

추적가스법을 적용한 국내 석회석 광산의 환기성능 평가 연구

김영수, 노장훈, 김진*

Ventilation Efficiency Evaluation of Domestic Limestone Mine
Using Tracer Gas Method

Young-su Kim, Jang-hoon Roh, Jin Kim*

Abstract Natural ventilation is employed in limestone mines that have been currently operated in Korea, and there has been a growing issue of a significantly weak airflow caused by the large-scale excavation. Thus, the air quality in the working area is considerably poor. In order to improve this circumstance, it is mainly required to examine ventilation performance. In this study, the examination of ventilation efficiency was conducted by using tracer gas method. The result of this work indicated detailedly the ventilation problems in research mine, in that extremely low air velocity, recirculation, and air change rate were evaluated quantitatively using tracer gas. Therefore the ventilation performance evaluation using tracer gas can be opted as a precise method to improve the working area in mines.

Key words Limestone mine, Tracer gas method, Low air velocity, Recirculation, Air change rate

초 록 현재 국내에서 가행 중인 석회석 광산은 자연환기력을 주된 환기방법으로 사용하고 있고, 대단면 굴착으로 매우 저속의 공기유동현상이 나타나고 있다. 이로 인하여 작업구간의 공기질이 매우 저하되어 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 먼저 환기성능을 면밀하게 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 환기성능평가를 위해서 추적가스법을 적용하여 평가를 실시하였다. 연구 결과, 추적가스법을 통해 매우 저속의 공기유동, 공기재순환현상, 작업장 공기교환을 등을 정량적으로 평가함에 따라서 연구광산의 환기문제점들을 정밀하게 확인할 수 있었다. 이러한 추적가스법을 활용한 환기성능 평가방법은 광산의 작업환경 개선을 위하여 매우 정밀한 도구로 사용될 수 있음을 확인하였다.

핵심어 석회석 광산, 추적가스법, 저속 공기유동, 공기재순환, 공기교환을

1. 서 론

국내 광물 생산량의 약 70% 이상을 차지하고 있는 석회석은 현재 대부분 갱내채광을 통해 생산이 이루어지고 있다. 과거 노천채광이 주를 이루었지만 지표부근 매장량의 고갈 및 환경파괴로 인하여 광산의 지하화가

빠르게 진행되고 있고 이로 인하여 갱내 작업환경은 갈수록 열악해지고 있는 실정이다.^{1,2)} 국내 석회석 광산은 대부분 자연환기방법에 의존하여 작업장을 환기시키고 있으며, 주요 작업구간에만 국부선풍기를 활용하여 환기하는 방법을 주로 사용하고 있다. 주방식 채광법을 주로 사용하고 있는 국내 석회석 광산들은 일반적으로 대단면으로 굴착이 이루어지고, 채광이 진행됨에 따라서 매우 복잡한 갱도들이 형성되기 때문에 매우 느린 공기속도가 유지된다.³⁾ 뿐만 아니라 내외부의 온도차이에 형성되는 자연환기력 때문에 계절에 따른 환기량의 변동이 매우 크다. 이러한 이유들로 인하여 다양한 디젤장비들로부터 발생하는 오염물질들이 외부로 배출되지 못하고 갱내에 축적됨으로써 작업환경은 갈수록 열

Received: Jul. 13, 2016

Revised: Aug. 1, 2016

Accepted: Aug. 1, 2016

***Corresponding Author:** Jin Kim

Tel) +82328607558, Fax) +82328727550

E-Mail) jinkim@inha.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Inha University 100 inharo, Nam-gu, Incheon



INOVA 1312, Multigasmeter



Sampling bag

Fig. 1. Definition of distance between twin tunnels

악해지고 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 정확한 갱내환경진단이 필요하기 때문에, 본 연구에서는 추적가스법을 적용하여 앞서 언급한 문제점들을 보다 정확하게 평가하고자 하였다. 추적가스법은 일반적으로 건축물 및 지하공간 등에 사용되는 환기시스템 평가방법이지만, 저속의 공기유동 및 공기교환율의 측정이 가능하기 때문에 광산에도 충분히 적용이 가능하다.⁴⁾ 이미 국외에서는 추적가스법을 적용하여 갱내 환기시스템을 평가하고 이에 대한 개선방안을 도출하는 연구들이 진행되었지만^{5,6)}, 국내에서는 석회석 광산을 대상으로 매우 낮은 속도에서의 오염물질의 확산 메카니즘을 추적가스(SF₆)를 통해 규명하는 연구만이 진행되었다.^{7,8)} 이에 따라서 본 연구에서는 강원도 동해시에 위치한 석회석 광산의 주요 채광작업장 주변을 대상으로 추적가스법을 적용하여 갱내 환기시스템을 평가하였다. 연구의 범위는 앞서 언급한 국내 석회석 광산에서 발생하는 일반적인 문제점인 저속의 공기유동 측정, 공기재순환 현상을 포함하여 채광작업장의 공기교환율을 규명해보고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 추적가스법

