 부지조성 등)에서는 발파공 상부 축 전색길이의 증가로 대피의 발생이 많아 부득이 2차 파쇄(소할)에 많은 시간을 투자함으로써 공사기간이나 공사비에 적잖은 비용이 들 수 있다. 따라서 이러한 현장에 Air Tube를 이용한 발파를 수행하면 폭약사용량을 비롯 암 굴착비용을 최소화할 수 있다. 본 공법은 울산지역 광역상수도 현장의 댐공사와 서울 ○○지역 재개발 아파트 현장에서 적용하여 민원과 공사비를 줄일 수 있었다.

02 진동제어를 위한 발파공법의 검토

표 1 | 진동제어 발파공법의 검토

구분	발파공법				
	이완식발파	이분위발파	건교부안 정밀진동제어	Air_Deck (Air Tube)	
사용 폭약류	- 에멀전류 • 뉴마이트 • 에뮤라이트	- 에멀전류 • 뉴마이트 • 에뮤라이트	• 다이나마이트 • 에멀전폭약류 • 분말폭약류	- 에멀전류 • 뉴마이트 • 에뮤라이트	
기본 원리	발파대상 암반에 균열만 발생시킬 수 있는 소량의 적장약량과 비산과 폭음을 제어하기 위해서 철재매트를 이용하는 발파	계단발파공법에서 1차 발파(매개공+확장공)를 실시하면 2차 발파 예정의 암반은 성곽형태로 남게 되어 자유면이 많아 적은 장약량으로 발파 하므로써 발파효율 증대와 진동이 감소된다는 원리	소량의 폭약으로 암반에 균열을 발생시켜 대형 브레커로 2차 파쇄를 실시하는 원리	Deck charge의 개념으로 중규모 이상의 발파에서 폭약과 폭약사이에 Air tube를 삽입 하므로써 분산장약의 효과인 진동제어는 물론 노관과 2차 파쇄비를 감소시킨다는 원리	
시공 도시					
공해 정도	진동	小	小	微, 小, 大	小
	소음	小	小	微, 小, 大	小
비석	無, 微, 小	無, 微, 小	有	無, 微, 小	
시공방법	천공 장약 전색 발파보호공발파 2차파쇄	천공 장약 전색 발파보호공발파 2차파쇄	천공 장약 전색 발파보호공발파 2차파쇄	천공 장약 전색 발파보호공발파 2차파쇄	
적용현장	도심지 및 외곽, 중, 소규모 현장	도심지 및 외곽, 중, 소규모 현장	도심지 및 외곽, 대, 중, 소각중 현장	도심지 및 외곽, 대, 중, 소각중 현장	

