TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 27, No. 4, 2017, pp. 217-229
https://doi.org/10.7474/TUS.2017.27.4.217
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

광산 통기 네트워크 연구

김수홍, 김윤광, 김선명, 장윤호*

A Study on Mine Ventilation Network

Soo Hong Kim, Sun Myung Kim, Yun Kwang Kim, Yun Ho Jang*

Abstract This study focuses on the improvement of the working environment in domestic collieries where temperature is increasing due to heat of the earth that is caused by the long-term mining. In order to improve the working environment of the mine, a ventilation evaluation was carried out for Hwasoon Mining Industry. In order to increase the ventilation efficiency of the mine, numerical analysis of the effect on temperature was carried out by using climsim, a temperature prediction program. The analysis shows that A coal mine needs 6,152 m^3/min for in-flow ventilation rate but the total input air flowrate is 4,710 m^3/min, 1,442 m^3/min of in-flow ventilation rate shortage. The 93 m hypothetical ventilation shaft from -395 ML to -488 ML could result about 3°C temperature drop in the coal mine of -488 ML far. As a result of predicting the CO_2 concentration at -523 ML development using artificial neural network, the emission of CO_2 increased as the amount of coal and coal bed thickness increased. The factors that have the greatest effect on the amount of CO_2 emissions were coal layer thickness and coal mining. And, as the air quantity increases, it has a great effect on the decrease of carbon dioxide concentration.

Key words Flowrate, Temperature, Ventilation network, Shaft, CO_2

초 록 최근 국내의 탄광들은 오랜 가행으로 작업심도가 깊어지고 운행갱도가 길어지면서 지열에 의한 온도증가로 인하여 작업환경이 더욱 악화되고 있다. 갱내의 작업환경 개선을 위하여 A광업소를 대상으로 통기평가를 하였으며 갱내의 통기 효율을 증가시키기 위하여 통기전용수갱을 건설할 시에 온도 예측 프로그램인 CLIMSIM을 이용하여 온도에 대한 효과를 수치 해석하였다. A광업소의 필요 공기량은 6,152 m^3/min으로 산출되었으며, 실제 총 입기량은 4,710 m^3/min로 공기량이 1,442 m^3/min 부족한 것으로 나타났다. -395 ML에서 -488 ML까지 93 m 길이의 통기전용수갱을 건설하였을 시에 -488 ML 작업장의 온도가 현재보다 약 3°C가 감소되었다. 인공신경망을 이용하여 -523 ML 개발시의 CO_2 용출을 예측한 결과 채탄량과 탄층 두께가 증가할수록 CO_2의 발생량은 증가하였다. CO_2 발생량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 탄층 두께와 채탄량으로 나타났으며 통기량이 증가할수록 이산화탄소의 농도 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심어 공기량, 온도, 통기네트워크, 수갱, 이산화탄소

1. 서 론

복잡하고 다양하게 이루어지는 지하 채탄 작업은 성능이 향상된 광산장비로 인해 채굴율 향상과 채산성은 높아졌지만, 작업환경은 더욱 악화되어졌다. 즉, 많은 열이 발생하여 작업장의 온도가 높은 것과 가스의 발생이다. 석탄광의 탄층 부존 상태는 대부분 탄폭의 변화가 심하고 상하반이 연약한 편이며 탄층의 경사가 급하게 매장되어 있기 때문에 생산량에 비해 채탄 심도가 급하게 증가하고 있으며 이로 인해 갱내의 채굴 환경 조건은 더욱 악화되고 있는 실정이다. 채탄 작업이 이루어지는 지하 심부 작업장의 경우, 높은 온도와 습도로 인한 작업 환경 악화와 가스사고등 대형 사고를 유발할 수 있는 용출가스에 대한 대책 마련은 매우 중요

Received: Jul. 28, 2017
Revised: Aug. 18, 2017
Accepted: Aug. 18, 2017
***Corresponding Author:** Yun Ho Jang
Tel) +82335706305, Fax) +82335736317
E-Mail) yhjang@kangwon.ac.kr
Dept. of Environmental and Energy Resources Engineering, Kangwon National University, Joongang-Ro Samcheck-si Gangwon-Do, Republic of Korea 25913

하다(Hartman, 1982). 특히 광산에서는 생산계획과 함께 통기 대책이 설계되어야만 한다.

본 연구에서는 A광업소를 연구대상으로 하였다. 갱내의 작업 환경이나 작업장의 환경은 광업소의 보안사항에 해당하여 이름 대신 A광업소로 명명하였다. 광산 통기는 크게 주통기와 국부통기로 나뉘어진다. 주통기는 광산 통기 네트워크의 전체적인 공기의 입기와 배기 회로를 뜻하고, 국부통기는 작업장 통기를 뜻한다.

A광업소의 주통기 네트워크를 분석하기 위해 갱내의 필요 공기량을 계산하였으며, 계산된 필요 공기량과 현행의 입배기량을 비교하였다. 현재 운용되고 있는 통기 네트워크를 분석하기 위해 갱내 통기 조사와 작업장 환경 조사를 실시하였다. 또한 심부개발시의 원활한 통기 네트워크가 이루어 질수 있도록 통기전용수갱의 건설에 대한 갱내의 온도 변화를 CLIMSIM 프로그램을 이용하여 예측하였다. 국부통기를 분석하기 위해 작업장에서 발생하는 이산화탄소의 농도와 통기량간의 관계를 새롭게 인공신경망(Artificial Neural Network)을 이용하여 분석하였다. 인공신경망은 인간이나 동물들이 가지고 있는 생물학적인 뇌의 신경세포(Neuron)를 모델화하여 인공적으로 지능을 만드는 것이다. 이러한 연구를 통하여 광산의 적정한 통기네트워크를 구축할 수 있으며, 효율적인 통기 네트워크를 통하여 쾌적한 작업환경을 조성함으로써 안전성과 생산성을 높일 수 있다.

2. 연구광산의 통기 네트워크

A광업소는 광구 전체가 가연성가스(CH_4)가 발생되지 않는 을종탄광이다. 본 광업소는 두 개의 생산부(a생산부, b생산부)로 운영되고 있으며, 통기는 선풍기를 이용한 기계통기방식이다. a생산부는 구 Conveyor 사갱 갱구에 120 HP 주선풍기를 설치하여 동갱 12편 상부구역을 배기시키고 있으며 b생산부는 배기사갱 입구에 200 HP 주배기선풍기를 설치하고 b생산부 1사갱 13편에서 배기사갱 6편, b생산부 2사갱 16편에서 13편까지 각각 통기수갱을 설치하여 b생산부 전체 및 a생산부 일부구역까지 통기를 담당하고 있으나 A광업소의 생산구역이 모두 급속히 심부화 되어 17편 이하구역의 작업장 통기에 심각한 문제점이 도출되었다. 적절한 시기에 통기 네트워크의 조정 및 주선풍기 용량 증대 등 조정이 이루어지지 못하여 작업장 환경이 더욱 열악해지고 있다.

