

심부 석탄광산의 환기시스템 최적화 연구

권준욱, 김선명, 김윤광*, 장운호

A Study on Optimum Ventilation System in the Deep Coal Mine

Joon uk Kwon, Sun Myung Kim, Yun kwang Kim*, Yun Ho Jang

Abstract 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. The working environment is deteriorated due to a rise in temperature of a coal mine caused by increase of its depth and carriage tunnels. To improve the environment, the ventilation evaluation on J coal mine is carried out and the effect of a length of the tunnel on the temperature to enhance the ventilation efficiency in the subsurface is numerically analyzed. The analysis shows that J coal mine needs 17,831 m³/min for in-flow ventilation rate but the total input air flowrate is 16,474 m³/min, 1,357 m³/min of in-flow ventilation rate shortage. The temperatures were predicted on the two developed models of J mine, and VnetPC that is a numerical program for the flowrate prediction. The result of the simulation notices the temperature in the case of developing all 4 areas of -425ML as a first model is predicted 29.30 at the main gangway 9X of C section and in the case of developing 3 areas of -425ML excepting A area as a second model, it is predicted 27.45 Celsius degrees.

Key words Coal mine, Artificial Neural Network, Temperature prediction, Ventilation system

초 록 본 연구에서는 적정 소요환기량의 확보를 통한 갱내 환경의 최적화를 위한 기초연구로 갱내 소요환기량을 추정하였다. 채굴의 심부화 및 운행갱도의 증가로 인한 온도상승으로 작업환경이 점차 악화되는 광산에서 작업환경의 개선을 위하여 J광업소를 대상으로 환기평가를 하였으며 갱내의 환기효율을 증가시키기 위하여 갱도의 길이에 따른 온도에 대한 효과를 수치 해석하였다. 연구결과 J광업소의 소요환기량은 17,831 m³/min으로 산출되었으며, 실제 총 입기량은 16,474 m³/min로 환기량이 1,357 m³/min 부족한 것으로 나타났다. 개발된 프로그램을 이용하여 J 광업소의 두 가지 개발모델에 관하여 온도 예측을 하였으며 온도계산의 기본 인자인 환기량 예측을 위해서 수치해석 프로그램인 VnetPC를 사용하였다. 실험 결과 첫 번째 개발모델인 -425ML을 전체 개발할 경우의 C 생산부 주운반갱도 9X의 온도는 29.30°C로 예측되었으며 두 번째 모델인, A 생산부를 제외한 일부 지역만 개발할 경우의 온도는 27.45°C로 예측되었다.

핵심어 석탄광산, 인공신경망, 온도예측, 환기방식, 입기량

1. 서 론

국내 대부분의 탄광은 현재 상당한 심부에서 채탄작업을 하고 있으며 채굴이 점차 심부로 이행되고 있어 여러 가지 기술적인 어려움에 직면하고 있다. 깊이가 깊어질수록 지열증가로 인한 작업환경의 악화와 점점 더 복잡해지는 환기망, 지압증가로 인한 작업장의 유지 곤란 등의 문제가 발생하고 있다. 우리나라의 탄층 부존상태는 탄폭의 변화가 심하고 상하반이 취약할 뿐 아니라 경사가 급하게 매장되어 있고 해마다 작업심도가

Received: Mar. 16, 2015

Revised: Apr. 9, 2015

Accepted: Apr. 10, 2015

***Corresponding Author:** Yun kwang Kim

Tel) +82318372940, Fax) +82318372940

E-Mail) skyblue31@hanmail.net

706, Dae-won Bldg, 146, beomgol-ro, Uijeonbu-si, Gyeonggi-do, 480-849 Korea

깊어지고 있으며, 갱내의 채굴 환경 조건은 더욱 악화되고 있는 실정이다. 많은 열의 발생으로 인한 작업장의 온도 상승은 더욱 작업환경을 악화시키고 있다. 채탄 작업이 이루어지는 지하 심부 막장이나, 굴진작업을 하는 맹갱도의 경우에는 높은 온도로 인하여 온도 저감에 대한 대책 마련은 매우 중요하다(조원재 외, 1995). 특히 갱내 작업 환경을 악화시킬 수 있는 작업장의 온도 상승 문제가 무엇보다 가장 심각한 문제로 대두되고 있으며 이에 따라 심부 채탄 개발의 타당성 검토나 생산 및 환기계획 수립 시 심부 갱내의 온도를 예측하는 것은 무엇보다 중요한 과제이다.

본 연구에서는 J 광업소를 연구대상으로 하여 갱내 소요환기량 계산을 통하여 현행 환기시스템의 입배기량의 적정성을 평가하였다. 연구대상 광산은 생산규모로 볼 때 단일 탄광으로는 국내 최대이며, 작업장이 심부화 되고 있어 앞으로의 개발계획이나 환기계획 수립 시 기온 예측 계산이 반드시 필요한 광업소이다. J 광업소는 지표에서의 심도가 약 1,000 m 이상인 곳에서 작업을 하고 있으며, 깊은 심도로 인하여 채탄 작업장의 건구온도는 약 33℃ 정도로 측정되었고, 높은 온도와 습도로 인하여 작업자들의 열적 스트레스가 매우 높은 수준이었다. 별도의 추가적인 설비의 증가 없이 현행 환기시스템으로 -425 ML를 채탄개발할 때 두 가지 개발 모델에 대한 심부갱도의 입기량과 온도를 도출하기 위해 본 연구를 수행하였다.

심부 석탄광에서의 복잡한 갱내여건에 상응한 열전도율을 도출하기 위해 Artificial Neural Network(인공신경망)를 이용한 갱내 기상 온도 예측 전산프로그램(TemPredict)을 사용하였으며, TemPredict는 실제 갱내의 열전도율을 도출하여 보다 정확하고 편리하게 갱내 기상 온도를 예측하고자 하였다. 갱내 기상 온도를 계산하기 위해 필요한 인자인 환기량 예측은 수치해석 전산프로그램인 VnetPC를 사용하였다. 갱내 기상 온도 예측을 위한 전산 프로그램을 사용하여 미개발된 -425ML 심부갱도의 두 가지 개발모델에 대해 갱내 입기량 및 온도를 예측하였다. 지하공간의 설계나 개발계획에 따른 환기를 예측함으로써 적절한 환기시스템을 마련할 수 있으며, 효율적인 환기를 통하여 안전성, 생산성을 높일 수 있다.

