

터널發破에서 一般發破와 AIR-TUBES發破의 比較研究

A Study on the Comparison of Conventional Blasting vs Air-Tubes Blasting in the Tunnel

진 정무, 양 국정, 이 천식, 심 동수, 김 용균, 강 대우
Jung-Moo Jin, Kook-jung Yang, Chun-Sik Lee, Dong-Soo Sim,
Yong-Kyun Kim, Dae-Woo Kang
동아대학교

초 록

발파공법이 소개된 이후로 계속해서 많은 우수한 발파이론이 발표되어 왔다. 그러한 이론들의 저변에 있는 궁극적인 목표는 효율의 증가와 경제성이다. 이에 본 연구는 Air-Tubes 발파공법을 소개하고 터널에서 일반발파와 비교하여 그 발파효율을 검토해 보았다. 연구의 배경이 되는 곳은 산청군 시천면 내대리와 하동군 목계리를 연결하는 2차선 국도 터널 공사 현장이며 전체 총연장은 2Km이다. 진동측정방법은 하나의 발파진동을 4개의 측정기로 측정하여 데이터분석에 사용하였다. 일반발파와 Air-Tubes의 진동측정을 4개소에서 각각 6회씩 실시하여 총 24개씩의 진동측정 데이터를 얻었고 회귀분석을 실시하여 95% 신뢰도의 발파진동 추정식을 얻었다. 시험발파 및 진동측정에 이어 매 발파마다 광파측량을 실시하여 진행장을 구하였으며 사용한 장약량은 Air-Tubes 발파시 25% 정도 적게 사용하였고 발파진동이 23% 감소하였다. 발파당 굴진장 및 Smooth blasting 발파시의 벽면의 상태는 동일하고 파쇄석의 크기는 Air-Tubes 발파시 더 작게 나타난다.

핵심어 : 발파공법, 효율, 경제성, 터널공사, Air-Tubes

1. 서 론

1.1. 연구배경

근래에 들어 토목공사를 함에 있어 발파작업이 수행되지 않는 곳은 흔하지 않다. 특히 터널공사 및 도로개설공사에 있어서는 발파작업을 뺀다면 공사자체를 수행할 수가

없는 경우가 많다. 따라서 터널발파작업에 항상 수반되는 진동, 폭음 및 그에 따른 보안물건과 인근 주민들의 환경적 피해에 대해 문제가 되고 있다. 이론적으로는 진동 및 소음을 감소시키는 방법으로 지발당 장약량을 줄이는 방법, 최소저항선 및 공간격을 줄이는 방법, 진동전파 차단용 방진구를 설치

하는 방법, Pre-Splitting 발파, 저폭속 폭약을 사용하는 방법, 지발뇌관을 사용하는 방법 및 지발뇌관의 지연시간 조절에 의한 진동의 상호 간섭 작용 등이 알려져 있다.

지발당 장약량을 줄이는 방법의 다른 방법들중 방진구 설치와 Pre-Splitting 발파방법이 있으나 모두가 지발당 장약량을 줄이는 방법과 동일하다. 발파진동을 줄이기 위해서는 지발당 장약량을 줄이는 방법이 가장 좋은 방법 중 하나이다. 그러나 지발당 장약량을 줄여 발파작업을 수행하는 것은 한계가 있고, 파쇄압력이 줄어들어 결국 경제성이 떨어지는 발파가 될 수밖에 없다. 현재 발파작업이 이루어지는 작업장에서는 적은 장약량으로 동일한 양의 파쇄암을 얻을 수 있고, 비장약량을 낮춤과 동시에 지발당 장약량을 줄여 진동 저감 효과를 얻기 위한 방법이 절실히 요구되고 있다. 20여 년 전부터 미국과 캐나다 등에서는 발파공내에 Air층을 형성 시키고 자유면쪽으로의 투사면적을 증가시켜 폭약이 폭발할 때 암반의 자유면쪽으로 작용하는 힘을 최대한 크게 작용하도록 하여 폭약의 에너지가 암반파쇄에만 이용될 수 있도록 하는 방법으로 바리스템(Vari-stem)과 가스백(Gas-bag) 등이 발파공법으로 적용되어 현재 사용되고 있으나 취급하기 곤란하고 가격이 비싸 경제적인 효과가 낮은 실정이며 노천발파에서만 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 터널 발파공 내에 일정 길이와 폭을 갖는 Air층을 형성시키는 Air-Tubes를 이용하여서 비장약량을 감소시켜 종래의 일반 터널 발파와 Air-tubes를 이용한 터널 발파를 비교 분석하였다.

