

자립형 에어튜브의 현장적용에 관한 사례연구

이 신^{1)*}, 강대우²⁾

A Case Study on the Application of Self Supporting Air Tube

Lee Shin and Kang Dea Woo

Abstract Already, the air deck blasting method has been used to take many advantages of blasting. In the existing air deck blasting method, air deck is made usually on column charge. But in the case study, we analyzed about the effect of self supporting air tube which made air deck in column charge. As results of this case study, it was shown that blasting vibration was decreased about 20~26% and quantity of explosive was decreased about 10~20%. Also, fragmentation was shown to be smaller than it of common blasting method.

Key words Air tube, Air deck blasting, Blasting vibration, Air-blast

초 록 에어덱 발파방법은 더 좋은 발파효과를 얻기 위해 실행되어지고 있다. 기존의 에어덱 발파방법은 주로 장약장 상부에 공기층을 형성한다. 그러나 본 연구는 장약장 중간부분에 공기층을 형성하는 자립형 에어튜브의 효과를 분석하기 위하여 실시되었다. 연구 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 발파로 인한 풍압은 약 20~40%, 진동은 약 20~26% 정도의 감쇠효과가 나타났고, 화약량의 경우 약 10~20%정도 절감할 수 있었다. 또한 파쇄도의 경우 일반발파에 비해 더 작은 입도를 보였다.

핵심어 에어튜브, 에어덱 발파방법, 발파진동, 폭음

1. 서 론

암반파쇄를 위하여 건설 현장이나 광산현장에서 가장 많이 사용되는 방법이 화약을 이용한 발파방법이다. 대부분의 발파방법은 양호한 파쇄를 얻으면서도 소음과 진동을 줄이는 것을 목적으로 발달해 왔으며, 근래에 주목 받고 있는 기술들 중의 하나는 공기층을 이용한 발파방법, 즉 에어덱 발파방법이다. 외국에서는 이미 공기층을 이용한 발파방법으로 vari-stem, gas-bag, power-deck, air-bal 등을 사용한 발파가 널리 이용되고 있으며, 국내에서 개발된 에어튜브를 이용한 발파방법 또한 널리 사용되어지고 있다¹⁾. 이런 공기층을 이용한 발파방법들은 사용되는 화약량을 줄이면서도 발파로 인한 에너지를 효율적으로 사용함으로써 파쇄도를 향상시키고, 소음과 진동을 줄이며, 경제적인 절감효과를 얻는 것으로 알려져 있다.

그러나 기존 제품들은 주로 장약장의 상부 내지는 하부에 설치하도록 되어있으며, 기존 제품을 장약장 중앙에 설치하려면 정확한 공기층의 부피를 형성하기 어렵고, 작업이 복잡하거나 이중뇌관을 사용해야 하는 단점이 있다. 따라서 이런 단점을 극복하고 장약장 중간부분에 공기층을 형성함으로써 폭력을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있는 방법이 필요하게 되었다.

이를 위해 기존 에어튜브를 구조가 단순하면서 장약장 중앙에 장착하기 쉽고, 작업이 간편하도록 자립형 에어튜브로 변형시켰다.

이 연구는 자립형 에어튜브의 현장적용에 관한 사례 연구로 석회석광산에서 자립형 에어튜브를 장약장 중간부분에 분산시켜 공기층을 형성하고 일반 발파와 자립형 에어튜브를 사용한 발파의 파쇄도, 소음, 진동 및 화약의 절감 등에 관하여 분석하였다.