2. 연구대상 광산 현황

본 연구는 강원도에 태백에 위치하고 있는 Fig. 1의 J 광업소를 대상으로 하였다. 본 지역에 분포하는 지질은 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄기~트라이아스기의 평안 누층군 및 화성암류로 대별된다. 탄층으로 탄층수가 3~5매로 발달하였고 가행탄층은 중층탄 1매로 노두연장 10 km, 평균탄폭 4 m이다. 탄층주향은 남서에서 북동방향이며 탄층경사는 북북서에서 북북동방향으로 상부 60°, 하부 30°로 발달하였다. 단층은 광

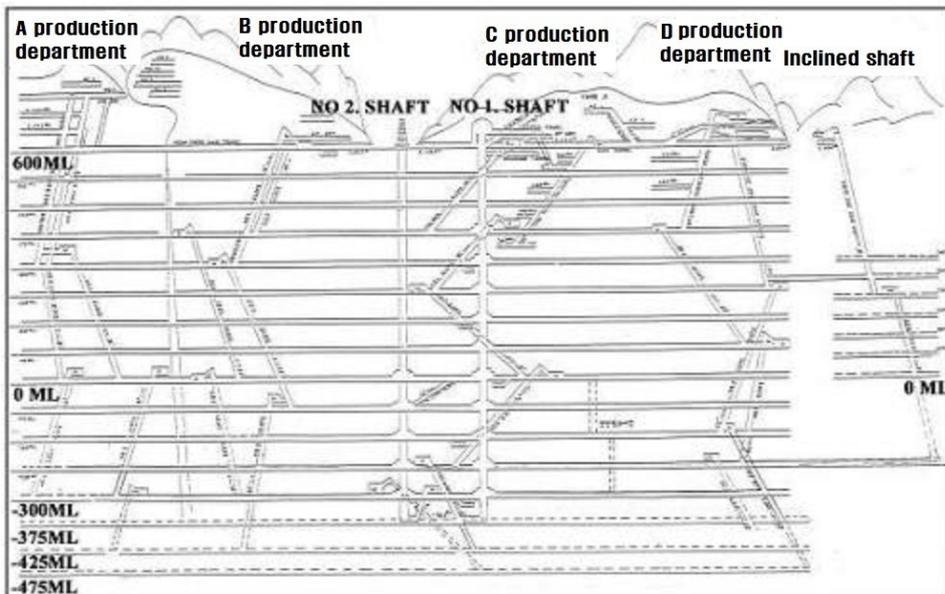


Fig. 1. Vertical section of the Jangsung Colliery

구 서단에 함백산 대단층이 북북서 방향으로 발달하였다. J광업소의 개발골격은 1수갱과 2수갱을 중심으로 탄층부존의 자연적인 경계 및 인원관리 효율화 등의 이유로 4개 생산부로 운영하고 있으며, 현재 추가행 수준은 -375M 이다.

본 탄광의 갱내 환기 네트워크는 총 10개 갱도의 갱구로 입기되고, 전체 입기량의 약 80%에 달하는 제 1, 2수갱을 통한 입기는 각 레벨의 운반갱도와 사갱을 통하여 각 생산부의 작업구역에 입기된다. Fig. 1는 J 광업소의 단면도이다. 입기된 기류는 4곳의 생산부에 설치된 주선풍기에 의하여 각각 배기되고 있다. D seciton의 주 배기갱도에 설치된 700HP의 주선풍기를 비롯하여 작계는 150HP의 주선풍기가 각각 운영되고 있다. 일반적인 환기방식은 중앙 및 대우식의 혼합식이며, 기계력에 의한 강제 환기가 이루어지고 있다. 또한 광업소 내부의 환기 네트워크를 효율적으로 이루기 위하여 운반갱도 및 작업장에 보조선풍기 및 국부선풍기가 설치되어 가동되고 있다(Kim, 2000).

본 광업소의 총 입기량은 압축공기 1,060 m³/min를 포함하여 총 16,474 m³/min이고, 총 배기량은 약 17,470 m³/min로 측정되었다. 일반적으로 광산환기에서는 외부의 신선한 공기가 입기되어 배기되어지는 주환기회로와 작업장을 위한 국부환기를 실시하여야만 한다. 국부환기법으로는 소형 국부선풍기와 300~900 m/m 직경의 풍관에 의한 취입(blowing)식 국부환기법을 활용하기도 하고, 중단 채탄 작업 시 봉락 중에 상단갱도와 관통이 되는 경우 중단갱도 입구에 소형 선풍기를 설치하여 흡출(suction) 가동하면 하단 봉락 작업장의 오염공기가 상단으로 배출되는 국부환기법을 활용하는 작업개소도 있다. 그리고 본 탄광도 다른 탄광과 같은 방법으로 압축공기를 작업장에 투입하여 작업장 국부환기의 보조수단으로 겸용하고 있으며 다른 국부환기법은 활용하지 않고 다만 순수하게 압축공기 투입에 의해서만 작업장 환기를 해결하고 있는 개소도 많다. 현재 굴진 막장의 기계용 압축공기와 작업장 환기용 압축공기로 활용하고 있는 공기량은 약 1,060 m³/min 정도 된다.

현재 지표에 있는 갱구 600 ML을 기준으로 -375 ML에서 주로 생산이 이루어지고 있으며, 추가생산을 위한 -425 ML의 굴착이 진행 중에 있다. 서론에서 언급한 것처럼 고심도의 채탄장에서 가장 큰 문제는 높은 온·습도이다. 현재 본 연구광산의 주요 채탄장인 -375 ML과 굴진작업 중인 -425 ML에서는 90%이상의 높은 습도와 평균 건구온도가 33℃ 정도로 측정되어 작업자들이 느끼는 열적 스트레스가 매우 높은 수준에 도달해 있는 실정이다.

3. 소요환기량 산출

갱내 환기의 목적은 갱내의 작업자의 호흡에 필요한 산소를 공급하고 갱내 작업장에서 발생하는 분진이나 탄층에서 용출하는 가연성 가스를 희석시켜 갱외로 배출하는 동시에 더운 갱내에 신선한 공기를 공급함으로써 작업장 환경을 개선하고 종업원의 보건과 위생을 유지하는데 있다.

따라서 갱내에 환기해야 할 풍량은 언제나 상기 목적을 만족시키는 데 충분한 양이 되어야 한다. 그러므로 갱내 소요환기량은 갱내 취업자 수와 갱내에서 용출하는 가연성 가스량 및 갱내온도를 근거로 하여 산정하고, 각각의 경우를 만족시킬 수 있는 환기량 중에서 최대의 공기량을 소요환기량으로 채택한다.

3.1 갱내 작업자 수에 의한 방법

일일생산량을 추정 결정하고 갱내 OMS(Outcome per man shift)의 추정치 또는 실적 통계치를 적용하여 일일 입갱인원을 산출한다. 일일 동시 최대 입갱인원을 산출하기 위하여 일일 입갱 인원수를 2등분 하면 대체적으로 1교대의 동시 최대 입갱인원수가 산출되며, 여기서는 출근일지를 참고하여 일일 감방최대인원을 선정하였다.