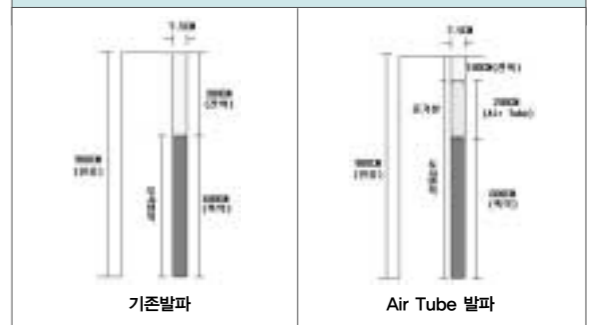
03 이론적 고찰

3-1. 투사면적에 관한 기초이론

(1) 폭약의 투사면적 : $B = A / (CaR)$

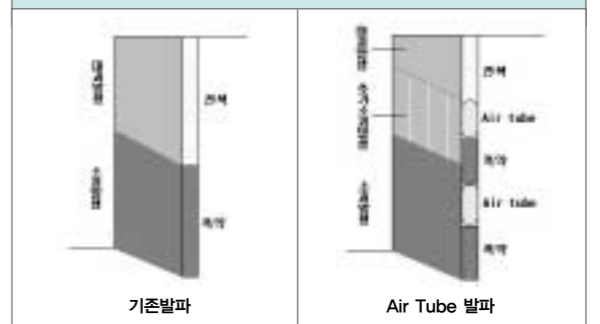
B:저항선, A:투사면적, Ca:암석계수, R:장약실 주변장

그림 1 | 투사면적 비교



- (2) 일반발파 : $A = 600\text{cm} \times 7.5\text{cm} = 4500\text{cm}^2$
 - (3) Air Tube 발파 : $A = 800\text{cm} \times 7.5\text{cm} = 6000\text{cm}^2$
 - (4) 폭약 폭발시 작용압력 : $\rho = 6000\text{kg/cm}^2$ (가정)
 - (5) 일반발파 전압력 : $P = A \cdot \rho$
 $\Rightarrow P = 4500\text{cm}^2 \times 6000\text{kg/cm}^2 = 27,000\text{ton}$
 - (6) Air Tube 발파 전압력 : $P = A \cdot \rho$
 $\Rightarrow P = 6000\text{cm}^2 \times 6000\text{kg/cm}^2 = 36,000\text{ton}$
 - (7) 두공의 압력차 : $9,000\text{ton} \Rightarrow$ 전압력이 Air Tube를 이용 하므로써 33% 증가
- 상기의 기초이론에 의한 일반발파와 Air Tube발파의 파괴 형태는 다음 그림에 나타나는 형상과 같다.

그림 2 | 일반발파와 Air Tube 발파 파괴 비교



3-2. 전색제에 관한 이론

(1) 정의 및 종류

전색제란 발파공에 폭약을 장전 한 후 그 공에 다시 점토나 모래 등의 재료를 충전하는 것을 말하며 전색제로서 발파공을 밀폐시키면 폭약의 위력이 충분히 발휘되어 발파효과가 좋아진다. 전색의 종류로는 점토, 모래, 석분, 물 등이며 이들 중 보통 쓰이는 재료는 모래, 석분, 점토가 보편적이다.

(2) 전색물의 길이와 종류에 따른 저항성 검토

일본의 청산(靑山), 하촌(下村)씨에 의하면 점토질 전색물로 수분 23%인 경우 전색물 길이와 저항의 관계는 <그림 3>에, 모래질 전색물의 관계는 <그림 4>에 나타난 바와 같다.

그림 3 | 점토질 전색물의 길이와 저항치

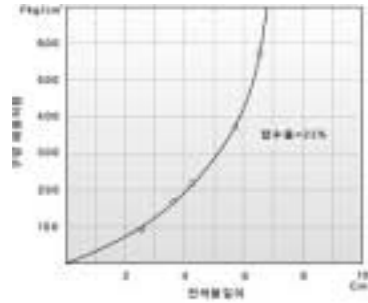
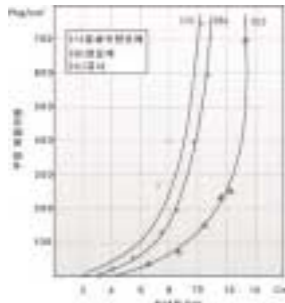


그림 4 | 모래질 전색물의 길이와 저항치



또한 大川씨에 의하면 전색물이 돌출하기까지의 시간은 <표 2>와 같다.

표 2 | 전색물의 종류와 그의 돌출 시간

장약량(kg)	전색물길이(cm)	석분(ms)	점토(ms)	물	비고
22.5kg	81	-	1.0	-	암벽발파
25.0	35	-	2.4	-	암벽발파
37.5	55	3.5	1.8	-	암벽발파
22.5	80	3.3	-	-	암벽발파
26.2	75	3.1	-	-	암벽발파
25.0	60	2.4	1.6	0.4	약7톤 정도 암석사용
10.0	35	-	1.0	0.7	약3.5톤 정도 암석사용

3-3. 순폭도에 관한 이론

층상장약(다단장약)으로 이루어진 발파방법에서는 폭약과 폭약 사이에 Air Tube를 장착시킬 때 순폭도를 이용하면 뇌관이 추

가적으로 소요되지 않는 이점이 있는데, 이순폭도는 폭약의 약경에 의하여 정해지며 일반적인 폭약의 순폭도는 다음과 같이 산출한다.

순폭도(n) = S/D (S: 최대거리(mm), D: 약포지름(mm))로 공기 속에서는 n값이 2.5배이나 공 내에서는 n값이 폭약에 따라 다르지만 16~20배 이상으로 훨씬 높아지며, 현장에서 실험한 결과 공경 45mm~75mm의 공 내에서 32mm~50mm 약경의 폭약은 순폭거리가 50~100cm 이상으로 나타나 n값이 10~20배까지 가능하며 이에 따라 Air Tube의 길이는 50~300cm 까지 가능하도록 공기층상을 구성할 수 있다.

