

Rampway 설치 석회석 광산내 환기 현황 및 열환경 분석 사례연구

김두영, 이승호, 정규홍, 이창우*

A Case Study on the Ventilation and Heat Environment in a
Underground Limestone Mine with Rampway

Doo Young Kim, Seung Ho Lee, Kyu Hong Jeong, Chang Woo Lee*

Abstract As more diesel engines have been employed in underground limestone mines with large cross section, underground space environment is worsened by diesel exhausts and heat flow. This paper aims for the ultimate goal to optimize the work place environment through assuring the optimal required ventilation rate based on the analysis of the airflow, diesel exhaust gas concentrations and the effects of mechanization and deepening working face on temperature and humidity. Due to the insufficient capacity of the main exhaust fan and poor airway management, stagnant airflows were observed at various locations, while the flow direction was reversed instantly with passing diesel equipment and the flow reversal was also made by the seasonal variation of the outside surface weather. During the loading operation, CO concentration measurements were found to be frequently higher than the threshold limit of 50 ppm, and most of the NO₂ measurements during drilling and loading operations shows even more serious levels surpassing the permissible limit of 3 ppm. The actual ventilation quantity was considerably less than the required quantity estimated by the mine health and safety law, and this shortage problem was less serious in colder winter showing more effectiveness of the natural ventilation.

Key words Limestone mine, Rampway, Thermal environment, Carbon monoxide, Nitrogen oxide

초 록 국내 대단면 지하 석회석광산 갱내에서 디젤장비의 사용이 증가함에 따라 배출 오염물질 및 열방출로 인한 작업환경의 악화 문제가 심각해지고 있다. 본 연구에서는 적정 소요환기량의 확보를 통한 갱내 환경의 최적화를 위한 기초연구로 갱내 환기망내 기류분포와 디젤장비의 배출가스 농도분포를 측정하고, 지하 심부화와 기계화에 따른 온·습도 변화를 고려하여 갱내 소요환기량을 추정하였다. 배기팬의 용량 부족 및 갱도 관리의 문제로 인하여 갱내 다수의 지점에서 기류정체가 심하고, 주요 갱도에서의 기류방향이 장비의 이동에 따른 순간적인 변화가 크며 계절별 변화 또한 큰 편이다. 디젤 배출가스인 CO의 경우 적재작업시 규제농도 50 ppm을 자주 초과하였으며, NO₂의 경우 천공 및 적재작업동안 대부분 규제농도 3 ppm을 초과하였다. 광산보안법규를 적용하여 구한 갱내 소요환기량에 비하여 실제 환기량이 심각하게 부족하였으며 자연환기력의 영향에 따라 환기량 부족문제는 외부 온도가 낮은 겨울철이 상대적으로 덜 심각하였다.

핵심어 석회석 광산, Rampway, 열환경, 일산화탄소, 질소산화물

1. 서 론

국내 석회석 광산의 대형화, 지하 심부화, 기계화 추세에 따라 갱내에 다양한 종류의 대형 디젤장비가 투입되고 있으며 이들 장비로부터 배출되는 오염물질, 특히 매연 및 고온으로 인한 작업환경 악화는 이전에는 국내에서 경험하지 못하였던 문제를 야기하고 있어 시급한 해결 방안의 모색이 필요하다(R.H. Grau III, R.B. Krog,

Received: May. 29, 2012

Revised: Jun. 11, 2012

Accepted: Jun. 12, 2012

***Corresponding Author:** chang woo Lee

(Tel) +82512007769, (Fax) +82512007771

(E-Mail) cwlee@dau.ac.kr

Department of Energy and Mineral Resources Engineering,
Dong-A University, Busan, Korea

2009). 국내의 대단면(단면적 92 m² 이상) 석회석 광산은 대부분 주방식 채광법을 적용하며, 대단면 Rampway를 굴착하여 대형 디젤장비를 운반수단으로 이용하고 있다. 따라서 디젤장비는 이동 오염원으로 전체 갱내 환경을 오염시키고 있으나 현재 국내 광산보안법에서는 디젤 배출물질 중 유해성이 가장 큰 매연에 대한 규제농도를 제정하고 있지 않다. 또한 NO_x 중 NO₂는 폐수증을 유발하는 독성 가스로 국내 갱도내 농도를 광범위하게 측정할 자료도 없으며 표준측정방법에 대한 규정도 없는 상황이다.

본 연구에서는 대단면 지하 석회석 광산에서의 (1) 갱내 환기망내 기류분포를 측정하고, (2) 디젤장비에서 배출되는 작업공간내 가스상 물질 농도분포, (3) 지하 심부화와 기계화에 따른 열환경을 고려하여 갱내 환기량의 적정성 분석이 목적이다. 궁극적으로는 디젤배출물질 및 열환경을 고려한 대단면 지하 석회석 광산에서의 적정 소요환기량을 산정하기 위한 기초연구이다.

2. 지하 대단면 석회석 광산내 유해가스 및 소요환기량 기준

작업공간내에서 가동중인 디젤장비에서 배출되는 유해가스는 주로 CO, NO_x이며 국내 광산보안법에 의한 규제농도는 Table 1과 같다.

갱내에서 발생하는 유해물질을 적절히 제거 및 희석하는데 소요되는 환기량은 내연기관의 정격출력 1 kW를 기준으로 규정되며 국내의 규정은 Table 2와 같다. 2011년도에 개정된 국내 광산보안법규(55조 갱내환기량)에서 갱내 소요환기량은 내연기관의 정격출력 1 kW당 3 m³/min(0.05 m³/s) 이상으로 규정하고 있다. 1964년에 제정된 미국 기준에 따른 소요환기량은 0.04 m³/s/kW이지만, 설계시에는 안전율을 고려하여 기준보다 50% 큰 0.06 m³/s/kW를 적용한다(G.H. Schnakenberg Jr, 2001).

