TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 27, No. 1, 2017, pp. 1-11
https://doi.org/10.7474/TUS.2017.27.1.001
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

대단면 석회석 광산 갱도 내 국부선풍기 승압력 및 통기효과 비교 연구

박동준, 강현호, 이창우*

A Comparative Study on the Auxiliary Fan Pressure and the Ventilation Efficiency in Large-opening Limestone Mine Airways

Dongjun Park, Hyeonho Kang, Changwoo Lee*

Abstract Most of the local limestone mines are developed as large-opening underground mines, while mine ventilation is heavily dependent on the natural ventilation and auxiliary systems, rather than the mechanical ventilation system using main fans. The current auxiliary ventilation system with fan and ducting requires optimization since enhanced deployment of diesel equipment demands higher airflow rate and the associated cost is expected to be too excessive for the local mine operators. This paper aims at optimizing the fan capacity for the working site ventilation through comparing the fan pressure in the mine airway and the ventilation efficiency of an axial-flow fan and a propeller fan developed in this study.

Key words Large-opening limestone mine, Auxiliary fan, Axial-flow fan, Propeller fan, Ventilation efficiency

초 록 국내 지하 석회석 광산은 대부분 대단면 갱도로 개발되고 있으며 갱내통기는 주요 선풍기에 의한 통기방식보다는 자연통기 및 국부통기에 의존하고 있다. 국부통기는 국부선풍기와 풍관을 이용한 급배기 통기방식을 적용하고 있으나 대단면 갱도 특성과 갱내 굴진·운반장비의 디젤화에 따라 소요통기량이 대폭 증대하여 통기의 효율 및 경제성 확보가 주요과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 대단면 갱내 작업장 국부통기를 위한 선풍기 용량 최적화를 위하여 축류식 및 프로펠러 선풍기를 개발하여 갱내 승압력 및 통기효과를 비교 분석함을 목적으로 한다.

핵심어 대단면 석회석광산, 국부선풍기, 축류식 선풍기, 프로펠러 선풍기, 통기효과

1. 서 론

현재 지표부근의 부존된 고품위 석회석 자원의 고갈과 환경 규제로 인해 국내 석회석 광산은 점진적으로 갱내 채굴로 전환되어 연간 최대 40 m까지 급속히 심부화 하고 있다. 한편, 생산성 증대를 위하여 다양한 종류의 대형 디젤장비를 사용하고 있어 이들 장비로 부터 배출되는 열, 매연, CO, NOx 등으로 인하여 작업환경이 악화됨에 따라 작업효율 및 안전성 저하 문제들이 대두되고 있다(Lee and Nguyen, 2015).

국내 대부분의 석회석 광산의 통기는 주요 선풍기와 같은 통기설비를 이용한 전체 갱내통기 방식보다는 자연통기에 주로 의존하고 필요에 따라 국부 선풍기를 이용한 지엽적 통기(regional ventilation)방식에 의존하고 있다. 국내 석회석 광산과 같이 교대시간 내에 채굴작업이 동시에 진행되는 작업장이 인접해 있지 않고 작업장 개소 수도 2~3개 정도에 불과하므로 주요 선풍기를 이용한 광산 전체통기방식(total mine ventilation system)보다는 적절한 설비용량의 국부선풍기를 이용한 국부통기방식이 상대적으로 적합하기 때문이다. 자연통기는 광

Received: Dec. 30, 2016
Revised: Jan. 16, 2017
Accepted: Jan. 18, 2017
***Corresponding Author:** Changwoo Lee
Tel) +82512007769, Fax) +82512007771
E-Mail) cwlee@dau.ac.kr
Dept. of Energy and Mineral Resources, Dong-A University, Busan, Korea

산 내·외부의 공기밀도 차이와 갱구에 작용하는 풍압에 의하여 가능하지만 통기량의 확보와 통기방향 제어가 어려워 심부화 및 대형화가 진행된 국내 광산에서는 소요통기량 확보를 위한 통기시스템의 구축이 지하광산의 핵심과제가 되고 있다.

국내 대형 석회석광산에서 사용하고 있는 국부선풍기 용량은 7.5～74.6 kW이며 풍관과 연결하여 송기(blowing) 방식으로 주로 이용되며 작업장 부근에서는 일부 배기(exhaust)방식으로도 이용되고 있다. 그러나 이들 국부선풍기는 대부분 용량기준 선풍기 풍압이 1000 Pa이상인 고풍압 선풍기로 대단면 갱내에서 필요한 소요 풍압보다 과다한 설비용량을 가지므로 통기효율 저하 및 소요비용이 과도하게 소모되어 최적화의 필요성이 대두되고 있다(Lee and Nguyen, 2015). Fig. 1은 석탄광산 갱도에 설치된 축류식 고풍압 선풍기를 대단면 석회석 갱도에 설치하는 경우에 운전점이 A점(고압력, 저풍량)에서 B점(저압력, 고풍량)으로 옮겨짐을 보여준다. 그러나 대단면 갱도에 축류식 고풍압 선풍기 대신에 프로펠러 선풍기와 같은 저풍압 선풍기를 설치하는 경우에는 운전점이 C점(저풍압, 고풍량)에서 결정되므로 대단면 갱도인 경우에 저풍압 프로펠러 선풍기를 사용하는 경우가 풍압 및 풍량 모두 증가함을 의미하고 있다. 한편 그림에는 도시되어 있지 않으나 대단면 갱도에서의 선풍기 효율은 고풍압 축류식보다 저풍압 프로펠러의 경우가 2, 3배 높게 나타난다고 보고하고 있다(Grau et al., 2006; Krog and Grau, 2006). 이와 같은 결론은 대단면 갱도 통기 목적으로는 저풍압 선풍기의 적용이 통기 및 에너지효율 측면에서 상대적으로 우수함을 보여주는 연구결과이다.