1.2 연구개요

본 연구는 경남 하동군 청암면과 산청군

시천면을 연결하는 폭 11M, 길이 2000M의 도로 터널 공사장에서 터널발파시 터널내부에 동일한 발파진동을 4개의 진동측정기를 가지고 100-400M 거리에서 각각 측정하여 터널발파시 재래식 V-CUT과 Air-Tube를 사용한 V-CUT의 발파효과, 파쇄효과, 진동 및 소음, 경제성, 안정성, 터널내 구조물에 대한 영향 등을 비교하여 발파현장에서의 적용성 및 주변여건에 적당한 발파방법을 제시하고자 한다.

2. 지질 및 주변현황

2.1 주변현황 및 현장명

당 현장의 현장명은 "청암-시천간 도로 4차선 개설공사"이며 지리산 중산리에서 청학동을 연결하는 터널공사이다.

터널의 제원은 폭 11M, 높이 7.5M, 총연장 2000M이며 700-800M 굴착시공 시부터 실험을 위한 계측을 실시하였다. 주변에 민가는 없으며 400m거리에 한 채가 성토부로 가려져 있고 1Km이상의 거리에 15여 채의 민가가 위치해 있어 직접적인 소음 및 진동의 피해는 거의 없었다. 그리고 약 800M거리를 두고 15여 채의 가옥이 위치해 있고 발파현장이 해발 500M에 위치해 있으며 민가는 해발 420M정도에 위치해 있다.

2.2 지형 및 지질개요

본 조사지역은 한반도의 남단 중간부에 위치하고 있으며, 행정구역상 경상남도 하동군 청암면-산청군 시천면에 해당한다.

본 지역은 지리산 국립공원에 해당되며, 대부분 해발 1000m 내외의 높은 산릉들을 중심으로 하는 험준한 산악지대로 구성되며, 평야는 거의 찾아 볼 수 없다.

본 지역의 산계는 그 지세가 대체로 남북

방향 내지 북북동-남남서 방향을 유지하고 있으며 본 역의 수계는 주 산통을 중심으로 한 방사상의 계류가 형성되어 있다.

본 지역의 지질을 대관하면 변성퇴적암류와 편마암류를 기반으로 하고 이에 관입한 화성암류와 이들을 부정합으로 피복하는 퇴적암류로 구성되어 있다.

본 지역에 넓게 분포하는 변성암류는 퇴적암이 광역변성작용(regional metamorphism)과 그 후의 심한 화강암화 작용(granitization)을 받아 변성된 것으로 그 변성 연령은 7.74~12.43억 년으로 선캠브리아 변성암으로서 이들 변성암류를 화강암화 작용에 의한 교대 변성작용의 정도에 따라 변성 퇴적암류, 백립암, 메타테틱 편마암, 미그마타이트질 편마암, 화강암질 편마암, 반상변정 편마암, 괴상화강암질류 편마암으로 구분된다. 이러한 화강암화 작용의 말기에 페그마타이트질 및 애플라이트질인 물질이 도입되어 다시 혼성화작용(contamination)을 일으켜, 혼성 페그마타이트질 편마암이 형성되었다.

상기한 화강암화 작용과 혼성화 작용이 있는 후에 중성내지 염기성인 암택과 섬록암(diorite), 화강섬록암(grano-diorite), 흑운모 화강암(diotite-granite) 및 페그마타이트질 화강반암(pegmatitic-granite porphyry) 등이 변성암류를 관입하였다.