Table 1. Threshold limit values for hazardous gases(Mine Health and Safety Act 49, 2011)

Hazardous gas	TLV(ppm)
CO	50
CO ₂	10,000(1%)
NO	25
NO ₂	3

3. 현장실험

3.1 대상 현장 개요

Fig. 1의 D광업소는 강원도 삼척에 위치한 대단면 석회석 광산으로 연간 생산량은 294만 톤으로 연간 갱도 굴진율이 국내 최고로 현재 6편까지 개발되어 있다. 편간 고도차는 20 m이며 최하부 편은 갱구로부터 140 m 하부에 위치한다. 갱도는 사각형의 형상으로 폭 12 m, 높이 7 m, 단면적 84 m²이며 주방식 채광법을 적용하고 있는 채광 작업갱도와 주운반갱도의 단면적은 같다. Fig. 2는 D광업소의 환기계통도로 주운반갱인 Rampway

Table 2. Ventilation rate design factor(Kevin Hedges et al., 2007)

Country	Ventilation rate design factor
Korea	0.05 m ³ /s/kW
USA	0.06 m ³ /s/kW
Australia (New South Wales, Western Australia)	0.06 m ³ /s/kW
Canada (Northwest Territories and Nunavut, Yukon, Ontario, British Columbia)	0.06 m ³ /s/kW



Fig. 1. Location of D mine

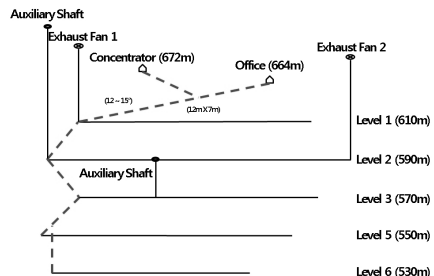


Fig. 2. Schematics of the ventilation network

의 경사는 12~15°이다. 자연환기력 만으로는 환기량이 부족하므로 대우식 환기방식을 적용하여 2개의 수직갱에 150 HP 배기팬을 설치하였으며, 외부와 연결된 환기승갱 1개와 2편, 3편을 연결하는 갱내 환기승갱이 굴착되어 있다.

3.2 실험방법

2011~2012년에 D광업소에서 총 3회의 현장실험을 수행하였으며 날짜에 따른 실험내용과 실험방법을 Table 3에 정리하였다. 대단면 지하 석회석 광산에서의 갱내 환기량 분포, 작업공간내 유해가스 농도와 열환경을 측정하여 분석하였다. 초음파 3D 풍속계와 정밀도 1 Pa 인 기압계를 각 편 of 중앙지점, 작업장부근, 작업장으로부터 50 m 하류편에 설치하여 풍향, 풍속과 기압을 측정하였다. 주방식 채광법을 적용하고 있어 남겨진 광주의 크기 및 형태가 일정하지 않으므로 각 편에서의 정확한 풍향과 풍속 측정이 용이하지 않다(R.B. Krog et al., 2004). Rampway의 상하류와 각 편 of 접합점에서 풍향, 풍속, 온·습도를 측정하였으며 대형 디젤장비 배출가스 중 유해성이 큰 CO, NO_x의 작업공간내 농도분포를 측정하였다. 작업공간내 CO농도 측정에는 전기화학식을 사용하는 Kanomax사의 Model 2211을 사용하였으며, NO_x 농도는 국내 대기내 NO_x의 표준측정방법

인 화학발광법(Chemiluminescent method)을 사용하는 CASELLA사의 모델 CM2041을 사용하여 실시간 측정하였다. 또한 지하 심부화와 기계화에 따른 갱내의 열환경 변화를 관찰하기 위하여 작업장과 50 m 하류편에서 온·습도를 측정하여 분석하였다.

4. 갱내 기류특성 및 분포

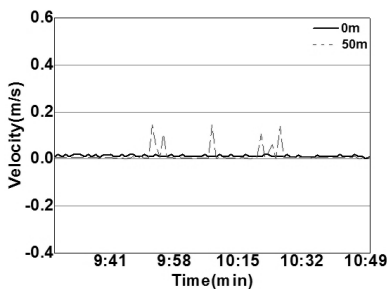
대단면 지하 석회석 광산의 환기 특성을 분석하기 위하여 초음파 3D 풍속계를 이용하여 갱내 기류특성과 저속의 환기속도 측정이 가능한 지향성 풍속계와 스모크 튜브를 이용하여 갱내 기류분포를 측정된 결과는 다음과 같다.