추적가스법의 일반적인 개념은 측정공간에 추적가스를 주입하고, 측정 위치에서 시간에 따른 추적가스의 농도를 모니터링함으로써 유동방향 및 유속 등을 측정

하는 방법이다. 뿐만 아니라 응용하여 적용하면 오염된 공기의 재순환 현상과 특정 공간에서의 시간에 따른 공기교환율까지 측정이 가능하기 때문에 지하공간의 환기시스템을 평가하기 위한 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 추적가스로 사용되는 가스로는 CO₂, CH₂F₂, He, NO₂, SF₆, C₆F₁₂ 등이 존재하며, 추적가스를 선택하는 가장 중요한 기준은 측정 공간에 존재하지 않는 가스이어야만 한다.⁹⁾ 본 연구와 같은 광산에서는 디젤 기관 사용에 따라서 대기 중에 CO₂, NO₂가 존재하기 때문에, CO₂와 NO₂는 추적가스로 사용될 수 없다. 이에 따라서 본 연구에서는 매우 낮은 농도에서도 측정이 가능할 뿐만 아니라, 대기와 쉽게 혼합되는 SF₆가스를 선택하여 Fig. 1과 같은 멀티가스미터(INOVA 1312)장치와 정량분사를 위한 샘플링백을 사용하여 연구를 진행하였다. 본 장비는 가스를 샘플링하여 모니터링하는 장치와 가스를 분사하는 장치로 구성되어 있고, ppb단위까지 농도 측정이 가능하다. 또한 공기교환율의 측정을 위한 일정농도법의 계산이 가능한 실험 모듈을 포함하고 있다. 공기교환율을 측정 시에는 분사장치를 함께 사용하며, 공기속도 및 공기재순환 현상 측정 시에는 샘플링백을 통해 분사를 실시한다.

2.2 저속의 공기속도 측정방법

광산에서 공기속도를 측정하는 것은 일반적으로 유량을 산정하기 위한 방법으로 간주된다. 하지만 광산의 형상이 불규칙적이기 때문에 정확한 단면의 측정이 어

렵고, 이로 인한 공기량 역시 많은 오차들이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 추적가스의 농도를 바탕으로 유량을 계산하는 방법들이 연구되어졌고, 1974년 Thimons와 Kissel에 의하여 식 (1)이 제안되었다.^{6,10)}

$$Q = \frac{Q_g}{C_{avg} T} \quad (1)$$

여기서 Q는 공기량(m³/s), Q_g는 분사된 추적가스량(L), C_{avg}는 추적가스 농도평균, T는 측정시간을 의미한다. C_{avg}는 추적가스가 측정된 농도들의 총합에 샘플링 횟수를 나누어 주는 평균 농도이다. 식 (1)이 제안된 배경은 앞서 언급한 것처럼 불규칙한 단면에 의한 유량계산의 오류를 개선하기 위한 방법으로 제시되어졌지만, 본 연구에서는 실제로 갱도에서 어느 정도의 저속이 나타나는지 확인하기 위하여 식 (1)을 통해 계산된 유량에 단면을 나누어 줌으로써 유속을 판단하였다. 분사된 추적가스의 양을 정확히 계산에 적용하기 위해 Fig. 1의 샘플링백에 추적가스를 정량 주입하여 분사지점에서 최대한 빠르게 분사하였다.

2.3 국부통기시스템 공기 재순환 현상

국내 석회석 광산 대부분은 공기질이 현저히 떨어지는 주요 작업구간 주변에 국부선풍기와 덕트를 결합하여 작업장으로 공기를 주입하는 국부환기시스템을 적용하고 있다. 하지만 이러한 국부환기시스템이 단일 갱도 내에서 입배기가 동시에 이뤄지는 경우, 작업장을 거친 오염된 공기가 국부선풍기로 다시 유입되는 공기 재순환 현상이 발생할 수 있다.^{12,13)} 이러한 공기재순환 현상은 직관적으로 국부선풍기 주변 오염물질의 농도 분포를 통해 확인할 수 있지만, 이를 실험을 통해 정량적으로 분석하는 것은 매우 어렵다. 이 실험을 위해서 앞서 언급한 저속의 공기속도 측정방법과 마찬가지로 일정량의 추적가스를 선풍기 앞에서 분사하여 추적가스가 국부선풍기 주변에서 어떠한 농도분포를 나타내는지 모니터링 하였다. 하지만 추적가스의 이동경로가 전 작업구간에 걸쳐 상세하게 모니터링될 수 없고, 추적가스의 농도를 바탕으로 한 정량적인 분석은 어렵기 때문에 대략적으로 추적가스가 국부선풍기 주변에 어느 정도로 체류시간을 가지는지 여부를 통해 공기재순환 현상을 판단하였다.

