

인공신경망을 이용한 심부 갱내온도 예측

김윤광^{1)*}, 김진²⁾

Temperature Prediction of Underground Working Place Using Artificial Neural Networks

Yunkwang Kim and Jin Kim

Abstract The prediction of temperature in the workings for the propriety examination for the development of a deep coal bed and the ventilation design is fairly important. It is quite demanding to obtain precise thermal conductivity of rock due to the variety and the complexity of the rock types contiguous to the coal bed. Therefore, to estimate the thermal conductivity corresponding to this geological situation and complex gallery conditions, a computing program, which is TemPredict, is developed in this study. It employs Artificial Neural Network and calculates the climatic conditions in galleries. This advanced neural network is based upon the Back-Propagation Algorithm and composed of the input layers that are acceptant of the physical and geological factors of the coal bed and the hidden layers each of which has the 5 and 3 neurons. To verify TemPredict, the calculated result is compared with the measured one at the entrance of -300 ML 9X of Jang-sung production department, Jang-sung Coal Mine. The difference between the results calculated by TemPredict (25.65°C) and measured (25.7°C) is only 0.05°C, which is less than the allowable error 5%. The result has more than 95% of very high reliability. The temperature prediction for the main carriage gallery 9X in -425 ML under construction when it is completed is made. Its result is 28.2°C. In the future, it would contribute to the ventilation design for the mine and the underground structures.

Key words Temperature prediction, Thermal conductivity, Artificial neural network, Back-propagation algorithm

초 록 심부 탄광 개발의 타당성 검토나 통기계획 수립시 갱내 작업장의 온도를 예측하는 것은 매우 중요하다. 심부의 탄광주변의 암반은 매우 다양하고 여러 암종으로 구성되어 있어 암반의 열 전도율(thermal conductivity)을 구하는 일은 매우 어려운 작업이다. 이에 본 연구에서는 복잡한 갱내여건에 상응한 열전도율을 도출하기 위해 artificial neural network(인공신경망)를 새롭게 도입하여 갱내 기상 예측을 위한 전산 프로그램을 개발하였다. 인공 신경망을 이용한 열전도율 계산 프로그램은 back-propagation algorithm을 사용하였으며 9개의 인자를 받아들이는 input layer와 5개와 3개의 뉴런을 가지는 두 개의 hidden layer로 구성되어 있다. 개발된 TemPredict를 이용하여 장성광업소의 심부온도를 검증한 결과 장성생산부 -300 ML 하반구 입구의 온도가 25.65°C로 산출되었고 실제 온도(25.7°C)와 0.05°C의 차이를 나타냈다. 이는 오차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 검증결과 95% 이상의 높은 신뢰도를 나타냈다. 위의 검증결과를 통해 TemPredict를 이용하여 현재 굴진중인 -425 ML이 관통이 되었을때의 장성생산부 주운반갱도 9X지점의 온도를 예측하였다. 예측 결과 장성생산부 주운반갱도 9X지점의 온도는 28.2°C로 예측 되었다. 향후 TemPredict를 통한 온도예측을 통하여 광산이나 지하구조물의 설계시 통기계획에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

핵심어 온도예측, 열전도율, 인공신경망, 역전파 알고리즘

1. 서 론

심부 채탄 개발의 타당성 검토나 생산 및 통기 계획 수립시 갱내 작업장의 건구온도와 유효온도를 예측하는 것은 대단히 중요하다. 이를 위해서는 갱내 기상을

¹⁾ 대한석탄공사 기술연구소 선임연구원
²⁾ 인하대학교 환경공학과 부교수
* 교신저자 : skyblue31@hanmail.net
접수일 : 2007년 8월 8일
심사 완료일 : 2007년 8월 21일

예측 계산해야 하는데, 이때 만족스러운 계산 결과를 얻으려면 그 대상 탄광의 입기 갱도 암반에 대한 열적 특성치를 알아야 한다. 과거(1960년대 전후)에 외국의 많은 학자들에 의해 갱내 기온 예측 계산법이 집중적으로 연구된 바 있으나 대부분 갱도가 건조할 때를 대상으로 한 것이며, 근래에는 새로운 모델이나 방법이 제안된 바 없다 (Voß, 1984).

갱내 기온 예측 계산에 필요한 변수들은 갱도의 주변장, 구간장, 등가반경 등 갱도의 크기에 관한 것, 갱도기점의 공기온도, 공기의 비열, 풍량 등 통기에 관한 것, 처녀암반온도, 경과계수, 열전도율 등 갱도 주위암반의 열적 특성에 관한 것 등 크게 3종류로 분류할 수 있으며 이중 암반의 열적 특성치는 대부분 지역에 따라 다르기 때문에 대상지역에 대한 열적 특성치를 실측을 통해 도출해야 한다. 특히 암반의 열적 특성치중 탄광의 암석 열전도율에 관해서는 여러 문헌에 발표되어 있는데(Mücke, 1964), 이 문헌들의 대부분은 건조한 암석 시편을 실험실내에서 측정한 것으로 광의의 열전도율에 관한 것들이다. 이는 암석의 광물 조성과 조직 및 공시체적에 좌우되는 것으로, 건조하고 균일하며 등방성의 암반내에 갱도가 굴진되어 있을 때에만 기온 예측계산에 적합하다.