4.1 갱내 기류특성

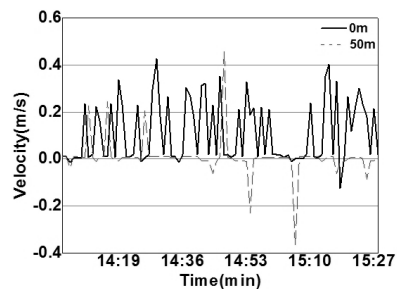
작업장 부근에서의 풍속 분포를 분석하기 위하여 초음파 3D 풍속계로 측, 수평, 수직방향의 풍속을 측정하였다. 단면상에서의 수평 및 수직방향의 풍속은 오염물질의 효율적 희석 가능성을 분석할 수 있는 지표로 활용할 수 있다. 측방향에 비하여 상대적으로 수평과 수직방향으로의 풍속은 천공작업시 -0.013~0.001 m/s, 적재작업시 -0.25~0.31 m/s로 낮은 편이다. Fig. 3은 작업별 작업면 부근과 50 m 하류편에서 측정된 측방향 풍

Table 3. Measurement and measurement parameters by date

Measurement	Measurement parameters	Date(2012)								
		Case A (January)			Case B (April)			Case C (April)		
		3	4	5	12	13	14	23	24	25
Ventilation characteristics	- Airflow direction, velocity - Pressure distribution	○	○	○	○	○	○			
Thermal environment	- Temperature · humidity	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hazardous gas concentration	- CO - NO _x				○	○	○	○	○	○



a. During drilling



b. During loading

Fig. 3. Velocity profiles by operation

속을 보여주며 천공작업시 풍속은 0.001~0.020 m/s, 적재작업시는 -0.13~0.43 m/s이다. minus로 측정된 풍속은 환기방향이 장비의 이동에 따라 순간 역전된 경우이다. 대단면 채굴적으로 갱내 풍속이 매우 낮았으며, 작업면부근은 디젤차량의 영향으로 50 m 하류편보다 풍속이 높았다. 풍속분포에 나타나는 순간적인 상승 및 하강 현상은 인접지점을 통과하는 디젤차량으로 인한 결과이며, 천공작업보다 적재작업시가 갱내 풍속이 높고 변화폭도 크다. 이는 천공작업시 사용되는 장비는 천공기가 유일하나 적재작업시에는 로우더뿐만 아니라 여러 대의 디젤트럭들이 지속적으로 대기, 적재, 이동을 반복하기 때문이다. 또한 주방식 현장에서의 광주의 위치 및 크기가 규칙적이지 못하고 바닥 및 측벽 정리와 같은 갱도 관리가 불량하여 기류방향의 제어가 어려운 문제로 발생한다.

4.2 갱내 기류분포

배기팬의 가동 유무와 계절변화(겨울/봄)에 따른 갱내 환기시스템의 기류방향과 풍속을 측정하여 갱내 기류분포를 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

2012년 1월과 2012년 4월에 각각 3일간 2개의 수직갱에서 각 1대의 배기팬을 가동하는 동안 갱내의 기류방향, 풍속, 온·습도를 측정한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 2개의 갱구에서 들어오는 신선한 기류는 대단면 채굴적과 누기로 인하여 하부로 내려갈수록 환기량이 급격히 줄어들어 6번에서는 환기량이 극히 작았다. 대단면 갱도에서의 풍속이 낮으므로 디젤장비의 이동으로 순간적인 환기방향의 역전이 자주 관찰되며, 일정하지 않은 Rampway에서의 환기방향, 갱내 정체기류 등은 주선풍기 용량의 부족이 가장 큰 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 4. a는 겨울철 갱내 기류분포이며 2개의 갱구에

서 들어오는 기류가 합쳐지는 지점(측정점 5번)에서 측정된 환기량은 7,661 m³/min이고 1편을 지나 Rampway가 시작하는 지점(측정점 7번)은 4,032 m³/min로 관찰되었다. Fig. 4. b는 봄철 갱내 기류분포이며 측정점 5번에서 환기량이 9,677 m³/min이고 측정점 7번에서는 7,661 m³/min로 관찰된다. 계절별로 기류방향의 큰 차이를 보이는 것은 자연환기력의 영향이 큰 것으로 보이며, 풍속이 낮아 정체기류가 자주 관찰되었다. 또한 겨울철에는 하부면에서의 갱내수 유입으로 갱내온도가 심부하에 따라 증가하지 않고 오히려 점진적으로 감소하는 현상을 보였다.

Fig. 5는 자연환기력의 영향을 분석하기 위하여 배기팬을 가동하지 않고 갱내 디젤장비의 가동도 없는 오전 시간대에 기류의 분포를 측정한 결과이다. 겨울철에는 갱내 심부 온도가 상대적으로 크므로 밀도차이에 따라 하부에서 상부로 기류가 이동을 하였으며 봄철에는 겨울철과 반대로 갱구에서 들어온 기류가 하부로 내려간다.

Fig. 5. a에는 겨울철 갱내 기류분포를 도시하였다. 측정점 5번에서 환기량이 7,560 m³/min이고 측정점 7번에서는 5,695 m³/min로 관찰되었다. Fig. 5. b는 봄철 갱내 기류분포이며 측정점 5번에서의 환기량 5,891 m³/min이고 측정점 7번에서는 4,234 m³/min로 관찰되었다. 겨울철이 봄철보다 온도차이에 의하여 생성된 자연환기력으로 유입되는 환기량이 상대적으로 많았다.

갱내 자연환기력은 고도차와 온도차에 의한 환기력의 합이며 갱내의 각 지점의 고도차는 계절별 차이가 없으므로 갱내의 온도차가 계절별 환기량에 큰 영향을 미치게 된다. Table 4는 계절별로 각 지점에서의 평균 온도를 측정된 결과이며 갱내의 온도차는 겨울철이 34.9℃이고 봄철이 10.2℃이다. 겨울철 2편의 측정점 8번과 10번에서 온도차는 6.1℃이며 봄철에는 1.2℃이다. 갱