2.4 채광 작업장 공기교환을 측정

광산에서 채광 작업장은 발파 및 광석의 적재로 인한

분진과 디젤 배출물질이 가장 많이 발생하는 장소이다. 하지만 채광작업장은 막힌 공간이기 때문에 실제로 작업장 내에서 공기의 유동은 매우 미약하게 나타나게 된다. 이러한 작업장에서 환기현황을 측정하기 위하여 추적가스 일정농도법을 적용하였다. 추적가스 일정농도법은 건축물과 같은 공간에서 공기교환율을 계산하는 측정방법 중의 한 가지로, 추적가스농도를 특정공간에 일정하게 유지시킨 후에 환기에 따라 점차 낮아지는 추적가스 농도를 일정하게 유지시키기 위해 분사되는 추적가스의 양을 바탕으로 공기교환율을 계산한다. 이는 식 (2)와 식 (3)과 같은 추적가스 질량보존 방정식을 기본으로 식 (4)처럼 계산된 공기량 Q에 공간의 체적을 나눔으로써 계산된다.

$$V \frac{dC}{dt} + QC = \dot{m} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{C} (\dot{m} - V \frac{dC}{dt}) \quad (3)$$

$$ACH(\text{air exchange rate}) = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

V : volume [m³]

$\frac{dC}{dt}$: concentration change rate [dimensionless]

Q : air flow rate [m³/s]

C : moment concentration [mg/m³]

\dot{m} : input rate of SF₆ [m³]

본 연구에서 사용되는 멀티가스미터(INOVA 1312)는 위의 식을 기본으로 시간당 공기교환율을 식 (5)로 정의하여 직접 계산되어진다.¹¹⁾

$$N_k = \frac{(V_k/R_v + (\bar{C}_{k-p} - \bar{C}_k))/T_a}{\bar{C}_{avg} - C_b} \quad [1/h] \quad (5)$$

N_k : air exchange rate [1/h]

R_v : volume of room [m³]

T_a : average period time [h]

V_t : total dose of tracer-gas delivered in the period T_a [mg]

\bar{C}_{k-p} : concentration measure at the start of the averaging period [mg/m³]

\bar{C}_k : concentration measure at the end of the averaging period [mg/m³]

\bar{C}_{avg} : concentration measure at the average of the averaging period [mg/m^3]

C_b : background concentration of tracer-gas in the measurement location [mg/m^3]

3. 연구 결과

3.1 단일 갱도 내에서 저속의 유속 측정

저속의 공기속도를 판단하기 위해서 주요운반갱도를 선정하여 실험을 진행하였다. 이 주요운반갱도를 통해 작업장에 신선한 공기가 입기되어야만 하는 시스템임에도 불구하고 일반적인 공기속도 계측기를 통해 속도를 측정할 결과 0.1~0.2 m/s로 매우 느린 공기속도가 측정되었다. 하지만 일반적인 공기속도 계측기의 최소 측정범위가 0.1 m/s인 것을 감안한다면 측정결과에 많은 오차가 있을 것으로 판단되어 추적가스법을 적용하였다. 측정 방법은 Fig. 2에 나타난 것처럼 직선 상의 주요운반갱도의 중앙지점에서 샘플링백에 2 L의 SF₆가

스를 정량주입한 후 빠르게 분사하고, 공기진행 방향 30 m지점 3곳에서 추적가스 모니터링을 2분 간격으로 실시하였으며, 추적가스가 더이상 측정되지 않을 때까지 모니터링하였다. 갱도의 면적은 10.5 m(W)×6.7 m(H)이다. 추적가스 모니터링 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 추적가스는 약 11:40분경에 분사되어 11:50분경에 처음으로 모니터링되어 약 40분간 꾸준하게 농도가 모니터링되고 있다. 이를 바탕으로 식 (1)에 적용하여 공기량 Q를 계산하고 갱도의 면적을 바탕으로 공기속도를 예측한 결과 약 0.038 m/s의 공기속도가 계산되었다. 이는 기존에 사용하였던 공기속도 계측기의 최소 측정범위 0.1 m/s이하의 속도로서, 더 정밀한 속도의 측정이 가능하다는 것을 나타낸다.