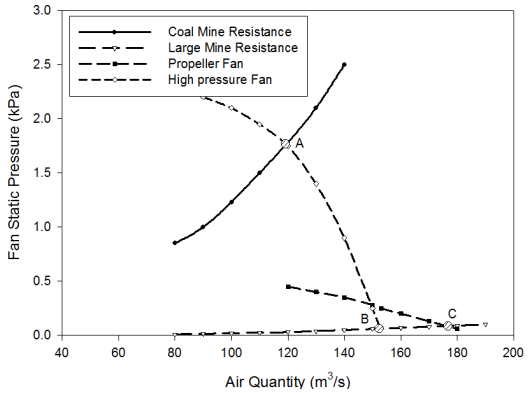


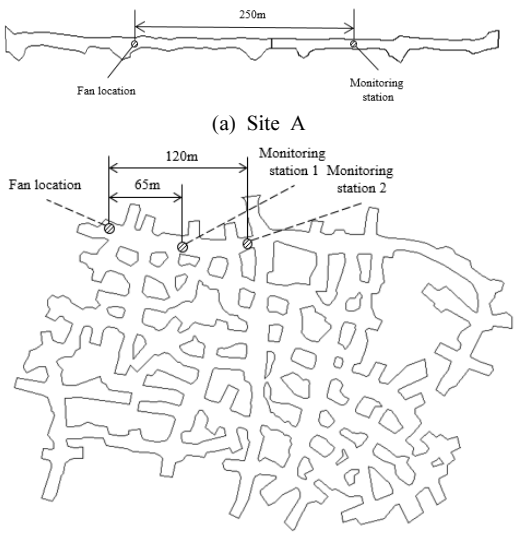
Fig. 1. Fan operating points in large-opening airways with high and low-pressure fans (Grau et al., 2006)

본 연구에서는 국부선풍기의 갱내 승압력(선풍기 특성 곡선상의 압력이 아니라 선풍기 가동에 따라 증가하는 갱도 내 압력 상승크기)산정과 국내 광산에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 고풍압 축류식 선풍기를 대체할 수 있도록 개발된 저풍압 축류식 선풍기와 본 연구를 통하여 개발한 저풍압 프로펠러 선풍기의 통기효율 및 경제성을 비교 연구함으로써 국부통기시스템의 최적화를 위한 기초 연구 수행을 목적으로 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 현장

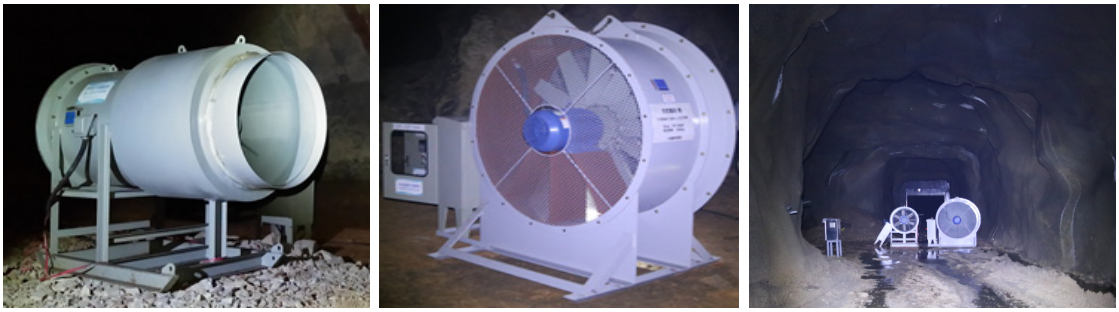
갱도 내 국부선풍기 종류별 승압력 및 통기효율을 산정하기 위해 Fig. 2의 강원도 삼척시 소재 D광업소의 통기사갱과 주방식 굴진 작업장 2개소를 실험 장소로 선택하였다. 통기사갱인 Site A는 갱도 평균단면적 32.4 m^2, 길이 300 m인 구간이며, 주방식 작업공간인 Site B는 갱도 평균단면적 122.7 m^2, 대상구역의 크기는 약 400 m × 300 m이다. Site A는 평균 구배 4%인 통기사갱으로 실험기간 중 자연통기에 의한 풍향이 수시로 바뀌는 단일갱도이며 실험은 Fig. 2. a의 선풍기 설치지점과 모니터링 지점 간격이 250 m인 구간에서 수행하였다. Site B는 주방식 굴진이 중단된 현장으로 전체 공간이 하나의 갱도로 타 지역과 연결되어 있는 고립된 공간 형태로 자연통기력이 전혀 작용하고 있지 않다. 실



(a) Site A

(b) Site B

Fig. 2. Study sites



(a) Jet Fan (b) Propeller Fan (c) Scene with fan installation

Fig. 3. Jet fan and propeller fan installed for the study

Table 1. Fan characteristics

Description \ Fan type	Jet fan	Propeller fan
Capacity (m^3/min)	1,000	1,500
Pressure (Pa)	235	147
Speed (RPM)	1,180	880
Power (kW)	15	
Length (mm)	2,230	750
Diameter (mm)	950	1,600
Outlet Velocity (m/s)	23.5	12.4

험은 Fig. 2. b의 선풍기 설치지점과 모니터링 지점 1, 2를 연결하는 총 120 m 갱도구간에서 수행하였다. 실험 대상 갱도구간에는 여러 개의 크로스컷 갱도와 접속되어 있으며 선풍기의 통기효율 분석은 Site B 전체 공간을 대상으로 하였다.

2.2 연구대상 국부선풍기 특성

광산 내 주요 선풍기만으로 통기가 어려운 지역이나 맹갱도 형태로 굴진하는 작업공간 내 통기를 위하여 설치하는 국부선풍기는 가장 중요한 통기 설비이다(이창우, 2014). 국부선풍기의 갱내 통기효과는 선풍기의 풍압과 풍량에 좌우되며 모든 선풍기의 풍압과 풍량은 반비례한다. 따라서 과다한 용량의 국부 선풍기는 소요풍압과 풍량 이상을 공급하므로 풍압과 풍량의 곱으로 정의되는 동력 또한 대폭 증가하여 운전비용뿐만 아니라 설비비용 또한 과다하게 소요되는 문제가 발생한다. 따라서 선풍기 용량의 최적화를 위하여 선풍기 가동에 따른 갱도 내 압력상승 즉, 승압력과 통기량을 추정할 수 있어야만 선풍기의 최적 용량과 설치 대수를 결정할 수 있다.