그러나 대부분 석탄광의 경우같이 암반이 서로 상당히 다른 열전도율을 가진 여러가지 암석으로 구성되어 있을 경우, 각각 암종의 열전도율로부터 식은 암반에 대해 열의 흐름을 고려한 평균치를 계산해 내는 것은 매우 어렵다. 또한 갱도 주변암반이 갈라지거나 부서져 이로 인해 열전도율이 감소될 때는 계산이 더욱 어려워진다. 암반으로부터 갱도에 물이 유입되거나 갱도 굴진시 천공 및 누수에 사용된 물로 인해 갱도가 습한 경우에 열전도율은 기온 상승에 결정적인 역할을 하지 못하므로 열전도와 물 또는 수증기의 이동에 의한 암반의 열전도를 나타내는 등가열전도율을 기상예측계산에 사용해야 한다. 본 연구에서는 복잡한 갱내여건에 상응한 열전도율을 도출하기 위해 artificial neural network (인공신경망)를 새롭게 도입하여 갱내 기상 온도 예측 전산프로그램(TemPredict)을 개발하였으며 이를 이용해 실제 갱내의 열전도율을 보다 정확하고 편리하게 도출하여 정확한 갱내기상온도를 예측하고자 하였다.

본 연구에서는 생산규모로 볼 때 단일 탄광으로 국내 최대이며, 작업장이 심부회(심도 1000 m)되어 심부개발이나 통기계획 수립시 기온 예측 계산이 반드시 필요한 장성광업소를 대상으로 하였으며, 갱내 기상 예측을 위한 전산 프로그램을 개발하여 미개발된 심부작업장에 대한 기상예측계산을 하였다. 현재 굴진중인 -425 ML의

갱내 기상 온도를 예측하기 위해서 -425 ML이 관통되었을때의 통기량을 전산프로그램인 VnetPC를 사용하여 필요한 인자중의 하나인 통기량 예측을 하였다.

2. 갱내 기상 이론

암반으로부터 확산되어 온 열은 암반 표면을 통하여 터널 내부의 공기로 전달된다(Fig. 1).

$$q = k \left[\frac{\partial \theta}{\partial r} \right]_s = h(\theta_s - \theta_a) \quad (1)$$

h : heat transfer coefficient
 θ_s : rock surface temperature
 θ_a : dry bulb temperature

암반 표면에서 터널 내 공기로 방사되는 암반 열은 Fourier 법칙을 따르며, 위 식에서 암반 표면의 온도와 공기와의 건구 온도 차이가 클수록 전달되는 열의 양이 큼을 알 수 있다.

대부분의 지하공간에는 눈에 보이지 않더라도 어느 정도의 물의 증발이나 공기 중의 수증기가 응축된다. 수분의 응축열과 증발열에 의해서 암반 표면의 온도는 증감하며, 이러한 표면에서의 수분의 역할은 암반의 온도 예측에 중요한 고려 인자이다. 갱내기온 예측계산에 있어서 건조한 갱도(즉 그 갱도 내 수증기량이 변화하지 않는 것)와 습한 갱도는 구분되어야 한다. 왜냐하면 건조한 갱도에서는 암반에서 방출된 열이 전부 기온상승에 쓰이지만 습한 갱도에서는 열의 일부만이 기온상승에 쓰이고 그 나머지는 기류에 전달된 수분의 기화 및 공기의 잠열을 높이는데 쓰이기 때문이다(McPherson, 1993).

암반열 q 와 공기가 가지는 q_L , q_{sen} 은 열적 평형을 이룬다.

$$q = q_L + q_{sen} \quad (2)$$

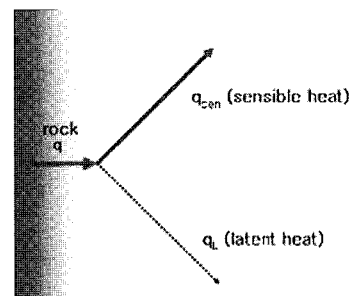


Fig. 1. the heat balance at a wet surface

q : strata heat flux[W/m²]
 q_L : latent heat transfer[W/m²]
 q_{sen} : sensible heat transfer[W/m²]

$$q = h_c \frac{G}{B-G} (VRT - \theta_{ws}) \quad (5)$$

건조한 표면에서의 암반 열은 식 (3)과 같다(h_r 은 h_c 보다 매우 작기 때문에 무시함).

$$q_{dry} = h_c \frac{G}{B} (VRT - \theta_d) \quad (h_c \gg h_r) \quad (3)$$

q_{dry} : dry strata heat flux[W/m²]
 B : Biot number
 θ_d : dry bulb temperature
 h_r : radiative heat transfer
 h_c : convective heat transfer
 VRT : Virgin Rock Temperature

식에 사용된 θ_d를 제외한 모든 변수는 터널 내 습윤 상태와 독립적이므로, θ_d에 대한 보정이 필요하다. 이 온도를 effective dry bulb temperature(θ_{ef})라고 하면, 위 식은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$q_{wet} = h_c \frac{G}{B} (VRT - \theta_{ef}) \quad [W/m^2] \quad (4)$$

θ_{ef}(effective dry bulb temperature)를 구하기 위해 젖은 표면의 암반 온도(θ_{ws})가 필요하며, θ_{ws}와 θ_{ef}의 관계를 정리하면 다음과 같다.

3. 연구대상 광산 현황

본 연구의 대상은 대한석탄공사 산하의 장성광업소이며 석탄의 개발, 생산, 선탄 및 수요자에게 공급함을 그 주요 임무로 하고 있다. 본 지역에 분포하는 지질은 캄브로-오도비스기의 조선누층군, 석탄기~트라이아스기의 평안 누층군 및 화성암류로 대별된다. 장성광업소는 탄층부존의 자연적인 경계 및 인원관리 효율화 등의 이유로 4개 생산부로 운영하고 추가행 수준은 -375 M이다.