3.2 국부환기시스템 주변 공기재순환 현상 규명 실험

본 연구광산은 주요작업장 진입 운반갱도에 Fig. 3과 같은 국부선풍기와 덕트를 결합한 국부환기시스템을



Fig. 2. Diagram of flow measurement by using tracer gas

Table 1. Tracer gas concentration over times

Sample	Time (hh:mm)	Concentration (mg/L)	Sample	Time (hh:mm)	Concentration (mg/L)
1	11:42	0	14	12:08	2.6×10 ⁻⁷
2	11:44	0	15	12:10	2.8×10 ⁻⁷
3	11:46	0	16	12:12	3.2×10 ⁻⁷
4	11:48	0	17	12:14	3.5×10 ⁻⁷
5	11:50	1.1×10 ⁻⁷	18	12:16	2.8×10 ⁻⁷
6	11:52	2.0×10 ⁻⁷	19	12:18	2.4×10 ⁻⁷
7	11:54	2.2×10 ⁻⁷	20	12:20	2.2×10 ⁻⁷
8	11:56	2.3×10 ⁻⁷	21	12:22	2.0×10 ⁻⁷
9	11:58	2.1×10 ⁻⁷	22	12:24	2.3×10 ⁻⁷
10	12:00	2.2×10 ⁻⁷	23	12:26	2.1×10 ⁻⁷
11	12:02	2.2×10 ⁻⁷	24	12:28	1.8×10 ⁻⁷
12	12:04	2.2×10 ⁻⁷	25-30	12:30 -12:40	Near zero
13	12:06	2.4×10 ⁻⁷			

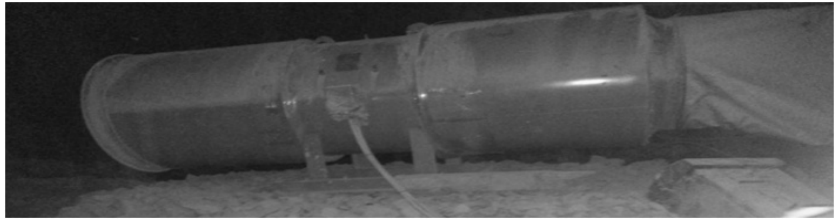


Fig. 3. Jet Fan and Duct System

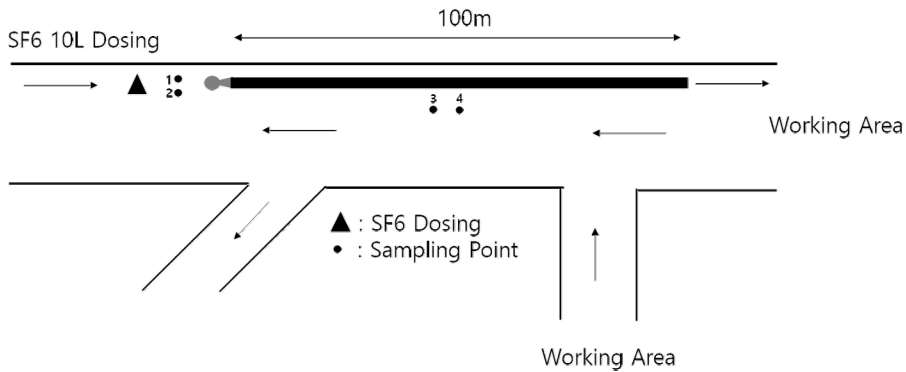


Fig. 4. Diagram of Recirculation measurement by using tracer gas

적용하여 운영하고 있다. 하지만 Fig. 4의 실험구간 모식도에서 확인할 수 있는 것처럼 국부선풍기와 덕트를 통해 유입된 공기가 작업장을 거친 후에 동일 갱도로 배기되면서 이 구간에서 공기재순환 현상을 확인하였다. 실제로 이 구간에서는 다른 운반갱도들에 비하여 오염물질의 농도가 현저히 높게 관측됨에 따라서 이러한 원인이 공기재순환 현상에 의하여 발생되었다는 것을 규명하고자 하였다. Fig. 4와 같이 선풍기 앞 10 m 지점에 SF₆ 10 L를 정량 분사하고 선풍기 앞 5 m 지점에 두 개의 샘플러(Sampler 1,2)와 재순환 현상이 의심되는 덕트 주변에 두 개의 샘플러(Sampler 3,4)를 덕트 길이의 1/2에 해당하는 50 m 지점에 설치하였다. 덕트의 말단 지점에서의 토출풍속은 약 3 m/s이며, 덕트 주변 풍속은 위치에 따라 값에 차이가 많지만 전반적으로 0.2~0.8 m/s의 범위 내에서 배기되고 있다. 이로 인하여 분사된 추적가스는 덕트를 통해서만 유입되는 것으로 가정하였다. 모니터링은 2분 마다 실시하도록 장비를 세팅하고 결과를 충분히 확인하기 위해 3시간 동안 모니터링을 실시하였다. 4개의 샘플러의 모니터링 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