도로터널 내 설치되는 환기 및 방재용 축류식 선풍기(제트팬)는 토출속도 약 30 m/s, 승압력은 10~30 Pa 정도인 고풍압 선풍기이다. 그러나 유사한 축류식 선풍기가 설치된 대단면 국내 석회석광산현장에서의 승압력은 단면 크기와 벽면마찰의 차이 때문에 도로터널의 승압력 연구결과를 그대로 적용시키기는 불가능하다. Fig. 3은 본 연구에서 비교분석 대상으로 선택한 Φ950의 저풍압 축류식 선풍기와 Φ1600의 프로펠러 선풍기이며 선풍기 특성은 Table 1에 정리하였다. 선풍기 특성자료는 “흡입구 벤츄리 노즐에 의한 성능시험방법(KS B ISO 13350)”에 의한 시험을 통하여 구하였다. 저풍압 축류식 선풍기는 기존의 광산 국부통기용 고풍압 축류식 선풍기의 문제점을 개선하기 위한 연구(Lee and Nguyen, 2015)를 통하여 개발되었으며 프로펠러 선풍기는 대단면 갱도 내 작업장 통기효율 제고를 목표로 본 연구를 통하여 개발하였다.

비교분석을 위하여 프로펠러 선풍기는 축류식 선풍기와 동일한 동력 15 kW로 제작하였으며 풍량은 1.5배 풍압은 0.62배이다. 프로펠러팬의 rpm은 880이며 선풍기 소음은 85 dB이하로 저소음 선풍기를 구현하였다.

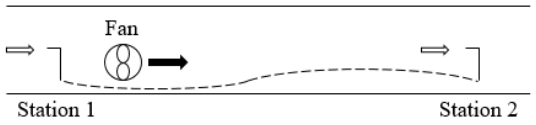


Fig. 4. Method for differential pressure measurement

저풍압 축류식 선풍기의 경우도 기존 국내 광산 내 35.6 kW 국부 선풍기와 유사한 통기성능을 보이는 저에너지 소비형 저소음 선풍기로 개발되었다.

2.3 풍속 측정 방법

Fig. 2와 3에 도시된 바와 같이 설치된 국부선풍기로부터 하류 250 m(Site A)와 65 m 및 120 m(Site B)에 높이별로 열선식풍속계(hot-wire anemometer)를 설치하여 풍향과 풍속을 측정하였다. 국내 대단면 석회석 광산 갱내에서의 기류유동의 특징은 대부분 0.5 m/s이하의 초저풍속이고 자연통기력에 의한 비정상 유동이므로(김두영 외., 2004) vane 타입 풍속계로는 풍속측정이 불가능하여 지향성 열선식 풍속계를 갱도 중앙에 높이 1, 2, 4, 6 m 지점에 설치하여 단면상의 높이별 풍속 분포를 측정하였으며, 필요에 따라서는 수평 방향의 풍속도 다지점 측정을 동시에 실시하였다.

2.4 선풍기 승압력 측정 방법

국부선풍기 종류별 승압력을 산정하기 위해 갱도 내 두 지점사이의 압력손실을 측정하기 위하여 일반적으로 Fig. 4에서와 같이 피토튜브(pitot tube)를 설치하고 튜브로 연결한 후 정압 또는 전압의 차이를 차압계를 이용하여 측정한다. 본 연구에서는 선풍기의 승압력에 의한 압력 상승폭을 측정하기 위하여 2단계의 측정을 수행하였다. 선풍기의 토출속도가 12~24 m/s로 고속이므로 피토튜브를 선풍기의 하류 부근에 설치하여 측정한 압력은 단면상 풍속 분포의 불균일성으로 인하여 대표성이 없는 측정값일 가능성이 높다. 따라서 첫 번째 단계로 피토튜브를 Fig. 4에서와 같이 선풍기의 상류편 약 5 m지점인 Station 1에 설치하여 Station 2와의 압력차($\triangle P_{Measured}$)를 측정하고, 두 번째 단계로 Fig. 5와 같이 두 지점간 압력 손실($\triangle P_{Estimated}$)을 고려하여 승압력($\triangle P_{Fan}$)을 추정하였다. 한편 압력손실은 Atkinson 식 (1)을 이용하여 추정 가능하므로 통기저항계수 k를 직접 측정하여 추정하였다.

$$\triangle P_{Estimated} = \frac{kPL}{A}v^2 \tag{1}$$

$$\triangle P_{fan} = \triangle P_{Measured} + \triangle P_{Estimated}$$

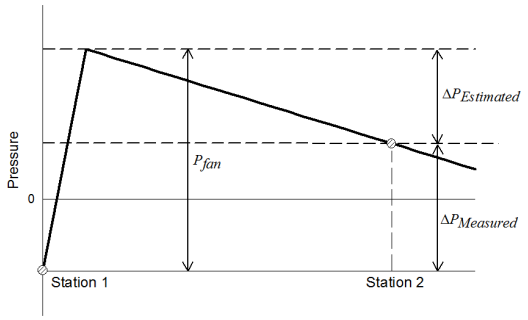


Fig. 5. Pressure profile in the airway segment with a fan

$\triangle P_{Estimated}$: 압력손실(Pa)
k : 통기저항계수(kg/m^3)
P : 갱도둘레(m)
L : 갱도길이(m)
A : 갱도단면적(m^2)
v : 풍속(m^3/s)

2.5 갱도 통기저항계수 측정방법

$\triangle P_{Estimated}$의 추정을 위하여 필요한 통기저항계수(k)를 측정하기 위하여 본 연구에서는 차압측정법(Gauge and tube method)과 속도감쇠법 두 가지 방법을 적용하였다. 차압측정법은 두 지점 사이의 압력손실을 직접적으로 측정하는 방법으로 피토튜브를 이용해 각 위치의 전압(total pressure)의 차이를 측정하여 식 (1)을 이용한 다음 식 (2)에 따라 통기저항계수를 산출한다(Brian and Loomis, 2004).

$$k = \frac{\triangle PA}{PLv^2} \tag{2}$$

속도감쇠법이란 통기설비의 작동을 중지한 후 갱도 내의 마찰손실로 인해 풍속이 감소하는 풍속감쇠곡선을 이용하여 갱도 내 통기저항계수를 산출하는 방법이다(이경복 외., 2004). 속도감쇠과정에서 자연통기력이 일정하고 속도감쇠가 끝난 후 정상상태에 도달한 후의 풍속이 일정하다고 고려할 경우, 다음 식 (3)이 성립된다.

$$\triangle P_w = (\zeta_{in} + \zeta_{out} + 4f\frac{L}{D_h})\frac{1}{2}\rho u^2 \tag{3}$$

$\triangle P_w$: 자연환기압 (Pa)
$\zeta_{in,\ out}$: 입, 출구갱구의 충격손실(dimensionless)
f : Darcy 통기저항계수(dimensionless)
L : 갱도길이(m)

