

## 현장실측을 통한 국내 일반광의 열역학적 자연통기력 연구

유영석, 노장훈\*, 김진

A Study on Thermodynamic Natural Ventilation Analysis  
by the Field Survey of Underground Mines in Korea

Yeong-seok Yu, Jang-hoon Roh\*, Jin Kim

**Abstract** In this study, a total of 13 mines were finally selected as study subjects and field measurements were conducted. Thereafter, calculations of thermodynamic natural ventilation were attempted using spread sheets and solutions for natural ventilation of mine types with multiple vertical shafts were obtained. Based on the results, natural ventilation of each mine was quantified. In addition, changes in natural ventilation energy (NVE) and natural ventilation pressure (NVP) were estimated assuming mine deepening and the resultant values were applied to mine conditions to observe changes in flow rates. Natural ventilation pressure in domestic mines is generally calculated to be in a range of 5 Pa~300 Pa. Although NVP increases as the depth increases, resistance also increases. Therefore, as the depth increases, flow rates show a tendency of converging on a certain value because of the relationship between NVP and mine resistance. Natural ventilation using shafts with depth differences is effective up to depths of 200~300 m. However, flow rate change rates resulting from NVP are small at depths deeper than approximately 200~300 m. Therefore, if a mine is deepened over 300 m, NVP will become insufficient and thus additional pressure obtained through mechanical ventilation will be necessary.

**Key words** Field measurements, Natural ventilation energy(NVE), Natural ventilation pressure(NVP)

**초 록** 본 연구에서는 가행광산 및 휴폐광산에 대하여 선정과정을 거쳐 최종적으로 총 13개의 광산을 연구대상으로 하여 현장실측을 하였다. 이후 스프레드시트를 이용한 열역학적 방식의 자연통기력에 대한 계산을 시도하였다. 이를 바탕으로 각 광산들의 자연통기력을 정량화 하였다. 또한, 광산 심부화를 가정한 자연통기에너지(NVE)의 변화와 자연통기압력(NVP)을 예측하고, 이 값을 갱도 조건에 적용하여 유량변화를 관찰하였다. 국내 광산의 자연통기력은 약 5~300 Pa의 범위로 계산된다. 심도가 깊어짐에 따라 온도차에 의해 NVP은 커지나 저항 또한 증가하므로 NVP와 갱도 저항의 관계에 의해 깊이가 증가할수록 유량은 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 깊이 200~300 m 까지는 높이차가 있는 수직갱을 이용한 자연통기가 효과적이거나 약 200~300 m 이상에서는 NVP에 따른 유량변화율이 미미하므로 300 m 이상 심부화가 진행될 경우 자연통기압력으로 충당치 못하게 되어 기계통기를 통한 추가적인 압력이 필요하다.

**핵심어** 현장실측, 자연통기에너지, 자연통기력

**Received:** Jul. 19, 2013

**Revised:** Aug. 6, 2013

**Accepted:** Aug. 9, 2013

**\*Corresponding Author:** Jang-Hoon Roh

(Tel) +82328727551, (Fax) +82328727550

E-Mail) iglord2@naver.com

INHA University, 100 Inha-Ro, Nam-gu, Incheon (402-751), Korea

## 1. 서론

광산에 관련한 환경규제 및 정책의 강화로 인해 국내 일반광은 점차 노천채광의 형태에서 갱내채광으로 전환되는 추세이다. 노천채광에 비해 갱내채광은 고려해야 할 위험요소가 많은데, 그 중에서도 가장 문제가 되는 것이 갱내채광 시 사용되는 디젤 장비 연소 및 발파

작업 시 발생하는 유해가스의 배출이다.<sup>[1][2]</sup> 이러한 갱내 유해가스들은 광산보안법 및 산업안전보건법에 의하여 허용농도 이하로 항상 유지해야만 하는데 이를 위해 가장 일반적이고 경제적인 방법은 통기시스템을 통하여 충분한 공기량을 입·배기시킴으로써 오염물질 농도를 희석시키는 것이다. 또한, 광물 가격의 상승추세로 인해 생산단가가 높은 심부광물의 채광도 경제성을 가지기 때문에 향후 심부화 광산의 수는 더 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 향후 작업장의 작업환경은 온습도에 더 많은 영향을 받게 될 것이다. 이러한 작업환경 개선을 위한 효율적인 통기시스템의 적용은 더욱 중요해지고 있다.

현재 국내에서 갱내채광을 하는 광산의 대부분은 지표에 가까운 심도에서 채광이 이루어진다.<sup>[3]</sup> 따라서 기계통기를 적용하지 않고 자연통기력에 의존하여 채광되고 있다. 하지만 이러한 자연통기력은 현재까지 제대로 정량화되어 있지 않기 때문에 현장에서 정확한 자연통기량을 계산하여 적용하는 데는 많은 어려움이 있다. 또한, 향후 채굴심도와 통기계통이 길어지고 복잡해짐에 따라 통기네트워크에 어려움이 많이 발생할 것으로 예상된다. 광산 심도와 통기계통이 길어지면 자연통기력으로 소요통기량을 충족시키는데 한계가 발생하게 된다.