04 Air Tube 발파의 장착방법 및 적용

4-1. Air Tube 장착 방법

- (1) 장약공 내의 폭약이 폭발할 때 공내 장착된 Air Tube가 파괴되면서 암반 투사면적을 증가시켜 암반을 파쇄 시키는 데만 폭발에너지가 작용하고, 에너지가 암반에 진동으로 전달되는 것을 최소한 억제 시킬 수 있도록 공내에 Air Tube를 설치하는 것이다.
- (2) Air Tube는 공저, 폭약과 폭약사이 및 폭약과 전색사이에 장착시키며, 폭약과 폭약사이는 경제성과 비산 등을 고려한 일정길이의 Air Tube를 장착한다.
- (3) 계단발파에서 상부 쪽으로 갈수록 자유면이 크게 되어 폭약의 에너지가 암석을 파괴시키는데 적은 에너지가 필요함을 이용하려는 것이다.
(☞ 외국의 경우 하부장약과 상부장약으로 구분 시키나 국내에서는 거의 구분이 없다.)
- (4) 일반발파에서 장약시 Air Tube를 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 Air Tube 부분이 자유면 역할을 할 수 있도록 장착하여 절단 능력이 우수하도록 폭약과 Air Tube를 상대 장착 시키는 것이다.
- (6) 분산장약(Deck Charge) 발파에서 중간의 모래 전색 부분을 폭약이 순폭할 수 있는 길이의 에어튜브로 장착하여 이중뇌관을 사용하지 않아 경제적인 효과를 기대할 수 있을 것이다.

그림 5 | Air Tube재료 및 장약 방법

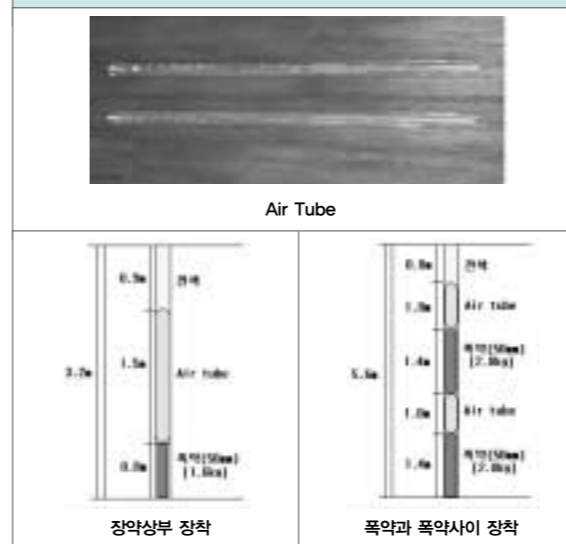


그림 6 | Deck Charge 장약방법 비교 (Deck Charge)

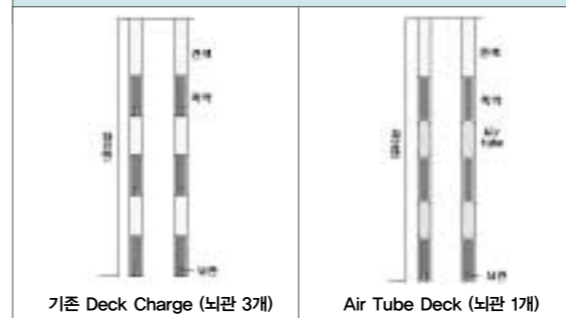
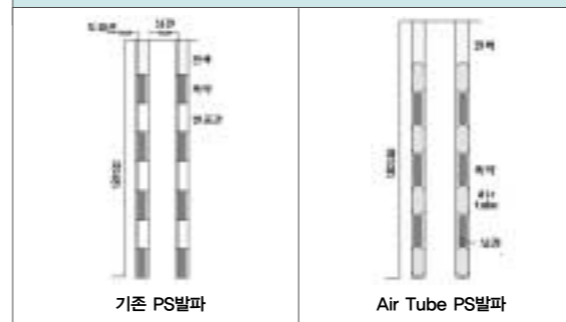


그림 7 | PS 발파 장약방법 비교 (PS 발파)



4-2. Air Tube 적용사례 1

- (1) 위 치 : 경남 울산시 광역상수도 현장
- (2) 주변현황 : 발파현장 부근에 민가
- (3) 발파공법 : Air Tube 발파 공법
- (4) 발파패턴

표 3 | 발파패턴 (안)

구분	요소	단위	패턴	
			진동제어 증규모	일반발파
천공	천공경	mm	75	75
	천공간격	m	1.5	2.0
	최소저항선	m	1.5	2.0
	천공장	m	3.2	6.0
장약	공당장약량	kg/hole	1.6	4.0
	지발당공수	hole/delay	1	1
	지발당장약량	kg/delay	1.6	4.0
	발파당공수	hole/round	10 이하	10 이하