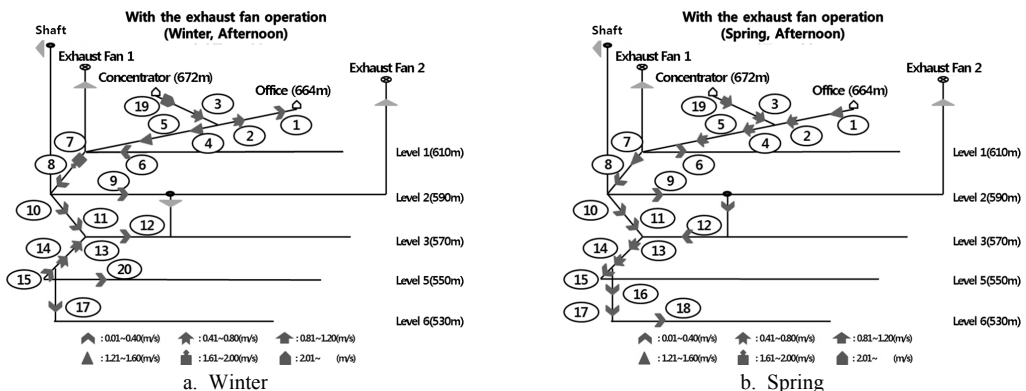


Fig. 4. Airflow distribution with the exhaust fan operation

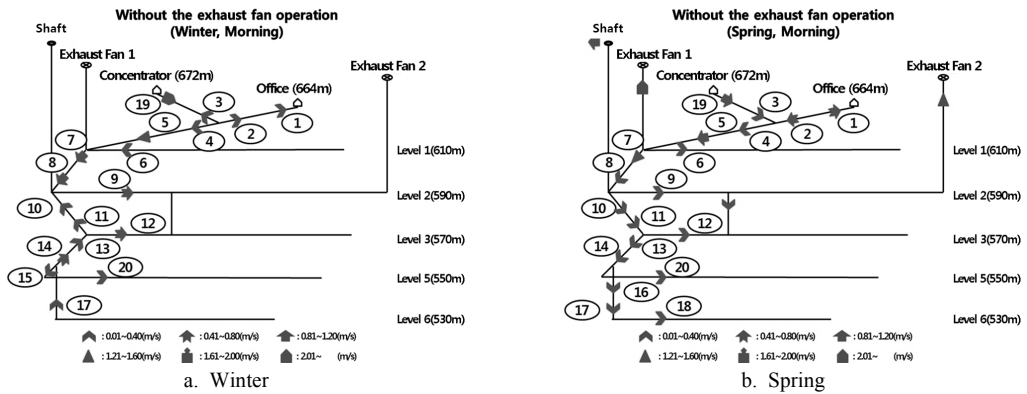


Fig. 5. Airflow distribution without the exhaust fan operation

Table 4. Seasonal underground temperature distribution at the measurement locations

Location \ Season	1(°C)	2(°C)	3(°C)	4(°C)	5(°C)	6(°C)	7(°C)	8(°C)	9(°C)	10(°C)
Winter	-10.2	0.3	-0.2	-4.5	-1.0	8.3	1.5	6.2	8.9	12.3
Spring	8.9	8.3	10.1	13.2	10.5	10.3	9.7	13.5	12.3	14.6
Location \ Season	11(°C)	12(°C)	13(°C)	14(°C)	15(°C)	16(°C)	17(°C)	18(°C)	19(°C)	20(°C)
Winter	13.1	15.0	14.2	16.4	14.1	-	15.7	-	-18.5	15.4
Spring	15	15.1	17.3	14.6	-	14.4	15.1	15.6	7.1	14.5

내 상부 및 하부편의 온도차이가 클수록 자연환기력이 증가하게 된다. (C.W. Lee, H.G. Kim, 2001; C.W. Lee, H.C. Park, 2009)

5. 유해가스 농도분포

작업공간내 디젤장비 배출가스의 작업별 분포는 유해성이 큰 CO, NO_x를 대상으로 하였으며 작업별 작업사이클을 측정하여 디젤장비의 작업종류 및 이동의 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

5.1 CO 농도분포

CO는 무색, 무취, 무미하고 독성이 강한 가스로 다양한 요인에 의해 발생하지만 작업공간내에서는 디젤장비의 배출가스와 발파후 가스로 많이 생성된다. Table 5는 작업별 갱내 CO 농도분포이며 적재작업이 천공작업보다 농도가 높음을 알 수 있다. 적재작업은 총 5 경우를 측정하였으며 그 중 2 경우의 평균농도가 51.1 ppm과 62.5 ppm으로 광산보안법에서 제시하는 CO의 규제농도 50 ppm을 초과하였다.

Table 5. Concentration profiles of CO by operation

Operation	Concentration profiles of CO(ppm)	Mean concentration of CO(ppm)
Drilling	13.5~47.2	24.5
Loading	16.0~113.0	40.7

Fig. 6. a는 천공작업시의 CO 농도를 나타내며 작업장부근에 천공기만 가동 중이므로 CO 농도가 낮은 편이다. 작업시에는 CO 농도가 비교적 일정하지만 작업이 종료된 후 천공기의 이동에 따라 일시적으로 농도가 증가하는 현상이 관찰되었다. 습식천공을 하거나 전기모터를 사용하는 천공기를 가동하는 경우에는 CO 농도가 감소하였다. Fig. 6. b는 적재작업시의 CO 농도분포이며 농도의 순간적 상승 및 하강은 로우더와 디젤트럭의 이동에 의한 현상이다. 작업장부근에서는 규제농도 50 ppm을 초과하는 경우가 관찰된다. 적재 작업장에서 로우더와 디젤트럭의 대기시 또는 대기 트럭 수의 증가시에는 높은 농도의 CO가 관찰되며 갱도의 형태가 땀갱도인 경우에는 기류에 의한 확산이 원활하지 못해서 농도가 높았다. 또한 디젤트럭의 대기 위치가 작업장