2. 에어덱 발파방법의 원리

2.1 에어덱(air-deck) 발파의 이론적 배경

기존의 일반발파는 천공하부에서부터 폭약을 장전하

¹⁾ 동아대학교 건설기술연구원 연구소 특별연구원

²⁾ 동아대학교 자원공학과 교수

* 교신저자 : unit2@korea.com

접수일 : 2007년 7월 19일

심사 완료일 : 2007년 8월 16일

고 상부에 전색을 하기 때문에 천공하부에 폭약이 편중되고 전색이 너무 길어, 폭약이 폭발할 때 폭력의 효율적 분산을 저해하게 된다. 폭력이 저항선이 짧은 자유면 쪽(벤치면)으로 집중되기 때문에 장약장과 자유면사이의 암석의 입도는 매우 작고 상부 전색부분에 대과가 생기는 경우가 많이 발생한다²⁾. 이 경우 대과를 적정한 크기로 파쇄하기 위한 소할발파가 필요하므로, 경제적 손실 뿐만 아니라 비석과 소음, 진동 등의 환경적 문제를 가중시킨다. 즉 하부의 장약 집중과 비효율적인 장약분포는 발파진동과 폭음을 증가시키는 원인으로 작용되어 필요 이상의 환경적 피해와 분쟁의 가능성을 가져올 수 있다. 기존 에어택 발파방법의 원리는 장약실과 전색 사이에 공기층을 형성시킴으로써 폭약이 폭발하는 순간에 자유면 쪽으로 폭력의 투사면적이 넓혀지도록 하고 전색의 길이를 짧게 하여, 폭력의 분산 효과가 발생하도록 하는 것이다.

즉 에어택 발파는 폭약의 폭굉에 의한 충격파가 장약 중간에 형성된 공기층에서 매우 빠른 속도로 발파공을 따라서 확산되고 고압으로 전색에 충격을 주고 반사하면서 암반에 추가적인 파쇄를 주는 발파 방법을 가리킨다. 이로 인해 폭력의 효율적인 분산과 과장약을 줄임으로서 폭약의 사용량을 줄일 뿐만 아니라 발파로 인한 폭음과 진동을 줄이며 파쇄도를 향상시켜 환경적 피해를 감소시킬 수 있게 된다. 환경적 분쟁의 소지를 낮추고 경제적인 발파를 목적으로 선진국에서는 많은 연구가 이루어지고 있는 기술이다^{3,4)}.

2.2 기존의 공기층을 이용한 발파 방법

이미 선진국의 발파현장에서는 에어택 공기층을 이용한 다양한 발파방법을 적용하기 위해 Vari-stem, Gas-bag, Power deck 등의 제품을 이용하였다. 하지만 이러한 기술들은 공기층을 완벽하게 활용하기에는 부족한 점이 있고 사용상 복잡하고 장착시간이 오래 걸리며, 정확한 공기층의 부피를 확보하기 어려운 점이 있다.

2.3 본 연구에 적용된 자립형 에어튜브

자립형 에어튜브는 지름(Φ) 53 mm, 길이 1 m인 제

품과 지름(Φ) 53 mm, 길이 0.5 m인 제품, 지름(Φ) 200 mm, 길이 2 m인 제품, 그리고 지름 300 mm, 길이 1 m인 포켓형 에어튜브 제품 등이 있다.

Fig. 1은 본 연구에 적용된 지름(Φ) 53 mm, 길이 1 m인 자립형 에어튜브 제품이다.

3. 현장실험 및 분석

3.1 에어튜브와 일반발파에 적용한 발파패턴

동일한 조건에서 두 발파방법을 비교하기 위하여 자립형 에어튜브를 사용한 발파와 일반발파의 발파패턴은 천공경, 천공장, 공간격, 저항선은 동일하게 하였고, 전색장과 에어튜브의 높이, 화약량만을 달리하여 적용하였다.

일반발파와 자립형 에어튜브를 사용한 발파의 패턴은 Table 1과 같다. 일반발파와 자립형 에어튜브를 사용한 발파패턴의 천공수는 20공, 사용폭약은 한국화약의 암포, 뇌관은 전기뇌관으로 지발당 뇌관수는 1개, 지발당 전기뇌관의 시차는 20 ms, 전색은 모래를 사용하여 동일하게 설계하였다.