또한 입갱인원 일 인당 소요환기량 결정은 가연성 가스가 용출하는 갑종탄광의 경우 국내 광산 보안 시행규칙으로 규정된 입갱인원 일 인당 최소 3 m³/min 이상을 적용하고 여타 광산은 법으로 규정은 안되어 있지만 일반적으로 일 인당 필요한 환기량이 노동 시에 1.2~2.4 m³/min이고 다수인이 같은 장소에서 작업할 때 갱내에서 배출된 호흡공기를 다시 흡입하지 않고 신선한 공기로 호흡하려면 0.75~2.0 m³/min가 소요된다(J. Voss, 1981). 그러므로 일일 동시 최대 갱내 작업인원에 대하여 일인당 3 m³/min으로 보는 것이 적당하다.

일일중 동시 최대 입갱 인원수에 일 인당 소요환기량을 곱하여 총 소요환기량을 산정한다.

3.2 가연성 가스용출량에 의한 방법

먼저 일일평균생산량을 추정 결정한 후 이를 1일 기본생산량으로 보고 실제 생산 작업 과정에서 1일 생산량이 증감되는 정도를 감안해야 한다. 이 중 1인 최대생산량이 어느 정도 되는지 정하기 위해 1일 최고생산율이 얼마나 되는지 결정하여야 한다. 이는 작업장 여건에 따라 상이할 수도 있으나 일반적으로 그 최고생산율은 기본생산량의 120% 정도로 보면 무리가 없을 것으로 본다.

다음으로 생산 Ton당 가스용출량을 추정하여야 한다. 일반적으로 채탄 작업장이 깊어짐에 따라 가연성가스의 용출이 증가하는 경향은 있으나 심도와 가스용출량 간에 일정한 기준이 있는 것은 아니므로 새로 개발하는 탄광의 경우에는 부근 탄광 갱내에서의 1톤당 가스 용출량을 참고하여 추정해야 하고, 이미 작업하고 있는 탄광에서 가연성 가스용출량을 결정하는 데는 과거의 실적을 참고하여 심도 증가를 고려해서 추정해야 한다.

그러므로 가연성 가스용출량 결정은 출탄 톤당 가스용출량과 일일생산량으로 계산한다.

가스용출량 $V_G(m^3/min)$ 은 식 (1)에 의하여 계산되어진다.

$$V_G = \frac{\text{일일생산량} \times \text{최고생산율} \times \text{톤당 가스용출량}}{24 \times 60} \quad (1)$$

공기량 산출은 식 (2)에 의해서 산출한다. 배기 중 허용 가스함유율 결정은 광산 보안법규상 작업장 기류 중 허용 가스함유율을 1.5% 이하로 하고 주요 배기갱도의 기류 중에는 0.25%이하 그리고 채탄작업장의 기류중에는 1%이하로 결정하는 것이 타당하다고 본다.

$$X = \frac{100 V_G}{(\eta_v Q + V_G)} \quad (2)$$

$V_G (m^3/min)$: 가연성 가스용출량

x (%) : 허용가스 함유율

η_v : 유효 풍량

Q (m^3/min) : 전 공기량

J광업소는 갑종탄광으로 가연성가스가 용출한다고 본다. 그러나 J광업소의 측정자료에 의하면 가연성가스의 용출량은 많지 않은 것으로 보이므로 가스용출량을 생산 1톤당 $5 m^3$ 로 추정하여도 가능할 것으로 사료됨으로 이를 기준으로 소요환기량을 산정하였다.

3.3 갱내 온도에 의한 소요환기량

대기 중의 공기가 갱내로 유입된 후 갱내 기상온도는 암반의 지열 온도와 심도 변화에 의한 기류 자체의 단열 압축열 및 기계류에 의한 마찰열 그리고 기류 자체의 속도 변화에 의한 열 등에 영향을 받는다. 그 외 갱내 각종 산화물에 의한 산화열, 인체에서 발하는 발산열, 갱내 갱도벽 및 주위 수분의 증발에 의한 흡수열 등에 의하여 변화한다.

이와 같이 변화하여 고온화한 온도를 사람이 작업할 수 있을 정도로 저하시키기 위하여 갱내 유효온도(체감

온도)를 $28 \sim 30^\circ C$ 이하로 낮추는 데 필요한 소요 공기량을 계산할 필요가 있다.

그러나 이 계산이 용이하지 않으며 만일 정확히 계산하려고 하면 갱도규격, 갱도 굴착 경과 시간, 갱도 벽면의 습기 여부, 암반의 지열온도, 암반의 열전도도 및 암반의 열전달율 등의 정확한 자료가 있어야 하며 계산과정 역시 반복 수렴하여 계산을 해야 하는 등 복잡한 과정이 뒤따라야 한다.

그러나 상기한 자료가 비치되어 있지 않고 만일 이와 같은 시험을 거치려면 상당한 시간이 소요되므로 다음과 같이 3단계로 나누어 대략적인 소요 풍량을 계산하였으며 아래의 방법에 의하여 산출하여도 큰 착오가 없는 것으로 판단된다.

즉 제 1 단계로 사갱이나 수갱으로 수평방향이 아니라 심부 연직 방향으로 공기가 유입되어 수준차가 생기는 경우만을 생각한다. 사갱이나 수갱의 입기 갱도는 심부화 됨에 따라 갱도기류 온도가 상승한다. 그러나 갱도벽에서 수분이 증발하는 등 원인에 의하여 기온을 저하시키므로 이와 같은 기류 온도는 풍량에 별로 영향이 없이 다만 공기 단열 압축에 의한 온도 상승과 수분 증발에 의한 온도 하강 등을 감안하여 100 m 하부로 진행함에 따라 $0.6^\circ C - 0.8^\circ C$ 로 추정 증온율 dt 를 주어 식 (3)에 의하여 계산한다.

$$t_2 = t_1 + Z/100 \times dt \quad (3)$$

t_1 : 지표온도 ($^\circ C$)

t_2 : 하부편의 온도 ($^\circ C$)

z : 수준차 (m)

dt : 증온률 ($^\circ C/100m$)

제 2단계는 심부 어느 수준에서 수평방향이든 운반 갱도를 따라 유통하는 경우를 생각한다.