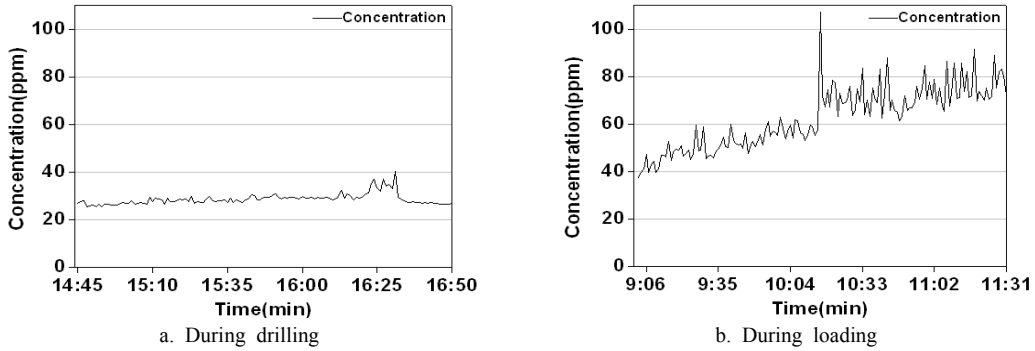


Fig. 6. Concentration profiles of CO by operation

Table 6. Concentration profiles of NO_x by operation

Operation	Concentration profiles of NO(ppm)	Mean concentration of NO(ppm)	Concentration profiles of NO ₂ (ppm)	Mean concentration of NO ₂ (ppm)
Drilling	0.4~10.3	3.9	0.4~4.2	2.3
Loading	2.3~15.2	8.6	0.5~9.8	5.1

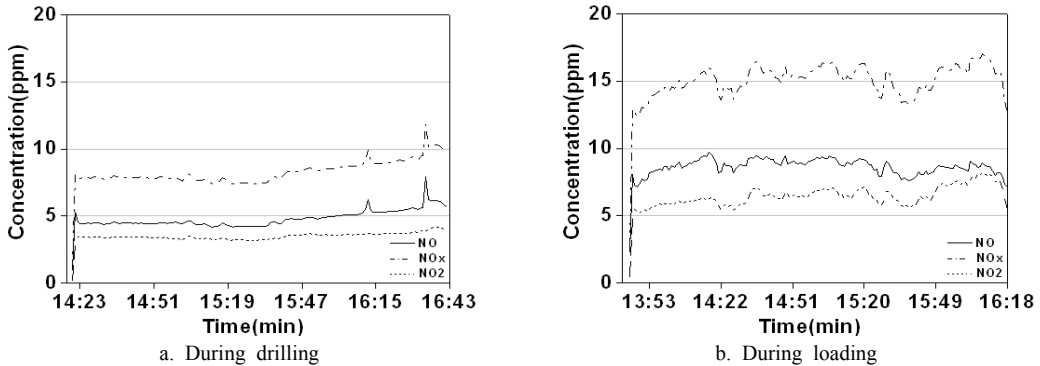


Fig. 7. Concentration profiles of NO_x by operation

상류에 위치하면 입기부근의 공기가 오염되어 작업장 농도가 증가하므로 작업 계획 수립시 디젤트럭의 대기 위치를 반드시 변경하여야 한다.

5.2 NO_x 농도분포

주로 내연기관의 연소나 발파시에 생성되는 NO, N₂O, NO₂와 같은 질소산화물은 장기간 노출되면 폐수 중이 발생하는 유해한 가스이다. 갱내 NO_x 농도는 NO와 NO₂의 합으로 나타내며 Table 6은 NO와 NO₂의 농도분포를 보여준다. NO와 NO₂ 농도는 모두 적재작업 시가 천공작업시 보다 상대적으로 높게 나타난다. NO는 규제농도 25 ppm를 초과하는 경우가 발생하지 않았으나 천공작업과 적재작업에 의한 NO₂의 평균농도는

모두 규제농도 3 ppm을 초과하였다.

디젤장비에서 배출된 NO는 빠르게 NO₂로 산화되고 일반적인 대기중 NO 농도는 NO₂ 농도에 비하여 상대적으로 낮지만 측정결과는 상이하였다. Fig. 7. a에서 보는 바와 같이 천공작업의 경우 NO_x 농도는 비교적 일정하게 유지된다. Fig. 7. b에서 적재작업시 디젤장비의 이동으로 순간적인 농도 상승 및 하강이 관찰되지만 농도변화는 CO처럼 크지 않다. 작업 종료 직후 장비가동이 정지되면 NO와 NO₂ 농도는 동시에 감소하지만, NO가 NO₂로 산화됨에 따라 NO와 NO₂의 농도 차이가 급격히 감소되는 것이 관찰된다.