일반발파의 발파패턴은 천공직경 89 mm, 천공장 17 m, 천공간격 3.8~4.8 m, 최소저항선 3.5~4.5 m, 장약장 12.5~13.5 m, 전색장 3.5~4.5 m, 한 공당 장약량 60~75

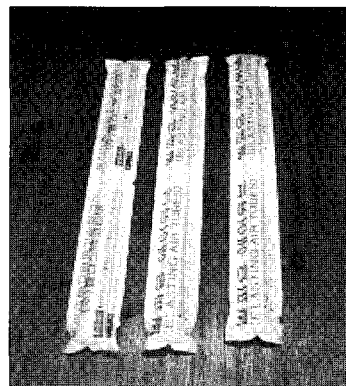


Fig. 1. Self supporting air tube

Table 1. General and air tube blasting pattern I (in limestone mine)

	Hole diameter (mm)	Hole length (m)	Hole space (m)	Burden (m)	Total charge (kg)	Height of charge (m)	Stemming (m)
General blasting	89	17	3.8~4.8	3.5~4.5	60~75	12.5~13.5	3.5~4.5
Air tube Blasting	89	17	3.8~4.8	3.5~4.5	50~60	13~14	3~4

kg, 지발당장약량 60~75 kg, 뇌관은 순발~MS19까지 사용하였다.

자립형 에어튜브를 사용한 발파패턴은 천공직경, 천공장, 천공간격, 최소화항선은 동일하고, 장약장 13~14 m, 전색장 3~4 m, 한 공당 장약량 50~60 kg, 지발당장약량 50~60 kg, 뇌관은 순발~MS19까지 사용하였다.

자립형 에어튜브를 사용한 발파 패턴에서는 길이 1 m, 직경 53 mm인 자립형 에어튜브 3~4개를 장약장 사이에 사용하여 공기층을 형성하였으며, 장약장 중양을 중심으로 분리되도록 에어튜브를 장착하였다.

일반발파는 공기층을 형성하지 않고 일반적으로 사용하는 방법대로 전색과 장약을 실시하였다.

일반발파와 자립형 에어튜브를 사용한 발파의 예는 Fig. 2와 같다.

3.2 발파진동 측정 장비 및 측정방법

본 연구에 사용된 발파진동 측정기기는 캐나다 Instan-tel 사에서 제작된 Blastmate 시리즈이고, 총 7대의 진동 측정기를 일정한 간격으로 일렬로 설치하여 발파진동을 측정하였으며, 측정위치는 발파지점으로부터 각각 30 m, 50 m, 70 m, 90 m, 110 m, 150 m, 190 m으로 설정하였다.

3.3 파쇄입도분석 방법

파쇄물의 입도측정에는 파쇄물의 디지털 이미지로부터 입도측정이 가능하도록 제작된 Split-desktop 프로그램을 이용하였다.

이 프로그램을 이용한 분석의 단계는 디지털 이미지 입력 ⇒ 이미지로부터 파쇄물의 경계부 추출 및 연산

⇒ 결과분석 ⇒ 출력단계로 나누어진다.

3.4 일반발파와 자립형 에어튜브를 사용한 발파의 진동과 폭음의 분석

일반 발파의 경우 자승근 환산거리를 이용한 진동 속도 추정식은 $K=630, n=-1.35$ 이고 결정계수는 0.94이다 (Fig. 3(a)참조).

$$V = 630 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.35} \tag{1}$$

이 경우 삼승근 환산거리를 이용한 진동 속도 추정식은 $K=1640, n=-1.35$ 이고 결정계수는 0.94이다(Fig. 3 (b)참조).

$$V = 1640 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.35} \tag{2}$$

일반발파의 경우 발파풍압의 추정식은 $K=1087, n=-0.58$, 결정계수=0.52로 분석되었다(Fig. 3(c)참조).

$$V = 1087 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-0.58} \tag{3}$$

자립형 에어튜브를 사용한 발파의 폭음과 진동을 분석하면 아래와 같이 나타난다.

이 경우 자승근 환산거리를 이용한 진동 속도 추정식은 $K=477, n=-1.32$ 이고, 결정계수는 0.932이다(Fig. 4 (a) 참조).