본 연구에서는 국내 광산들의 갱내채광 시 발생하는 통기문제들을 개선하기 위하여 13개 광산의 현장 실측을 통하여 현재까지 일반적으로 적용하여 실행하고 있는 자연통기력을 열역학적인 방법으로 계산하여 정량화하였다. 또한, 자연통기력의 한계심도를 예측하고자 한다.

## 2. 자연통기력

현재 국내 지하채광을 실시하는 광산의 대부분은 자연통기에 많은 의존도를 보이고 있으며 선풍기를 통한 통기를 실행하더라도 기계통기가 전체 통기계통에 미치는 영향은 부분적이다. 따라서 현재 각 광산들의 대략적인 자연통기력을 추정·분석하고 심부화별, 계절별 추이를 살펴보는 것은 앞으로 심부화가 될 가능성이 많은 국내 광산의 통기메커니즘을 이해하는 데 있어 꼭 필요하다.

과거 광산들은 심부화되어 있지 않은 경우가 많았고 광산 통기 문제에 대한 규제가 심하지 않았다. 따라서 국내 광산 개발 과정에서 통기는 다른 부분보다 덜 중요시 되어 왔던 것이 사실이다. 자연통기에 대한 이해가 바탕이 되었을 경우 자연통기력 계산에 기초하여 유

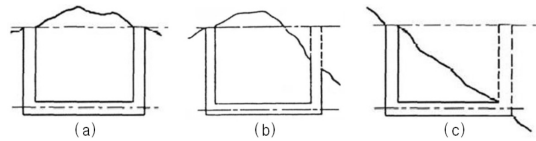


Fig. 1. Concepts of natural ventilation systems

Table 1. Air flow direction depending on seasons

	system(a)	system(b), (c)	temp
need to induce	yes	no	
winter direction	either	right to left	strata>air
summer direction	none	left to right	strata<air

량을 예측할 수 있어 효율적인 통기 설계가 가능하고 그로 인한 에너지 절감, 갱내 공기질 향상 등의 효과가 발생한다.

자연통기력을 계산할 경우에는 입기부와 배기부의 높이차가 자연통기력에 중요한 영향을 끼친다. 각각의 기준면으로부터 공기주 높이에 의한 압력차를 비교하게 되는데 더 낮은 평균온도를 갖는 공기주는 더 무거우므로 가라앉게 되고 더 따뜻하고 가벼운 공기주를 대체하게 된다.<sup>[4]</sup>

Fig. 1과 Table 1에서 나타나는 system(a)의 여름철 상황을 살펴보면 입·출구 높이차가 없을 때 공기는 안정된 상태가 되어 갱도 내에서 흐름이 발생하지 않고 정체될 수 있다. 하지만 심부화가 진행 될 경우 지하 심부는 대기온도보다 더 높은 온도를 가지므로 겨울철과 같이 항상 흐름이 생성될 수 있고 이때의 흐름은 양쪽 방향으로 모두 가능하다.<sup>[5]</sup> 또한, 태양에 의해 직사광선을 받는 부분과 그늘진 지형이 생기는 등 입·출구 부분의 온도차 등으로 인해 흐름이 생길 수 있다.

또한, 위의 Table 1에서 여름철의 경우 Fig. 1의 system(b), (c)는 지반이 대기보다 온도가 낮으므로 오른쪽에서 왼쪽방향으로 공기가 흐르게 될 것이며 겨울철의 경우 지반이 대기보다 따뜻하므로 왼쪽에서 오른쪽으로 흐름이 생기게 된다.

### 2.1. Thermodynamic Method

열역학적 방법으로 자연통기에너지(NVE; Natural Ventilation Energy)에 의한 자연통기력(NVP: Natural Ventilation Pressure)을 구하는 방식은 일반적으로 밀도차와 높이차를 이용한 계산(hydrostatic method)에 비해 낮은 오차율을 보여주나 그 계산 과정이 까다롭다.<sup>[6]</sup>

실제 광산의 3D 형상은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 매우 복잡하므로 모든 경로에 대한 NVP를 계산함에 무

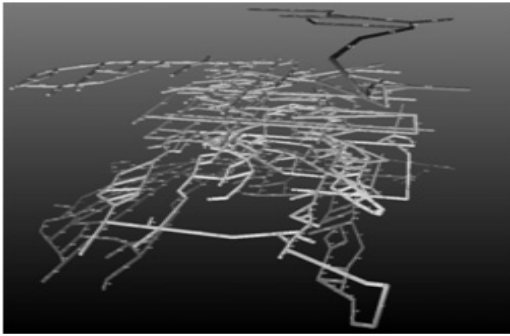


Fig. 2. 3D map of mine A

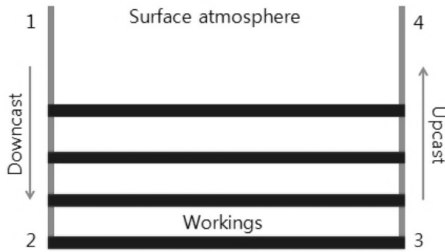


Fig. 3. Mine ventilation layout for NVP calculation

리가 있다. 따라서 열역학적 자연통기력 계산을 위해 사용될 모델은 Fig. 3과 같이 수직갱의 높이, 각 편별 고도차, Ramp way의 유무를 바탕으로 최대한 단순화하여 만든다.<sup>[7]</sup>