D_h : 평균등가직경(m)
ρ : 공기밀도(kg/m^3)
u : 풍속(m/s)

상기식을 적분할 경우, 속도감쇠 시간동안의 속도 $u(t)$와 u_e 및 f의 관계는 다음 식 (4)와 같다.

$$u(t) = u_e \frac{e^{a+bt}+1}{e^{a-bt}-1} \quad (4)$$

$$a = \ln\frac{u_0+u_e}{u_0-u_e},\ b = (\xi_{in}+\xi_{out}+4f\frac{L}{D_h})\frac{u_e}{L}$$

$u(t)$: 속도감쇠 동안의 풍속
u_0 : 선풍기 가동시 풍속
u_e : 속도감쇠 후 풍속

속도감쇠곡선을 비선형 회귀분석을 통하여 Darcy 통기저항계수(f)를 구할 수 있다. 파이프나 덕트의 경우 Darcy 통기저항계수(f)를 사용하면 되나, 터널이나 광산의 갱도처럼 단면크기가 불규칙한 경우에는 단면적과 둘레 길이를 고려한 Atkinson 통기저항계수(k)로 다음 식 (5)과 같이 변환시켜준다.

$$f = \frac{2k}{\rho} \quad (5)$$

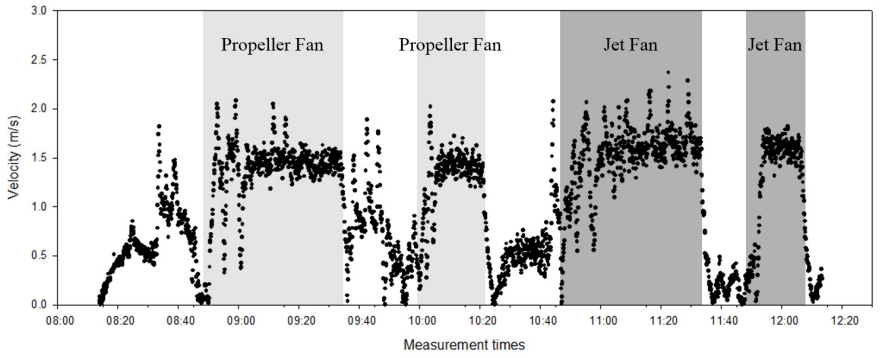
$$k = \frac{f\times\rho}{2}$$

3. 선풍기 승압력 측정 결과

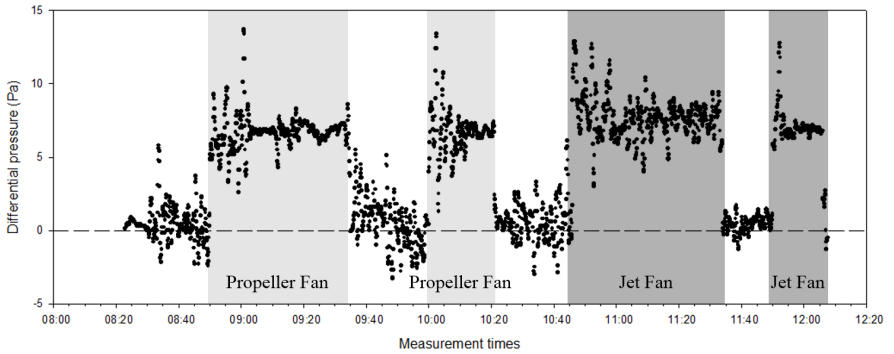
Site A 및 B 2개소에서 동일지점에 설치한 축류식 및 프로펠러 선풍기를 이용한 실험은 2015년 9월과 2016년도 9, 10월에 수행하였다. 선풍기 가동 전 자연통기에 의한 풍속을 측정한 후 선풍기를 20~102분 가동하였으며 선풍기 가동 중지 후 갱내 풍속이 가동 전 풍속 수준으로 안정화된 후에 다시 가동하는 방식을 적용하였다. 전체 실험시간동안의 모니터링 지점에서의 단면상 풍속 분포를 측정하기 위하여 수직 및 수평방향으로 복수의 지점에 설치된 열선식 풍속계를 이용하여 연속적으로 측정하였다.

3.1 선풍기 가동 후 풍속 및 압력분포

Fig. 6은 2016년 10월 20일 08시 20분부터 12시15분



(a) Velocity distribution (2016/10/20)

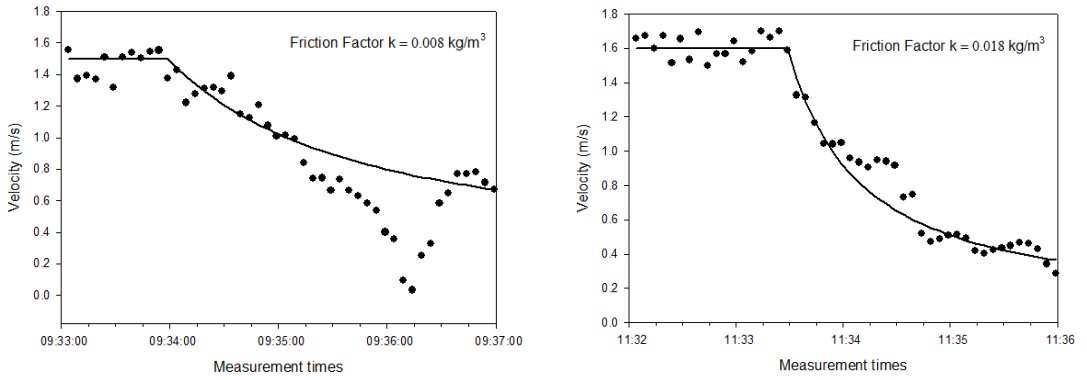


(b) Differential pressure distribution (2016/10/20)

Fig. 6. Velocity & differential pressure distribution at Site A

Table 2. Friction factor (k) by using the differential pressure at Site A

Measurement times	ΔP (Pa)	Average Velocity (m/s)	Friction factor k (kg/m^3)
9:20 ~ 9:28	1.68	0.90	0.015
14:49 ~ 14:54	0.63	0.49	0.012
10:14 ~ 10:18	0.24	0.49	0.005
10:28 ~ 10:42	0.38	0.51	0.007
8:20 ~ 8:31	0.44	0.55	0.007
Average Friction Factor			0.008