$$V = 477 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.32} \tag{4}$$

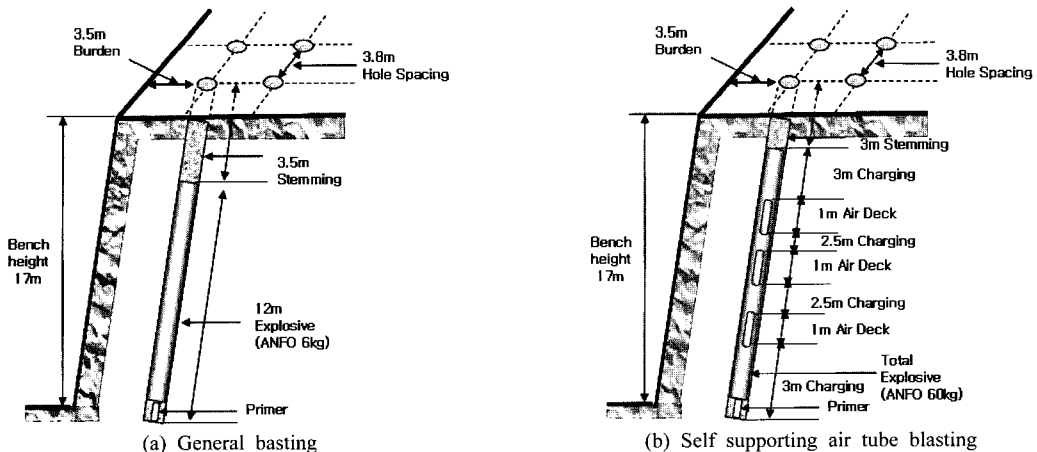
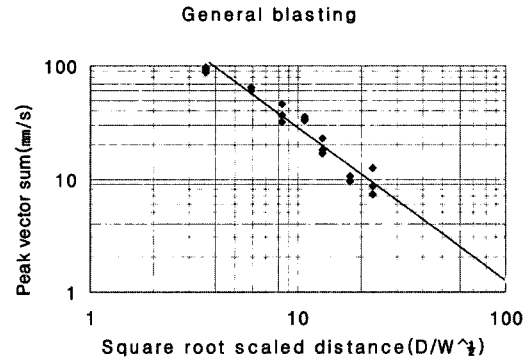
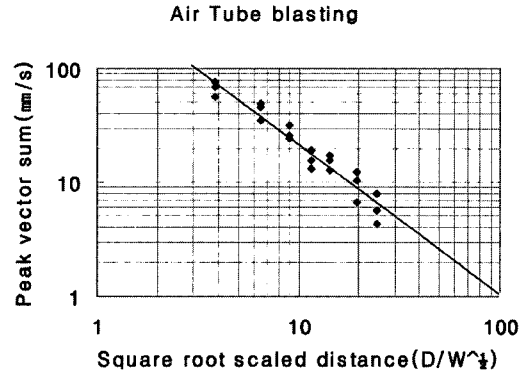


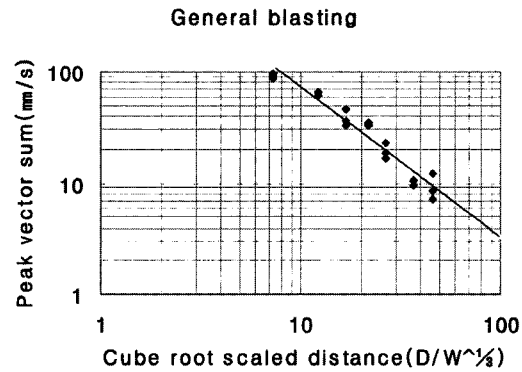
Fig. 2. Blasting patterns



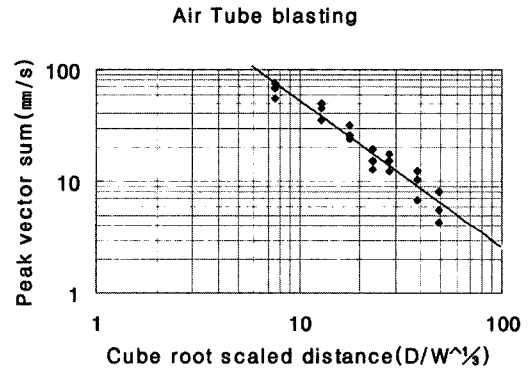
(a) Relationship between peak vector sum and square root scaled distance of blasting vibration