자연통기력을 구하기 위한 열역학 P-V선도는 Fig. 4에서 보이는 것과 같이 입기 수직갱(1-2), 작업구간(2-3), 배기 수직갱(3-4)으로 간략화 함으로써 Fig. 5와 같이 도출할 수 있게 된다.

자연통기 압력(에너지)을 산출하기 위해서 만약 지하의 환경이 폴리트로픽 법칙을 따른다고 가정하면, 전체 지하공기통로에 걸쳐 발생하는 마찰을 극복하기 위해 행해진 일의 양은 다음과 같은 (1)식에 의해서 계산된다.

$$F_{i-1,i} = \frac{u_{i-1}^2 - u_i^2}{2} + (Z_{i-1} - Z_i)g - R(T_i - T_{i-1}) \frac{\ln(\frac{P_i}{P_{i-1}})}{\ln(\frac{T_i}{T_{i-1}})} \quad (1)$$

첨자 i는 위치 2,3,4를, u는 공기속도, Z는 수직갱 깊이, T는 절대온도, P는 공기압력을 나타내고 결과로 나

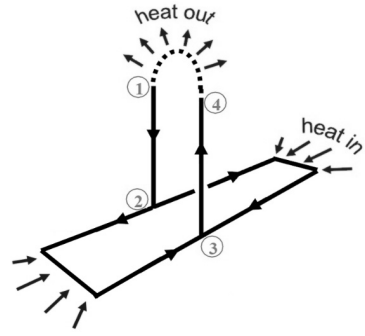


Fig. 4. Schematic diagram of underground mine[5]

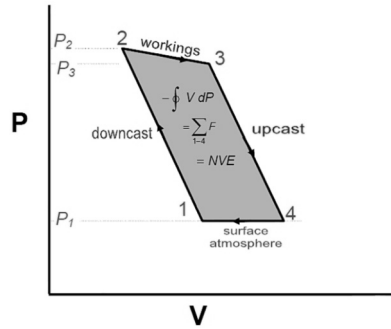


Fig. 5. P-V diagram of mine ventilation circuit

오는 힘(일)의 합은 NVE를 나타낸다.

단순화된 모델의 열역학적인 방법에 의한 자연통기력은 Fig. 5와 같은 P-V(압력-부피)선도에 의해 간단히 설명될 수 있다.

각각의  $\int VdP$  항은 P-V 선도 상의 좌측 면적으로 표시된다. 완전한 사이클을 위한 순환적분  $\oint VdP$  은 P-V 선도 상에서 1-2-3-4로 표시되는 닫힌 면적이 된다. Fig. 5는 그 닫힌 면적이 “음”임을 보여주며 이것은 순수한 공기흐름일(net flow work)이 공기에 의해서 행해진 것임을 알 수 있다. 이것이 공기의 흐름을 발생시키고 유지시키는 기계적 에너지(자연통기 에너지 : Natural Ventilating Energy)가 된다. 또한 P-V 선도는 이 NVE 면적이 크게 아래의 두 가지 요소에 의존함을 보여준다.

- 1) 모델에서 지점 2-3 사이의 단위 부피를 확장시킬 수 있는 열의 추가 범위
- 2) 수직갱 1-2와 3-4 각각의 깊이에 의해서 야기되는 압력차

즉, 추가되는 열과 깊이가 커질수록 P-V 선도에서의 면적은 커지게 되며 NVE도 커지게 된다.<sup>[8]</sup> 이 면적 (NVE)에 공기밀도  $\rho$ 를 곱하여 자연통기 압력(NVP)을 계산하게 된다.

$$NVP = NVE \times \rho \quad (2)$$

**2.2. 다수의 Shaft를 지니는 경우에 적용**

광산의 자연통기력 계산에 있어서 공기가 단일 갱도로 입기된다고 가정할 때는 분석이 비교적 수월하나 입기가 여러 통기계통을 통해 될 경우도 고려해 보아야 한다. Fig. 6과 같이 다수의 수갱을 통해 공기가 출입할 경우에는 각 수갱 간의 자연통기력을 각각 구한 후 합산하여 전체 자연통기력을 구할 수 있다.