(a) Velocity decay curve by jet fan (b) Velocity decay curve by propeller fan

Fig. 7. Velocity decay curves at Site A

까지 Site A에서의 두 종류의 선풍기를 연이어 가동한 실험의 풍속 및 차압 측정 결과이다. 모니터링 지점에서의 갱내풍속은 0.0~0.58 m/s 정도로 상류편의 차량 운행에 따른 영향으로 변화폭이 비교적 크게 관찰되기도 하였으며 풍속이 극히 낮은 경우에는 순간적으로 풍향의 역전도 관찰되었다. Fig. 6a에 도시한 풍속 측정결과는 축류식 선풍기 가동시 1.60~1.66 m/s, 프로펠러 선풍기 가동시 1.42~1.46 m/s이었으며 자연통기속도는 선풍기 가동방향과 반대방향으로 0.49~0.90 m/s로 작용하였다. 동시간대의 측정된 자연통기압의 크기는 0.24~1.68 Pa로 측정되었으며 통기저항계수 산정을 위하여 측정한 차압은 Fig. 6b에 도시하였으며 분석결과는 Table 2와 같다.

3.2 통기저항계수 산정

차압계를 이용해 측정된 차압은 갱내 실험자의 이동, 상류편 차량운행, 외부기압 변화 등의 다양한 변수에 의해 지속적으로 변화한다. 따라서 본 연구에서는 비교적 일정한 차압을 유지하는 시간대를 선택하여 동시간대의 평균 풍속 측정값을 이용하여 Table 2와 같이 통기저항계수를 산정하였다.

Site A에서의 Atkinson 통기저항계수는 0.007~0.015 kg/m^3 범위이며 평균은 0.008 kg/m^{3}로 산출되었다. 한편, 선풍기 가동 중지 후의 속도감쇠를 이용하여 통기저항계수를 산출한 결과는 Fig. 7에 도시하였다.

속도감쇠법을 이용해 도출한 통기저항계수의 범위는 0.008~0.018 kg/m^{3}이며 평균 0.013 kg/m^{3}이다. 두 방법으로 구한 저항계수는 불규칙적인 발파면을 가진 갱도의 통기저항계수인 0.009~0.015 kg/m^3(Prosser and Wallace, 1999; CHASM, 2015)와 유사한 결과를 보인다.

3.3 선풍기 승압력 산정

Site A에서 측정한 $\triangle P_{Measured}$와 추정한 압력손실 $\triangle P_{Estimated}$를 합하여 산정한 선풍기 승압력을 Table 3에 요약하였다. 자연통기력에 의한 풍속이 "-"로 표시된 것은 풍향이 선풍기 가동방향과 반대임을 의미한다. 통기저항계수의 범위에 따라 일정 범위를 보이게 되는 $\triangle P_{Estimated}$에 따라 추정한 선풍기 평균 승압력은 축류식

Table 3. Fan pressure and expected velocity at Site A

Fan type	Measurement times	Natural Velocity (m/s)	Measured Velocity (m/s)	Expected Velocity (m/s)	$\Delta P_{Measured}$	$\Delta PE_{stimated}$	P_{fan}
Jet Fan	9:00 ~ 9:36	-0.58	1.60	2.18	2.5	4.2 ~ 10.7	6.7 ~ 13.2
	10:26 ~ 10:42	-0.49	1.65	2.14	2.1	4.0 ~ 10.2	6.1 ~ 12.3
	11:02 ~ 11:16	-0.49	1.66	2.15	3.3	3.6 ~ 9.3	6.9 ~ 12.6
	11:00 ~ 11:33	-0.51	1.64	2.15	4.1	4.0 ~ 10.3	8.1 ~ 14.4
	11:54 ~ 12:05	-0.19	1.60	1.79	6.7	3.6 ~ 9.3	10.3 ~ 16.0
Average				**2.1**			**9.7 Pa**
Propeller Fan	14:59 ~ 15:07	-0.49	1.42	1.91	2.6	3.1 ~ 8.0	5.7 ~ 10.6
	9:03 ~ 9:33	-0.55	1.46	2.01	2.9	3.3 ~ 8.5	6.2 ~ 11.4
	10:06 ~10:19	-0.51	1.42	1.93	2.8	3.1 ~ 8.0	5.9 ~ 10.8
Average				**2.0**			**8.4 Pa**

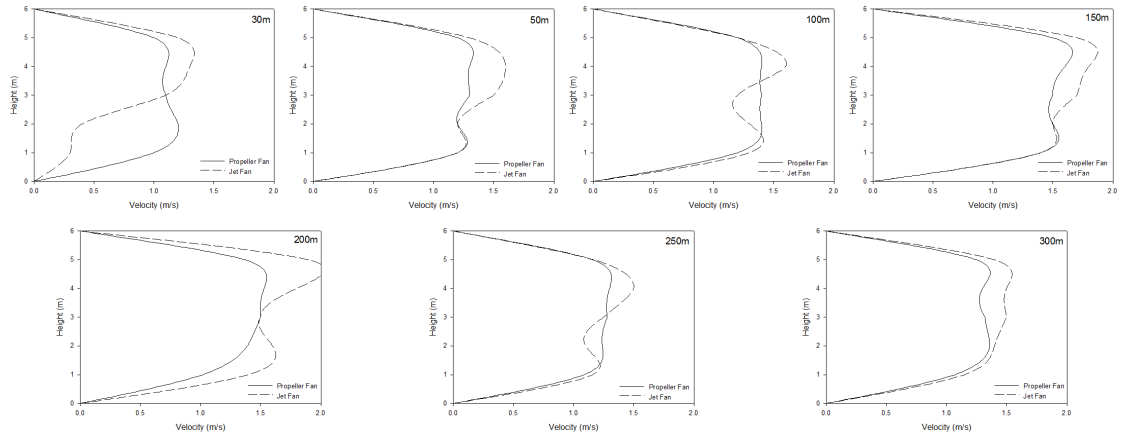


Fig. 8. Cross-sectional velocity distributions by distance at Site A

선풍기와 프로펠러 선풍기가 각각 9.7 Pa, 8.4 Pa로 축류식 선풍기가 상대적으로 큰 승압력을 보이나 250 m 하류점에서 추정한 자연통기력을 제외한 순 기계통기력에 의한 유도풍속은 2.1 m/s와 2.0 m/s로 차이는 극히 미미하다.