특히 a생산부 구역은 갱구에 설치된 주선풍기의 용량이 부족하고, 각 편간 주요 통기승의 관리 부실로 열악한 통기 조건에서 작업을 해오다가 2011년부터 주요 통기갱도 풍문 및 풍도승 정비를 통한 단면적 확보를 대대적으로 시행하였다. 부족한 주선풍기의 통기압력을 보완 향상시키기 위해 12편에 75HP 보조선풍기(풍량 : 1,000 m^3/min. 풍압: 200 mmAq)를 설치하여 정체된 a생산부 하부구역 통기를 해결하기 위한 단기적 조치를 하였으며, 이것은 선풍기 흡출압력에 비해 갱도의 저항이 너무 과다하여 통기계통 혼란 현상을 응급조치한 것이며, 중장기적 하부개발을 위해서는 전반적인 통기 시스템 개선이 반드시 필요하다(Fig. 1).

A광업소는 압축공기(295 m^3/min)를 포함하여 a생산부 1사갱, 콘베어사갱 및 기전계 압기관승 그리고 b생산부 1사갱과 통기사갱을 통하여 4,710 m^3/min이 입기

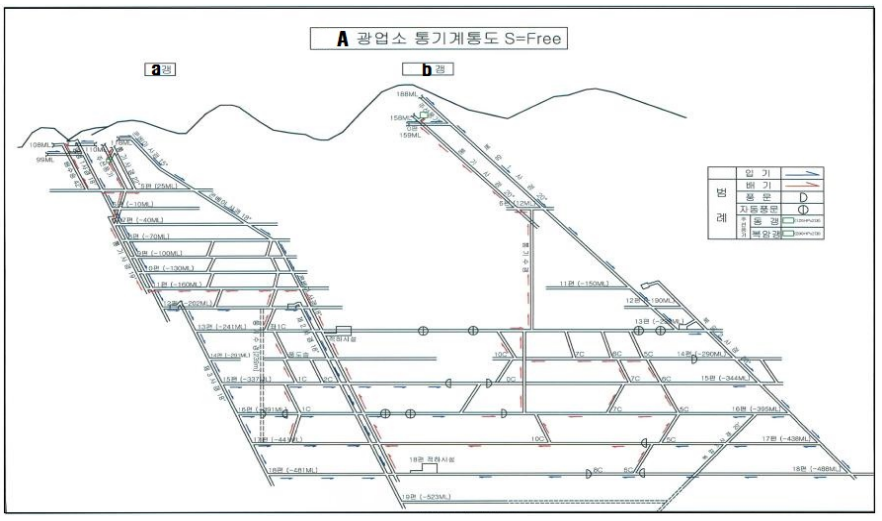

Fig. 1. Ventilation Network in A Colliery

Table 1. Flow rate data (2015. 8.)

Production Department	Inflow/ outflow	Measuring Spot	Cross sectional area (m^2)	flow-rate (m^3/min)
a Department	Inflow	1 inclined 0 level lower part	7.25	1,976
		Conveyor inclined entrance	9.72	420
		Compressor		295
	Total (A)			2,691
	Outflow	Ventilation inclined	6.90	2,345
	Total (B)			1,624
b Department	Inflow (C)	1 inclined 0 level lower part	7.25	2,019
	Outflow (D)	Ventilation inclined entrance	6.02	2,355
a, b Department Total Inflow flow-rate (E)				4,710
a, b Department Total Outflow flow-rate (G)				5,300

되며, a생산부 통기사갱과 b생산부 통기사갱을 통하여 5,300 m^3/min이 배기되고 있다. 주요 갱도의 통기량은 Table 1에서 보이는 바와 같다.

본 탄광에서의 국부 통기에서는 소형 선풍기(5 HP～15 HP)를 사용하여 200～400 mm 직경의 풍관에 의한 입기(Blowing)식 통기방법과 흡출(Suction)식 통기방식을 사용하고 있다. 또한 다른 탄광과 같은 방법으로 압축공기를 작업장에 투입하여 작업장 국부통기의 보조수단으로 겸용하고 있었으며 선풍기를 사용하지 않고 압축공기 투입에 의해서만 작업장 통기를 해결하고 있는 개소도 있었다. 현재 기계용 압축공기와 통기용 압축공기로 활용하고 있는 공기량은 약 295 m^3/min정도이다(Table 1).

3. 광산의 통기특성

통기 네트워크에서의 통기량 조사는 공기속도, 압력, 건구습구온도, 전체 단면적(특히 중요 지점에서의 단면적)등을 측정한다. 이러한 통기조사는 좀 더 명확하고 빠르게 공기량, 압력손실, 공기밀도, 공기저항 등을 결정하는 수치적, 분석적 계산을 위해 필요한 자료로 이용 된다. 갱내의 통기조사는 일반적으로 광산 통기 시스템의 계획이나 평가에 사용되어지며 컴퓨터에 의한 시뮬레이션의 기초자료로 사용되어진다. 통기조사의 타당성을 높이기 위해서는 조사지역을 효과적 배분하고 다시 그 배분된 지역에서 반드시 필요한 측점을 선정하여 정확도가 높고 적절한 기기를 사용하여 측정하는 것이 필요하다. 측정된 모든 데이터는 조정, 수정, 정정되어지고 분석적, 수치적 계산을 위해 편집된다. 통기조사로부터 얻어진 데이터가 컴퓨터 모의실험에 사용되어지며 이를 위하여 정확한 공기량과 압력측정이 필요하고 얻어진 결과는 측정한 데이터의 정확도에 크게 의존한다. 데이터의 정확도를 위하여 적절한 기기의 사용, 올바른 통기조사의 측정방법의 적용과 통기량에 대한 포괄적 지식에 기초하여 현명하게 측정지점을 선택하는 것이 중요하다(Kwon, 1986). 또한 광산 통기 네트워크의 정확한 분석을 위하여 같은 시간대에 측정되어지는 것이 바람직하다.

3.1 공기속도 측정

공기속도는 갱내 공기의 동적, 물리적 특성을 측정하기 위해 가장 많이 사용된다. 공기속도는 유동하는 공기량의 계산과 선풍기 용량의 산정에 매우 중요한 요소이다.

공기속도는 레이놀즈수(Reynolds number)에 의해 정의된 것처럼 공기흐름 상태의 다양성과 벽면의 마찰저항 등으로 인하여 갱구의 단면에 따라 매우 다양하게 나타난다. 최고속도는 기하학상의 중심에서 일어나고 벽면에 가까울수록 점차적으로 작아진다. 가스와 먼지 등의 제거 및 희석과 관련하여 단면에서의 속도분포에 대한 공기의 특성은 매우 중요시 되며, 공기량 조절 및 공기속도는 주로 단면에서의 속도분포에 크게 의존하는 공기량과 풍압의 손실을 측정하기 위해 공기속도를 측정한다.