Shaft no.1과 Shaft no.2 사이의 자연통기력을  $h_{e1}$ , Shaft no.1과 Outlet shaft의 자연통기력을  $h_{e2}$ , Shaft no.2과 Outlet shaft의 자연통기력을  $h_{e3}$ 로 나타내었다. 각 자연통기력은 전체 통기계통에 순방향 혹은 반대방향으로 작용할 수 있어 순방향의 경우 +값으로, 역방향일 경우 -값으로 표시할 수 있다. Fig. 6은 아래 Fig. 7과 같은 해석이 가능하며, 이 때 R은 갱도저항, h는 통기압력 강하, Q는 유량을 의미한다. Fig. 7의 (a) Shaft no.2에  $h_{e1}$ 이 팬 형태로 표시되는 것은 Shaft no.1 사이

의 자연환기압력이 작용함을 의미하고, 그 작용 방향에 따라 전체 계통에 positive 혹은 negative한 요소로 간주될 수 있다.

또한  $h_{e2}$ 와,  $h_{e3}$ 는 Outlet shaft와의 NVP를 나타낸 것으로 전체 광산 통기계통에 영향을 미치는 요소이며, Fig. 7의 (a)의 Shaft no.1과 Shaft no.2를 Fig. 7의 (b)와 같이 하나의 수갱으로 가정할 경우  $h_{e2,3} = h_{e2} + h_{e3}$ 로 나타낼 수 있고, 따라서 광산의 전체 자연통기력은  $h_e = h_{e1} + h_{e2} + h_{e3}$ 로 표현가능하다.<sup>[9]</sup>

**3. 연구대상광산 선정 및 분류**

연구대상광산은 총 417개의 가행광산<sup>[3]</sup> 중에서 1차로 주요 갱내채굴 광산 74개 광산을 선정한 후에 2차로 통기문제를 고려하여 선정하되 광종별로는 주종을 이루고 있는 석회석 광산을 위주로 하고 기타 주요 광종별로 고르게 포함시켜 28개 광산을 선정 조사한 후 중요도에 따라 최종 13개 광산을 선정 연구하였다.

선정된 광산은 Table 2와 같으며 광종별로 보면 석회석광산 8개, 금속광산에서 철광석, 금, 은, 몰리브덴, 연아연 등 4개 광산과 기타 비금속광인 규석광산 1개이다. 지역별로 보면 강원 8개, 경기 1개, 충북 2개, 전남 2개 분포되어 있다. 광산의 보안 문제로 인하여 본 연구에서는 광산명을 알파벳으로 기술하였다.

선정된 13개 광산을 광산 형태별로 U형(Fig. 1의 system(a))<sup>[10]</sup>, J형(Fig. 1의 system(b)), L형(Fig. 1의 system(c)) 등으로 분류를 하였다. 아래의 Fig. 8에 나

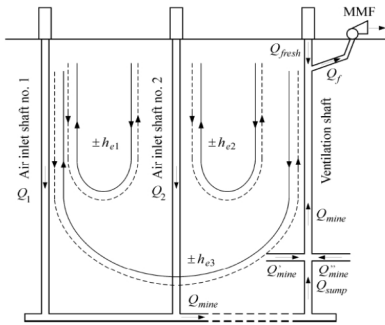


Fig. 6. Mine ventilation layout with two air inlet shafts<sup>[9]</sup>

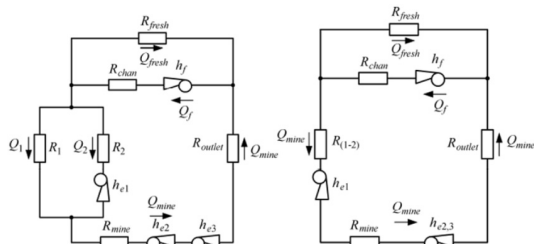


Fig. 7. Mine calculation schemes<sup>[9]</sup>

Table 2. List of researched mines

Mine	Type of mineral	Location	Depth
A	Iron ore	Jeongseon, Gangwon	375 ML
B	Lime stone	Samcheok, Gangwon	92 ML
C	Lime stone	Samcheok, Gangwon	62 ML
D	Lime stone	Jeongseon, Gangwon	59 ML
E	Lime stone	Jeongseon, Gangwon	40 ML
F	Lime stone	Jecheon, Chungbuk	80 ML
G	molybdenum	Jecheon, Chungbuk	134 ML
H	Lime stone	Samcheok, Gangwon	110 ML
I	Gold, silver	Haenam, Jeonnam	100 ML
J	Silica stone	Gangjin, Jeonnam	0 ML
K	Lime stone	Yeongwol, Gangwon	140 ML
L	Lime stone	Jeongseon, Gangwon	103 ML
M	Lead, zinc	Gwangmyeong, Gyeonggi	0 ML

타낸 것과 같이 Shaft 간의 비율이 3:1 이하일 경우 L자형, 3:1 이상 3:2 이하일 경우 J형, 그 이상일 경우 U자형으로 분류하였다. U형의 경우 여름철에 내·외부 온

도차가 작아지므로 NVP가 낮을 것으로 예상되고 겨울철에 가장 높은 NVP값을 가질 것으로 예상되었다. 전반적으로 내외부의 온도차가 작은 봄·가을철에는 NVP가 낮게 형성될 것으로 예상된다.