이 운반갱도는 대략 개착한 후 2년 정도 경과하고 그 거리는 약 1500 m 보고 있으므로 여기에 흐르는 환기량 $Q_2(m^3/sec)$ 는 식 (4)에 의해 계산한다. 여기서 소요 환기량은 Vane Anemometer를 이용하여 측정하였다.

$$Q_2 = \alpha_2 Q_1 = \frac{2\pi\eta\lambda_g S(t_0 - \frac{t_3 + t_2}{2})}{C_p \times 3600 \times r(t_3 - t_2)} \quad (4)$$

Q_1 : 소요환기량 (m^3/sec)

Q_2 : 해당수준(편)의 분산환기량 (m^3/sec)

α_2 : 해당수준(편)의 환기량 분산률

t_0 : 암반온도 ($^\circ C$)

- t_3 : 운반갱도 끝의 온도 (°C)
 t_2 : 운반갱도 입구의 온도(°C)
 C_p : 공기 비열(0.24)
 λ_g : 암반의 열전도율(사암 2.5 kcal/m^b°C)
 S : 운반갱도 환기거리(m)
 η : 갱도개착 경과시간 계수(운반갱도 2년 경과는 대략 0.4임)
 r : equivalent radius

제 3단계는 수평갱도 즉 운반갱도에서 맹갱도인 작업장으로 공기를 유입시켜 작업장 공기온도를 저하시키는 경우를 생각한다.

작업장 갱도는 규격을 3.3 m × 2.4 m (단면적 6.23 m², 갱내 지압을 받은 일반적 막장)으로 하고 일반적 거리는 100 m까지로 하여 평균 갱도 개착 후 경과 시간은 15일로 가정한다.

일반적으로 작업장의 환기는 국부환기로 하며 작업장의 환기량은 풍속의 제한을 받으므로 (풍속은 고속으로 하면 분진 비산 등 곤란) 풍속을 1 m/sec ~ 2 m/sec로 하여 작업장 풍량은 162 m³/min ~ 324m³/min정도로 유지하면 된다. 작업장 온도는 식 (5)에 의하여 계산한다.

$$t_4 - t_3 = \frac{2\pi\eta\lambda_g S(t_0 - \frac{t_4 - t_3}{2})}{C_p \times 3600 \times r \cdot Q_f} \quad (5)$$

- Q_f : 작업장의 환기량(m³/min)
 t_4 : 작업장 기류온도(°C)
 η : 갱도개착 경과시간계수(여기서 15일 경과로 0.7로 뒀)

3.4 소요환기량 결정

상기 소요환기량 산정 계산치 중에서 갱내온도를 기준으로 한 소요환기량이 가장 많은 환기량으로 나타났으므로 17,831 m³/min을 본 탄광의 갱내 소요환기량으로 결정함이 타당한 것으로 사료된다.

- 갱내 작업자 수에 의한 (안전율을 고려) 소요환기량 : 3,312 m³/min
- 자연성 가스용출량에 의한 소요환기량 : 6,540 m³/min
- 갱도온도를 통한 소요환기량 : 17,831 m³/min

4. J 광업소 미개발지역인 -425ML 환기량 예측

연구 대상 광산의 심부개발심도인 -425ML 개발 가

능한지의 여부를 판단하기 위하여 크게 두 가지 개발 모델로 나누어 온도 예측 계산을 하였다. J 광업소의 -425ML의 개발 시 전 생산부류(A, B, C, D) 개발할 때와 부광대에 의존한 일부(B, C, D 일부) 생산부류만 개발 시의 심부온도를 예측하였다. 심부 온도 예측을 위한 갱도 규격이나 암반의 열적 요소는 앞에 기존 자료를 사용하였고, -425ML의 예상환기량은 VnetPC프로그램을 사용하여 구하였으며, 갱내의 열전도율은 학습된 인공신경망을 이용하여 구하였다.

4.1 환기량 수치해석 프로그램 VnetPC

VnetPC는 지하환기 설계 계획에 관련 있는 광산-환경공학자들을 돕기 위해 고안된 Windows에 기초한 프로그램이다. 지하시스템 디자인에서의 VnetPC의 적용성은 설계단계에서 연구과제의 단계에 걸쳐서 미치고 있다. 이 프로그램은 미국의 방사성 폐기물 처분사업인 Waste Isolation Pilot Plan(WIPP)의 환기평가에 사용되기도 하였다.

VnetPC는 fan 작동지점, 공기량, 실제시스템과 근사한 마찰압력의 감소 등 현존하는 환기망을 시뮬레이션한다. 이것은 주어진 통풍로 면적과 특징으로부터 결정된 데이터와 함께 환기조사에 의해 얻어진 데이터에 의해 실행할 수 있다. 환기방식의 변화 또는 앞으로의 개발계획에 의한 확장을 위해 측정된 현장 데이터를 사용하여 새로운 시스템에서의 공기 흐름의 분포를 예측할 수 있다. VnetPC를 이용한 시뮬레이션에 의해 예측된 공기흐름의 분포를 이용하여 지하의 설비들은 설계될 수 있다. 이러한 시뮬레이션은 환기망에서의 통풍로 저항을 결정하기 위해 사용되었던 설계변수들과 이를 사용하여 얻어진 물리적 입력데이터에 의해 행해진다.

VnetPC 프로그램은 비압축성 기체라는 가정 하에서 발전되어졌고 아래와 같은 Kirchoffs법에 기초하여 발전했다(Wang, 1970).

Law 1: 각 교차점을 떠나고 들어오는 공기비율의 체적의 대수적 합계는 같다. 비 압축흐름은 교차점에서의 고정된 양의 주입 또는 반출에 의해 시뮬레이션(simulation)을 한다.

Law 2: 폐쇄된 회로 주위의 마찰압력저하의 대수적 합은 fan, 자연환기효과로 설명될 수 있으며 0과 동일하다.

환기 네트워크에서의 Operating Point는 Atkinson 공식으로 표현되는 터널의 저항곡선과 선풍기의 특성 곡선으로서 교차점으로 결정되게 된다. 그러나 여러 개의 mesh를 가지는 환기 네트워크의 경우 이를 직접적으로

Branch No.	From	To	F Q i	Type	Branch Resistance (Ns ² /m ⁸)	Area (m ²)	Fixed Quantity (m ³ /s)	Branch Description	Symbol
1	1	5		R	0.00562				None
2	5	6		R	0.01818				None
3	6	9		R	0.01477				None
4	9	99		R	0.01771				None
5	99	18		R	50.01297				D
6	125	164	F	R	0.00176				None
7	127	66		R	0.01609				None
8	127	15		R	25.00709				D
9	15	130		R	0.00126				None
10	130	131		R	0.00527				None
11	131	128		R	0.02068				None
12	70	140		R	0.00396				None
13	37	138		R	0.00790				None
14	36	132		R	0.01111				None
15	132	20		R	0.00567				None
16	132	133		R	0.00268				None
17	133	40		R	0.00192				None
18	133	129		R	0.00981				None
19	40	128		R	0.00000				None
20	128	129		R	0.00460				None

Fig. 2. VnetPC branch input data

알아낼 수 없기 때문에 연속적인 계산에 의해서 오차를 줄여나가는 “Iteration Method”가 적용되게 되는데 이를 “Hardy Cross Method”라 한다(Hartman, 1982).