Fig. 8은 작업중과 작업종료 후의 NO와 NO₂의 관계를 보여준다. NO는 공기 중에서 수증기와 혼합하여 빠

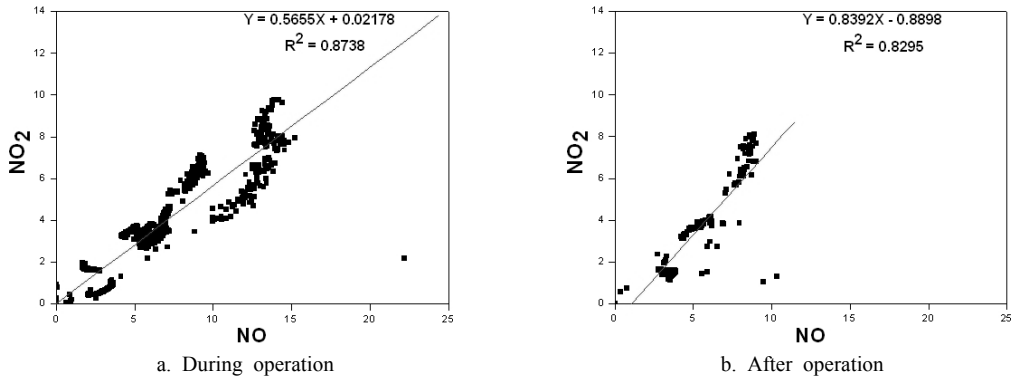


Fig. 8. Relationship between NO and NO₂

Table 7. Temperature and humidity profiles by location

Location	Range of temperature(°C)	Mean temperature(°C)	Range of humidity(%)	Mean humidity(%)
Level 3(100 m)	13.3~15.7	15.2	91~100	97
Level 5(120 m)	15.7~16.6	16.1	94~99	97
Level 6(140 m)	16.3~17.5	16.8	94~100	96

르게 독성이 가장 강한 NO₂로 산화된다. NO와 NO₂의 농도는 작업 중 및 작업 후 모든 경우에 0.8 이상의 높은 양의 상관관계를 보인다.

6. 열환경 분석

갱내 지하 심부화와 기계화에 따른 갱내 열방출량이 증가하여 작업공간내 열환경을 악화시킨다. 현재 채굴 작업이 진행 중인 3편, 5편, 6편에서 디젤장비에 의한 영향이 없는 지점에서 4월 하순경 온·습도를 측정된 결과를 Table 7에 정리하였다. 3편보다 5편의 온도가 0.9°C 높으며 6편은 5편보다 0.7°C 높게 나타나 심부화에 따른 갱내 온도증가율은 0.04°C/m 정도이다. 각 편에서 습도는 91~100%로 높으며 습도분포 형태는 온도분포와 일치하지 않았다.

작업장부근과 50 m 하류편에서 온도분포를 측정된 결과는 Fig. 9와 같다. 습식천공시에는 작업공간내 온도가 비교적 일정하게 유지되며, 디젤장비로 부터의 열방출량도 적어 작업장 부근에서 온도는 50 m 하류지점에 비하여 0.2°C 정도 높게 나타났으며 Fig. 9. b에 도시한 건식천공의 경우에는 온도증가가 2.3°C로 상대적으로 큰 편이었다. 적재작업시 운반갱도와 맹갱도에서의 온도 측정결과를 Fig. 9. c와 9. d에 정리하였다. 적재작업 시에서는 디젤장비의 이동에 의한 발생열로 인하여 순간적인 온도변화가 관찰되며 작업장 인접 운반갱도에

서의 온도가 50 m 하류지점 보다 0.6°C 높으며 맹갱도의 경우에는 차이가 2.6°C이었다. 작업지점과 50 m 하류지점에서의 작업 종류별 온도차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

Fig. 10은 작업별 작업장부근과 50 m 하류편에서 습도분포를 나타낸다. 디젤장비의 운행에 따른 습도변화는 적었으며 온도와 반대로 50 m 하류편의 습도가 높은 편이었다.

7. 소요환기량 평가

D광업소는 하루에 총 8시간 작업을 하고 “천공→발파→적재→운반”의 작업사이클이 반복된다. 계획 생산량을 맞추기 위하여 복수의 채광 작업면을 가행중이다. Table 8은 갱내의 장비현황 및 작업인원을 보여준다.

D광업소 내 천공기, 굴착기, 로우더, 디젤트럭 등 내연기관의 총 출력 5867 kW, 최대 작업인원수 42명이다. 국내 광산보안법규에 의하여 내연기관 출력 및 작업인원수를 기준으로한 추정 소요환기량은 Table 9와 같다.

추정 소요환기량은 17,601 m³/min이나 겨울철 입기 갱구에서 측정된 풍속의 최고값 2.5 m/s를 가정한 최대 가능 환기량은 12,600 m³/min이고 봄철의 경우는 최고 측정 풍속 1.2 m/s, 최대 가능 환기량 6,048 m³/min를 고려할 경우, 겨울철에는 5,000 m³/min 이상 그리고 봄