본 탄광의 갱내 통기는 10개 갱도의 갱구 즉 철암 600 ML 전차갱, 철암 백산사갱, 장성 600 ML 전차갱, 제 1수갱 동구 인입갱, 동구 배수갱, 배경사갱, 제 2수갱, 제 2수갱 콘베어갱, 금천 600 ML 전차갱 및 문곡 1사갱 등의 갱구로 입기된다. 제 1, 2수갱을 통한 입기는 -300 ML, -225 ML 및 -150 ML의 운반갱도를 통하여 장성갱, 철암갱, 금천갱 및 문곡갱의 작업구역을 거치고, 백산사갱으로 입기된 기류는 -225 ML운반갱도를 거쳐서 철암갱의 작업구역을 통과하여 철암배기갱으로, 금천 600 ML 전차갱과 문곡 제 1사갱구로 입기된 기류는 문곡 3사갱 -225 ML권립을 통하여 수갱 -225 ML에서 입기된 기류와 합류하여 문곡갱 -225 ML 작업구역을 거쳐서 문곡 배기갱으로, 각 갱 주배기갱도 즉, 4개소의 주선풍기 갱도로 배기되고 있다(Fig. 2). 현재

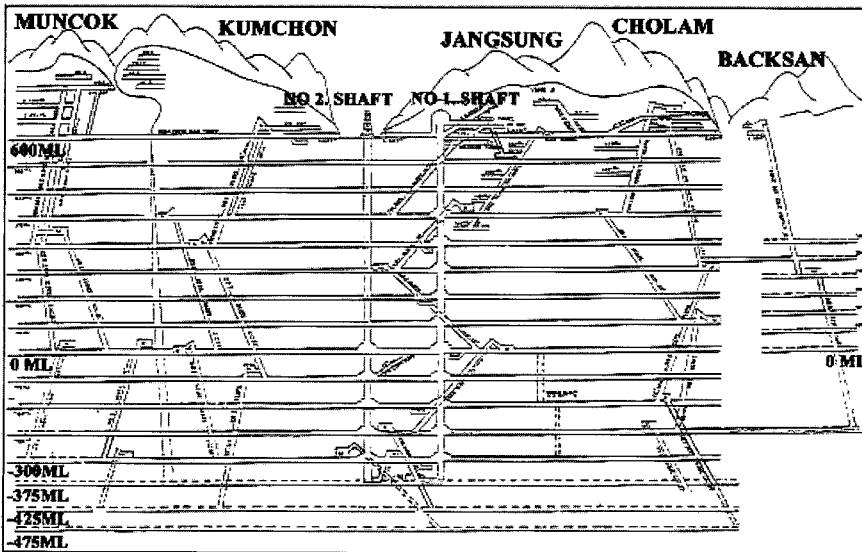


Fig. 2. Vertical section of the Jangsung Colliery

철암 배기갱도에는 350 HP, 문곡 배기갱도에는 250 HP, 금천 배기갱도에는 150 HP 및 장성 배기갱도에는 300 HP의 주선풍기가 설치되어 가동되고 있으며, 각 선풍기의 선풍기압은 각각 150 mmAq, 290 mmAq, 170 mmAq 및 245 mmAq를 나타내고 있다. 또한 각 갱 배기갱도 중간에 많은 보조 선풍기가 설치되어 가동되고 있다. 통기방식은 중앙 및 대우식의 혼합식이며, 기계력에 의한 강제 통기가 이루어지고 있다. 2006년 7월 현재 각 갱 주선풍기에 의한 총 입기량은 대략 13,452 m³/min이고, 총 배기량은 약 14,431 m³/min이며, 압축공기의 투입량은 약 894 m³/min이 되며, 주요 갱도의 통기량은 Table 1에서 보이는 바와 같다. 본 탄광도 채탄 및 굴진 작업장은 주 통기회로에 포함되지 않으므로 주 통기와는 별도로 작업장을 위한 국부 통기를 실시하여야만 한다. 따라서 본 탄광에서 실시하는 국부 통기법으로는 소형 국부선풍기와 300~900 m/m 직경의 풍관에 의한 취입(blowing)식 국부 통기법을 활용하는 작업개소도 있고, 또한 중단 채탄 작업시 봉락중에 상단갱도와 관통이 되는 경우 중단갱도 입구에 소형 선풍기를 설치하여 흡출(suction) 가동하면 하단 봉락 작업장의 오염공기가 상단으로 배출되는 국부 통기법을 활용하는 작업개소도 있다. 그리고 본 탄광도 다른 탄광과 같은 방법으로 압축공기를 작업장에 투입하여 작업장 국부통기의 보조수단으로 겸용하고 있으며 다른 국부 통기법은 활용하지 않고 다만 순수하게 압축공기 투입에 의해서만 작업장 통기를 해결하고 있는 개소도 많다. 현재 굴진 막장의 기계용 압축공기와 작업장 통기

용 압축공기로 활용하고 있는 공기량은 약 900 m³/min 정도 된다.

4. 장성광업소 암반의 열적 특성치

4.1 처녀암반온도(Virgin Rock Temperature)

처녀암반온도 T_{gu}(°C)는 심도 ΔH(m) 및 지열심도(m/°C)에 좌우된다. 지열심도는 심도가 몇 m 증가할 때 처녀암반온도가 1°C 증가하는가를 나타낸다. 지열심도는 갱외의 계절적 영향을 받지 않는 상온대(중립대)로부터 계산한다. 이 상온대의 심도는 약 20~30 m로 알려져 있는데(Hemp, 1982), 정확한 심도는 장기간 많은 측정을 통해 알 수 있지만 처녀암반온도 계산에 미치는 영향이 미소하므로 그 중간치인 25 m로 보아도 적당할 것으로 사료된다. 향온대의 온도는 그 지역의 연중 평균기온과 거의 같다(Hemp, 1982; 천야훈삼, 1987). 장성탄광의 경우 정확한 측정치가 없으므로, 강릉의 1969년부터 1978년까지 10년간 평균기온 9.29°C를 적용하였다. 처녀암반온도를 구하는 일반식(Schmidt, 1965)은 다음과 같다.

$$T_{gu} = \frac{\Delta H - h_c}{L_g} + T_c \quad (^\circ\text{C}) \quad (6)$$

T_{gu}: 처녀암반온도

ΔH: 심도(m)

h_c: 상온대의 심도(m)

T_c: 상온대의 온도(°C)

L_g: 지열심도(m/°C)