4.2 환기량 수치해석

환기량 모의실험을 하기 위해서는 현재의 광업소 환기 모델링을 통하여 현행 환기상태를 VnetPC에 정확히 인식시켜야 한다(S. Wasioewski, 1989). 이를 위해서는 먼저 J 광업소의 갱내의 도면을 개략적으로 지도를 작성하여야 한다. 단순화한 지도에서는 각각의 분기점이나 전체적인 모양을 잘 나타내 주어야 한다. 모델링한 도면에서 각각의 지점을 노드(Node)라 하고, 노드와 노드 사이를 연결한 것을 브랜치(Branch)라고 한다. J 광업소 환기량 시뮬레이션에서는 약 600개의 브랜치를 작성하였다.

환기 네트워크의 작성이 끝난 후에 VnetPC의 branch data를 입력시켜야 하며, Fig. 2은 입력양식을 보여준다. 여기서 각각의 브랜치의 저항을 계산하여야 한다. 통풍로의 손실수두(head loss)는 통풍로에 흐르고 있는 공기량의 제곱에 비례하므로 head-quantity관계는 비례적인 상수를 포함하는 식 (6)으로 표현될 수 있다(Atkinson Eq.) (McPherson, 1987).

$$P = R \cdot Q^2 \tag{6}$$

- P : 통풍로 압력(=압력손실) (N/m² = Pa)
- R : 저항(Ns²/m⁸)
- Q : 유량(m³/s)

식 (7)을 이용하여 각각의 브랜치의 갱도의 저항을 계산할 수 있다. VnetPC 수치해석을 위해서 보통의 경우에 갱내에서 마찰계수 K를 McElroy의 값 0.015 kg/m³를 사용하였고(Table 1), 갱내의 벽면 상태에 따라 그 값을 변화시켰다. 갱도의 단면적과 갱도 길이는 실제로 측정한 값을 사용하였으며, L_e는 Equivalent Length Method를 이용하였다(Table 2) (Hartman, 1982).

$$R = \frac{KP(L+L_e)}{A^3} \tag{7}$$

- R : 갱도 저항(N*s²/m⁸)
- P : 주변장(m)
- L : 갱도 길이(m)
- L_e : Equivalent Length(m)
- A : 갱도 단면적(m²)
- K : Friction Factor(kg/m³)

각 갱도의 저항의 계산 후에 선풍기(Fan)는 주선풍기, 보조선풍기, 국부선풍기로 나누어지며 실제의 위치하고 있는 브랜치에 입력시키고 선풍기 특성곡선(Fig. 3)을 이용하여 각각의 압력과 풍량을 입력시켰다. Network Balancing 작업을 통하여 실제와 시뮬레이션을 조정하였다. 환기망 모델의 각 개소와 실제 갱내 갱도에서의 실측 공기량과 차이 역시 상호 간의 결과를 비교하였을 때 90%이상의 정확도를 가지고 있었으며, 이 결과치를 이용한 여러 가지 환기량 수치해석의 결과에서도 90%

Table 1. Friction factor (referred to air density of 1.2kg/m^3) and coefficients of friction (independent of air density)

Tunnel Situation	Friction factor, k (kg/m^3)
Steel arched airways	
Smooth concrete all round	0.004
Bricked between arches all round	0.006
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009
Lagged behind arches	0.012
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016
Shafts	
Smooth lined, unobstructed	0.003
Brick lined, unobstructed	0.004
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075
Unlined, well trimmed surface	0.01
Unlined, major irregularities removed	0.012
Unlined, mesh bolted	0.014
Tubbing lined, no fitting	0.007-0.014
Brick lined, two side buntons	0.018
Two side buntons, each with a tie girder	0.022

Table 2. Examples of Equivalent Length

Source	m	Source	m
Bend, acute, round	1	Contraction, gradual	1
Bend, acute, sharp	45	Contraction, abrupt	3
Bend, right, round	1	Expansion, gradual	1
Bend, right, sharp	20	Expansion, abrupt	6
Bend, obtuse, round	1	Splitting, straight branch	10
Bend, obtuse, sharp	5	Junction, deflected branch(90°)	60
Doorway	20	Junction, straight branch	20
Overcast	20	Junction, deflected branch(90°)	10
Inlet	6	Mine car or skip(20% of airway area)	30
Discharge	20	Mine car or skip(40% of airway area)	150

이상의 신뢰도를 가진다고 할 수 있다. 보정이 끝난 VnetPC를 이용하여 -425ML의 모의실험을 하였다.

4.3 -425ML 전체 지역 개발 시 환기량과 일부 지역 개발 시 환기량의 비교

4.3.1 -425ML 전체 개발 시 환기량

Fig. 4는 -425ML 개발 시 -300ML이나 -375ML과 같이 A생산부, B생산부, C생산부, D생산부를 현행과 같은 체계로 -425ML을 개발했을 때의 환기량을 시뮬레

이션한 경우의 모형도이다. -375ML까지 Network Balancing 작업을 거친 VnetPC를 이용하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 5에서 제일 아래쪽의 라인이 -425ML을 나타내고 있다.

선풍기의 위치나 용량은 현행과 같다고 가정하였고, 갱도의 단면적, 주변장 등 갱도규격 등은 -375ML과 같다고 가정하여 -425ML을 시뮬레이션하였다. Fig. 4에서 네모의 부분을 확대한 것이 Fig. 5이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 -425ML에서 B에서 A생산부 방향으로 입기되는 공기량이 $12.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 분

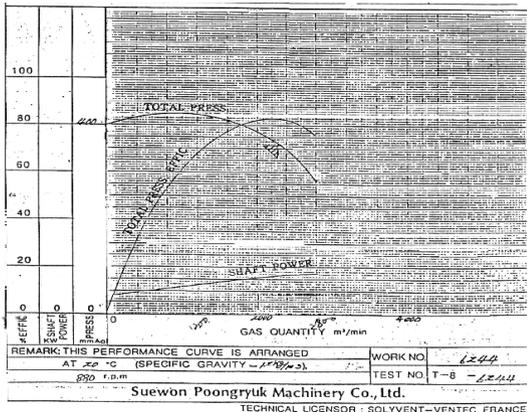


Fig. 3. Fan characteristic curve of B production department

당 754 m³의 공기량이 A생산부 쪽으로 흐르는 것을 볼 수 있고, -425ML에서 B생산부에서 C생산부 방향으로 입기되는 공기량이 6.80 m³/s이며, 분당 408 m³의 공기량이 C생산부 방향으로 입기되는 것을 볼 수 있다.

4.3.2 -425ML 일부 개발 시 환기량

Fig. 6은 -425ML 개발 시 A생산부의 개발을 포기하고 B생산부 부광대 일부분과 C생산부와 D생산부의 부광대를 개발할 경우의 환기량을 모의 실험한 경우의 모형도이다. Fig. 7에서 보는 것처럼 B생산부의 일부 지역을 제외하고 A 생산부 쪽의 갱도는 개발하지 않을 것으로 가정하였고, -425ML의 개발규격은 -375ML의 동일할 것으로 가정하여 각 브랜치의 저항을 계산하였다.