추적가스의 시간에 따른 농도측정 결과 선풍기의 앞에서 추적가스 농도는 분사 후 바로 0.5 ppm까지 증가

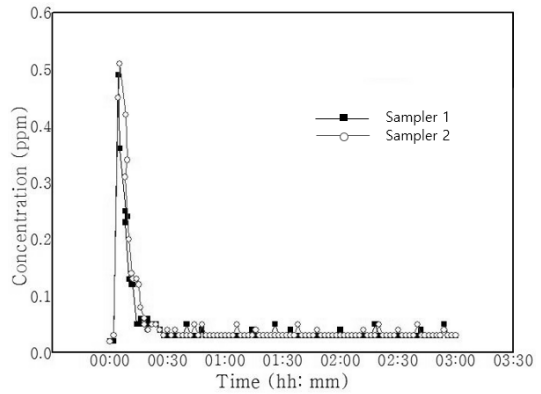


Fig. 5. Tracer gas concentration graph of Sampler 1 and 2

한 후 더 이상 측정이 안되는 것을 확인하였지만, 공기 재순환 현상이 의심되는 덕트 주변에서는 약 5분 후에 최대 농도를 보였다. 이는 덕트를 통해 유입된 공기가 작업장을 약 5분간 체류한 후에 바로 배기되는 것을 의미한다. 또한 추적가스의 농도가 Fig. 6과 같이 바로 안정화되지 않고 약 30분가량 꾸준히 0.1 ppm 정도의 농도분포가 나타남을 확인하였다. 이는 작업장을 거친 공

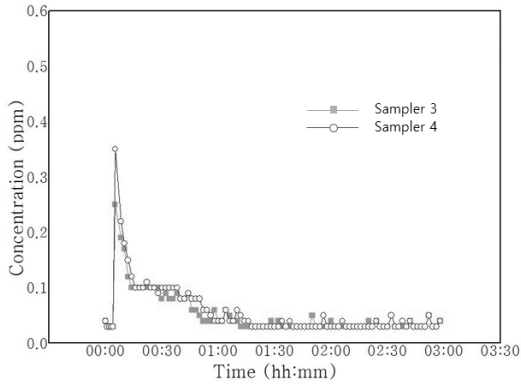


Fig. 6. Tracer gas concentration graph of Sampler 3 and 4



Fig. 7. Equipment setting for air exchange rate

기가 다시 선풍기를 통해 재유입되면서 공기가 재순환 된다는 것을 의미한다. 본 갱도는 주요 작업구간으로 연결되는 주요 갱도이기 때문에 차량의 진출입이 많아 Sampler 3번과 4번을 차량의 이동에 방해가 되지 않는 덕트 옆에서 측정한 결과이다. 이러한 이유로 본 광산에서 국부선풍기 주변 공기재순환 시간이 약 30분 정도라고 단정 지을 수는 없지만, 본 실험을 통해 공기재순환 현상을 규명할 수 있다. 또한 현재 국내 석회석 광산에서 주로 운영하고 있는 국부선풍기시스템의 설계 시 공기재순환 현상을 최소화할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다는 것을 파악하였다.

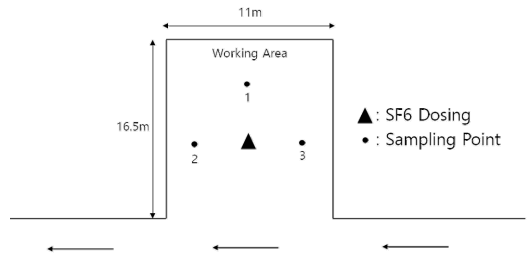


Fig. 8. Diagram of air exchange rate experiment

3.3 작업장 공기교환율 측정 결과

공기교환율은 주로 건축물과 같은 실내 구조물의 환기성능을 평가하는 중요한 지표로 사용되어졌지만, 본 연구에서는 채광 작업장에서의 공기교환율을 바탕으로 작업환경을 평가해보고자 하였다. 공기교환율을 측정하기 위하여 현재 가장 활발하게 채광작업이 이루어지고 있는 작업장을 선정한 후에 약 6시간 동안 측정을 실시하였다(Fig. 7). Fig. 8에서 보는 바와 같이 작업장의 중앙에서 추적가스를 분사하고 분사지점을 중심으로 정면에 Sampler1을 설치하고 좌, 우에 각각 Sampler 2와 3을 설치하였다. 작업공간의 높이는 약 5.7 m이다. 공기교환율을 측정하기 위한 일정농도법은 대상공간 내에 일정한 추적가스 농도를 만들어준 후에 실시하여야 하기 때문에 간이선풍기 등을 활용하여 초기 분사되는 추적가스가 최대한 고르게 섞일 수 있도록 하였다. 일정농도법을 계산하기 위한 일정농도는 3 ppm으로 설정하였으며, 대상공간의 크기를 고려하여 4분 마다 샘플링을 실시하였다. 즉, 꾸준히 추적가스를 분사한 후에 3