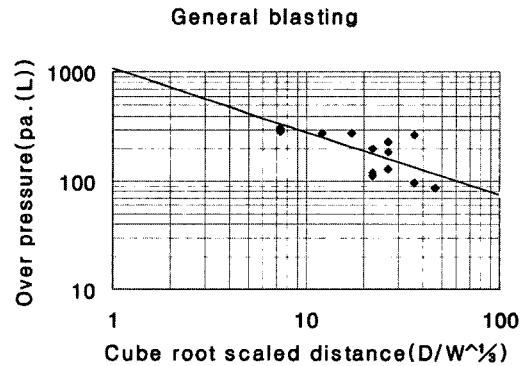
(a) Relationship between peak vector sum and square root scaled distance of blasting vibration



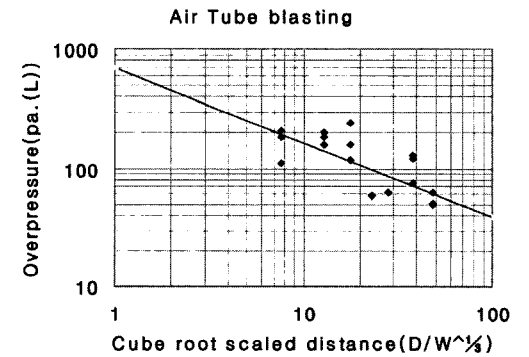
(b) Relationship between peak vector sum and cube root scaled distance of blasting vibration



(b) Relationship between peak vector sum and cube root scaled distance of blasting vibration



(c) Relationship between overpressure and cube root scaled distance of blasting



(c) Relationship between overpressure and cube root scaled distance of blasting

Fig. 3. analyses of general blasting

Fig. 4. analyses of air tube blasting

또한 삼승근 환산거리를 이용한 진동 속도 추정식은 $K=1110$, $n=-1.32$ 이고 결정계수는 0.932이다(Fig. 4(b) 참조).

$$V = 1110 \times \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.32} \quad (5)$$

에어튜브 발파풍압의 폭음의 환산식은 $K=699$, $n=-0.63$, 결정계수=0.49이다(Fig. 4(c) 참조).

$$V = 699 \times \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-0.63} \quad (6)$$

일반발파와 비교하여 에어튜브를 이용한 발파에서는 폭약량을 약 10~20% 절감할 수 있었다.

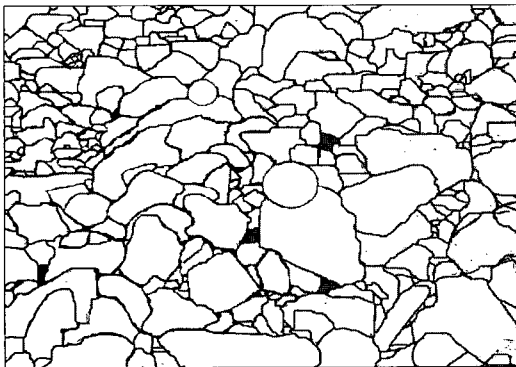
자승근 환산거리를 이용한 일반 발파의 진동 속도 추정식(식 1)과 에어튜브를 이용한 발파의 진동 속도 추정식(식 4)를, 비교하면 실험의 대부분을 포함하는 환산거리 4에서 30의 범위 내에서, 에어튜브를 이용한 발파가 일반 발파에 비하여 약 20~26% 정도 진동을 감쇠시킬 수 있는 것으로 나타났다. 발파로 인한 폭음의 경우 측정범위 내에서 삼승근 환산거리를 이용한 폭음의 추정식을 사용하여 비교한 결과 에어튜브를 이용한 발파와 일반발파의 발파풍압 추정식은 분산이 크고 결정계수가 낮은 경향이 있으나 일반발파에 비해 에어튜브를 이용한 발파에서 풍압이 20~40%정도 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 일반발파에 비해 에어튜브를 이용한 발파가 발파로 인한 폭음과 진동을 줄이는데 효과가 있는 것으로 분석되었다.

3.5 파쇄도 분석

Fig. 5의 (a)는 일반발파로 인한 파쇄석의 형태를 보



(a) Picture of fragmentation



(b) Digital image

Fig. 5. Picture and image of general blasting

여준다.