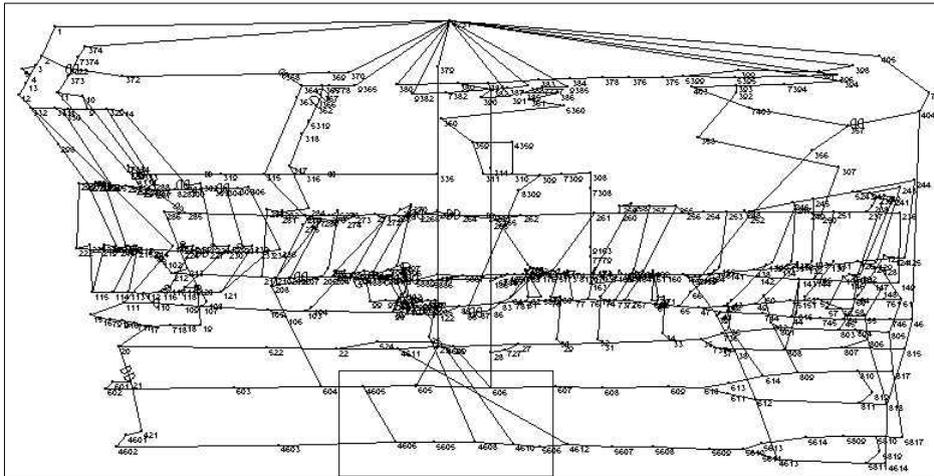


Fig. 4. The case of developing -425 ML all 4 production department

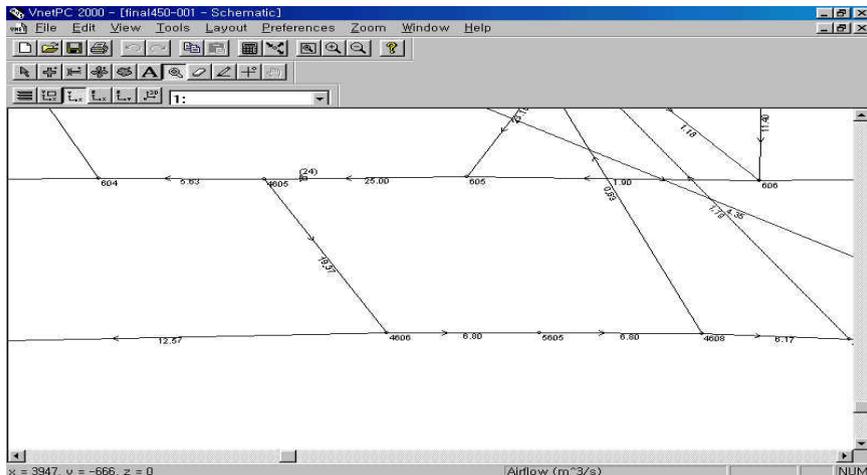


Fig. 5. Flowrate Simulation Result (the case of developing all 4 areas)

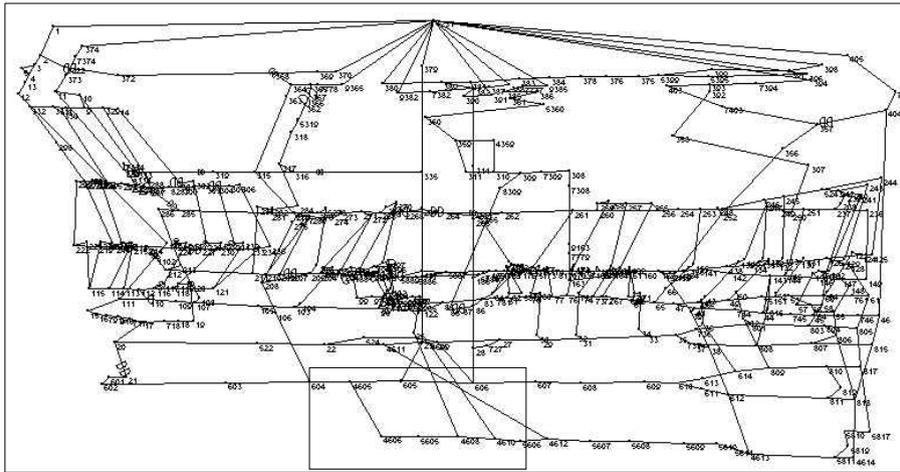


Fig. 6. The case of developing -425 ML 3 areas (b, c, and d) production department

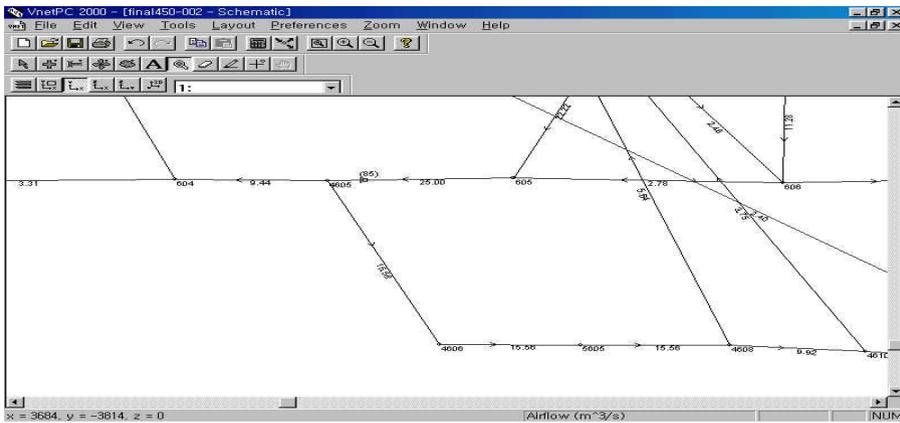


Fig. 7. Flowrate Simulation Result (the case of developing 3 areas)

-425ML의 전체 개발 시의 모의실험과 갱내의 일반적 조건들(단면적, 선풍기용량 및 위치, 저항 등)을 같게 하였다. Fig. 6에서 네모의 부분을 확대한 것이 Fig. 8 이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 -425ML에서 B에서 A 생산부 방향의 갱도가 없어짐으로 C 생산부 쪽으로 입기 되는 풍량이 15.56 m³/s이며, 분당 933.6 m³의 공기량이 C 생산부 방향으로 흐르는 것을 볼 수 있다.