Table 1. Ventilation rate data (2006. 7. 5~19)

Intake air flow rate		Return air flow rate	
Measuring Spot	Airflow rate (m ³ /min)	Measuring Spot	Airflow rate (m ³ /min)
Cholam tunnel	107	Cholam main return tunnel	5274
Backsan inclined shaft	1,692	Jangsung main return tunnel	3137
Jangsung tunnel	679	Kumchon main return tunnel	3087
Jungang tunnel	2,126	Mungok main return tunnel	2933
Kumchon inclined shaft	462		
Bakyung inclined shaft	220		
No.2 shaft conveyor tunnel	540		
Mungok inclined shaft	329		
Acess tunnel	629		
Center compressor (17 units operated)	894		
No. 2 Shaft	5,774		
Total	7,681	Total	gc14,434

4.2 암반의 평균비열 및 밀도

기온예측 계산시 경과계수를 알아야 하는데 이 경과 계수는 Fourier 수와 Biot수의 함수로서 Biot수는 온도 전도율과 관계되고 이 온도전도율은 암반의 비열 및 체 적 밀도(bulk density)와 관계된다.

갱도가 단일 암종 내에 굴착되어 있을 때는 그 단일 암종에 대한 비열과 밀도를 계산시에 적용하면 되지만 탄광은 국내외를 막론하고 단일 암종으로 구성된 암반 이 극히 드물기 때문에, 정확한 계산을 위해선 그 대상 탄광 암반의 구성암종별 비열과 밀도를 그 구성비에 따 라 기중 평균한 값을 적용하여야 한다.

1) 암반의 암종별 분포율

현 추가행편인 -375 M.L의 주입기갱도에 대해 암 종별 분포량을 조사한 결과 암종별로는 셰일이 44.6 %로 가장 많고 사암은 28%, 석회암 26.8%, 관입 암 0.6%로 나타났으며, 분기점간의 평균 구간장이 182.8 m인데 반하여 암종은 평균 매 15.3 m마다 바뀌고 있었다.

2) 암반의 평균 비열 및 밀도

암석의 비열 및 밀도측정에 사용된 시료는 셰일 13개, 사암 25개, 석회암 12개, 관입암 5개로 총 55 개였다. 그러나 국내 탄광 갱도의 지질은 복잡하고 연속성이 적어 한 갱도 구간(branch: 동일 풍량이 흐르고 있는 갱도)이 동일 암종으로 구성된 경우가 극히 드물기 때문에 암종별 분포비율에 따라 기중 평균치로 나타나도록 했다. 이에 따라 갱내 기온 예 측 계산시 적용해야 할 장성 탄광 전체 암반의 평 균 비열은 0.2024 Kcal/kg이고 평균 밀도는 2,725 kg/m³인 것으로 나타났다.

4.3 갱내 기상측정에 의한 평균 습도 및 밀도

갱내 기상은 일반적으로 공기의 온도, 습도, 열복사와 풍속이 갱내 종업원의 건강과 작업 능률에 미치는 영향 을 의미한다. 이 중 열복사는 갱내 작업장의 대부분에서 그 영향이 미소하기 때문에 고려의 대상이 되지 못한다 (Voß, 1965). 갱내 기상을 알기 위해서는 공기의 건구온 도, 습구온도, 풍속 그리고 기압을 측정하여야 한다. 이 측정치로써 현재 각국에서 많이 사용하고 있는 종합 기 상치인 유효온도는 물론 습도, 수증기압, 수증기량, 엔 탈피, 가스상수, 밀도도 알 수 있다.

-300 M.L 주운반갱에서 9개소, 추가행편인 -375 M.L 주운반갱에서 17개소, 총 26개소에서 공기의 건구온도, 습구온도 및 기압을 측정 계산한 결과는 공기의 평균

습도는 95%이고, 평균 밀도는 1.2 kg/m³이다.

4.4 입기갱도 주위 암반의 등가열전도율(λ_{eq})

건조한 갱도에 대한 기온 예측계산식에서 사용되는 열 전도율(λ)는 실험실내에서 건조한 암석시료를 대상으 로 구한 것이므로 갱내 기상측정에 의해 확인된 바와 같 이 입기 갱도의 주위 암반이 전부 습한 장성탄광 갱내 의 기온예측계산에는 갱도가 습할 때의 계산식에 적용 할 등가열전도율(λ_{eq})을 알아야 한다. 열전도율은 주로 층의 구조와 광물의 조성에 의해 좌우되지만 등가열전 도율은 많은 요인에 영향을 받는데 우선 암반 내 물의 유무, 갱도주위암반의 균열 및 갈라진 틈이나 부서진 정도에 관계되고 마지막으로 암반의 열전도율에도 좌 우된다. 이 특성치는 실험실에서 구할 수 없으며 갱내의 기온측정에 의해 구한 기상치를 이용하여 도출할 수 있다.

1) 등가열전도율 산정 방법

갱도의 등가열전도율은 서독의 Voß(1965)가 제안한 근사부정방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_i K(\alpha)}{K(\alpha)_i} \frac{1}{\lambda_i / \lambda_{eq}} \quad (\text{Kcal/mh } ^\circ\text{C}) \quad (7)$$

λ_i: 갱도의 열전도율(Kcal/mh °C)

K(α): 경과계수

λ_{eq}: 등가열전도율(Kcal/mh °C)

습한 갱도의 기온예측계산식을

$$T_{wz} = T_{gu} - (T_{gu} - T_{wo}) \exp \left[- \frac{u \lambda_i K(\alpha) z}{G_w C_p r_o} \right] \quad (8)$$

T_{gu}: 처녀암반온도

T_{wo}: 기점의 온도(°C)

U: 갱도의주변장(m)

G_w: 풍량(kg/h)

C_p: 공기의 정압비열(0.24 kcal/kg°C)

z: 갱도의 구간장(m)

λ_i: 갱도의 열전도율(Kcal/mh °C)