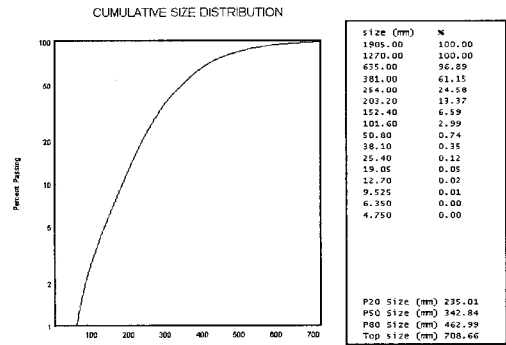
Fig. 5의 (b)는 Fig. 5의 (a)를 이미지화한 것이다. 일반 발파를 Schuhmann 방법을 이용하여 분석한 결과 평균 파쇄입도(X_{50})는 34.28 cm로 분석되었다.

파쇄암석 전체무게 %에 해당하는 각각의 입도분석 결과 20%, 50%, 80%의 입자 크기는 각각 23.5 cm, 34.28 cm, 46.3 cm로 나타났다. Fig. 6은 각각 일반발파에서 입도분포곡선과 누적입도분포곡선을 나타낸다.

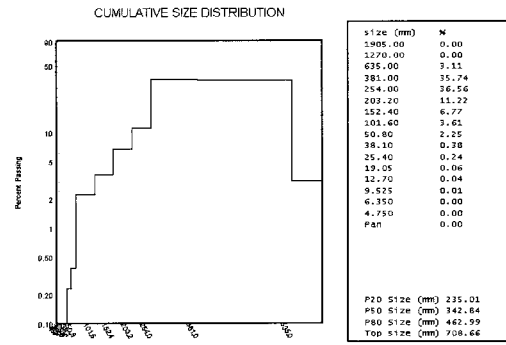
Fig. 7의 (a)는 에어튜브를 이용한 발파방법에 의한 파쇄석의 형태를 보여주고 있으며, Fig. 7의 (b)는 이것을 영상 이미지화한 것이다.

에어튜브를 이용한 발파의 경우 Schuhmann 방법을 이용하여 분석한 결과 평균 파쇄입도(X_{50})는 28.43 cm로 분석되었다.

파쇄암석 전체무게 %에 해당하는 각각의 입도분석 결과 20%, 50%, 80%의 입자 크기는 각각 18.1 cm, 28.43 cm, 43.49 cm로 분포하고 있다. Fig. 8은 각각 자립형 에어튜브를 이용한 발파에서 입도분포곡선과 누적입도분



(a) Size distribution

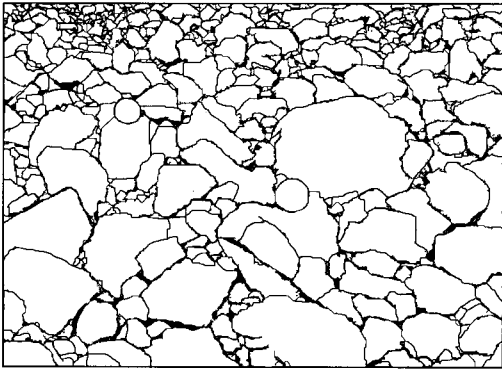


(b) Cumulative size distribution

Fig. 6. Analyses of fragmentation of general blasting



(a) Picture of fragmentation



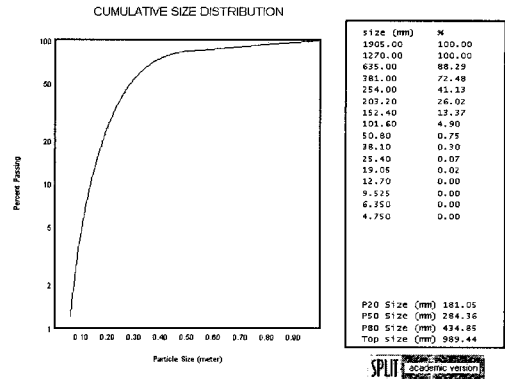
(b) Digital image processing

Fig. 7. Picture and image of air tube blasting

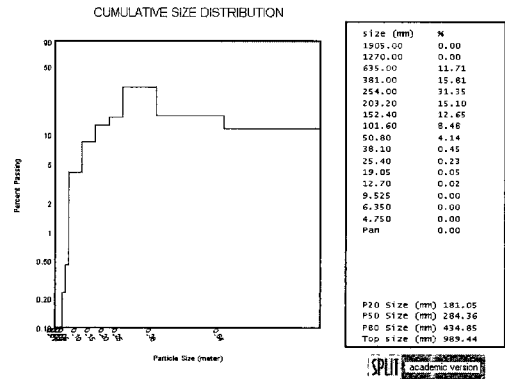
포곡선을 나타낸다.