평균속도를 사용할 경우에는 통기 분석에서 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 최고 또는 최저 공기속도가 사용되어질 경우에는 일반적으로 의미 없는 그릇된 결과를 초래하게 된다. 따라서 공기속도를 측정하기 위해서는 평균값을 획득하기 위한 특별한 노력이 필요하며 근사 평균값을 얻기 위하여 보정계수를 사용한 값

Table 2. Sample measurement data

NO	Location	Section	Sectional area (m^2)	Velocity (m/Sec)	Air volume (m^3/min)
1	Dong 1inclined sawmill 10 m	3.04 x 2.41	6.333	2.600	987.94
2	Dong 0Level C/V inclined man-tunnel downward10 m	4.00 x 2.70	9.080	1.100	599.28
3	Dong 0Level C/V inclined man-tunnel upward 10 m	3.00 x 2.70	7.133	1.200	513.54
4	Dong 5Level C/V inclined downward 10 m	3.10 x 2.50	6.717	1.300	523.92
5	Dong 5Level C/V inclined upward 10 m	2.95 x 2.80	7.324	1.000	439.47
6	Dong 5Level C/V inclined inclined-ventilation 10 m	2.80 x 2.10	5.037	0.400	120.89
7	Dong 5Level 1inclined inclined-ventilation C/V inclined man-tunnel 10 m	2.80 x 2.10	5.037	0.00	0.00
8	Dong 8Level C/V inclined downward 10 m	3.20 x 2.40	6.579	1.000	394.75
9	Dong 8Level C/V inclined upward 10 m	2.90 x 2.40	6.056	1.400	508.70
10	Dong 8Level C/V inclined-ventilation 10 m	1.80 x 1.70	2.712	0.700	113.89

을 적용한다. 공기 측정 방법들은 단일 측정(single measurements)과 다중 측정(multiple measurements)으로 분류되어질 수 있다.

단일 측정은 가장 빠르고 간단하나 부정확할 여지가 많다. 측정지점은 통풍로의 최고속도지점이나 중심으로 하여 측정한다. 관측된 속도는 근사계수를 사용하여 보정되어지나, 레이놀즈수를 알고 있다면 정확한 공기속도를 얻을 수 있다. 이러한 근사 기술은 단기간에 다수의 장소에서 측정할 때 적합하다(McPherson, M. J., 1987).

다중 측정은 다중 고정점 측정(fixed-point traversing) 또는 연속이동 측정 방법(continuous-traversing method)에 의해 전체 단면에서 얻어진 값을 가지고 보다 전형적이고 정확한 평균속도를 얻을 수 있다. 다중 고정점 측정에서는 측정 단면을 균등한 면적의 수로 나누고, 각각의 균등한 면적의 평균속도를 각 부분의 중심에서 공기속도를 측정하거나 각각의 균등한 면적에서 고르게 기구를 가지고 횡단하면서 측정한다. 전체 단면적을 위한 평균속도는 모든 균등한 면적의 수적 평균이다. 연속이동 측정 방법에 의한 다중 측정은 일반적으로 다중 고정점 측정 보다 더 빠르고 정확하다.

3.2 갱내 측정 결과

A 광업소 통기 시스템의 통기네트워크 평가를 위하여 갱내 공기량 분석을 하였다. 이를 위하여 갱도의 단면적과 갱내의 공기 속도를 측정하였고 갱내의 작업장이나 운반갱도의 건구 및 습구온도, 기압을 측정하였다. 측정은 정상적인 작업을 하는 상태에서 3일간, 총 3회 실시하였다. 주배기 선풍기로는 110 HP과 200 HP의 주선풍기가 가동되고 있었으며, 각 채탄 작업장과 굴진 작업장은 작업 상황에 따라 국부선풍기가 작동하였다. 건구온도와 습구온도는 슬링 사이크로미터(sling psychrometer)를 사용하여 측정하였으며, 공기속도 측정은 열선측정기(hot wire anemometer)와 바람개비형 측정기(vane anemometer)를 이용하여 앞에 설명한 단일측정방법과 다중측정방법을 중복 사용하여 측정하였다. 측정위치는 통기네트워크상 중요한 개소를 선정하여 측정하였다. 통기네트워크상 중요한 개소는 입기 갱도, 배기 갱도, 선풍기가 위치한 갱도, 공기의 분기점, 작업장 등이다. 기존의 광업소의 측정 장소 외에 보다 정확한 통기 네트워크의 평가를 위하여 약 20개소를 추가하여 총 100여곳을 측정하였다(Table 2).

4. 갱내의 필요 공기량

통기는 일반적으로 공기의 움직임, 공기의 양, 공기흐름의 방향을 통제함으로서 공기량, 공기의 질, 공기의 온도 및 습도를 제한치 아래로 유지하는 것을 목적으로 한다. 특히 지하에서 채탄을 하는 광산에서는 작업자의 호흡에 필요한 산소를 공급하고 갱내 작업장에서 발생하는 미세먼지를 포함한 분진이나 탄층에서 용출하는 가연성 가스를 희석시켜 갱외로 배출시킬수 있는 신선한 공기를 최소 이상으로 입기시켜야 한다. 또한 심부로 갈수록 지열에 의한 온도가 상승하게 되기 때문에 통기에서는 유해물질 뿐만 아니라 발생되는 열의 제어를 위한 공기조화도 반드시 고려되어져야 한다. 따라서 갱내에 통기해야 할 풍량은 언제나 상기 목적을 만족시키는데 충분한 양이 되어야 한다. 그러므로 갱내에 필

Table 3. Maximum worker per day in A colliery (work daily memories)

Depar-tment	Dong		Bok-am		factory management		Quality		Supervising		Planning		General affairs		Total		
	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	direct	outsourcing	Total
Total	77		76		41		6		14		15		15		244	-	
1st rotation (Enter)	47	50	47	40	19	10	1	-	5	-	9	-	2	-	130	100	230

	Dong (1st rotation)			Bok-am (1st rotation)			factory management (1st rotation)			Details
outsourcing (Enter)	digging	24	18	digging	24	12	pump	8	3	dong (5level), Bok-am (2, 3 shaft)
	repair	16	16	repair	16	16				Security clerk 1
	transport	18	9	transport	24	12	charge	12	7	dong2 (2inclined 13level, 3inclined17level) Bok-am1 (18level)
	tippler	14	7							Repair for gangway 4
	Total	72	50		64	40		20	10	

요한 공기량은 갱내의 작업자수와 갱내에서 용출하는 가연성 가스량 및 갱내온도를 근거로 하여 산정하고, 각각의 경우를 만족시킬 수 있는 통기량 중에서 최대의 공기량을 필요공기량으로 채택한다(Hartman, 1997).

4.1 갱내 작업자수에 따른 필요 공기량

각 광업소의 연간 생산계획에 따라 일일 채탄 생산량이 결정되어지고, 입갱 실적 통계치를 적용하여 일일 입갱인원을 산출한다(Hall, 1981). 본 연구에서는 갱내 입갱 출근일지를 참고하여 일일 작업 최대인원을 선정하였다.

또한 입갱인원 일인당 필요 공기량 결정은 국내 광산보안 규칙으로 규정된 입갱인원 일인당 최소 3 m^3/min 이상을 적용하였다(Kim, 2000). 본 광업소에서는 일일 동시 최대 입갱 인원수를 작업일지를 바탕으로 230명으로 산정하였다(Table 3).