4. 대단면 갱도 내 통기효과

4.1 갱도 내 풍속분포

갱내 유도 풍속이 거의 동일하게 나타난 두 종류의 선풍기 가동에 따른 통기효율을 비교분석하기 위하여 단일갱도인 Site A에서 선풍기 설치위치로부터 30, 50, 100, 150, 200, 250, 300 m 지점의 단면상 풍속분포를 비교한 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

그림에서 실선은 축류식 선풍기, 점선은 프로펠러 선풍기의 가동에 의한 단면상 풍속분포이다. 축류식 선풍기는 토출속도가 23.5 m/s의 고속으로 토출되는 제트류(jet stream)가 구배 4%정도의 하향 갱도로 유동하므로 갱도 상부영역에서 하부보다 빠른 풍속분포를 보이며 기류의 유동거리가 길어질수록 제트류 에너지 감소로 단면상의 풍속분포는 균등해진다. 그러나 프로펠러 선풍기의 경우에는 비교적 균등한 풍속으로 유동하는 것을 확인할 수 있다.

주방식 굴진 현장인 Site B에서 선풍기 하류점 50, 70, 100, 120 m에서의 단면상 풍속분포를 Fig. 9에 도시하였다. Site B에 설치된 선풍기는 제트류의 유동거리를 최대화하기 위하여 갱도 내 실험자들의 이동공간을 피하여 선풍기축을 미세하게 상부로 향하도록 설치하였다. 따라서 Site A와 같은 단면상 풍속분포 특징을 보인다.

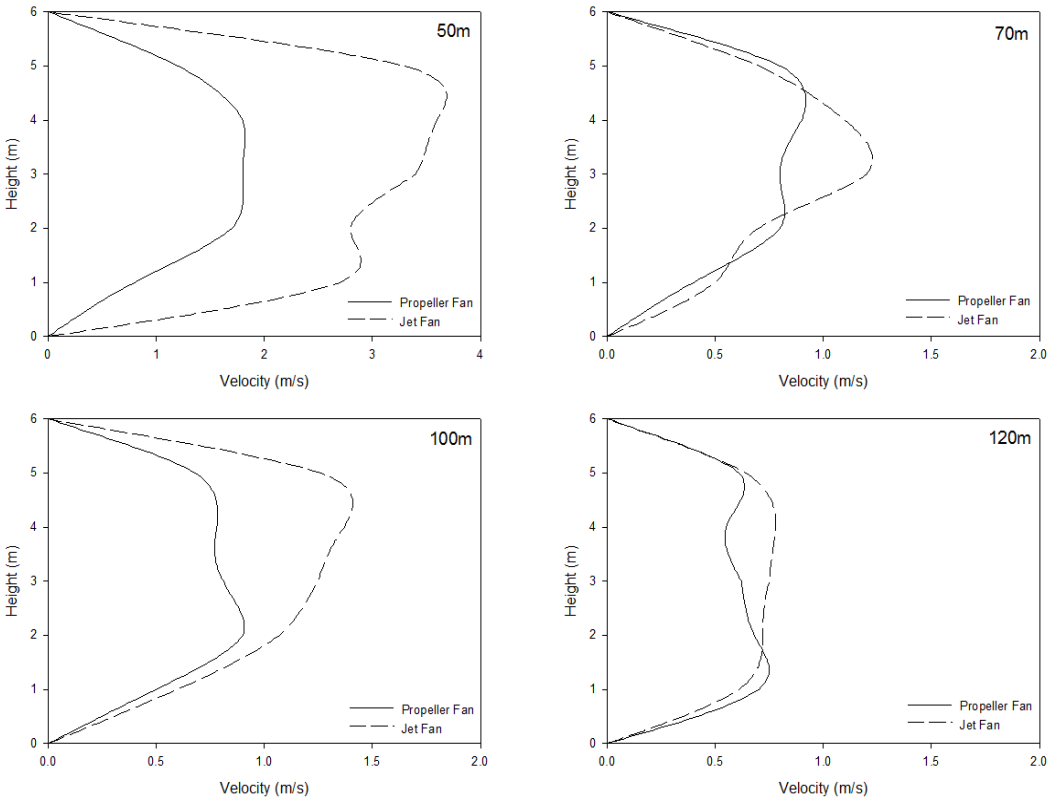


Fig. 9. Cross-sectional velocity Distributions by distance at Site B

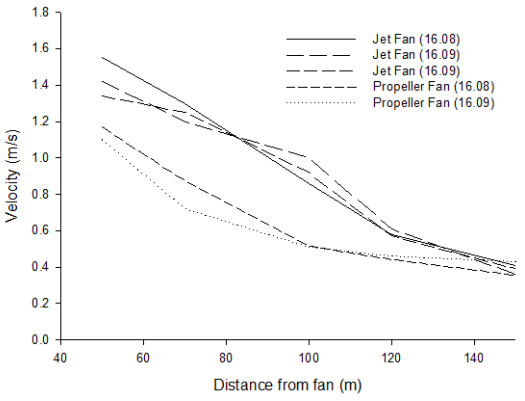
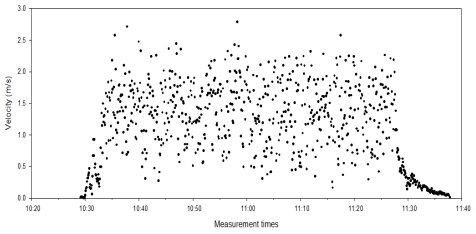


Fig. 10. Longitudinal velocity distributions at Site B

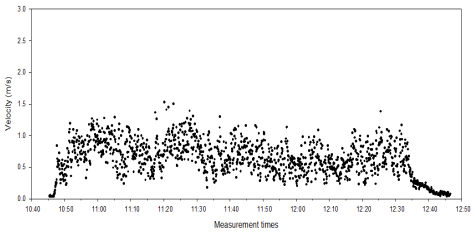
Site B에서 국부선풍기 가동에 따른 거리별 갱도 중심 풍속분포 비교결과를 Fig. 10에 도시하였다. Site B는 단일갱도 형태인 Site A와는 달리 120 m 실험구간 내에 5개의 크로스컷이 있어 고속의 제트류를 토출하는 축류식 선풍기의 가동 시 인접 갱도로부터 크로스컷을 통한 기류 유입 즉, 벤츄리 효과가 발생하므로 선풍기 가까운 거리에서는 축류 선풍기로 인한 갱도 내 축방향 풍속이 프로펠러 선풍기에 비하여 2배에 달할 정도로 현저히 크게 나타나고 있다. 그러나 단면상 평균 풍속은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 120 m정도에서 약 0.7 m/s로 거의 유사하며 중심 풍속의 경우에는 150 m 지점에 도달하여서는 0.5 m/s정도로 거의 같아지고 있다. 따라서 프로펠러 선풍기 가동에 따라 관찰된 단면상 풍속 분포의 상대적 균일성은 갱도 단면상에 분포하는 유해 입자 및 가스상 물질의 희석 및 배기효율이 좋으므로 통기효율 측면에서 프로펠러 선풍기가 상대적으로 장점을 가진다.