그림 8 | Air Tube재료 및 장약 방법



(5) Air Tube 사용량

- 사용기간 : 2000년 7월 - 2001년 2월
- 사용갯수 : 3,000개/월
- 공당갯수 : 각 발파패턴별 공당 1개(1m/ea)

(6) 사용화약류

- 뇌관 : 전기뇌관
- 폭약 : 에멀전(50mm)

(7) 효과

- 진동 및 소음 : 약 20% 감소(민원 감소)
- 폭약량 : 약 30% 절약

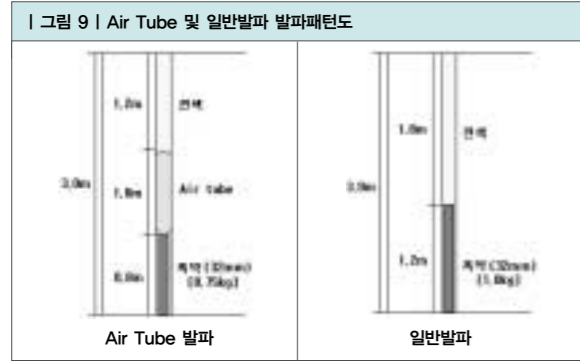
4-2. Air Tube 적용사례 2

- (1) 위 치 : 서울시 성동구 ○○지역 재개발 아파트 현장
- (2) 주변현황 : 발파현장 부근에 주택밀집
- (3) 발파공법 : Air Tube 발파 및 일반발파 공법
- (4) 발파패턴

표 4 | 발파패턴 (안)

구분	요소	단위	패턴	
			Air Tube 발파	일반발파
천공	천공경	mm	45	45
	천공간격	m	1.0	1.0
	최소저항선	m	1.0	1.0
	천공장	m	3.0	3.0

구분	요소	단위	패턴	
			Air Tube 발파	일반발파
장약	공당장약량	kg/hole	0.75	1.00
	지발당공수	hole/delay	1	1
	지발당장약량	kg/delay	0.75	1.00
	발파당공수	hole/round	1	1
	총천공수	공	20	20
	총장약량	kg	15	20



(5) Air Tube 사용량 : 공당 1개(1m/ea)

(6) 사용화약류

- 뇌관 : 전기뇌관

- 폭약 : 에델전(32mm)

(7) 발파 방법

먼저 일반적으로 천공하는 발파형태 즉 현장조건에 적합한 천공깊이, 천공간격, 저항선을 정하여 총 40공을 <표 4> 발파 패턴과 같이 천공하여 발파공법별로 장약을 하였다.

발파는 일반 발파기에 모선을 연결 하였으며 뇌관의 종류는 시험의 결과를 정확히 알기 위하여 순발 전기뇌관을 각각의 공에 삽입하여 공법별로 1공씩 발파를 수행하고 동일 위치에 서 계측을 실시하였다.

(8) 측정결과

표 5 | 20m 지점에서의 측정결과

발파 순서	공수 (공)	장약량(kg)		계측결과 [kine/dB(A)]	
		일반발파	Air Tube	일반발파	Air Tube
1	1	1.0	0.75	0.508/76.5	0.215/72.4
2	1	1.0	0.75	0.332/74.1	0.245/70.0
3	1	1.0	0.75	0.750/79.6	0.351/73.7
4	1	1.0	0.75	0.296/57.7	0.639/75.2
5	1	1.0	0.75	0.756/83.0	0.341/73.2
6	1	1.0	0.75	0.827/79.3	0.482/74.0
7	1	1.0	0.75	1.290/81.7	0.487/77.9
8	1	1.0	0.75	1.120/84.0	0.852/83.4
9	1	1.0	0.75	0.873/79.8	0.296/77.8
10	1	1.0	0.75	1.010/81.3	0.247/73.8
11	1	1.0	0.75	1.040/83.2	0.882/83.1
12	1	1.0	0.75	2.400/85.9	0.680/79.2
13	1	1.0	0.75	1.720/85.9	0.863/78.8
14	1	1.0	0.75	0.317/86.3	0.307/78.4

15	1	1.0	0.75	0.237/87.5	0.269/74.0
16	1	1.0	0.75	0.713/77.0	1.560/85.0
17	1	1.0	0.75	1.200/82.1	0.666/77.7
18	1	1.0	0.75	0.863/84.6	0.981/80.2
19	1	1.0	0.75	1.150/86.8	0.771/80.4
20	1	1.0	0.75	1.020/85.9	0.649/78.9