4.2 가스 용출에 따른 희석용 공기량

채탄 계획을 기본으로 하여 실제 생산 작업 과정에서 생산량이 증감되는 것을 고려하여 일최대생산량을 결정하여 일최고 생산율을 계산한다. 최고생산율을 결정한 이후 석탄의 생산 Ton에 따른 가스 용출량을 결정하여야 한다. 가스용출량은 광산의 위치, 탄의 종류, 심도 등에 상관없이 불규칙적으로 발생하므로 기존의 가스 발생량을 참고하여 1톤당 가스 용출량을 참고하여 추정한다. 가연성가스가 용출되지 않는 A광업소는 을종 탄광으로 기존의 자료를 바탕으로 채탄 1톤당 희석공기량을 5 m^3로 결정하였고 이를 기준으로 필요 공기량을 계산하였다.

가스 용출량 V_G(m^3/min)은 식 (4-1)에 의하여 계산되어진다(J. C. Hall, 1981).

$$V_G = \frac{\text{일일생산량} \times \text{최고생산율} \times \text{톤당가스용출량}}{24 \times 60} \quad (4\text{-}1)$$

4.3 온도 저하를 위한 필요 공기량

갱내 공기는 갱내를 흐르는 도중에 많은 원인에 의해 더워지는데, 맨 먼저 입기 수갱으로 들어갈 때 자동압축에 가열되고 운반갱도와 채굴작업장에서 암반으로부터 열 유입과 기체의 운반물의 열 발산에 의해 가열된다. 또한 갱내 각종 산화물에 의한 산화열, 인체에서 발하는 발산열, 갱내 갱도벽 및 주위 수분의 증발에 의한 흡수열 등에 의하여 기체의 온도는 변화하게 된다.

작업장 기준 온도는 광산보안법과 A광업소의 작업장 환경 세칙에 의해 유효온도(체감온도)를 28°C이하로 낮추는데 필요한 소요 공기량을 계산하였다.

4.4 갱내 필요 공기량 산정

갱내에 필요한 공기량은 위에 설명한 필요 공기량 계산결과 중에서 가장 큰 값을 필요 공기량으로 결정하였다(Hartman, 1997). 계산 결과 갱내 작업자수에 따른 필요 공기량은 690 m^3/min로 산출되었고, 가스 용출에

따른 희석용 필요 공기량은 869 m^3/min로 계산되었다. 그리고 온도 저하를 위한 필요 공기량은 6,152 m^3/min로 계산 결과 중 가장 많은 공기량으로 본 탄광의 필요 공기량으로 결정하였으며, 온도저하를 위한 공기량이 기준이 되었을 때, 갱내의 작업자와 가스 희석을 위한 공기량으로 충분할 것이다.

현재 A광업소의 총 입기량은 4,710 m^3/min이며 계산된 필요 공기량 보다 1,442 m^3/min의 입기량이 부족한 것으로 나타났다.

5. 심부개발시의 통기 네트워크

A광업소의 통기 네트워크는 제1통기수갱이 b생산부 1사갱 6편에서 b생산부 2사갱 13편까지 설치되어 있고 a생산부측은 갱외에 120HP 주선풍기에 의존하고 있으며(12편 상부측 통기 전제) 3사갱 18편(-488ML)까지 개발된 상황이여서 통기 개선이 절실한 상황이다. 갱내의 온도를 저하시키기 위해서는 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 광업소의 주선풍기의 용량을 증가 하여 갱내의 입기량을 늘리는 방법이고, 두 번째는 통기 네트워크를 원활히 조성하여 필요한 개소에 신선한 공기를 입기시켜 갱내의 저항을 낮추어 입배기의 효율을 높이는 방법이다. 현재 A 광업소는 주선풍기의 용량 증가는 불가하며, 광산 내부의 통기 수갱을 연장하거나 새롭게 통기전용수갱을 굴착할 수밖에 없는 실정이여서 심부개발을 위하여 통기전용수갱을 16편에서 18편까지 설치했을 경우와 설치하지 않았을 경우의 온도를 예측하였다.

5.1 공기량 모의실험

일반적으로 광산에서의 수갱은 장비의 운반, 작업원들의 이동과 통기 및 시설물들의 설치를 위한 다목적 수갱과 통기만을 목적으로 하는 소규모의 통기 전용 수갱이 있다. 현재 본 광업소는 통기전용수갱이 6편에서 16편(-395ML)까지 설치되어 운용되고 있으며, 심부개발시 통기전용수갱을 16편(-395ML)에서 18편(-488ML)편까지 건설되었을 때와 건설치 않았을 때를 VnetPC를 이용해 공기량에 관한 모의 실험을 하였으며, 온도 예측 프로그램인 CLIMSIM에 예측된 공기량을 이용하여 18편의 갱내 온도예측을 하였다. VnetPC는 MVS에서 지하공간의 통기 네트워크의 설계 및 분석을 위하여 개발한 프로그램이며, 이 프로그램은 미국의 방사성 폐기물 처분사업인 Waste Isolation Pilot Plan(WIPP)의 통기 평가에 사용되기도 하였다.

통기량 모의실험을 위한 VnetPC 프로그램의 첫 번째 작업은 광산 보안도를 바탕으로 최대한 실제의 통기네트와 같게 통기 도면을 작성하여야 한다. VnetPC가 현행 통기 네트워크를 인식하기 위해 정확한 모델링을 하여야 한다. 모델링한 도면에서는 갱도의 분기점이나 선풍기의 위치 등 전체적인 통기 네트워크가 잘 나타내주어야 한다(Fig. 2). 통기 네트워크에서 교차점을 노드(node)라 하고, 노드와 노드사이를 연결한 것을 브랜치(branch)라고 한다.

브랜치의 저항과 선풍기의 특성곡선을 이용하여 선풍기의 압력과 공기량을 입력하여야 한다. 광산 통기해석은 Atkinson's Law를 바탕으로 식 (5-1)을 사용하여 갱도의 저항을 계산한다(Atkinson Eq.).

$$P = R \cdot Q^2 \qquad (5\text{-}1)$$

P : 통풍로 압력(=압력손실) [N/m^2 = Pa]
R : 저항 [$N*s^2/m^8$]
Q : 유량 [m^3/s]

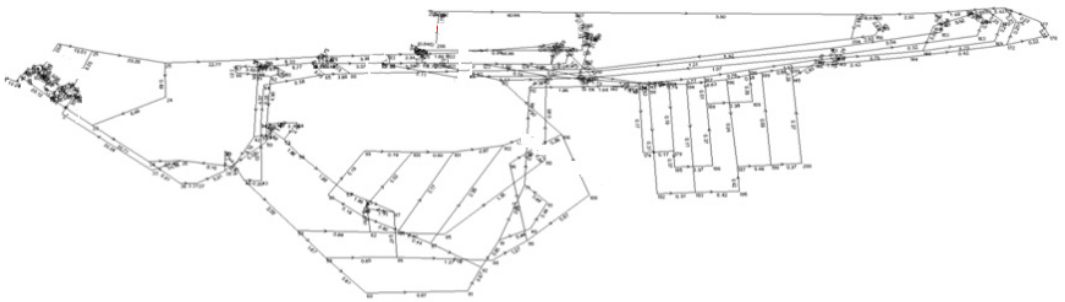

Fig. 2. Ventilation Network in A Colliery

Table 4. Friction factor (referred to air density of 1.2kg/㎥) and coefficients of friction (independent of air density) (Hartman, 1982)