천공공경 : 45 m/m
 장약공수 : 120 ea
 폭약약경 : 32 m/m
 발파당 장약량 : 300 kg
 기폭방법 : 역기폭
 지발당 장약량 : 24 kg
 천공시간 : 200 min
 사용폭약 : Dynamite 및 Finex-1호
 장약시간 : 90 min
 사용뇌관 : 전기뇌관 #0 ~ #19
 최소저항선 : 0.8 M
 비장약량 : 1.39 kg/m'
 공간격 : 0.9 M

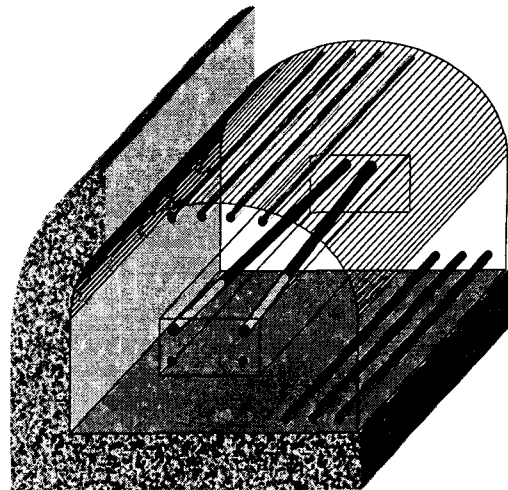


Fig. 1. 일반발파 장약 패턴도

3. 일반발파와 Air Tubes 발파공법

3.1 발파 패턴

(1) 일반발파의 장약발파 패턴

천공패턴 : V - CUT
 천공장 : 3.0 m
 발파단면적 : 80 m'
 굴진장 : 2.7 m

(2) Air-tubes발파의 장약발파 패턴

천공패턴 : V - CUT
 천공장 : 3.0 m
 발파단면적 : 80 m'
 굴진장 : 2.8 m
 천공공경 : 45 m/m
 장약공수 : 120 ea

폭약약경 : 32 m/m
 발파당 장약량 : 250 kg
 기폭방법 : 역기폭
 지발당 장약량 : 19 kg
 천공시간 : 200 min
 사용폭약 : Dynamite
 장약시간 : 120 min
 사용뇌관 : 전기뇌관 #0 ~ #19
 최소저항선 : 0.8 M
 비장약량 : 1.12 kg/m'
 공간격 : 0.9 M

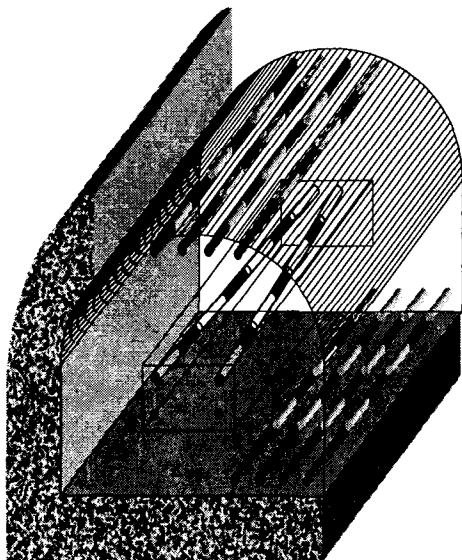


Fig. 2. Air-Tubes 발파의 장약 패턴도

Fig. 1, 2와 같이 일반터널발파에 비해 Air-Tubes 발파시의 비장약량을 1.39에서 1.12로 0.28(25%에 해당)줄여 발파를 행하였으며 장약시간이 Air-Tubes 발파공법 적용시 30분이 더 많은 120분이 소요되었다. Table. 1에 두 발파패턴을 간략하게 도표화하였다.

Table 1. 일반발파와 Air Tubes 발파의 패턴비교

구분	종래의 터널패턴	Air Tubes 패턴
천공장	3.0m	3.0m
굴진장	2.7m	2.7m
장약량	300kg	250kg
터널단면	80m'	80m'
천공수	120ea	120ea
공경	45m/m	45m/m
약경	32m/m , 17m/m	32m/m
사용폭약	HiMite 5500 Finex 1호	HiMite 5500
사용뇌관	전기뇌관MS# 0~#19	전기뇌관MS#0 ~#19
비장약량	1.39kg/m'	1.12kg/m'
발파횟수	6회	6회