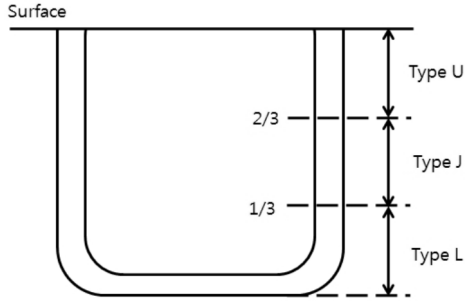


Fig. 8. Criterion of mine classification

Table 3. Classification with mine types

	Type U	Type J	Type L	Total
Number of mines	3	7	3	13
Mine	A, G, K	B, C, D, F, H, I, L	E, J, M	

#### 4. 형태별 계절별 자연통기력 결과

형태별로 분류된 광산의 주 통기계통의 현장실측을 수행하였고, 획득된 광산의 온도와 압력데이터를 바탕으로 자연통기력에 대한 계산을 스프레드시트를 이용하여 열역학적 방법으로 수행하였다. 구해진 NVP 값을 통해 자연통기력으로 유발되는 통기유량을 계산하였으며, 이를 현장에서 실측된 유량과 비교하여 열역학적 자연통기력 계산 값의 오차범위를 분석하였다. 또한 계절별 데이터를 이용하여 각 형태 별 계절에 따른 NVP 추이를 살펴보았다.

Fig. 9와 Fig. 10과 같이 각 광산의 주 통기계통에 대한 layout을 작성 후 P-V 선도를 이용해 NVE 및 NVP를 도출하는 과정을 수행하였다. 각 광산에 대한 현장실측 자료를 바탕으로 이와 같은 과정을 통해 국내 광산의 자연통기력을 도출한 결과 계절에 따라 차이는 있지만 NVP는 5~300 Pa 범위로 계산되는 것을 확인할

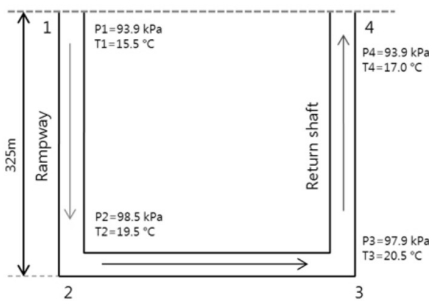


Fig. 9. Ventilation layout & P-V diagram of mine A

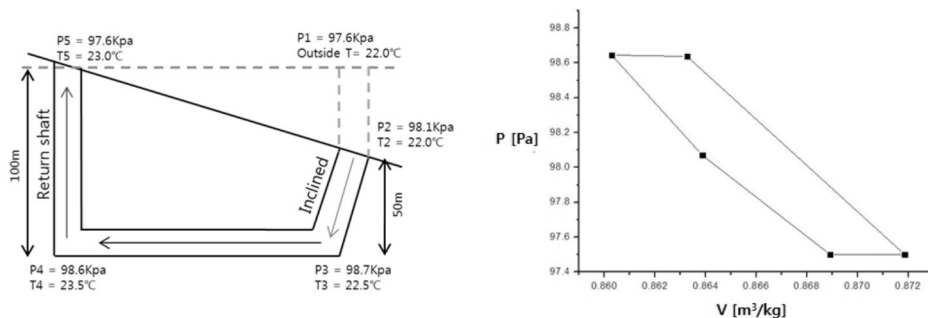


Fig. 10. Ventilation layout & P-V diagram of mine B

수 있었다.