K(α): 경과계수

r_o: 갱도의 등가반경(2 x 단면적/주변장)(m)

λ_i K(α)에 대해 풀면 식 (9)와 같다.

$$\lambda_i K(\alpha) = \frac{G_w C_p r_o}{u z} \ln \frac{T_{gu} - T_{wo}}{T_{gu} - T_{wz}} \quad (9)$$

이 식 우변의 변수들은 우리가 이미 알고 있거나 기상

측정에 의해 구할 수 있는 것들이다. 이 식의 우변 $\lambda_i K(\alpha)$ 에는 우리가 구하려는 등가열전도율 λ_{eq} 가 3번 포함되어 있다.

$$\lambda_i = \frac{C_p \Delta T_Z}{i_z} \lambda_{eq} \quad (\text{Kcal/mh } ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

i_z : 갱도 z m의 엔탈피(kcal/kg)

$$a_{eq} = \frac{\lambda_{eq}}{C_p} \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (11)$$

$$K(\alpha) = f\left(\frac{a_{eq} t}{r_o^2}, \frac{\alpha_{eff} r_o}{\lambda_{eq}}\right) \quad (12)$$

a_{eq} : 등가열전도율(m^2/h)

α_{eff} : 유효열전달율($\text{Kcal/mh}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

C_p : 공기의 정압비열($0.24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$)

C: 암석의 비열($\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$)

그리고, 다음 식에 포함되어 있다.

$$Bi = \frac{\alpha_{eff} r_o}{\lambda_{eq}} = \frac{\alpha_k r_o}{\lambda_i} \quad (13)$$

여기서, $\alpha_{eff} = \frac{\alpha_k}{C_p \Delta T_Z / \Delta i_Z} \quad (\text{Kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}) \quad (14)$

α_k 는

풍속(W) > 2 m/sec 시는 $\alpha_k = 4 \times W0.8$

풍속(W) < 1 m/sec 시는 $\alpha_k = 4 \times W0.8 + 2.5$ 이다.

또 식을 변형하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_{eq}} = \frac{C_p \Delta T_Z}{\Delta i_Z} = \epsilon_i \quad (-) \quad (15)$$

장성탄광 입기갱도 암반의 ϵ_i 는 기상측정에 의해 알 수 있으므로 앞에서 구한 $\lambda_i K(\alpha)$ 와 같이 상수화(C)가 가능하다. 즉 식 (15)는

$$\lambda_{eq} \frac{\lambda_i K(\alpha)}{\lambda_i / \lambda_{eq}} \frac{1}{K(\alpha)_1} = C \frac{1}{K(\alpha)_1} = C \frac{1}{K(\alpha)_1} \quad (16)$$

이 되고, $K(\alpha)_1$ 이 λ_{eq} 의 종속변수가 되어 식 (16)은 부정방정식이 된다. 그러므로 λ_{eq1} 을 가정하면 $K(\alpha)$ 을 알 수 있고 이로부터 부정방정식을 풀 수 있다. 좌우변의 편차가 2%가 내외가 될 때까지 개선된 추정식 $\lambda_{eq2}, \lambda_{eq3} \dots$ 로 축차근사계산을 실시한다.

2) 장성광업소 등가열전도율

장성광업소 갱내를 대상으로 갱도별로 실시하였다. 풍량은 풍속을 3회 이상 측정하여 계산한 평균치와의 차이가 $\pm 5\%$ 내외인 것만을 다시 평균하여 구하였다.

장성광업소의 등가열전도율 λ_{eq} 은 평균 $10.765(\text{Kcal/mh } ^\circ\text{C})$ 이고, 갱도의 습한 정도, 물의 유무, 갈라진 틈 등 갱도의 특성이 반영된 실제 등가열전도율(λ_i)은 $3.199(\text{Kcal/mh } ^\circ\text{C})$ 로 계산되었다.

5. 온도 예측 프로그램 TemPredict(Temperature Prediction Program)의 개발

5.1 개요

이 프로그램은 광산에서 새로운 갱도를 굴착하였을 때, 지하공간의 공기의 습윤 상태 및 열적특성을 손쉽게 비교적 정확하게 예측하기 위하여 개발된 프로그램이다. 원도우 상에서 엔지니어들이 개념적이며 상세한 통기 시스템을 설계할 수 있도록 지하공간의 수직갱이나 경사로 혹은 전략지역의 공기길 등의 열적 특성을 구간 별로 예측할 수 있다. 이 프로그램은 심부 지하공간의 특성치를 입력 값으로 하며, 이 입력 값은 지하공간의 환경인자 즉 온도 인자를 지배하게 된다. 프로그램에서 사용한 단위는 국제단위(SI) 단위를 사용하였다.

프로그램의 입력 값, 즉 초기 조건은 건구온도, 습구온도, 압력, 유량, 갱도길이, 갱도의 심도, 주변장, 마찰계수, 젖음 정도, 갱도연령, 처녀암반온도, 지열온도구배, 열전도도, 열확산계수로 되어 있다. 갱도를 구성하는 개개의 브랜치(branch)는 서로 연결되어 전체의 네트워크를 형성하게 된다. 프로그램 상에서 예측되는 지하공간은 균질한 암반 상태를 가진 원형 터널에서 방사성인 열적 흐름으로 표현된다고 가정한다. 하지만 실제 터널에서는 원형 터널로 되어있지 않으며, 암반 상태도 단층, 절리와 같은 암반 내 균열이 존재할 수 있으므로 균질하다고 볼 수 없다.