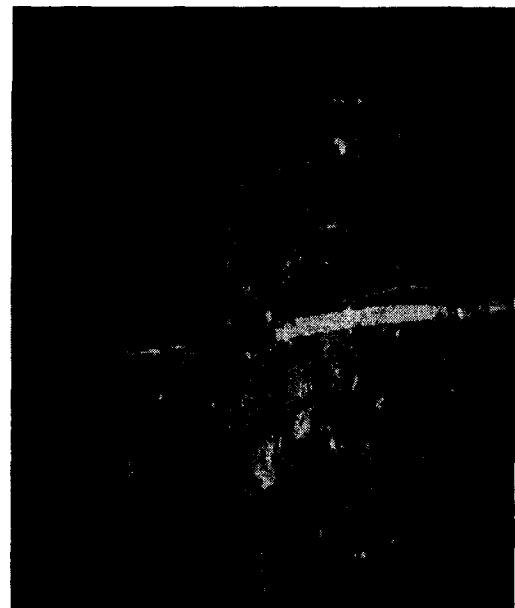


Fig. 3. Air-Tubes를 사용하여 장약된 공내부 모습-1

4. 진동측정 및 결과

4.1 진동 측정 방법

본 연구에 사용된 진동측정기는 캐나다 Instantel사에서 제작된 BLASTMATE(DS-477)²⁾ 및 BLASTMATE III이다. 이 측정기의 정밀도는 $\pm 0.01\text{mm/sec}$ 이며 측정범위는 진동은 $0.13\text{mm/s} \sim 253.99\text{mm/s}$. 폭풍압은 A보정의 경우 $50 \sim 100\text{dB}$, L 및 C보정의 경우 $100 \sim 140\text{dB}$, 오차는 $\pm 0.2\text{dB}$ 이다. $2 \sim 100\text{ Hz}$ 의 주파수대역의 측정이 가능하며 진동을 감지하는 Geophone과 공기중으로 전파하는 폭풍압을 감지하는 Microphone 및 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성되어있다.

모니터에 장착된 프린터로부터 주파수 그래프, 소음수준 변화그래프 및 USBM/OSMRE의 안전규정을 프린트할 수 있을뿐만 아니라 컴퓨터와 연결하여 진동성분의 진행성분(Longitudinal), 점선성분(Transverse) 및 수직성분(Vertical)과 주파수의 분석이 가능하다.

터널내에 각각 Fig. 4 와 같이 100M, 200M, 300M, 400M 위치에 진동측정기를 하나씩 배치하여 한번 발파에 4개의 자료를 취했으며 발파시 전구간에 상당한 폭풍압이 발생하므로 바닥을 깨끗이 청소하여 모암위에 진동 측정 Sensor를 스파이크로 고정시키고 그위에 모래주머니 등을 덮어 폭풍압^{3),6)}에 의한 오차를 최소한으로 했다. 특히 100M지점은 Jumbo-Drilling Machine을 측정기 앞에 배치하여 비산에 대비하였다.

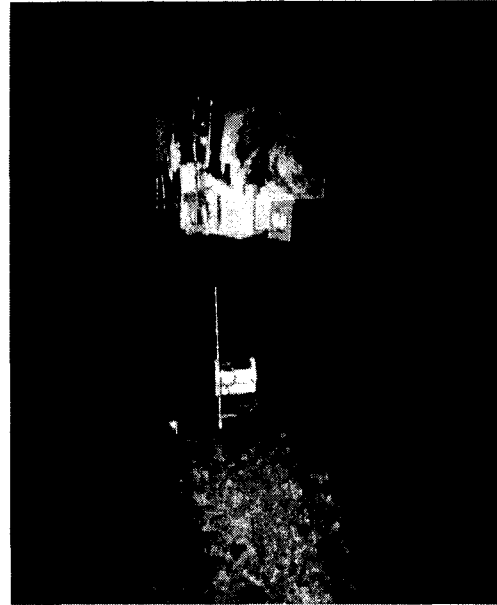


Fig. 4. 진동 측정 모습

4.2. 진동측정 Data 비교

(1) 일반발파의 진동측정 결과

Table 2. 일반발파의 진동측정 결과표

(unit : mm/s)

구 분	1 회	2회	3회	4회	5회	6회
100m	22.0	20.5	20.0	21.0	26.0	29.0
200m	8.0	7.8	15.0	11.7	12.0	9.0
300m	6.8	7.1	8.5	10.0	5.1	7.0
400m	5.0	4.0	3.9	4.2	3.8	6.2

(2) Air-Tubes 발파의 진동측정 결과

Table 3. Air-Tubes 발파의 진동측정
결과표 (unit : mm/s)