연구대상광산의 7월, 10월, 1월 중의 데이터를 이용

하여 계절별 NVP 계산결과를 Fig. 11의 그래프와

Table 4에 나타내었다. Fig. 12에 나타낸 U형 광산(A,

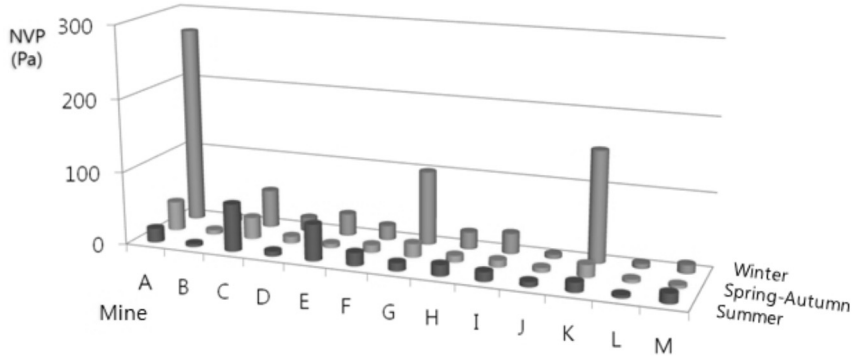


Fig. 11. Seasonal NVP graph

Table 4. Seasonal NVP value of researched mines

	Summer	Spring - Autumn	Winter	Type
Mine A	19.3 Pa	40.4 Pa	271.3 Pa	U
Mine B	4.3 Pa	6.2 Pa	9.7 Pa	J
Mine C	65.4 Pa	30.1 Pa	52.2 Pa	J
Mine D	6.9 Pa	9.6 Pa	18.9 Pa	J
Mine E	50.3 Pa	5.9 Pa	30.4 Pa	L
Mine F	18.1 Pa	10.7 Pa	20.1 Pa	J
Mine G	11.3 Pa	19 Pa	101.5 Pa	U
Mine H	15.5 Pa	9.3 Pa	23.4 Pa	J
Mine I	12.9 Pa	9.8 Pa	28.1 Pa	J
Mine J	7.1 Pa	6.4 Pa	5.6 Pa	L
Mine K	13.5 Pa	17.5 Pa	152.2 Pa	U
Mine L	4.2 Pa	4.9 Pa	6.7 Pa	J
Mine M	13.7 Pa	4.3 Pa	11.9 Pa	L

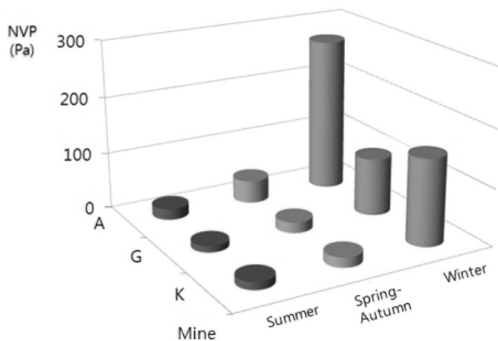


Fig. 12. Seasonal NVP graph of mine type U

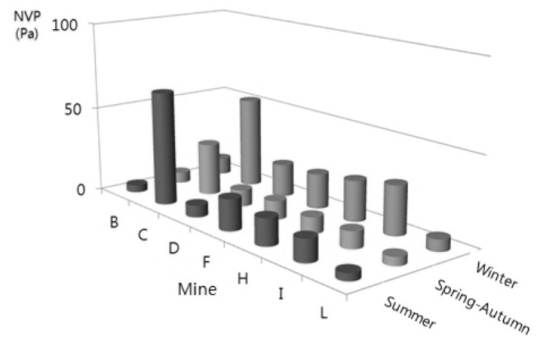


Fig. 13. Seasonal NVP graph of mine type J

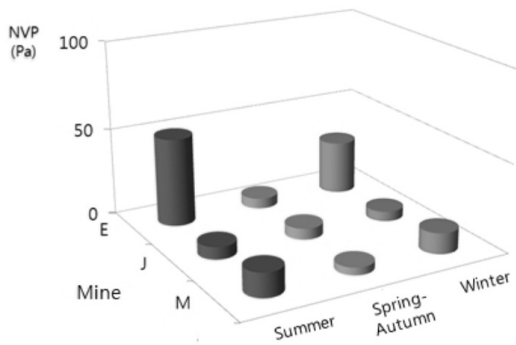


Fig. 14. Seasonal NVP graph of mine type L

G, K)의 경우 앞서 계절별 자연통기력 추이를 예측했던 바와 같이 여름철 <봄> 가을< 겨울철의 순서로 자연통기력이 높은 경향을 볼 수 있었다. J형 광산에서는 여름과 봄> 가을에 비슷한 값을 나타내고 겨울철에 높은 값을 나타낼 것으로 예상했는데 Fig. 13에 나타난 것처럼 분석결과는 예측과 모두 일치하지는 않았으나 B, D, I 광산 등에서 예측과 유사한 형태의 그래프를 나타내고 있다. 또한 L형(E, J, M)의 경우 여름과 겨울에 NVP가 높을 것으로 예상했는데 Fig. 14에 보이는 바와 같이 특히 E광산과 M광산에서 예측한 바와 같음을 볼 수 있었다.

## 5. 심부화에 따른 NVP 예측

### 5.1. 시뮬레이션을 위한 자료분석

심부화 시 광산 내 온도를 설정하기 위해서 현장실측 데이터를 기반으로 하고 그 이상의 심도에 대하여 적용 가능한 인자들을 고려하여 온도를 설정하였다. 일반적으로 주변과의 열 출입이 없을 경우 공기는 100 m 하강할 경우 auto compression 효과에 의해 약 0.92°C가 증가한다. Downcast, Upcast column 즉 공기가 유입되고

배기되는 수직갱의 경우를 가정하면 열 교환이 거의 없기 때문에 100 m 하강 시 약 1°C증가하는 것으로 가정해도 무관하며 이는 광산에서의 실제 측정 결과에서도 확인 할 수 있었다. 또한 지열의 경우 100 m 지하로 내려갈 시에 2~3°C 증가하는 경향을 보임에 따라 본 연구에서는 지하증온율 2.5°C/100 m를 적용하여 분석을 실시하였다. 광산의 형상은 U자형으로 가정하고 6×6 m의 갱도와 강원도 연평균 온도 10.6°C를 적용하였다. 작업구간에서의 공기는 유속이 느려지고 주변과의 열 교환이 증가하는 경향을 보여 지열과 디젤장비 및 발파 등에 의해 열을 받아 온도가 상승하기 때문에 이러한 열전도율을 함께 가정하였다.