이러한 문제점들을 프로그램에 반영하기 위해 artificial neural network(인공 신경망)를 도입하여, 암반의 특성을 실제와 유사하게 접근할 수 있도록 하였다. 인공신경망은 인간이나 동물들이 가지고 있는 생물학적인 뇌의 신경세포(neuron)를 모델화하여 인공적으로 지능을 부여 하는 것이다. 즉 인간의 뇌에 존재하는 생물학적 신경세포와 이들의 연결 관계를 단순화시켜 수학적으로 모델링하여 인간의 두뇌가 나타내는 지능적 형태를 구현하는 것이다. 인간이 학습을 통하여 사물을 식별하고 판단하듯이, 인공 신경망도 암반 특성 즉 암반의 열전도도에 영향을 주는 인자들을 입력 값으로 하여 사용자가

정해주는 반복 횟수만큼 학습을 하여 인공적인 지능을 갖게 된다. 이렇게 학습이 이루어진 값을 이용하여 새로운 곳의 열전도율을 예측할 수 있게 된다.

5.2 열전도율 예측을 위한 인자

갱내열전도율 대한 예측에 관계한 문제 중의 하나는 그것의 방출에 원인이 되는 인자들의 수이며, 이러한 인자들에 대한 양질의 데이터 획득이 필요하다. 갱내의 열전도율에 영향을 미치는 암반의 열적 요소들에 관계하는 것으로 판단하여 다음의 9가지 인자를 열전도율 예측에 이용하였다.

- ① 작업장의 심도
- ② 건구온도
- ③ 습구온도
- ④ 통기량
- ⑤ 경과년도
- ⑥ 암반습윤도
- ⑦ 압력
- ⑧ 건구온도차
- ⑨ 지하수

위의 아홉가지 인자 중 건구온도와 습구 온도는 sling psychrometer는 사용하여 각각 3회씩 측정하여 산술 평균하였으며, 통기량은 Hot wire를 사용하여 fixed-point traversing method로 측정하고, Vane anemometer 사용하여 continuous traversing method로 측정하여 산술평균하였으며, 공기속도와 단면적을 이용하여 통기량을 계산하였다(Hartman, 1982). 경과년도는 장성광업소 자료를 이용하였으며, 암반습윤도는 벽면의 젖음정도를 1(건조한 상태)에서 5(젖은 상태)단계로 나누어서 목측하였으며, 지하수는 0(없음)에서 5(갱내수량이 많은 상태)단계로 나누어서 측정하였다.

5.3 열전도율 예측을 위한 인공신경망 구조

1) 인공신경망의 이론적 배경

인공신경망은 인간의 뇌에 존재하는 생물학적 신경세포와 이들의 연결 관계를 단순화시켜 수학적으로 모델링하여 인간의 두뇌가 나타내는 지능적 형태를 구현한다. 따라서 인공신경망은 연속적인 학습에 의해 이전의 데이터를 보간(interpolation)하는 방식으로 복잡한 비선형 시스템의 제어에 적합하다고 할 수 있다(Lippman, 1984; 이상용, 1998; Minsky and Papert, 1969). 현재 신경 회로망 기법은 제어기 설계, 패턴 인식, 최적화 문제 등에 광범위하게 응용되고 있으며 제어 시스템에 응

용되는 대표적인 기법으로는 기존의 선형 제어 방식과 신경 회로망을 결합한 방식을 들 수 있다(Hebb, 1949; Rumelhart, 1986; Hinton, 1984). 현재 신경망 알고리즘 중 역전파(Back-propagation) 방식이 사용상의 용이성 때문에 가장 많이 쓰이는 알고리즘이다. 역전파방식은 내부적인 귀환환이 없기 때문에 정적인 맵핑이라고 불린다. 구조적으로 출력층, 다수의 은닉층, 입력층으로 구성되지만, 출력층과 하나의 은닉층, 입력층으로 충분히 비선형 시스템의 동작과 제어가 가능하다(Wasserman, 1993; 이상원, 1998). 역전파알고리즘은 입력 벡터(Vector)가 나열되어있는 예제를 통해 반복적으로 출력을 각각의 입력에 따라 수정해가며 학습한다. 각각의 학습과 일을 거치는 것이 하나의 주기이다. 각 주기 동안 네트워크는 실제의 결과를 가지고 목적하는 결과와 비교해서, 에러를 산출한 뒤, 그 에러를 최소화하기 위해 가중치(Weight)를 조절한다(James A. Freeman, David M. Skapura, 1992). supervised training이라 불리는 이 과정을 통해, 네트워크는 올바른 결과와 입력 패턴을 연관시키는 것을 학습하게 된다. 누적된 변화 값은 네트워크가 학습한 것을 나타내며, 학습한 방법을 보존하는 가중치(weight)를 저장하는 것을 나타낸다(Welstead, 1994).

일반적으로 출력층에서 나온 결과 벡터(O_{pj})는 실제의 결과 벡터(T_{pj})와는 같지 않다. 이들 간의 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum (T_{pj} - O_{pj})^2 \quad (17)$$

전체 오류는 학습 오류의 합으로서 계산된다.

$$E_t = \sum E_p \quad (18)$$

학습 오류를 감소시키기 위해서 가중치는 전방향전파와 역전파를 반복하면서 가중치를 변화 시킨다. 식 (17)과 식 (18)은 이러한 계산을 수행하게 된다. 이러한 처리는 정해진 역치오류(threshold error)까지 계속 수행된다. 신경망의 오류는 일반적으로 RMS(Root Mean Squared error) 혹은 SSE(Summed squared error)를 사용하여 최소로 수렴되기까지 계속된다.

2) 열전도율 예측을 위해 개발된 신경망의 구조

본 연구에서 개발된 프로그램은 역전파 알고리즘을 기본으로 장성광업소의 안전 관리자들이 용이하게 사용할하도록 하기 위하여 windows 기반을 둔 Visual C++로 작업을 하였다. 또한 사용자의 편의를 위해 간단한 인터페이스(버튼조작)로 결과를 한눈에 쉽게 알아볼 수

있도록 하였고, 현장의 실측 데이터를 이용하여 계속적인 학습이 가능하도록 하였으며, 보다 현실적으로 적용 가능한 프로그램을 만드는데 초점을 두었다. 개발된 인공신경망은 Fig. 3과 같이 9개의 인자를 받아들이는 입력층(Input Layer)과 5개와 3개의 뉴런을 가지는 두 개의 은닉층(hidden layer)로 구성되어져 있다.