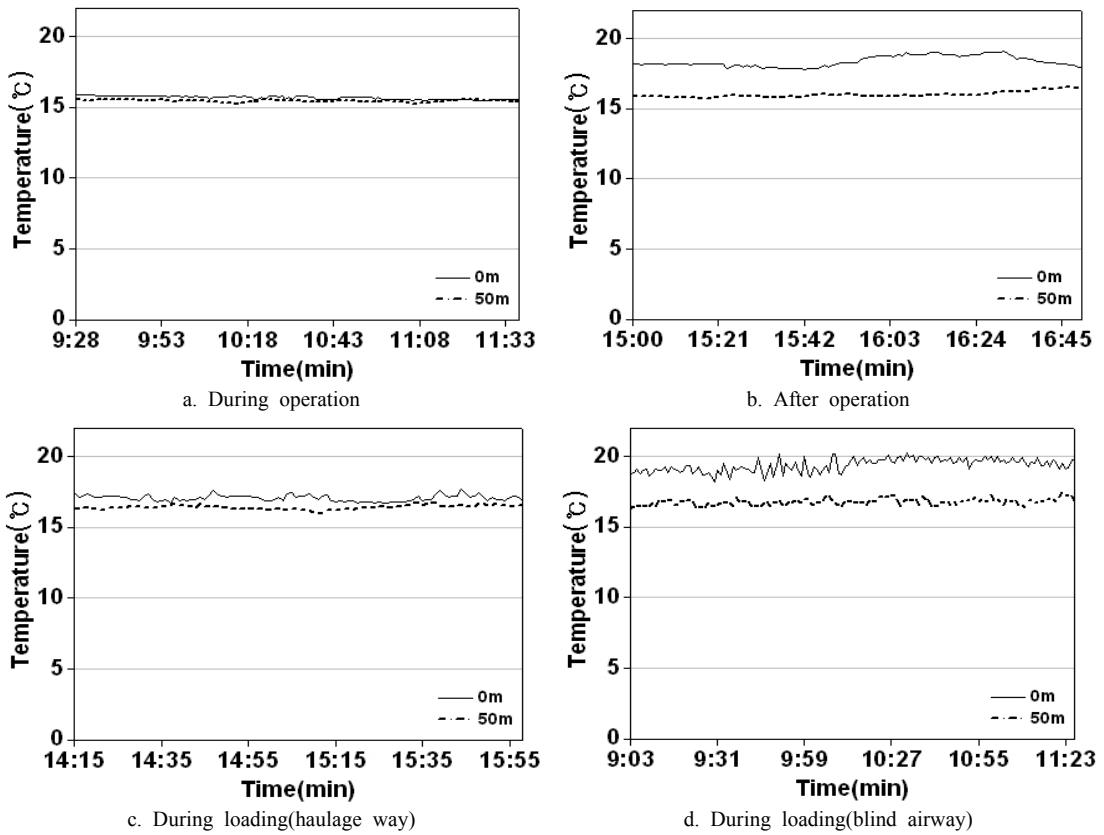


Fig. 9. Temperature profiles by operation

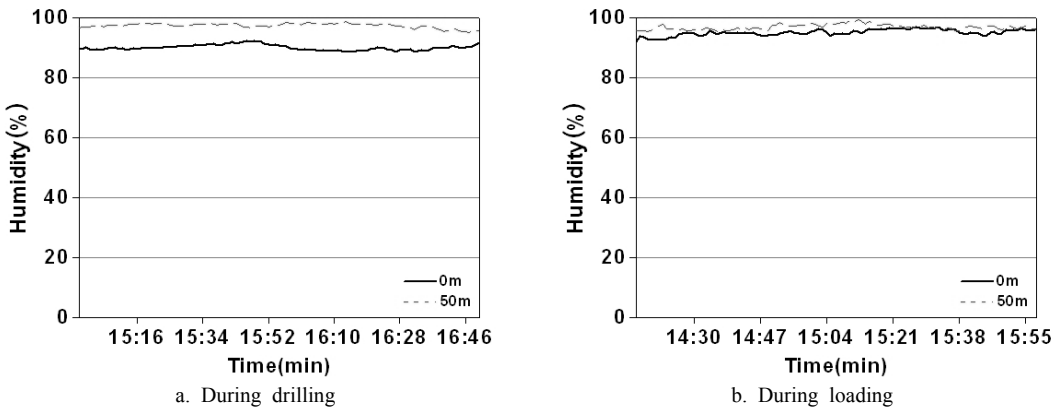


Fig. 10. Humidity profiles by operation

철에는 11,600 m³/min 이상의 환기량 부족이 예상된다. 겨울철의 부족량이 상대적으로 작은 것은 갱내의 온도

차이가 크게 되므로 공기의 밀도차이에 의한 자연환기력의 영향이 상대적으로 크기 때문이다.

Table 8. Number of equipment and workers employed by operation in D mine

Operation	Classification	Equipment	No of vehicles	Total Output(kW)	No of workers
Drilling		Drill	3	452	3
Blasting	Charge	ANFO charger	2	193	2
	Blast	Explosives clerk			5
Loading		Excavator	3	272	3
		Loader	5	1,047	5
		Crane	1	168	1
Transport		Dump truck(15 ton)	12	3,396	12
		Dump truck(4.5 ton)	1	168	1
Maintenance	Maintenance				5
	Management	Four wheel car	2	171	5
Total			28	5,867	42

Table 9. Estimation of the required airflow rate by Mine Health and Safety Act 55(2011)

Estimation criteria		Ventilation rate design factor	Required airflow rate
Internal combustion engine		Total rated output : 5,867 kW	17,601 m ³ /min
Underground operator		Total no of workers : 42	126 m ³ /min
Field measurement	Winter	Maximum wind speed : 2.5 m/s	12,600 m ³ /min
	Spring	Maximum wind speed : 1.2 m/s	6,048 m ³ /min

8. 결론

D광업소의 사례연구를 통하여 Rampway가 설치된 대단면 석회석 광산에서의 갱내 기류분포, 디젤장비 배출가스의 작업공간내 농도분포, 심부화와 기계화에 따른 열환경을 고려하여 소요환기량의 적정성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 갱도 단면상에서의 수평 및 수직방향의 풍속은 천공 작업시 -0.013~0.001 m/s, 적재작업시 -0.25~0.31 m/s로 낮아 효율적 희석이 어려우며, 배기팬의 용량 부족, 환기망의 비효율적 설계, 갱도 관리문제 등으로 인하여 측방향 풍속 또한 천공작업시 0.001~0.020 m/s, 적재작업시 -0.13~0.43 m/s로 극히 낮은 편으로 기류정체가 많은 지점에서 관찰된다. 풍속은 디젤장비의 이동에 의하여 작업장 부근이 50 m 하류 지점보다 상대적으로 높으며 천공작업 공간보다 적재작업 공간의 경우가 운반트럭의 이동에 따른 기류 유동으로 상대적으로 높다. 하부로 갈수록 환기량이 줄어들고 자연환기력의 영향을 기대하기 어렵다.
2. 작업공간내 CO는 천공작업시보다 적재작업시의 농