Tunnel Situation	Frictionfactor, 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 5. Example of Equivalent Length (Hartman, 1982)

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

여기서 P는 측정 지점에서의 공기압력(Pa), Q는 공기량을 의미한다. 통기해석에서 가장 중요한 요소인 저항(R)은 각 지점에서 압력과 공기량을 측정함으로써 정확하게 계산할 수 있지만, 압력측정을 통하여 광산의 압력을 정하는 것이 매우 까다롭기 때문에 일반적으로 저항은 식 (5-2)를 이용하여 계산된다(Hartman, 1992).

$$R = \frac{K P_l (L + L_e)}{A^3} \quad (5\text{-}2)$$

R : 갱도 저항 ($N*s^2/m^8$)
P_l : 주변장 (m)
L : 갱도 길이(m)
L_e : Equivalent Length(m)
A : 갱도 단면적(m^2)
K : Friction Factor(kg/m^3)

식 (5-2)에서 보듯이 갱도의 저항 R은 현장조사를 통

해 쉽게 측정이 가능하며 이러한 데이터를 바탕으로 저항 R을 계산하게 된다. VnetPC 수치해석을 위해서 일반적인 경우에 갱내에서 마찰계수 K를 McElroy의 값 0.016 kg/m^{3}를 사용하였고(Table 4), 갱도의 상태에 따라 Table 4를 참고하여 그 값을 입력시켰다. 갱도의 단면적과 갱도 길이는 실제로 측정한 값을 사용하였으며, 갱도의 모양이나 형상으로 인한 충격 손실에 따른 압력의 변화는 등가길이 L_e는 Equivalent Length Method를 이용하였다(Table 5)

VnetPC 프로그램은 입력된 데이터를 바탕으로 철저한 이론식에 근거한 해석 프로그램이다. 이 프로그램을 활용하여 여러 가지 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 가장 먼저 모델링의 검증이 이루어져야 한다. 모델링의 검증은 현장 측정 자료와 비교하여 모델의 정확성을 검증해야 한다. 주요 구간에서의 공기량 및 이동 방향이 일치해야 하며, 광산 전체의 입배기량 역시 근접하게 일치해야 한다.

각 갱도의 저항의 계산 후에 선풍기(fan)는 주선풍기, 보조선풍기, 국부선풍기로 나누어지며 실제 위치하고 있는 브랜치(branch)에 위치시키고 선풍기 특성곡선을 이용하여 각각의 압력과 풍량을 입력시켰다. Network Balancing 작업을 통하여 실제와 시뮬레이션을 조정하였다. 그 결과 VnetPC를 통한 수치해석 결과에서 총입기량은 4,880 m^3/min였으며, 실측한 총 입기량은 4,710 m^3/min이였다. 이는 현장조사 결과와도 매우 흡사하게 도출되었음을 확인하였다.

5.2 미개발 지역의 갱도 온도 예측

CLIMSIM 프로그램은 지하의 수직갱이나 사면 또는 통풍로를 따라 선택되어진 지점에서 열응력(heat stress)의 지표나 공기의 건습구적 그리고 열역학적 특성의 다양성을 예측하는데 사용된다. 이 전산프로그램은 온도의 수치적 계산과 구체적인 공기 냉각이나 통기 시스템의 설계에 이용된다. 이 프로그램은 20 m 또는 더 적게 유한한 요소로 통풍로의 길이를 분할할 수 있으며 각 길이 내에서 서로 영향을 미치는 수치적 진행과정들은 통풍로의 생성시기를 고려하여 계산되어진다. 암석과 공기의 중간면에서 경계면을 가로지르는 일반적 형태의 기류로 전달되는 열과 암석 표면에 도달하는 지층열(strata heat)사이의 열적평형과 습하거나 건조한 표면의 증발과 응축 과정 또한 고려되어진다(McPherson, 1997).

CLIMSIM 프로그램은 온도 시뮬레이션 프로그램이다. 온도 예측을 위해서는 프로그램이 요구하는 데이터를 입력하여야 한다. A광업소의 온도 예측을 위해서 상부(110 ML)의 건구온도 27.2°C, 습구온도 26.7°C(2015. 9월)를 사용하였으며, 초기지반온도(VRT)는 110 ML에서 12.8°C를 사용하였다.

또한 갱내의 온도에 주요한 영향을 끼치는 미개발 지역의 공기량은 VnetPC 프로그램을 사용하여 예측 공기량을 입력시켰다.

A광업소는 -438ML(17편)에서 채탄 작업을 하고 있으며 생산이 진행될수록 채굴심도도 계속 증가할 것이다. 심도가 깊어질수록 갱도의 암반열과 압축열이 증가하여 갱내의 온도는 더욱 증가할 것이다. 현재 A 광업소는 주선풍기의 용량 증가는 불가하므로 광산 내부의 통기 수갱을 연장하거나 새롭게 통기전용수갱을 굴착할 수밖에 없는 실정이므로 6편에서 -395 ML까지 운용되고 있는 통기수갱과 조합하여 -395ML에서 -488 ML까지 93 m의 통기전용수갱을 건설할 경우와 통기전용수갱을 건설하지 않고 작업장에서 작업할 경우의 갱내 온도 예측을 실시하였다.