4.2 벤츄리 효과

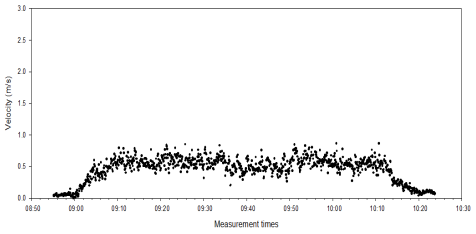
크로스컷이 다수 굴착된 Site B에서 선풍기 가동 후 하류 65, 120 m 지점의 높이 1, 2, 4, 6 m에 설치한 풍속계를 이용하여 측정한 풍속의 평균값을 갱도단면상 평균 풍속으로 정의하여 도시한 결과는 Fig. 11과 같다.



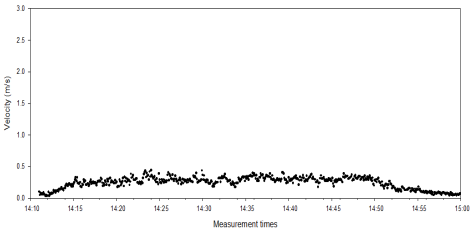
(a) Velocity profile at 65 m with jet fan operation



(b) Velocity profile at 65 m with propeller fan operation

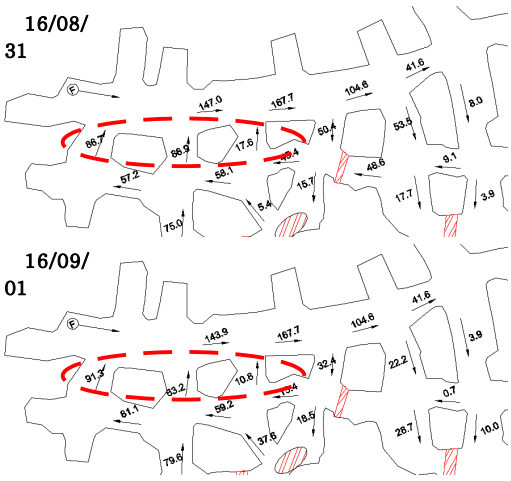


(c) Velocity profile at 120 m with jet fan operation

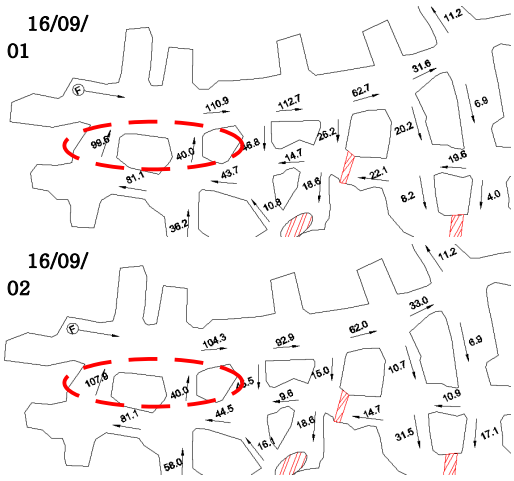


(d) Velocity profile at 120 m with propeller fan operation

Fig. 11. Velocity profile at Site B



(a) Jet Fan



(b) Propeller Fan

Fig. 12. Ventilation rates at Site B

축류식 선풍기와 프로펠러 선풍기 가동에 따른 65, 120 m 하류지점에서 평균풍속은 각각 1.39, 0.55 m/s 및 0.70, 0.29 m/s로 축류식 선풍기의 경우가 약 2배 높은 풍속을 보인다. 그러나 65, 120 m지점 평균풍속의 분산계수는 각각 0.44, 0.29 m/s 및 0.34, 0.17 m/s로 축류식 선풍기의 풍속 변동 폭이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 크로스컷이 굴착된 갱도에서의 선풍기의 가동은 인접갱도와의 정압차이에 변화를 초래하여 기류의 유출입이 발생하며 이와 같은 현상은 토출속도가 빠른 축류식 선풍기의 경우가 상대적으로 크기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 선풍기 가동 후의 Site B 전체 공간 내에서의 풍향 및 풍량을 측정하여 Fig. 12에 도시하였다. 전체 공간 내 기류유동분포는 유사하나 선풍기 설치갱도와 인접갱도사이에 기류의 유출입이 확인되며 특히 선풍기에서 토출되는 제트류가 빠르게 유동하는 구간에서는 정압이 급격히 감소하므로 인접갱도로부터 기류의 유입이 발생하여 갱도 내 통기량이 증가하는 벤츄리 효과가 발생함을 관찰할 수 있다(Lee

Table 4. Comparison of energy consumption

Category	Jet fan	Propeller fan
Fan pressure (Pa)	6.4 ~ 12.7	5.9 ~ 10.9
Air quantity (m^3/s)	58.5 ~ 71.3	62.5 ~ 65.7
Power (W)	769.7 ~ 709.3 (A)	509.0 ~ 578.4 (B)
Energy consumption ratio	1.23 ~ 1.51 (A/B)	

and Nguyenl., 2014). 축류식 선풍기와 프로펠러 선풍기 가동시 각각 하류 3개와 2개의 크로스컷을 통한 기류 유입량이 각각 164.3～187.1 m^3/s, 139.6～147.8 m^3/s에 이른다. 따라서 축류식 선풍기가 상대적으로 큰 벤츄리 효과를 보임을 알 수 있으나 벤츄리 효과에 의하여 유입되는 기류에 의하여 인접갱도 내 오염물질의 재순환 가능성이 높아지므로 작업장 통기를 위하여 풍관(duct)을 접속하지 않고 이용하는 프로펠러 선풍기의 경우에는 벤츄리 효과의 최소화를 통한 오염물질 재순환 제어는 반드시 필요한 요건 중의 하나이다.