- 도가 상대적으로 높고 광산보안법의 규제농도 50 ppm을 초과하는 경우도 자주 발생한다. 적재 작업장에서 로우더와 디젤트럭의 대기시 또는 대기 트럭수의 증가시에는 높은 농도의 CO가 관찰되며 갱도의 형태가 맹갱도인 경우에는 기류에 의한 확산이 원활하지 못해서 농도가 더욱 높게 나타난다. 디젤트럭의 대기 위치가 작업장 상류에 위치하면 작업장 농도가 증가하므로 배출가스의 효율적 확산을 위하여 작업 계획 수립시 로우더와 디젤트럭의 이동 경로에 대한 면밀한 검토가 요구된다.
3. NO와 NO₂ 농도는 모두 적재작업시보다 천공작업시보다 상대적으로 높게 나타난다. NO는 규제농도 25 ppm를 초과하는 경우가 발생하지 않았으나 천공작업과 적재작업에 의한 NO₂의 평균농도는 모두 규제농도 3 ppm을 초과하였다. 또한 NO와 NO₂ 농도는 0.8 이상의 높은 양의 상관관계를 보인다.
 4. 갱내 온도는 심부화에 따라 온도증가를 0.04℃/m를 보이며, 4월 하순경에 측정된 갱내 습도는 91~100%로 높게 나타난다. 디젤장비의 이동시 엔진 방출열로 인하여 순간적 온도증가가 관찰되며 작업장 인접 운반갱도에서의 온도가 50 m 하류지점 보다 0.6℃

높으며 맹갱도의 경우에는 차이가 상대적으로 높은 2.6°C이었다. 작업지점과 50 m 하류지점에서의 천공 및 적재작업별 온도차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 디젤장비의 운행에 따른 습도변화는 적었으며 온도와 반대로 50 m 하류편의 습도가 높은 편이었다.

5. 광산보안법규를 적용하여 추정한 D광업소 소요환기량과 측정 환기량을 비교한 결과 겨울철에는 5,000 m³/min 이상 그리고 봄철에는 11,600 m³/min 이상의 환기량 부족이 예상된다. 겨울철의 부족량이 상대적으로 작은 것은 갱내의 온도차이가 크게 되므로 공기의 밀도차이에 의한 자연환기력의 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 또한 디젤장비를 사용하는 갱내의 경우, 외국 수준으로 소요환기량 설계계수를 증대시킬 필요가 있다고 판단된다.
6. 국내 석회석 광산의 지하화, 대형화, 디젤장비 보급의 확대 등에 따른 작업환경 악화 문제를 해결하기 위하여서는 디젤 배출물질을 포함한 광산보안법규의 개정, 갱도 및 광주설계 최적화, 디젤장비 운행지침 마련, 대단면 갱도의 소요환기량 산정방식의 개선 등에 관한 면밀한 연구가 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업 “녹색성장형 광산개발을 위한 시설물 갱내화 및 환경 모니터링 기술개발”에서 지원 되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Knowledge Economy, 2011, Mine Health and Safety, Chapter 2, Section 1, Act 49.
2. Ministry of Knowledge Economy, 2011, Mine Health and Safety, Chapter 2, Section 1, Act 55.
3. C. W. Lee, H. G. Kim, 2001, On-site application of a vehicle tunnel ventilation simulator, Tunnel and underground space, Vol. 11, No. 4, pp. 319-327.
4. C. W. Lee, H. C. Park, 2009, A study on the natural ventilation force in tunnels, Tunnel and underground space, Vol. 19, No. 3, pp. 226-235.
5. R. B. Krog, R. H. Grau III, T. P. Mucho, S. B. Robertson, 2004, Ventilation planning layouts for large opening mines, NIOSH, Pittsburgh Research Laboratory, Pittsburgh, PA, pp. 1-9.
6. G. H. Schnakenberg Jr, 2001, Estimate of technically feasible DPM levels for underground metal and nonmetal mines, NIOSH, Pittsburgh Research Laboratory, Pittsburgh, PA, pp. 1-7.
7. Kevin Hedges, Fritz Djukic, Gavin Irving, 2007, Diesel particulate matter in underground mines - Controlling the risk (an update), pp. 1-15.
8. R. H. Grau III, R. B. Krog, Ventilating large opening mines, Pittsburgh Research Laboratory, Pittsburgh, PA, pp. 1-7.

김 두 영



2008년도 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2010년도 동아대학교 대학원 에너지자원공학과 공학석사

Tel: 051-200-7764
E-mail: rlaendud02@daum.net
현재 동아대학교 에너지자원공학과 박사과정

이 승 호



2011년도 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사

Tel: 051-200-7764
E-mail: cortoimasa@naver.com
현재 동아대학교 에너지자원공학과 석사과정

정 규 흥



2012년도 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사

Tel: 051-200-7764
E-mail: koung0908@nate.com
현재 동아대학교 에너지자원공학과 석사과정

이 창 우



1978년도 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년도 미국 펜실베니아주립대학교 대학원 자원환경공학 및 OR 공학석사
1986년도 미국 펜실베니아주립대학교 대학원 자원환경공학 및 OR 공학박사

Tel: 051-200-7769
E-mail: cwlee@dau.ac.kr
현재 동아대학교 에너지자원공학과 교수