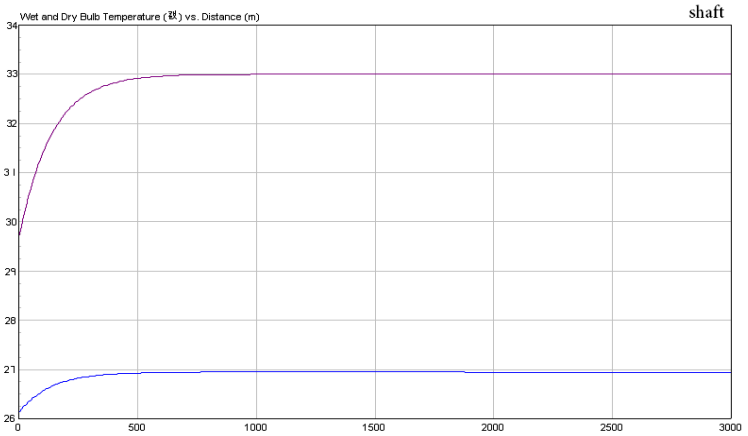

Fig. 3. CLIMSIM Result without a ventilation shaft

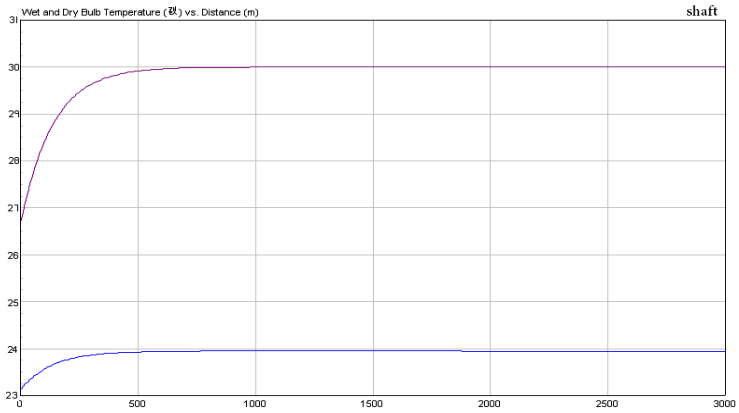

Fig. 4. CLIMSIM Result with a ventilation shaft

먼저 -395ML에서 -488ML까지 통기전용수갱을 건설하지 않았을 경우에 Network Balancing 작업을 거친 VnetPC와 CLIMSIM을 이용하여 18편 작업장의 온도를 시뮬레이션 하였다. 18편 갱구의 입구부는 건구온도가 29.87°C이며, 거리가 증가 할수록 온도가 증가하여 입구부에서 약 600 m지점에서부터는 33°C까지 온도가 증가하여 유지되는 것을 볼 수 있다(Fig. 3). 이는 통기전용수갱이 없을 경우 높은 온도로 인하여 열악한 작업환경이 되는 것을 알 수 있다.

-395 ML에서 -488 ML까지 통기전용수갱을 건설하였을 경우에 18편 작업장의 온도를 시뮬레이션 하였다. 먼저 VnetPC에서 -395 ML에서 -488 ML까지 통기전용수갱을 건설하였을 경우의 공기량을 예측하였고 예측된 공기량을 CLIMSIM의 열적 파라미터로 사용하였다. 그 결과 Fig. 4에서 보면 18편 갱구의 입구부는 건구온도가 26.78°C이였으며, 약 650 m 지점부터 30°C까지 온도가 증가하여 유지되는 것을 볼 수 있다.

CLIMSIM의 예측 결과로부터 통기전용수갱을 설치한 경우가 통기전용수갱을 설치하지 않았을 경우보다 약 3°C정도 온도가 낮은 것으로 나타났다. 작업장의 온도가 30°C가 넘어서면 작업효율이 현저히 떨어지며 작업환경 또한 급격히 열악해진다. 그러므로 A광업소의 심부개발시 16편에서 18편까지 통기전용수갱을 건설하여 통기네트워크를 단순화하고 입배기 효율을 높여 18편 이하의 갱내 작업장의 온도를 저하시켜 작업원들에게 쾌적한 환경을 제공해야 할 것이다.

6. CO_2 농도 예측과 통기량에 따른 농도 예측

지하 작업장에서 발생하는 유해가스중 이산화탄소와 메탄은 무색, 무미, 무취의 가스이며 밀도가 낮으므로 공기의 이동이 별로 없는 작업장에 축적된다. 이산화탄소의 경우 메탄과 비교해 볼 때 유해성 면에서는 그 위험도는 작지만 탄층의 한 곳에 밀집되어 있는 경우가 많아 한 번의 용출로 인한 질식사고의 위험이 많다. 이산화탄소의 농도와 국부 통기량간의 관계를 규명하기 위하여 이에 적용 가능한 인공신경망(artificial neural network)을 이용하였다. 인공신경망은 인간이나 동물들이 가지고 있는 생물학적인 뇌의 신경세포(Neuron)를 모델화하여 인공적으로 지능을 만드는 것이다. 역전파(back-propagation)는 복잡한 비선형 함수를 모델링하는 기술로써 함수를 나타내는 식을 모를 때에도 적용이 가능하다. 역전파의 적용범위로서는 분류(classification), 패턴인식, 연속 입력 데이터(data)를 연속 출력 데이터로 매핑시키는 작업이 필요한 곳에 사용한다. 현재 신경망 알고리즘 중에서 사용상의 용이성 때문에 가장 많이 쓰이는 알고리즘이다.

6.1 CO_2 예측을 위한 인자

CO_2 방출에 대한 예측에 관계한 문제 중의 하나는 그것의 방출에 원인이 되는 인자들의 수이며, 이러한 인자들에 대한 양질의 Data 획득이 필요하다. 가스 근원(source)층에서부터의 어떤 지층(strata) 가스의 방출 및 그 이후의 작업 지역으로의 가스 이동은 다음과 같은 요소들의 물리적, 지질학적 요소들에 관계하는 것으로 판단하여 다음의 9가지 인자- ① 작업장의 심도 ② 탄층 두께 ③ 1일 채굴량 ④ 1일 굴진 길이 ⑤ 작업장 온도 ⑥ 통기량 ⑦ 탄층 주변의 지질조건 ⑧ 작업장 압력 ⑨ 탄층의 투과도 -를 이용하였다.

이러한 인자들에 대한 정보는 기존의 광업소에 소유하고 있는 자료를 이용하거나 혹은 현장 실험을 통하여 획득하였다. 지하작업장에서의 가스 용출량 예측을 위한

Table 6. Neural network Training data

Depart-ment	Location	Transmission [md]	Depth [M.L]	Output [ton]	Digging [m]	Inflow [m^3/s]	Coal-thick ness [m]	Temp. [°C]	Pressure [Pa]	stratum
a Depart-ment	17level 1X	0.76	-441	15	2.0	4.76	3.7	28.3	1070	Sand Shale
	17level 2X	0.76	-441	35	2.0	2.43	3.1	29.40	1070	Sand Shale
	17level 3X	0.56	-441	70	2.0	0.05	4.5	27.20	1065	Sand Stone
	17level 5X	0.56	-441	75	2.0	0.05	6.0	28.80	1060	Sand Stone
	18level 1X	0.57	-481	20	2.0	0.82	2.5	27.7	1091	Shale
	18level 2X	0.57	-481	40	2.0	2.58	3.0	28.8	1090	Shale
b Depart-ment	17level 1X	0.58	-438	30	2.0	2.02	2.8	31.1	1068	Sand Stone Shale
	17level 2X	0.56	-438	25	2.0	4.04	1.5	30.0	1068	Sand Stone
	17level 3X	0.56	-438	75	2.0	0.39	3.3	29.40	1060	Sand Stone
	17level 5X	1.04	-438	95	2.0	0.17	3.6	27.20	1065	Sand Stone
	18level 1X	0.63	-488	55	2.0	0.23	1.9	29.40	1095	Sand Stone
	18level 2X	0.46	-488	70	2.0	0.39	3.3	27.20	1098	Sand Stone

신경망에 인공지능을 부과하기 위해서 A광업소의 채탄 작업장에 입갱을 통한 현장 데이터 획득을 실시하였다. 3회에 걸쳐 실시된 현장 실험을 통하여 작업장의 CO_2 농도, 온도, 통기량, 작업장 압력 등을 측정하였다. 특히, 탄층 투과도는 CO_2 용출량에 매우 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 인자로, 각 작업장 별로 괴탄 시료를 채취하여 코어링 작업 후 투과도를 실험하였다. 1일 채굴량 등의 기타 인자는 현장에서 일별 보고되는 자료를 인용하였다.