### 5.2. 자연통기 예측 및 분석

가행심도가 깊어짐에 따라 자연통기압력은 증가함을 Table 5에서 볼 수 있다. 이것은 상하부의 온도차이가 커지게 되고 작업구간에서 얻을 수 있는 열량이 높기 때문이다. 하지만 유량의 변화는 심도가 깊어질수록 Fig. 15와 같이 어느 정도의 값에 수렴하는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 심도를 Log scale로 나타낼 경우 Fig. 16와 같은 그래프를 얻을 수 있고 유량의 그래프가 직선을 나타냄을 볼 수 있다. 따라서 심도에 따른 유량 증가는 이러한 로그 곡선을 따라 계속 감소하는 것으로 예측할 수 있다. 이는 깊이가 증가할수록 갱도 길이가 길어져 갱도가 가지는 저항 역시 증가하기 때문이다.

심도가 더 깊어질 경우를 가정하면 P(Pressure)와 R(Resistance)이 거의 같은 비율로 증가할 것으로 예상할 수 있다.  $P = R \cdot Q^2$  이므로 유량이 일정범위에서 수렴되어 형성되는 것을 예측 할 수 있다. 시뮬레이션 결과 깊이 300 m 이상에서는 NVP에 따른 유량 변화율이 약 3 m<sup>3</sup>/s 이하로 줄어드는 것을 그래프에서 찾아 볼 수 있다.

Table 5. Natural ventilation simulation by depth increasing

Depth(m)	NVE (J/kg)	NVP (Pa)	Air flow rate (m <sup>3</sup> /s)	Flow rate change / 100m
50	-5.2	6.4	13.5	27.0
100	-14.3	17.5	18.6	10.2
200	-41.4	50.7	24.8	6.2
300	-73.5	90.0	28.1	3.3
400	-115.5	141.0	31.1	3.0
500	-161.3	198.4	33.5	2.4
600	-211.7	261.1	35.4	1.9
700	-266.1	329.0	37.0	1.6

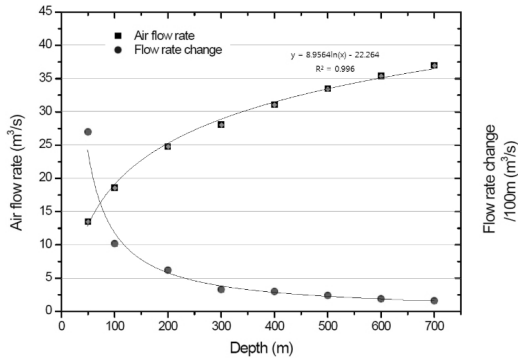


Fig. 15. Air flow change in depth

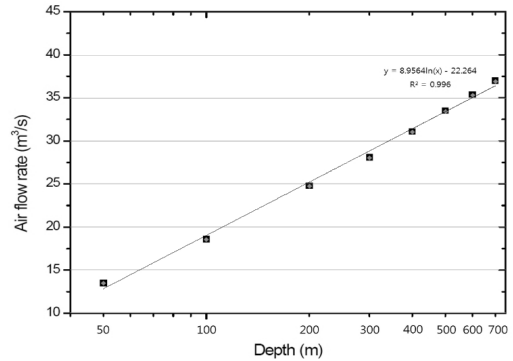


Fig. 16. Log scale air flow rate in depth

광산의 경우 심도가 깊어질수록 일반적으로 더 많은 유량을 필요로 하게 된다. 이는 통기가 필요한 작업 구간이 증가하기 때문이고 상부구간으로 유량이 흐르기 때문에 최하부 레벨까지 도달하는 유량이 점점 적어지기 때문이다. 그러므로 약 200~300 m의 심도까지는 자연통기력으로 인한 통기가 가능할 것으로 예상되지만 그 이상으로 심도가 깊어질 경우에는 자연통기압력으로 필요유량을 충족하지 못하게 되어 팬을 통한 추가적인 압력이 필요하여 기계통기력으로 통기를 시도하여야 한다.