구 분	1 회	2회	3회	4회	5회	6회
100m	18.0	18.5	16.0	22.8	23.0	16.5
200m	6.4	6.2	9.0	7.9	8.6	6.4
300m	5.1	4.9	5.7	6.2	6.3	5.3
400m	4.0	3.2	3.1	4.2	3.0	4.6

(3) 일반발파와 Air-tubes 발파의 진동측정
결과비교

Table 4. 일반발파와 Air-tubes 발파의
진동측정치 비교 (unit : mm/s)

구 분	100M	200M	300M	400M
일반발파-①	23.42	10.58	7.42	4.52
Air-Tubes-②	19.13	7.42	5.58	3.68
일반발파와 Air-Tubes 발파의 진동속도 비	81.68 %	70.13 %	75.20 %	81.42 %

Table 2와 Table 3은 각각의 진동측정값을 나타낸 것이고 동일한 거리에서의 진동측정값을 Table 4에 도표 하였다. 일반발파와 Air-Tubes 발파의 지반 진동 속도를 비교하여 볼 때 100M를 예로 들면 Air-Tubes 발파의 진동속도가 19.13mm/sec 일 때 일반

발파 진동속도는 23.42mm/s로 Air-Tubes 발파의 진동측정값이 일반발파의 진동측정값의 81.68%로 측정되었음을 나타내며 전체를 평균을 내면 약 77%의 진동속도를 나타낼 수 있다.

4.3. 일반발파와 Air-tubes 발파와의 진동속도 비교

거리와 장약량의 변화에 따른 진동측정 데이터를 회귀 분석한 결과 다음과 같은 SD값과 진동 속도 추정식을 구할 수 있다^{1),4)}. 여기서 SD값은 거리가 100M이상이므로 Square Root Scaled Distance를 구했다.

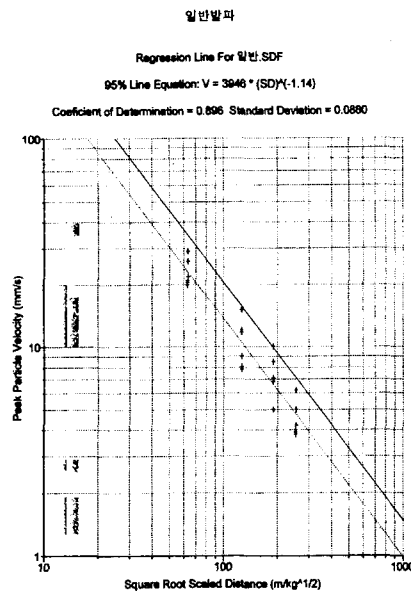


Fig. 5. 일반발파의 진동속도 추정식그래프

Fig. 5 및 Fig. 6은 일반 터널발파와 Air-Tubes 발파의 Scaled Distance에 따른 Peak Particle Velocity(최대입자속도)³⁾의 변화를 나타낸 그래프이며 점들이 일직선으로 나타내는 이유는 동일한 거리에서 측정

하였기 때문이다. 일반발파와 Air-tubes 발파를 각각 6회 실시하여 그 값을 분석하였고 두 그래프를 합쳐서 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

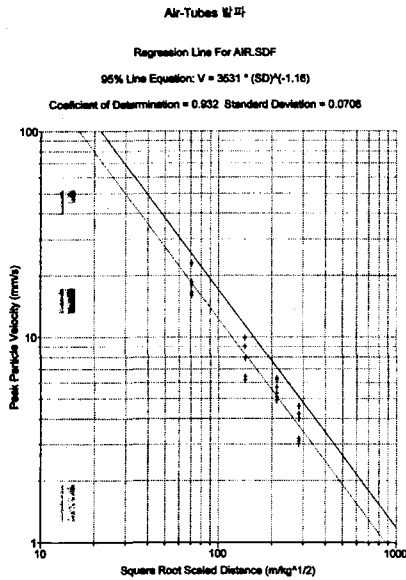


Fig. 6. Air-Tubes 발파의 진동속도 추정식 그래프

95%신뢰도 그래프³⁾를 사용하였고 일반발파시의 진동속도 추정식은 $V = 3946 \times (SD)^{-1.14}$ 이며 Air-Tubes 발파의 진동속도 추정식 $V' = 3531 \times (SD)^{-1.16}$ 이다