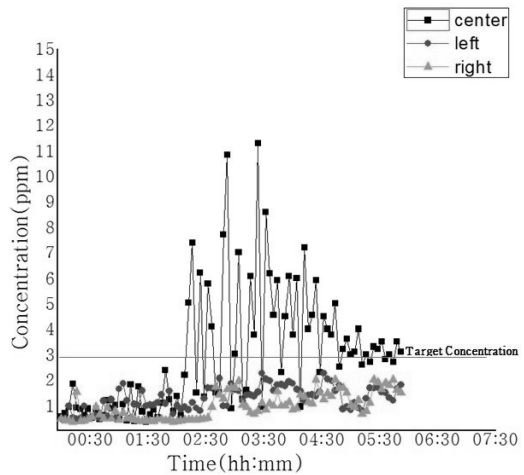


Fig. 9. Graph by constant concentration method

ppm정도로 농도분포가 안정화되면 그 시점을 기준으로 분사된 추적가스의 양을 바탕으로 시간당 공기교환율을 식 (5)에 의하여 계산하였다. 측정결과를 Fig. 9와 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Measured values for the air exchange rate

Time (min)	Concentration (ppm)			ACH	Time (min)	Concentration (ppm)			ACH
	Sampler #1	Sampler #2	Sampler #3			Sampler #1	Sampler #2	Sampler #3	
4	0.55	0.46	0.47	-	184	3.02	1.63	1.69	-
8	0.69	0.49	0.4	-	188	7	1.56	1.95	-
12	0.94	0.97	0.4	-	192	1.24	1.18	1.01	-
16	1.85	0.51	0.36	-	196	1.61	1.4	0.94	-
20	0.91	0.46	1.53	-	200	6.06	1.42	0.72	-
24	0.86	0.49	0.38	-	204	3.77	1.36	0.66	-
28	0.61	0.97	0.39	-	208	11.29	1.52	0.77	-
32	0.87	0.51	0.45	-	212	0.95	2.25	1.1	-
36	0.51	0.54	0.53	-	216	8.59	2.03	0.82	-
40	0.84	0.6	0.93	-	220	6.18	1.96	1.07	-
44	0.46	0.49	0.64	-	224	4.54	1.58	0.98	-
48	0.61	1.17	0.49	-	228	5.9	1.8	1.54	-
52	1.2	0.58	0.9	-	232	2.3	1.82	0.98	-
56	0.88	1.23	0.47	-	236	4.5	1.76	1	-
60	1.01	0.48	0.78	-	240	6.06	1.92	1.12	-
64	0.49	1.64	0.44	-	244	3.77	1.85	0.84	-
68	1.04	1.86	0.7	-	248	6	1.63	0.88	-
72	0.39	1.19	0.49	-	252	0.95	1.56	1.41	-
76	1.81	0.52	0.48	-	256	7.2	1.18	1.34	-
80	0.38	1.04	0.42	-	260	4	1.4	1.12	-
84	1.73	1	0.41	-	264	4.54	1.42	1.06	-
88	0.76	1.57	0.38	-	268	5.9	1.36	2	-
92	0.36	0.98	0.43	-	272	2.3	1.52	1.5	-
96	0.64	1.02	0.38	-	276	4.5	2.25	1.22	-
100	0.83	1.01	0.38	-	280	4	2.03	1.47	-
104	0.53	1.11	0.46	-	284	3.77	1.96	1.38	-
108	1.09	1.42	0.46	-	288	5	1.58	2	-
112	2.38	1.06	0.4	-	292	2.5	1.8	1.68	-
116	1.22	1.56	0.42	-	296	3.2	0.85	1.69	-
120	0.78	0.66	0.35	-	300	3.6	0.94	1.5	-
124	1.36	0.99	0.37	-	304	3	0.83	1.01	-
128	0.62	0.85	0.4	-	308	3.1	1.1	0.94	1.1
132	2.19	0.94	0.44	-	312	4	0.89	1.2	1.2
136	5.02	0.83	0.42	-	316	2.6	0.79	0.66	1
140	7.39	1.1	0.42	-	320	3	1.27	0.77	1.1
144	1.5	0.89	0.44	-	324	2.7	1.68	1.1	1.2
148	6.21	0.79	0.46	-	328	3.3	1.67	2	1
152	1.32	1.27	0.47	-	332	3.2	1.7	1.9	1
156	5.77	1.68	0.52	-	336	3.5	1.52	1.62	1.2
160	4.09	1.67	0.95	-	340	2.8	1.5	1.87	1
164	1.49	1.7	1.74	-	344	3	1.29	1.78	1.1
168	1.49	2.06	1.42	-	348	2.7	1.19	2	1.2
172	7.7	0.98	1.26	-	352	3.5	1.67	1.6	1
176	10.83	0.98	1.62	-	356	3.1	1.8	1.5	1.1
180	0.88	1.85	1.68						