4.3.3 환기량 SIMULATION 결과 분석

컴퓨터 프로그램인 VnetPC를 이용한 환기량 모의실험에서는 두 가지 경우, 즉 -425ML 개발 시, 전체개발과 일부 부광대 개발 시의 조건(저항, 단면적, K Factor 등)을 같게 하고 환기량 모의실험을 하였다. 그 결과 J

광업소 -425ML 개발모델에서 입기량의 큰 차이가 있음을 볼 수 있었다. 먼저 전 지역을 개발할 경우의 C 생산부 방향 공기량은 408 m³/min이었으며, -425ML 개발시에 A생산부를 개발하지 않고 일부 B지역과 C지역, D지역(부광대)을 개발할 경우에는 933 m³/min 공기량이 C생산부 방향으로 입기되었다. 환기 측면에서는 두 번째 경우인 일부 지역만 개발할 경우에 200% 이상의 환기량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

5. TemPredict 프로그램을 통한 -425ML 온도 예측

TemPredict 프로그램을 이용하여 -425ML의 개발모델의 주운반갱도가 관통이 되었을 때의 C생산부 주운반갱도 9X 온도를 예측하여 보았다. 갱내 주운반갱도

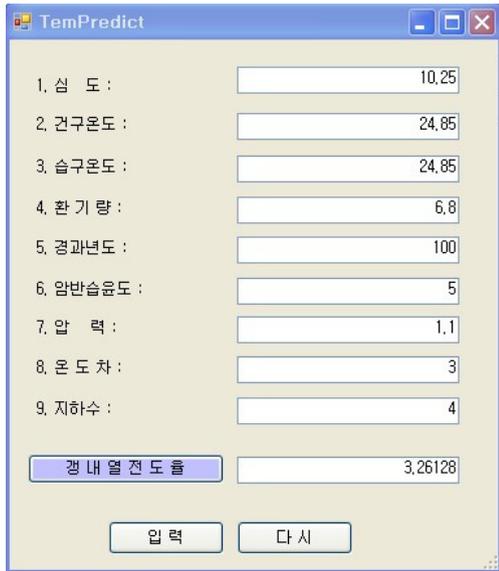


Fig. 8. Heat conductivity prediction Result

에서의 온도 예측은 각 지점 별 건습구 온도, 압력, 유량, 갱도 길이 및 깊이, 갱도 형상, VRT(virgin rock temperature), 마찰계수, 열전달계수, 확산계수 등의 변수 입력을 하여 프로그램을 구동시켰다.

지표 수갱에서의 입기 온도는 건구온도 18.5℃, 습구

온도 16.3℃를 시작온도로 하였으며, 600ML에서 -300ML까지는 수갱을 통해서 입기되며, -300ML에서 -375ML, -375ML에서 -425ML까지는 사갱을 통해서 입기된다. J 광업소에서 주운반갱도 중 온도가 가장 높은 -425ML에서 수평거리 2000 m지점인 C생산구 9X의 온도를 시뮬레이션하였다. 갱도 규격에 관한 인자들과 갱내의 열적 인자들은 실측치를 사용하였으며, 갱내 실제 열전도율은 학습된 인공지능망을 이용하여 산출된 결과치인 3.261(Kcal/mh℃)로 입력하였다. 온도예측 계산에 입력한 공기량은 -375ML까지는 현재 시스템에서 입기되는 공기량을 입력하였으며, -375ML에서 -425ML까지의 입기량과 -425ML의 수평 갱도의 입기량은 VnetPC 시뮬레이션 결과치를 입력하였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 갱내의 열전도율을 구할 수 있다.

첫 번째 개발모델인 -425ML을 전체 개발할 경우의 C생산부 주운반갱도 9X의 온도 예측 결과 29.30℃로 예측되었다.

Fig. 9은 TemPredict의 결과치를 나타낸다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 거리에 따른 온도와 습도를 볼 수 있으며, 거리의 간격은 사용자가 지정하여 나타낼 수 있다.

Fig. 11은 TemPredict의 결과치를 나타낸다. 두 번째 모델인, 풍량이 약 두 배 증가한 A생산부를 제외한 일부 지역만 개발할 시의 C생산부 주운반갱도 9X의 온도는 27.45℃로 예측되었다. Fig. 12에서와 같이 거리에

	Position	Dry Bulb [°C]	Wet Bulb [°C]	상대습도[%]	p2 [Pa]	습도 [%]
▶	0	24.85	24.85	0	0	0
	100	25.07	25.07	100	110101.58	100
	200	25.29	25.29	100	110103.15	100
	300	25.51	25.51	100	110104.70	100
	400	25.74	25.74	100	110106.24	100
	500	25.96	25.96	100	110107.77	100
	600	26.18	26.18	100	110109.28	100
	700	26.41	26.41	100	110110.78	100
	800	26.63	26.63	100	110112.27	100
	900	26.85	26.85	100	110113.74	100
	1000	27.07	27.07	100	110115.20	100
	1100	27.30	27.30	100	110116.65	100
	1200	27.52	27.52	100	110118.09	100
	1300	27.74	27.74	100	110119.51	100
	1400	27.97	27.97	100	110120.93	100
	1500	28.19	28.19	100	110122.33	100
	1600	28.41	28.41	100	110123.72	100
	1700	28.63	28.63	100	110125.10	100
	1800	28.86	28.86	100	110126.47	100
	1900	29.08	29.08	100	110127.83	100
	2000	29.30	29.30	100	110129.18	100

Fig. 9. Temperature prediction Result(Case 1)

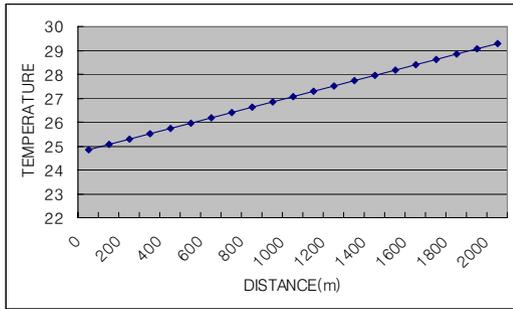


Fig. 10. Temperature prediction Result (Case 1)

따른 온도의 분포를 알 수 있다.

-425ML의 개발 시 전체를 개발할 때보다 A생산부를 제외한 부광대 지역만 개발하는 것이 입기량에 있어서는 2.3배의 증가를 나타냈으며, 온도는 약 2°C 낮은 27.45°C로 예측되었다. 약 2°C의 차이가 나는 이유는 주요한 원인이 풍량의 차이로 인한 것으로 사료된다. 그러므로 현재의 환기시스템으로 계속하여 운영할 경우 첫 번째 개발모델보다 일부 지역만 개발하는 두 번째 모델의 주환기회로의 온도가 훨씬 유리한 것으로 나타났다. -425ML을 현재 -375ML처럼 전 생산부를 개발하거나 더 깊은 심도까지 개발한다면, 갱도규격의 확장이나 입기량을 늘리기 위한 주선풍기의 증가와 아울러 Cooling System을 반드시 고려하여야만 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 갱내 심부에서의 입기량 및 온도를 예측할 수 있는 프로그램을 사용함으로써 미개발상태인 심부의 입기량 및 온도를 예측하여 환기설계의 기초로 사용할 수 있게 하였다. 보다 정확한 심부 온도 예측을 하기 위해 인공지능망을 새롭게 적용하여 온도 예측 계산의 기본 인자인 열전도율을 예측하였다. 본 연구를 통하여 얻어낸 결론은 다음과 같다.