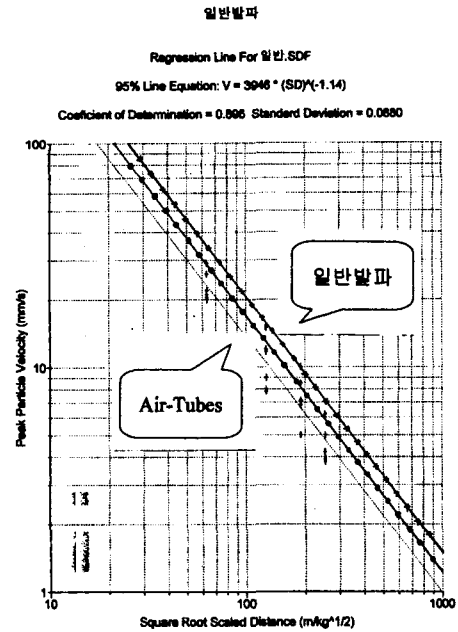


Fig. 7. 일반발파와 Air-Tubes 발파의 진동속도 추정식 그래프 비교

Table 5. 일반발파와 Air-Tubes 발파의 진동속도 추정식 비교표

	진동속도 추정식	K값	N값
일반 발파	$V = 3946 \times (SD)^{-1.14}$	3946	-1.14
Air-Tubes 발파	$V' = 3531 \times (SD)^{-1.16}$	3531	-1.16

95%신뢰도구간의 그래프를 도시하여 비교하였고 공분산도(Coefficient of Determination)와 표준편차(Standard Deviation)가 각각 89.6%와 93.2%, 0.088 및 0.071로 측정되어 신뢰성이 높음을 알 수 있으며 table. 5은 일반발파와 Air-Tubes 발파의 진동속도 추정식을 비교한 것이다.

K값은 Scaled Distance가 '1'일 때의 Peak Part Velocity값이며 즉, 그래프의 절편값이

다. 그리고 N값은 감쇄지수로써 그래프의 기울기를 나타내며 각각 -1.14, -1.16으로 나타난다.

일반발파와 Air-tubes 발파의 진동속도추정식을 가지고 SD값을 100으로하여 일반발파시의 예상진동속도V는

$$V = 3946 \times 100^{-1.14} = 20.70\text{mm/s 이고}$$

Air-tubes 발파시의 예상진동속도V'는

$$V' = 3531 \times 100^{-1.16} = 16.90\text{mm/s 이다.}$$

일반발파보다 Air-Tubes 발파시에 약 18%의 진동이 감소되어 나타났으며 이러한 감소의 원인은 공내에 위치시킨 에어튜브가 인접한 공의 자유면 역할을 하여 증가된 자유면이 발파효과를 증가시켰기 때문이다.

4.4. 발파효과 비교

일반 발파 시 Smooth blasting 공의 장약 및 발파 후 절개면 상태는 Fig. 8~9과 같으며 암반이 깨끗하게 잘려있음을 확인 할 수 있다.

하지만 정밀폭약이 1~3개가 흩어져 있거나 천반공에 그대로 매달려 있는 경우가 많아 안전성이 떨어진다. Air-Tubes 발파의 천반공 및 측벽공의 발파후의 상태 또한 Fig. 10~11과 같이 모암의 손상을 최대한 억제한 깨끗한 파단면을 얻었고 정밀폭약 및 순폭되지 않아 잔류된 폭약이 없었다. 그리고 각각 3M의 천공을 실시하여 일반발파와 Air-Tubes 발파의 굴진장은 동일하게 2.7M로 90%의 굴진률을 나타낸다.



Fig. 8. Smooth blasting 발파후의 암 절개면

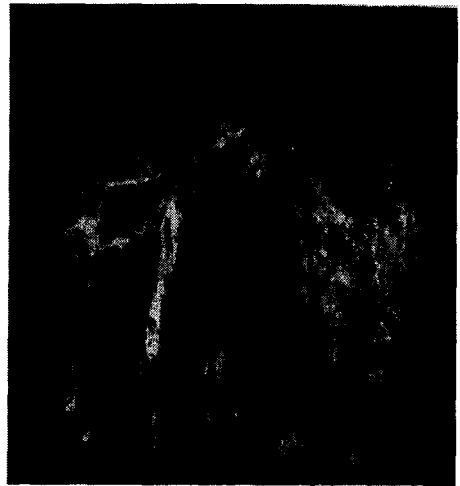


Fig. 9. Air-tubes 발파공법을 사용하여 생성된 파단선 모습

암반파쇄석의 굵기와 쌓인 위치는 일반발파시 직경 50~100cm 정도의 암괴가 대량으로 발생하였고 50M 거리까지 퍼져서 분포하고 있으며 Air-tubes 발파후의 파쇄석은 직경 50~70cm의 크기로 70M 거리까지 분포하며 Fig. 10~11에 각각의 상태를 나타내었다.