6. 갱내 기상 예측 프로그램(TemPredict)을 이용한 -425 ML의 온도 예측

6.1 인공신경망의 학습과정

개발된 neural network에 인공지능을 부과하기 위한 학습에 이용된 데이터는 위의 9가지 인자들의 값을 현장 측정을 통해서 구하였다. 인자들의 수치적 차이에서 오는 영향성을 배제시키기 위해서 각 인자들의 실제값을 10~1000으로 나누어 준 값을 이용하여 학습시켰다(normalization). 예를 들어 작업장의 심도가 -300 ML일 경우 지표와의 심도를 고려하면 900 m가 되나 이를 100으로 나누어준 '9'라는 심도 수치를 입력하는 것이다. 이는 다른 인자의 변화폭과 심도와 같이 변화가 많은 것을 일반화 시켜주기 위한 작업이다.

학습을 위한 learning rate는 0.5를 이용하였으며, 9개의 인자를 가지는 11개소의 온도 및 갱내 열적 데이터를 입력하여 반복적인 학습을 시켜 인공 지능을 부과하였다. 그 결과 열전도율 예측 네트워크의 경우 10,000번의 반복 학습을 시킨 결과 에러치(E_p)는 8.0×10^{-6} 을 보임으로써 충분히 학습되었음을 입증하였다. 이러한 반복적

인 학습을 통하여 학습된 네트워크를 이용하여 장성광업소 현장 적용성을 검토하여 보았다.

6.2 갱내 온도 결과치 비교

장성생산부 -300 ML 하반구 입구를 인공지능을 가진 네트워크로 예측해 본 결과 실제 측정치 온도가 25.7℃였으며, TemPredict 프로그램으로 시뮬레이션 한 결과 25.65℃로 실제치와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 또한 철암 생산부 -300 ML의 배차실 입구에서의 온도를 예측해 본 결과 실제치와 0.04℃의 차이를 나타냈다. 이는 실제와 0.05℃의 차이를 나타내며, 오차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 검증결과 95% 이상의 높은 신뢰도를 나타낼 것으로 판단되었다.

6.3 TemPredict 프로그램을 통한 -425 ML 온도 예측

TemPredict 프로그램을 사용하기 위해서 통기량이 반드시 필요하며 개발중인 갱도의 통기량 예측을 위해서 VnetPC를 사용하였다(김진 외, 2000). -425 ML의 갱도 구조가 -375 ML과 같다고 가정하였으며, 통기회로 역시 상부레벨과 같은 방법과 구조로 통기 시킬 것으로 가정하여 통기량 수치해석을 하였다.

VnetPC 수치해석을 위해서 보통의 경우에 갱내에서 마찰계수(friction factor) K를 McElroy의 값 0.015 kg/m^3 를 사용하였고, 갱내의 벽면 상태에 따라 그 값을 변화시켰다. 갱도의 단면적과 갱도 길이는 실제로 측정한 값을 사용하였으며, L_e 는 equivalent length method를 이용하였다.

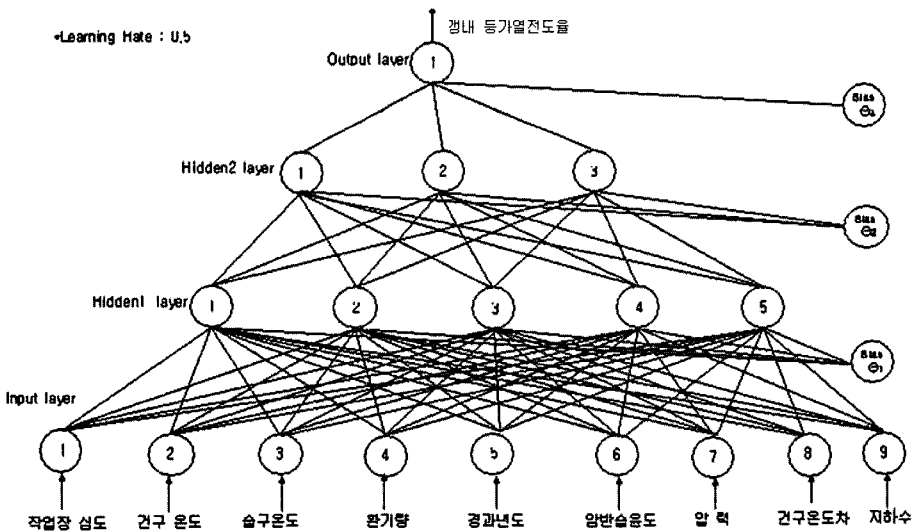


Fig. 3. Structure of developed artificial neural network

각 갱도의 저항의 계산 후에 선풍기(Fan)는 주선풍기, 보조선풍기, 국부선풍기로 나누어지며 실제의 위치하고 있는 브랜치에 위치시키고 선풍기 특성곡선을 이용하여 각각의 압력과 풍량을 입력시켜 수치해석한 결과 -425 ML 9X의 입기량은 520 m³/min로 예측되었다.

TemPredict 프로그램 이용하여 현재 굴진중인 -425 ML의 주운반갱도가 관통이 되었을 때의 장성생산부 주운반갱도 9X 온도를 예측하여 보았다. 갱내 주 운반갱도에서의 온도 예측은 각 지점 별 진습구 온도, 압력, 유량, 갱도 길이 및 깊이, 갱도 형상, VRT(virgin rock temperature), 마찰계수, 열전달계수, 확산계수 등의 변수 입력을 하여 프로그램을 구동시켜야 한다. 600 ML에서 입기되는 공기의 건조온도는 18.50°C, 습구온도는 16.30°C로 하였으며(2006년 9월 기준), 갱내 형상에 관계된 변수들은 상부레벨과 같다고 가정하였다. -425 ML 9X의 입기량은 520 m³/min로 입력시킨 결과 갱내 기상 온도는 건구온도 28.2°C, 습구온도 28.2°C로 예측 되었다. 건구온도와 습구온도가 같은 이유는 갱내의 습도가 높기 때문이다.