5. 국부선풍기 경제성 비교

Table 3에 정리한 바와 같이 15 kW급 저풍압 축류식 선풍기와 저속 회전 저풍압 프로펠러 선풍기의 유도 풍속은 거의 동일하였으나 승압력은 축류식 선풍기가 15%정도 크게 나타남에 따라 실험시간대별로 선풍기 가동에 필요한 에너지소비량의 비도 Table 4에 요약된 것과 같이 축류식 선풍기가 1.23～1.51배 크게 나타난다.

6. 결 론

본 연구는 국내 석회석 광산 갱내에서 동일한 15 kW 용량의 Φ950의 저풍압 축류식 선풍기와 Φ1600의 저속 회전, 저풍압 프로펠러 선풍기의 승압력과 통기효과를 비교분석하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 갱도 단면적 32.7 m^2인 중규모 갱도 내에서 측정한 축류식 및 프로펠러 선풍기의 승압력은 각각 9.7 Pa, 8.4 Pa로 축류식 선풍기가 15% 크나, 갱도 내 유도 풍량은 64.9 m^3/s, 64.0 m^3/s로 거의 동일하다.
2. 프로펠러 선풍기는 단면적 32.7 m^2 갱도의 경우 약 300 m, 단면적 122.7 m^2 갱도에서는 약 120 m 범위 내에서 축류식 선풍기에 비하여 상대적으로 균일한 단면상 풍속분포를 보임에 따라 벽면 및 천정 부근에 확산된 입자상 및 가스상 물질의 희석 및 배기 효율 면에서 프로펠러 선풍기가 우수하다고 평가된다.
3. 선풍기의 가동으로 토출되는 고속의 제트류의 유동에 의해 인접갱도로부터 기류가 유입되는 현상인 벤츄리 효과는 주방식 굴진 현장인 단면적 122.7 m^2 대단면 갱도의 경우 축류식 선풍기가 유입구간의 길이는 한 크로스컷 길게 나타나며, 유입량은 164.3～187.1 m^3/s로 프로펠러 선풍기의 139.6～147.8 m^3/s에 비하여 많다. 그러나 작업장 국부통기의 경우에 오염물질 재순환 제어가 중요하므로 풍관을 접속하지 않고 사용하는 프로펠러 선풍기의 재순환 제어 통기효과가 우수하다고 판단된다.
4. 동일한 통기량을 작업장에 공급하기 위하여 소요되는 15 kW 축류식 선풍기와 프로펠러 선풍기의 에너지 소비량은 상대적으로 승압력이 15%정도 큰 축류식 선풍기가 프로펠러 선풍기에 비하여 1.23～1.51배 크게 나타난다.
5. 147 Pa, 880 rpm의 저풍압, 저속회전 프로펠러 선풍기는 기존의 고풍압 축류식 선풍기를 개량한 100 m^3/s, 235 Pa의 저풍압 축류식 선풍기에 비하여 갱내 전단면에 걸친 오염물질 배기 및 작업장 부근 오염물질 재순환 제어 효율 그리고 에너지 효율 면에서도 우수한 성능을 보였다. 현재 국내광산에 소개된 적이 없는 프로펠러 선풍기의 국내 대단면 광산에의 적용을 위한 보다 적극적인 검토가 요구된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 “국내 석회석광 적용 자동차 경량화 광물 원료 등 미래 자원화 기술 실증화 연구(과제번호: 2013T100100021)”의 연구비 지원을 통하여 수행되었습니다.

References

1. 김두영, 정규홍, 이창우., 2013, “대단면 갱내 초저풍속 측정 방법에 관한 연구”, *2013 한국암반공학회 추계 총회 및 학술발표회 논문집*, KSRM, October, pp. 180-183.
2. 이경복, 김효규, 이창우., 2004, “도로터널 차도 벽면마찰계수 현장연구”, *2004 한국암반공학회 추계학술발표회 논*

문집, KSRM, October, pp. 61-72.
3. 이창우 외., 2014, *자원개발환경공학*, CIR, Seoul, Korea, pp. 133-163.
4. Brian, S.P. and Loomis I.M., 2004, “Measurement of frictional pressure differentials during a ventilation survey.” *Proceedings of the 10th US/North American Mine Ventilation Symposium*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 59-66.
5. CHASM, 2015, *Ventsim Visual User Guide*.
6. Grau, III, R.H., Krog, R.B., and Robertson, S.B., 2006, “Maximizing the ventilation of large-opening mines”, *Proceedings of the 11th US/North American Mine Ventilation Symposium*, University Park, Pa, USA, pp. 53-59.
7. Hartman, H.L., et al., 1997, *Mine ventilation and air conditioning*, 3th Edition, John Wiley & Sons.
8. Krog, R.B. and Grau III, R.H., 2006, “Fan selection for large-opening mines: vane-axial or propeller fans-which to choose?”, *Proceedings of the 11th US/North American Mine Ventilation Symposium*, University Park, Pa, USA, pp. 527-534.
9. Lee, C.W., and Nguyen, V.D., 2014, “Venturi effect induced by local ventilation fan in large-opening room-and-pillar mining sites”, *Tunnel and Underground space*, Vol 24, No 6, pp. 464-472.
10. Lee, C.W. and Nguyen, V.D., 2015, “Development of a Low Pressure Auxiliary Fan for Local Large-opening Limestone Mines”, *Tunnel and Underground space*, Vol 25, No 6, pp. 543-555.
11. McPherson, M.J., 2009, *Subsurface ventilation and environmental engineering,* Springer Science & Business Media.
12. NIOSH, 2002, *Using propeller fans to improve ventilation in large-entry stone mines*, NIOSH Technology News, No 499.
13. Prosser, B.S. and Wallace, K.G., 1999, “Practical Values of Friction Factors”, *Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium*, June 1999, pp. 691-696.

박 동 준

2015년 동아대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사

Tel: 051-200-5586
E-mail: parkdj111@naver.com
현재 동아대학교 공과대학 에너지·자원공학과 석사과정

이 창 우

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 미국 Pennsylvania State University, 자원시스템공학과 공학석사
1986년 미국 Pennsylvania State University, 자원시스템공학과 공학박사

Tel: 051-200-7769
E-mail: cwlee@dau.ac.kr
현재 동아대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수

강 현 호

2015년 동아대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사

Tel: 010-2388-2915
E-mail: jinnnn22@naver.com
현재 동아대학교 공과대학 자원공학과 석사과정