## 6. 결론

선정된 13개의 금속광산 및 비금속 광산 중 금속광산 4곳, 비금속 광산 9곳의 현장측량을 통하여 자연통기에 대한 분석을 실시하였다. 13곳의 광산 중에서 선통기를 활용한 기계통기 시스템을 부분적으로 적용하여 갱내 통기를 실시하고 있는 곳은 7곳이며, 나머지 6곳의 광산은 자연통기에 의존하고 있었다. 심부로 내려갈수록 통기량이 급격히 떨어짐에 따라 공기의 흐름을 포착하기가 매우 어려웠으며, 그에 따른 유해가스농도는 현저히 증가하였다. 광산실측과 자연통기에 대한 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 자연통기방법을 채택하여 채광하고 있는 일반 광산의 경우 현장측정 결과 계절에 따른 입-배기량이 일정하지 않고, 공기 흐름의 방향이 외부의 기온변화에 따라 민감하게 변화한다. 이러한 이유로 자연통기력에 의한 통기가 지속적으로 이루어지지 못하고 정체되기도 하는 등 안정적인 통기량 확보에 어려움이 있다.
2. 온도차와 깊이에 따른 자연통기력은 계절에 따른 차

이는 있으나 일반적으로 약 5~300 Pa 범위로 계산된다. U자형 광산의 경우 겨울철의 자연통기력이 가장 높은 것으로 계산되었고 여름철에 자연통기력이 가장 낮게 나타났으며 측정 통기량 또한 적은 것으로 나타났다. L자형의 광산은 여름과 겨울에 자연통기력이 높게 계산되었으며 연 평균온도와 광산내부 온도가 비슷해지는 봄·가을철에 가장 자연통기력이 적게 나타났다. J형광산의 경우는 겨울철의 자연통기력이 가장 높게, 봄·가을과 여름에는 비슷한 값을 나타내는 것으로 나타났다.

3. 심부화에 대한 예측시뮬레이션 결과 심도가 깊어짐에 따라 온도차에 의해 NVP는 커지나 갱도저항 또한 증가하게 된다. NVP와 갱도저항의 관계에 의해 깊이가 증가할수록 유량은 일정한 값으로 수렴하는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 심부화가 진행될수록 자연통기력 만으로는 지하 작업구간에서 요구하는 소요통기량을 충족시키지 못할 것으로 판단된다.
4. 국내 일반광의 일반적인 갱도규격 및 마찰계수, 갱내온도 등의 요소들을 적용시켜 심부화에 따른 자연통기력의 한계점을 판단하여 볼 때 깊이 300 m까지는 높이차가 있는 수직갱을 이용한 자연통기가 효과적이거나 그 이상의 심도에서는 자연통기력에 따른 유량의 증가율이 미미한 것으로 예측된다.
5. 300 m 이상 심부화가 진행될 경우 자연통기압력으로 소요통기량을 충족치 못할 것으로 예상되며 통기경로가 일정하지 않은 일반광산의 특성상 상부구간으로 대부분의 통기가 이루어지고 하부구간에서는 정체현상이 나타날 수 있다. 따라서 상부구간에 대한 Stopping 설치 및 기계통기를 통한 추가적인 통기압력을 통해 하부구간에 대한 통기량을 증가시켜 주는 조치가 필요하다.



## 감사의 글

위 논문은 자원개발특성화대학사업 및 광물자원공사의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Sang-Kwon LEE, 2004, A Study on Improvement of Underground Ventilation in Limestone Quarry, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 41, No. 4, pp. 313-318.
2. Bok-Youn Kim and Young-Do Cho, 1995, Research on Calculation of Ventilation Airflow in Underground Excavation Working using Diesel Equipments, Vol. 5, pp. 48-56.
3. KORES, 2011, 광업요람, 제1편, 5-10.
4. Jin Kim, Sang Ki Kwon, 2005, The Feasibility of Natural Ventilation in Radioactive Waste Repository Using Rock Cavern Disposal Method, J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 3(3), pp. 184-189.
5. Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., and Wang, Y. J., 1997, Mine Ventilation and Air Conditioning, Wiley Interscience, pp. 239-253.
6. McPherson, M. J., 1993, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, pp. 241-264.
7. J. C. Hall, 1981, Mine Ventilation Engineering, Society of Mining Engineers, pp. 109-116.
8. Prosser B. S. & Stinnette J. D., Paredes J., 2002, Ventilation optimization at the La Camorra mine, Proceedings of the North American/Ninth US Mine Ventilation Symposium, Kingston, pp. 57-63.
9. N. I. Alymenko, A. V. Nikolaev, 2011, Influence of Mutual Alignment of Mine Shafts on Thermal Drop of Ventilation Pressure Between the Shafts, Journal of Mining Science, Vol. 47, No. 5, pp. 636-42.
10. Jerry, C. Tien, 1992, Practical Mine Ventilation Design And Control, University of Missouri-Rolla, pp. 134-137.



### 유영석

2010년 인하대학교 환경공학과 공학사  
2013년 인하대학교 에너지 자원공학과  
공학석사

Tel: 032-872-7551  
E-mail: yeongseok.yu@gmail.com



### 노장훈

2009년 인하대학교 환경공학과 공학사  
2012년 인하대학교 에너지 자원공학과  
공학석사

Tel: 032-872-7551  
E-mail: iglord2@naver.com  
현재 인하대학교 에너지 자원공학과 박사과정



### 김진

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

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