표 6 | 40m 지점에서의 측정결과

발파 순서	공수 (공)	장약량(kg)		계측결과 [kine/dB(A)]	
		일반발파	Air Tube	일반발파	Air Tube
1	1	1.0	0.75	N/A	N/A
2	1	1.0	0.75	0.225/70.0	0.397/72.4
3	1	1.0	0.75	N/A	N/A
4	1	1.0	0.75	0.438/73.6	0.333/72.0
5	1	1.0	0.75	0.137/69.4	0.257/71.6
6	1	1.0	0.75	0.297/73.6	0.352/72.4
7	1	1.0	0.75	0.478/75.0	0.591/76.2
8	1	1.0	0.75	0.260/69.8	0.330/71.8
9	1	1.0	0.75	0.487/78.2	0.198/71.0
10	1	1.0	0.75	0.189/69.8	0.313/72.6
11	1	1.0	0.75	0.705/79.8	0.395/74.0
12	1	1.0	0.75	0.216/70.0	0.216/70.0
13	1	1.0	0.75	0.692/82.2	0.275/70.6
14	1	1.0	0.75	0.511/77.6	0.319/74.0
15	1	1.0	0.75	0.625/78.0	0.227/77.0
16	1	1.0	0.75	0.670/80.2	0.259/78.4
17	1	1.0	0.75	0.651/82.0	0.395/76.4
18	1	1.0	0.75	0.772/79.4	0.176/71.4
19	1	1.0	0.75	0.138/70.6	0.187/78.2
20	1	1.0	0.75	0.210/70.0	0.200/70.0

표 7 | 60m 지점에서의 측정결과

발파 순서	공수 (공)	장약량(kg)		계측결과 [kine/dB(A)]	
		일반발파	Air Tube	일반발파	Air Tube
1	1	1.0	0.75	0.206	0.148
2	1	1.0	0.75	0.129	0.168
3	1	1.0	0.75	0.111	0.079
4	1	1.0	0.75	0.105	0.093
5	1	1.0	0.75	0.108	0.085
6	1	1.0	0.75	0.079	0.111
7	1	1.0	0.75	0.119	0.082
8	1	1.0	0.75	0.105	0.077
9	1	1.0	0.75	0.073	0.079
10	1	1.0	0.75	0.085	0.071
11	1	1.0	0.75	0.096	0.090
12	1	1.0	0.75	0.074	0.076
13	1	1.0	0.75	0.175	0.084

(9) 측정결과 분석

표 8 | 측정결과

구분	일반발파	Air Tube 발파
진동	1	0.75~0.8
소음	1	0.9~0.95
파쇄도	1	0.6~0.8
폭약량	1	0.75

05 결론

5-1. 경제성 분석

(1) 폭약량

발파 패턴은 천공장 3.0m에 공당장약량을 각각

0.75~1.0(kg/공)을 기준으로 하였으며 발파시의 계측치를 분석한 결과 공당장약량을 일반발파는 1.0(kg/공), Air Tube에 의한 발파는 0.75(kg/공)을 장전하여 발파를 수행한 결과 발파 후 파쇄입도에만 차이가 있을 뿐 굴착효과(굴진효과)는 거의 동일하였다. 따라서 Air Tube를 이용한 발파를 수행할 경우 폭약량을 약 25% 감소시킬 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 파쇄도 및 2차 파쇄비

1차 발파 후 발생하는 파쇄암의 크기는 Air Tube에 의한 발파결과가 더 작았으며 중 2차 소할의 괴석 발생률이 일반발파에서 약 15%이상 많았고, 이결과는 Air Tube에 의한 발파를 수행 하였을 경우 2차 소할비를 일반발파에 비해 약 15% 이상 감소시킬 수 있는 결과를 도출할 수 있었다.

5-2. 진동 및 소음의 감소

동일한 발파패턴(천공패턴 및 장약량)으로 발파를 수행한 결과 계측된 진동 및 소음량은 일반발파보다 Air Tube에 의한 발파에서 진동속도의 크기는 약 20~25%, 소음은 약 10%정도 감소됨을 관찰 할 수 있었다.

따라서 본 결과에 의하면 노천현장에서 일반발파공법에 비해 Air Tube를 이용한 발파를 할 경우 진동 및 소음의 감소는 물론, 폭약량, 전선재료비, 노무비 등의 감소를 얻을 수 있으므로 안전성, 경제성이 고려된 능률적인 굴착공법으로 사료된다. S