7. 결 론

본 연구는 인공신경망을 이용한 갱내 기상 예측 프로그램을 개발함으로써 미개발 지역에서의 온도를 예측하고자 하였으며, 이를 통하여 얻어낸 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 개발된 TemPredict 프로그램의 특징은 artificial neural network(인공 신경망)을 이용하여 열전도율을 예측함으로써 보다 빠르고 정확한 갱내 온도를 예측할 수 있으며, 현장의 실측 데이터를 이용하여 지속적인 열전도율 학습이 가능하다.
2. 장성생산부 -300 ML 하반구 입구를 예측해 본 결과 실제 측정치 온도가 25.7°C였으며, TemPredict 프로그램으로 시뮬레이션 한 결과 25.65°C로 실제치와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 이는 실제와 0.05°C의 차이를 나타내며, 오차 범위 5% 이내에 포함되는 것으로 검증 결과 95% 이상의 높은 신뢰도를 나타내었다.
3. 현재 굴진중인 -425 ML의 주운반갱도가 관통이 되었을 때의 장성생산부 주운반갱도 9X 온도를 예측하기 위하여 VnetPC를 이용하여 통기량 예측을 하였으며, TemPredict 프로그램을 이용하여 갱내 기상온도를 예측한 결과 주운반갱도 9X의 온도는 28.2°C로 예측되었다.

4. TemPredict 프로그램을 이용한 정확한 온도 예측을 위해서 보다 많은 양질의 데이터 수집은 필수적이며, 이를 위해서 지하 작업장에서의 여러 인자들에 대한 지속적인 모니터링과 데이터 베이스화가 요구된다.

본 연구는 갱내 심부에서의 온도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 미개발 지역의 온도를 보다 정확히 예측할수 있도록 하고 갱도의 규격이나 국부선풍기, 보조선풍기 등의 용량을 산정하여 최상의 통기 계획을 마련함으로써 작업원들에게 보다 쾌적한 환경을 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 광산이나 지하구조물의 설계시 정확한 온도예측을 가능하게 하여 통기시스템 설계에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김진 외, 2000, "심부 석탄광산의 냉각방법에 관한 연구", 대한석탄공사.
2. 이상엽, 1998, "Visual C++5 programming 2주 완성", 영진출판사.
3. 이상용, 1998, "인공지능", 상조사.
4. 이상원, 1998, "학습하는 기계 신경망", Ohm 사.
5. 임태균, 1993, "다층 신경회망을 이용한 GMA 용접공정에서의 용융지의 크기 예측 및 제어에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문.
6. 조원재, 강창희, 이상권, 이종립, 김충한, 홍성규, 1995, "가행광산 갱내 안전진단 및 대책 연구", 한국자원연구소.
7. 조원재, 강창희, 이상권, 이종립, 김충한, 홍성규, 1996, "가행광산 갱내 안전진단 및 대책 연구(II)", 한국자원연구소.
8. 천아훈삼, 1987, "심부탄광의 기술적 문제점", 흙의 기초, 35(6), pp. 39-44.
9. D.W.Dixon, C.S.Özveren, A.T.Sapulek & M.A.Tuck, "The application of neural networks to underground methane prediction".
10. G.E. Hinton, T.J. Sejnowski, and D.H. Ackley, "Boltzmann machines: Constraint Satisfaction networks that learn", Carnegie Mellon Univ. Technical Report #CMU-CS-84-119, CMU, May, 1984.
11. H. L. Hartman, 1982, "Mine ventilation and air conditioning(second edition)", A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION.
12. Hemp, R., 1989, "Environmental Engineering in South African Mines", The Mine Ventilation Society of South Africa, 571.
13. James A. Freeman, David M. Skapura, 1992, "Neural networks algorithms, applications, and Programming techniques", Addison-Wesley publishing company.
14. McPherson, M. J., "Subsurface Ventilation and Environmental Engineering", Chapman & Hall, 131(1993).
15. McPherson, M. J., "The Resistance to Airflow of Mine Shafts", (1987).
16. Mücke, G., 1964, "Die Wärmeleitfähigkeit von Karbonge-

- steinen und ihr Einfluß auf das Grubenklima”, Bergbau-Archiv, 25(2), pp. 35-38.
17. P. D. Wasserman, 1993, advanced methods in neural computing, Van Nostrand Reinhold, New York.
 18. R.P. Lippman, “An Introduction to Computing with Neural Nets”, IEEE Computer, Vol. 21, No. 3, pp. 11-22, March, 1988.
 19. Simon Haykin, 1994, “Neural networks - A comprehensive foundation”, Macmillan publishing company.
 20. Voß, J., 1965, “Beitrag zur Vorausberechnung der Erwärmung und Wasserdampfaufnahme der Wetter in Steinkohlenbergwerken”, Glückauf-Forschungshefte, 26(4), pp. 187-198.
 21. Voß, J., 1984, “Klimavorausberechnung und Klimaplanung im deutschen Steinkohlenbergbau”, Glückauf-Forschungshefte, 45(2), pp. 76-79.

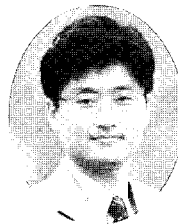
김윤광



1997년 2월 인하대학교 자원공학과 공학사
 1999년 8월 인하대학교 자원공학과 공학석사
 2005년 2월 인하대학교 자원공학과 박사수료

Tel: 031-828-0742
 E-mail: skyblue31@hanmail.net
 현재 대한석탄공사 기술연구소 선임연구원

김진



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

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