파쇄물의 평균입도크기 분석결과 에어튜브를 사용한 발파방법이 일반발파방법에 비하여 발파제원(공경, 천공장, 저항선, 공간격 등)은 동일하나 공(지발당)당 장약량을 적게 적용하였음에도 파쇄입도는 보다 양호한 수준으로 나타났다. 일반발파의 경우 34.28 cm로 파쇄입도 관리 측면에서 상대적으로 약간 불리한 결과를 나타내었으며, 자립형 에어튜브를 사용한 발파를 적용하였을 경우는 평균 파쇄입도가 28.43 cm로 시험 위치에 따른 편향성이 비교적 작고 균질하며 비교적 고른 파쇄입도 분포 양상을 나타내었다.

그러나 자립형 에어튜브를 이용한 발파방법의 최대 파쇄석의 크기가 98.96 cm로 일반발파의 최대 파쇄석의 크기 70.87 cm보다 크게 나타났는데, 이는 파쇄물의 평균크기와 20%, 80% 크기에서 자립형 에어튜브를 이용한 발파의 파쇄물 크기가 작게 나타남을 볼 때 절리의 형태 등 지질적인 이유로 인해 비정상적으로 크게 나타났다고 판단되어진다.



(a) Size distribution



(b) Cumulative size distribution

Fig. 6. Analyses of fragmentation of general blasting

4. 결론

지발당장약량과 전색장의 길이만 다를 뿐 동일한 조건에서 이루어진 일반발파와 자립형 에어튜브를 이용한 발파를 석회석광산에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화약 사용량의 경우 에어튜브를 이용한 대규모 석회석광산의 에어덱 발파방법에서 약 10~20% 정도 절감할 수 있었다.
2. 발파로 인한 진동의 경우 에어튜브를 사용한 발파방법이 약 20~26% 정도의 진동감쇠효과를 나타내었고, 폭음의 경우는 20~40% 정도의 음압 감쇠효과를 나타내었다.
3. 파쇄도의 경우, 일반발파방법과 자립형 에어튜브를 이용한 air-deck 발파방법에서 파쇄물의 평균크

기(X_{50})를 비교 분석한 결과, 일반발파방법의 경우 34.28 cm, 에어튜브의 경우는 28.43 cm로 나타났다. 그 결과 에어튜브를 이용한 발파방법이 일반발파에 비하여 발파제원이 동일하고 지발당장약량이 약 10~20% 적은 조건에서도 상대적으로 파쇄입도의 편향성이 작으며 파쇄입도도 작고 균질하여 좋은 파쇄효과를 보였다.

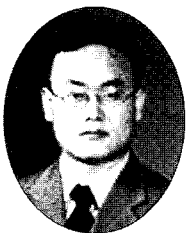
감사의 글

본 연구는 (재)부산테크노파크에서 시행한 2006년 산학기술혁신사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 김상욱, 2005, 도심지 노천발파에서 에어데킹 발파공법의 효과에 관한 연구, 58p..
2. 원연호, 2005, 에어데크(Air Deck)원리를 이용한 발파공법의 효과 고찰, 제 3회 한화발파기술 심포지엄, pp 251-252.
3. 김용균, 2003, 노천광산과 Tunnel에서 일반발파와 에어튜브 발파의 비교 연구, 3 pp 5-52.
4. Liqing Liu & P. D. Katsabanis, "Numerical modelling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting, pp 5-15.

이 신



1995년 동아대학교 공과대 자원공학과 공학사
 2000년 동아대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2007년 동아대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 016-568-0684
 E-mail: unit2@korea.com
 현재 동아대학교 건설기술연구원 연구소 특별연구원

강 대 우



1980년 한양대학교 공과대 자원공학과 공학사
 1982년 한양대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1987년 한양대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 016-840-8809
 E-mail: dwkang@dau.ac.kr
 현재 동아대학교 자원공학과 교수