1. J 광업소의 소요환기량 계산 결과 소요환기량은 17,831 m³/min으로 산출되었으며, 실제 총 입기량은 16,474 m³/min로 환기량이 1,357m³/min 부족한 것으로 나타났다.
2. VnetPC 프로그램을 사용하여 미개발 지역의 환기량을 예측하였고, 실험 결과 첫 번째 개발모델인 -425ML 전체를 개발할 경우의 C생산부 방향 입기량 예측 결과는 408 m³/min로 예측되었으며, 두 번째 모델인 A생산부를 제외한 일부 지역만 개발할 시의 C생산부 방향의 입기량은 933 m³/min로 예측되었다. 첫 번째 모델에 비해 두 번째의 모델의 입기량이 2.3배 증가하였다.
3. TemPredict 프로그램을 이용하여 -425ML의 개발모델 주운반갱도가 관통되었을 때의 C생산부 주운반갱도 9X 온도를 예측하여 보았다. 실험 결과 첫 번

	Position	Dry Bulb [°C]	Wet Bulb [°C]	상대습도[%]	p2 [Pa]	습도 [%]
▶	0	24.85	24.85	0	0	0
	100	24.98	24.98	100	110108.29	100
	200	25.11	25.11	100	110116.53	100
	300	25.24	25.24	100	110124.74	100
	400	25.37	25.37	100	110132.90	100
	500	25.50	25.50	100	110141.01	100
	600	25.63	25.63	100	110149.09	100
	700	25.76	25.76	100	110157.13	100
	800	25.89	25.89	100	110165.12	100
	900	26.02	26.02	100	110173.07	100
	1000	26.15	26.15	100	110180.99	100
	1100	26.28	26.28	100	110188.86	100
	1200	26.41	26.41	100	110196.69	100
	1300	26.54	26.54	100	110204.49	100
	1400	26.67	26.67	100	110212.25	100
	1500	26.80	26.80	100	110219.96	100
	1600	26.93	26.93	100	110227.64	100
	1700	27.06	27.06	100	110235.29	100
	1800	27.19	27.19	100	110242.89	100
	1900	27.32	27.32	100	110250.46	100
	2000	27.45	27.45	100	110257.99	100

Fig. 11. Temperature prediction Result (Case 2)

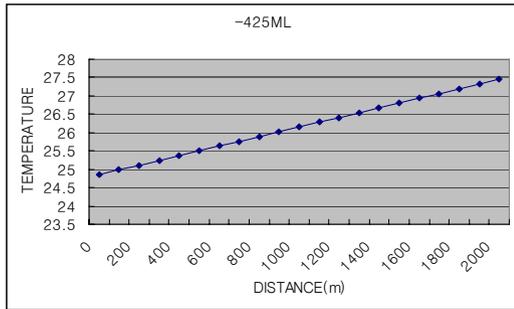


Fig. 12. Temperature prediction Result (Case 2)

재 개발모델인 -425ML을 전체 개발할 경우, 온도 추정값은 29.30°C로 예측되었으며, 두 번째 모델인, A생산부를 제외한 일부 지역만 개발할 시의 C생산부 주운반갱도 9X 온도는 27.45°C로 예측되었다. 풍량에 있어서는 2.3배의 증가와 온도에 있어서는 약 2°C의 차이가 발생하였다. 온도차이의 원인은 풍량의 차이로 인한 것으로 사료된다.

- 연구 결과에 의하면 별도의 추가적인 환기시스템의 설치가 없이 현행 환기시스템으로 -425ML을 개발한다면, -425ML의 A 생산부를 제외하고 B, C, D, 세 구역의 생산부만 개발하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 지하공간의 입기량과 심부 온도를 예측함으로써, 이를 바탕으로 갱도의 규격이나 국부선 풍기, 보조선풍기 등의 용량을 산정하여 최상의 환기 시스템을 마련하여 작업원들에게 보다 쾌적하고 안전한 환경을 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

사사

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다. 이에 감사드립니다.

References

- H. L. Hartman, 1982, "Mine ventilation and air conditioning (second edition)", A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION
- Hartman, H.L., Mutmanský, J.M. and Wang, Y.J., 1997, "ine Ventilation and Air Conditioning" *Wiley Interscience*, pp. 133-165.
- J. Voss, 1981, "Grubenklíma", Verlag Gluckauf.
- Kim, Y.K., 2000, "Study on the Improvement of VentilationSystem in Jang-Sung Colliery" *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 37, No. 3, pp. 173-180.
- Kwon, S.M., Yoon, C.H., Yang, H.S. and Mok, H.S., 1986, "Study on The Ventilation Net Analysis in Deep Coal Mine" *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 23, pp. 338-344.
- McPherson, M. J., "The Resistance to Airflow of Mine Shafts", (1987).
- McPherson, M. J., 1987, "The Resistance to Airflow of Mine Shafts", Mine Ventilation Society of South Africa.
- McPherson, M.J., 1993, "Surface Ventilation and Environmental Engineering" *Chapman & Hall*, pp. 134-141.
- McPherson, M.J., 1997, "LIMSIM for Windows Version 1.0 User' Manual" *Mine Ventilation Services*, pp. 14-19.
- S. Wasioewski, 1989, "Computer Programs for Mine Ventilation Analysis", Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Colorado.
- Wang, Y. J. and Saperstein, L. W., 1970, "Computer-aided solution of complex ventilation networks", Soc. Min. Eng. AIME 247.



권준욱

1998년 강원대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2015년 강원대학교 방재전문대학원 광해·
지질방재전공 박사과정

Tel: 02-1599-3669
E-mail: injoon98@naver.com
현재 (주)지오미래이앤씨 기업부설연구
소장



김윤광

1997년 2월 인하대학교 자원공학과 공
학사
1999년 8월 인하대학교 자원공학과 공학
석사
2005년 2월 인하대학교 자원공학과 박사
수료

E-mail: skyblue31@hanmail.net
현재 (주)굿엔지니어스 기업부설 연구
소장



김선명

1995년 인하대학교 공과대학 자원공학과
학과 공학사
1997년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학박사

E-mail: sunmg.kim@gmail.com
현재 신한대학교 에너지환경공학과학과
교수



장윤호

1979년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1990년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학박사

E-mail: yhjang@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 자원공학과
교수