Fig. 10. 일반발파후 암반파쇄 상태



Fig. 11. Air-Tubes 발파후 암반파쇄 상태

Table 6은 본 연구대상 발파현장의 여건을 고려하여 얻은 일반발파와 Air-Tube를 적용한 발파의 경제성을 비교한 도표이며 일반발파와 Air-Tubes 발파에 소요되는 경비 중 폭약만을 고려한 것이다. 발파당 소요되는 경비는 320,000원이 Air-Tubes 발파시 절감됨을 알 수 있고 터널 총연장 2000m를

비교한다면 21,300,000원(약 30%)의 경비절감을 추정할 수 있다.

Table 6. 경제성 비교 검토(폭약)

구분	일반 터널 발파	Air-Tubes 터널 발파
폭약량/발파	Dynamite 260kg Finex 1호 40kg	Dynamite 250kg
폭약가격/kg	Dynamite : 3,200원/kg Finex 1호 : 7,200원/kg	Dynamite : 3,200원/kg
소요경비/발파	260kg x 3,200원 + 40kg x 7,200원 = 1,120,000원	250kg x 3,200원 = 800,000원
총 연장(2000M)에 대한 경비대비	2000M/3M x 1,120,000= 746,000,000원	2000M/3M x 800,000= 533,000,000원
차액 비교	213,000,000 원	

5. 결론

일반발파와 25% 장약량을 감소시킨 Air-Tubes 발파의 실험 결과는 다음과 같다.

(1) 일반발파와 에어튜브(Air-Tubes)발파를 비교한 결과 Air-Tubes 발파가 폭약량을 일반발파보다 25% 줄이더라도 발파 후 터널 진행장의 차이는 없이 동일하다.

(2) 발파효과는 굴진장, 여굴, 암파쇄량 및 외곽공 발파후의 깨끗한 절개면의 상태가 동일하며 Air-Tubes 발파시 쇄석의 크기가 더욱 작다.

(3) Air-Tubes 발파의 진동속도가 종래의 발파에 비교해 약 18% 감소를 나타내고 있어 터널작업시 수행되는 Shotcrete, Rock-bolt 및 Steel-rib등의 터널 구조물에 물리적

영향이 일반터널발파보다 Air-Tubes 발파의 영향이 훨씬 적어서 터널구조물의 안정화에 효과적⁶⁾일 것으로 사료된다.

(4) 일반발파시 외곽공에는 정밀폭약을 사용하고 많은 불발된 잔류 폭약이 발생하나, 에어튜브(Air-Tubes)발파에는 일반 폭약을 외곽공에 사용할 수 있어 일반 발파에서 나타나는 잔류폭약의 위험으로부터 벗어날 수 있어 안전한 발파수행이 가능하다..

(5) Air-Tubes 발파공법은 상대적으로 고가인 정밀폭약을 사용하지 않으므로 일반발파에 비해 경제성이 30% 우수하다.

참 고 문 헌

- 1) 정철현, 1997, “화약발파총해,” 도서출판 서우, 2장 pp.2~89.
- 2) “BlastMate Series II User Manual (DS-477/677),” 1993, INSTANTEL INC., p.18~46.
- 3) Charles H. Dowding, “Blast Vibration Monitoring And Control,” p.101~117 , p.24~40.
- 4) 강대우, 1998, “알기쉬운 발파공학,” 구미서관, p.205~212 , p.230~231 . p.233~242.
- 5) Sushil Bhandari, 1997, “Engineering Rock Blasting Operations,” p.326~335.
- 6) Sing O. Olofsson, 강대우 역, “Applied explosive Technology for construction and Mining,” 1995, p.185~190 p.244~249.
- 7) 대한화약기술학회, 2000, “화약발파,” Vol. 18, No. 3, p.59~65.