Table 3. Guideline of Ventilation system design for multiuse facilities in Korea

Standard	Multiuse facilities	Waiting room in bus terminal	Subway station, Underground shopping center	Indoor parking lot
Air exchange rate (1/h)		>0.3	>0.5	>3

Fig. 9에서와 같이 추적가스를 분사하는 지점을 중심으로 전면부(Sampler 1)에서의 추적가스 농도가 민감하게 반응하였는데, 이러한 이유는 추적가스를 전면으로 분사하였기 때문이다. 또한 약 2시간까지는 추적가스의 농도가 타겟농도인 3 ppm에 도달하지 못하고 있다가 갑자기 농도가 올라간 것을 확인할 수 있는데, 이는 연구지역인 채광작업장의 체적이 매우 클 뿐만 아니라 운반갱도쪽으로 열려진 공간이기 때문에 분사장치로부터 조금씩 분사되는 추적가스량으로는 타겟농도에 쉽게 도달할 수 없다고 판단되어 추적가스의 분사량을 높였기 때문이다. 총 6시간 정도 추적가스를 분사한 결과 양 측면 (Sampler 2, 3)에서는 추적가스 농도가 타겟농도에 도달하지 못 했지만, 전면부(Sampler 1)에서는 타겟농도인 3 ppm에 도달하여 일정수준을 유지하였다. 실제로 일정농도법은 대상 공간에 추적가스가 완전하게 혼합되어진 상태에서 계산되어야 한다. 하지만 본 연구지역은 완전히 열린 공간이기 때문에 완전한 혼합에 도달하기 어려웠다. 이로 인하여 타겟농도에 도달한 전면부(Sampler 1)만을 대상으로 공기교환율을 예측해보았다. Table 2에서 보듯이 약 308분 지점부터 타겟농도에 도달했다고 판단하여 공기교환율을 측정된 결과 시간당 평균 약 1.1회의 공기가 교환되는 것으로 나타났다. 계산된 공기교환율을 바탕으로 작업장에 유입되는 공기량을 계산하면 약 0.32 m³/s로 실제 작업장에는 공기가 거의 유입되지 않는다고 판단된다. 공기교환율을 바탕으로 채광작업장의 환기성능을 비교하고자 Table 3의 “국내 다중이용 시설건축물 권고 기준”을 살펴보면 차량에 의한 배출가스가 상대적으로 많은 실내 주차장의 경우 시간당 3회 이상의 공기교환율을 권고하고 있다. 이러한 기준을 채광작업장에 적용할 수는 없겠지만, 채광작업장과 흡사한 실내주차장의 권고 공기교환율이 3회인 것을 참고한다면 실제 채광작업장의 환기효율이 매우 낮은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 가행 중인 석회석 광산을 연구광산으로 하여, 석회석 광산에서 일반적으로 나타날 수 있는 몇 가지 주요 문제점들을 파악하고 추적가스법을