6.2 신경망의 학습(training)

개발된 신경망에 인공지능을 부과하기 위한 학습에 이용된 데이터는 Table 6와 같다. 인자들의 수치적 차이에

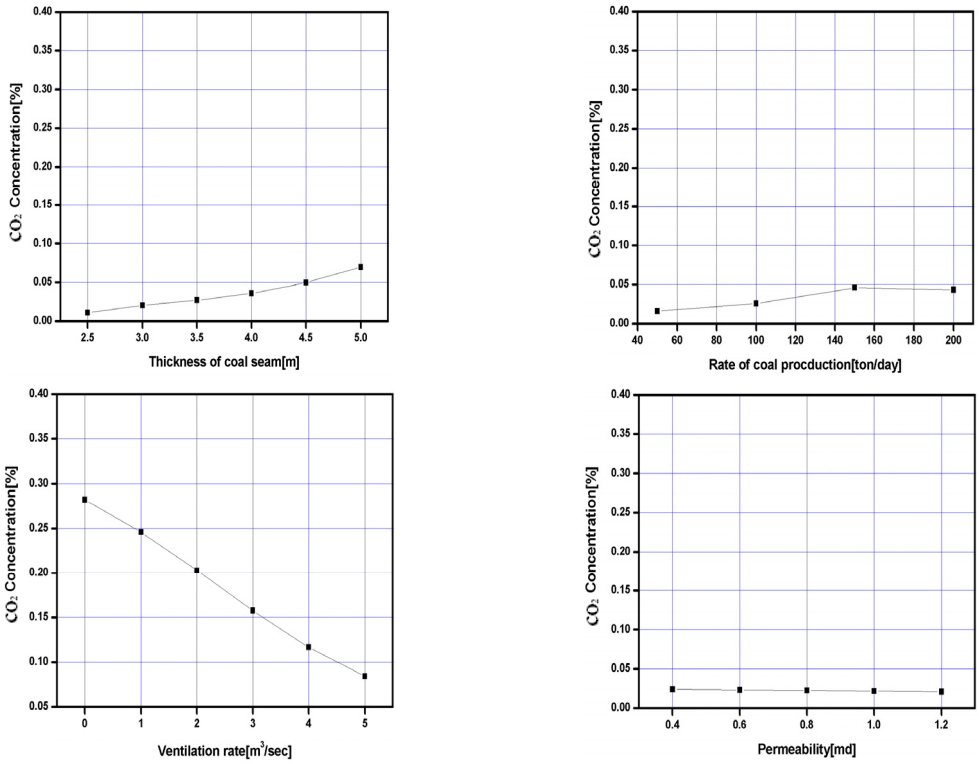

Fig. 5. Carbon dioxide Prediction value for a production department (sand shale)

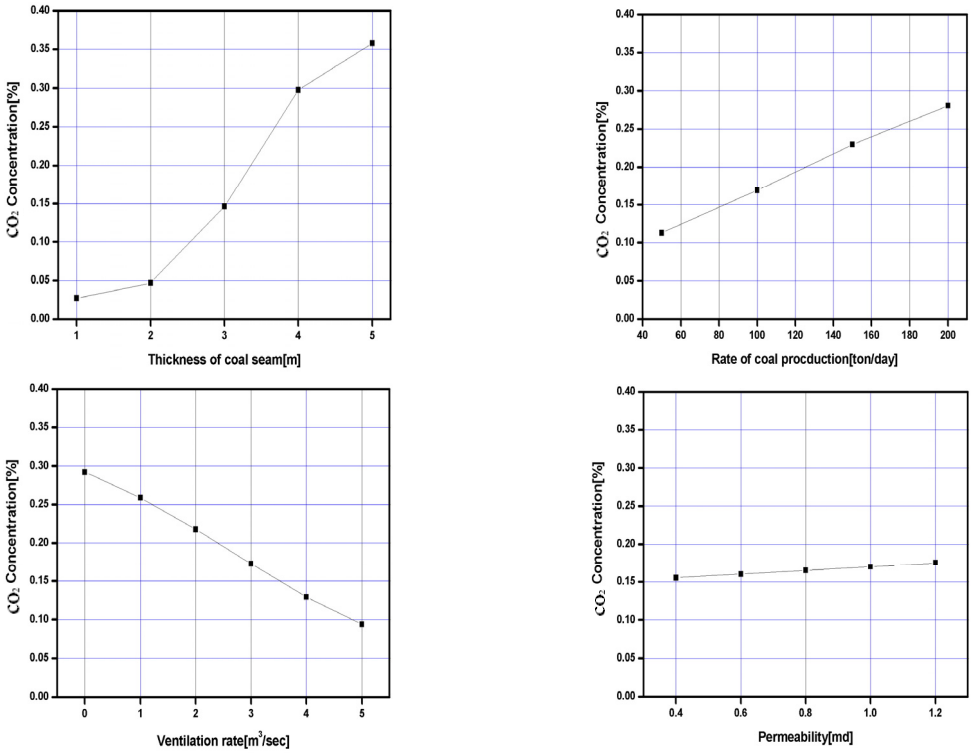

Fig. 6. Carbon dioxide Prediction value for b production department (sand stone)

서 오는 영향성을 배제시키기 위해서 각 인자들의 실제 값을 10～1000으로 나누어 준 값을 이용하여 학습 시켰다(normalization). 예를 들어 작업장의 압력이 1070 Pa 일 경우 이를 100으로 나누어준 '10.7'이라는 압력 수치를 입력하였다. 이는 다른 인자의 변화폭과 심도와 같이 변화가 많은 것을 일반화 시켜주기 위한 작업이다.

학습을 위한 Learning rate는 0.5를 이용하였으며, 9개의 인자를 가지는 12개소 CO_2 농도를 입력하여 반복적인 학습을 시켜 인공 지능을 부과하였다. CO_2 예측 네트워크를 100,000번 반복 학습시켰으며, 이때 에러치(Ep) 5.000×10^{-5}을 보임으로써 충분히 학습되었음을 입증하였다.

이러한 반복적인 학습을 통하여 학습된 네트워크를 이용하여 현장 적용성을 검토하여 보았다. a 생산부를 인공지능을 가진 네트워크로 예측해 본 결과 실제 측정치 이산화탄소 0.009%과 거의 동일한 0.0086%을 나타내었고 b생산부의 경우 이산화탄소 0.007%과 거의 동일한 0.0068%을 나타내었다. 이는 오차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 검증결과 95% 이상의 높은 신뢰도를 나타낼 것으로 판단되었다.

6.3 예측 결과

인공지능이 부과된 네트워크를 이용하여 19편의 a생산부와 b생산부 지역의 CO_2 농도를 예측하여 보았다. 지하 작업장 각 지역의 채탄량, 통기량, 탄층 두께, 주변 지역 지층, 투과도의 변화에 따른 CO_2 농도를 예측 비교해 보았다. 채탄량, 통기량, 탄층 두께, 주변 지역 지층은 기존의 작업장에서 실측되어진 데이터의 변화 범위를 산정하여 그 범위 내에서의 변화에 대한 CO_2 농도를 예측하였으며, 심부에서의 온도는 심도증가에 의한 지열 등의 상승을 고려하여 CLIMSIM을 통하여 얻어진 갱내 온도 변화 예측을 통하여 얻어진 수치를 이용하였다.