적용하여 환기성능을 평가해보고자 하였다. 석회석 광산에서 나타날 수 있는 문제점들로는 대단면 및 변동이 심한 자연환기력으로 인한 저속의 공기속도와 국부통기시스템에서 발생하는 공기재순환 현상, 실제 작업구간에서의 환기문제 등이다. 이를 규명하고 환기성능을 평가하기 위하여 추적가스를 SF₆로 선정하고 각 문제점들이 주로 나타나는 지역을 선정하여 추적가스법을 적용하였다. 연구의 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1. 일반적인 계측기로는 측정이 불가능하였던 저속의 공기유동현상을 측정할 수 있었다. 주요 작업구간으로 입기되는 유일한 통로인 운반갱도에서 공기속도를 관찰한 결과 약 0.0378 m/s의 공기속도가 관찰되었다. 이는 작업구간에 실제로 많은 양의 공기를 전달하지 못하고 있다는 것으로 판단되며, 측정 시기가 봄철인 것을 감안하면 내외부의 온도차이가 거의 없어 이로 인한 자연환기력이 매우 작게 작용된 것으로 판단된다.
2. 작업구간 근처에서 운영되는 국부환기시스템의 오염물질 재순환 현상을 규명하기 위해 실험한 결과 작업장을 거친 오염된 공기가 국부선풍기 주변에 약 30분간 체류하면서 공기재순환 현상을 발생시키는 것을 확인하였다. 이는 입배기가 동시에 일어나는 갱도에서 국부환기시스템을 운영 시 선풍기의 압력에 의해 오염된 공기가 다시 재유입되는 것으로 확인되며, 국부선풍기시스템을 구축할 때 이러한 공기재순환 현상을 최소화시켜 설치해야 함을 나타낸다.
3. 실제로 작업을 진행하고 있는 채광작업장에 유입되는 공기량을 추적가스 일정농도법을 바탕으로 공기교환율을 계산함으로써 추정하였다. 실험 결과, 시간당 약 1.1회의 공기가 교환되고 있음을 확인하였고, 이를 유량으로 환산하면 약 0.33 m³/s의 매우 적은 유량만이 유입되고 있음을 확인하였다. 이는 실제 작업구간의 환기성능을 높일 수 있는 환기시스템의 설계가 필요하다는 것을 나타낸다.

추적가스법을 적용한 본 연구는 국내에서 처음으로 적용된 환기성능평가방법으로서 평가도구로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 국내 석회석 광산의 전

반적인 문제점들을 정량적으로 판단할 수 있는 정밀한 평가도구가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교와 자원개발특성화사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. 이창우, & 양원철. 1994. 보문: 추적가스를 이용한 석탄광산 갱내 디젤배기물질 확산계수 연구. 한국지구시스템공학회지(구 한국자원공학회지), 31(5), 483-490.
2. 정규홍, 김두영, 이승호, 안혜림, & 이창우. 2013. 석회석 광산 갱도내 오염물질 난류확산계수에 관한 연구. 2013 한국암반공학회 춘계 총회 및 학술발표회 논문집, 137-140.
3. 한화택. 1999. 환기실험을 위한 추적가스 방법의 응용. 설비저널, 28(6), 452-462.
4. C.-M. Koo, S.-W. Jeon, I.-W. Lee, 2008, Underground Mine Design and Stability Analysis at a Limestone Mine, Tunnel & Underground Space, Vol. 18, No. 4, 243-251.
5. H.-U. Lim, J.-D. Kim, H.J. Baek, 2000, A Study on the Method for Limestone Mines with Less Environmental Hazards, Tunnel & Underground Space, Vol. 10, No. 1, 80-91.
6. Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. J. 2012. Mine ventilation and air conditioning. John Wiley & Sons.
7. Innova Air tech Instruments. Technical documentation application software type 7620 for control of tracer-gas monitoring system user manual.C-5.
8. Klinowski, G. W., & Kennedy, D. J. 1989. Tracer Gas Based Evaluation of the Auxiliary Ventilation System. In Proceedings of the 4th Mine Ventilation Symposium, 123-127.
9. Patterson, R., & Luxbacher, K. 2012. Tracer gas applications in mining and implications for improved ventilation characterisation. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 26(4), 337-350.
10. Suglo, R. S., & Frimpong, S. 2002. Accuracy of tracer gas surveys in auxiliary ventilation systems in coal mines. In Mine Ventilation: Proceedings of the North American/Ninth US Mine Ventilation Symposium, 168-175.
11. Thimons, R. J. B., & Kissell, F. N. 1974. Using sulfur hexafluoride as a gaseous tracer to study ventilation systems in mines. Bureau of Mines, Washington, DC (USA), 7916, 1-26.
12. Vinson, R. P. 1980. Face ventilation measurement with sulfur hexafluoride (SF₆). Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 8473, 1-16.
13. Y.-S. Yu, J.-H. Roh, J. Kim, 2013, A Study on hermodynamic Natural Ventilation Analysis by the Field Survey of Underground Mines in Korea, Tunnel & Underground Space, Vol. 23, No. 4, 288-296

김영수

2013년 인하대학교 환경공학과 공학사
2015년 인하대학교 에너지자원공학과
공학석사

Tel: 032-544-5785
E-mail: emeraldmtcl@naver.com
현재 개인사업

김진

1987년 인하대학교 자원공학과 공학사
1990년 미국 University of Kentucky 공
학석사/환기시스템
1995년 미국 University of Missouri-Rolla
공학박사/지하환경

Tel: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 에너지자원공학과 교수



노장훈

2009년 인하대학교 환경공학과 공학사
2012년 인하대학교 에너지자원공학과
공학석사

Tel: 010-6421-4985
E-mail: iglord2@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 박사
수료