Fig. 5은 19편 개발시에 a생산부에 대한 CO_2 농도 예측 결과이다. 예측 결과 주변 지층이 sand shale인 경우, 채탄량이 50 ton/day～200 ton/day로 증가함에 따라 CO_2 농도가 0.0162%～0.0433%로 증가하는 것으로 나타났으며, 탄층의 두께 역시 2.5 m～5.0 m로 증가함에 따라 CO_2 농도이 0.011%～0.069%로 증가하는 것으로 예측 되었다. 또한, 투과도의 경우는 0.4 md～1.2 md로 증가함에 따라 0.024%～0.021%로 매우 미세한 감소를 보였다. 통기량의 경우는 0 m^3/sec～5 m^3/sec로 증가함

에 따라 CO_2의 농도는 0.3%~0.1%로 크게 감소되었다.

Fig. 6는 b생산부 19편 개발시에 대한 CO_2 농도 예측 결과로, a생산부와 동일한 경향을 보인다. 채탄량과 탄층 두께가 증가할수록 CO_2의 용출량은 증가하고 통기량이 증가할수록 CO_2의 농도는 낮아질 것으로 예측되었으며, 작업 심도의 증가는 CO_2의 농도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되어진다. CO_2 농도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 탄층 두께와 채탄량일 것으로 판단된다. 또한 통기량이 증가할수록 CO_2의 농도 저하에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

7. 결 론

본 연구는 A광업소의 필요 공기량을 계산하였으며, 현재 운용되고 있는 통기네트워크를 이용하여 18편 작업장의 갱내 온도 예측을 하였다. 통기 네트워크 전용 시뮬레이션 프로그램인 VnetPC를 이용하여 공기량 예측을 하였으며 온도 시뮬레이션 프로그램인 CLIMSIM을 사용하여 18편 작업장의 온도를 예측하였다. 그리고 인경신경망을 이용하여 이산화탄소의 농도를 예측하여 환기량과의 관계를 예측하였다. 본 연구는 국내 광업소 한곳에서 실험하였으므로 국내 및 국외 석탄광산 및 기타 광산에 대하여 가스 농도의 예측과 광산 환기 설계에 기초가 되기를 바란다. 향후 본 연구가 광산의 통기 네트워크 설계에 적용될 수 있을 것을 기대 하면서 본 연구의 결론을 다음과 같이 요약한다.

1. A광업소의 현재 입기되는 총량은 4,710 m^3/min이였으며, 실제 계산한 소요통기량 6,152 m^3/min으로 계산되었다. 이는 현재 주선풍기를 통해 입기되는 공기량, 즉 총 입기량 1,442 m^3/min이 부족한 것으로 나타났다. 계속하여 생산이 진행됨에 따라 광산의 채굴 심도도 증가할 것이며 심도가 증가함에 따라 필요 공기량이 많아 질 것이다. 18편이나 그 이하 심부 채굴시에는 갱내의 필요 공기량이 더 많아 질 것으로 예상됨으로 쾌적한 작업환경을 위한 통기 대비책을 강구하여야 할 것이다.
2. VnetPC를 통한 수치해석 결과에서 총입기량은 4,880 m^3/min이였으며, 실측한 총 입기량은 4,710 m^3/min이였다. 이는 현장조사 결과와도 매우 흡사하게 도출되었음을 확인하였다.
3. 18편 이하 개발시 통기전용수갱을 16편(-395 ML)에서 18편(-488 ML)까지 설치한 경우가 설치하지 않았을 경우보다 갱내의 건구온도가 약 3°C정도 낮은 것으로 나타났으며 A광업소의 심부개발시 16편에서 18편까지 통기전용수갱을 건설하여 통기네트워크를 단순화하여 입배기효율을 높여 18편 이하의 갱내 작업장의 온도를 저하시켜 작업원들에게 쾌적한 환경을 제공해야 할 것이다.
4. 인공신경망을 이용하여 2개소에 대하여 검증한 결과 a생산부 지역은 실제 측정치 이산화탄소 0.009%과 거의 동일한 0.0086%을 나타내었으며 b생산부는 실제 측정치 0.007%과 거의 동일한 0.0068%을 나타내었다. 이는 오차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 심부 광산에서의 가스 예측에 적용이 가능하다고 판단된다.
5. 19편의 개발시의 CO_2 농도를 예측한 결과 채탄량과 탄층 두께가 증가할수록 CO_2 농도는 증가하였다. CO_2 발생량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 탄층 두께, 채탄량일 것으로 나타났으며 통기량이 증가할수록 이산화탄소의 농도 저하에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 “2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-201510038)”로 연구하였습니다. 이에 감사드립니다

References

1. H. L. Hartman, 1982, Mine ventilation and air conditioning (second edition), A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION.
2. Hartman, H.L., Mutmansky, J.M. and Wang, Y.J., 1997, Mine Ventilation and Air Conditioning, Wiley Interscience, pp. 133-165.
3. J. C, Hall, 1981, Mine Ventilation Engineering, Society of Mining Engineers, pp. 109-116.
4. Kim, Y.K., 2000, Study on the Improvement of Ventilation System in Jang-Sung Colliery, Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 37, No. 3, pp. 173-180.
5. Kwon, J.U., Kim, S.M., Kim, Y.K., Jang, Y.H., 2015, A Study on Optimum Ventilation System in the Deep Coal Mine, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics Tunnel and Underground Space, Vol. 25, No. 2, pp. 186-198.
6. 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.
7. McPherson, M. J., 1987, The Resistance to Airflow of Mine Shafts, Mine Ventilation Society of South Africa.
8. McPherson, M.J., 1993, Surface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, pp. 134-141.

9. McPherson, M.J., 1997, CLIMSIM for Windows Version 1.0 User' Manual" Mine Ventilation Services, pp. 14-19.
10. Wang, Y. J. and Saperstein, L. W.,1970, Computer-aided solution of complex ventilation networks, Soc. Min. Eng. AIME 247.

김 수 홍

1998년 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사

Tel: 010-2375-5950
E-mail: ksh2000@ekr.or.kr
현재 한국농어촌공사 경남지역본부 지하수지질부 차장

김 선 명

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

Tel: 031-870-1727
E-mail: sunmg.kim@gmail.com
현재 신한대학교 에너지환경공학과학과 교수

김 윤 광

1997년 2월 인하대학교 자원공학과 공학사
1999년 8월 인하대학교 자원공학과 공학석사
2008년 2월 인하대학교 자원공학과 박사수료

Tel: 031-425-8972
E-mail: skyblue31@hanmail.net
현재 ㈜굿엔지니어스 기업부설 연구소장

장 윤 호

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

Tel: 033-570-6313
E-mail: yhjang@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 자원공학과 교수