

열적지표를 적용한 국내 고심도 석탄광산의 열환경 평가 연구

박선오, 노장훈, 김 진*

A Study on Evaluation of Thermal Environment using Heat Stress Indices for Deep Coal Mine in Korea

Seon-oh Park, Jang-hoon Roh, Jin Kim*

Abstract In this study, the thermal environment in a large scale coal mine located in Taebaek, Gangwondo was assessed by a field survey. In order to estimate the thermal environment, various heat stress indices such as WBGT, HSI, ESI, KATA index and effective temperature were investigated. Correlation analysis was also conducted. It was found that the thermal environment in most workplace was high. In particular, the correlation coefficient between HSI reflected in physiological fatigue characteristic and the maximum sweat evaporation heat was -0.834. This shows that the correlation coefficient have the most influence on HSI index. The factor which has the most influence on the maximum sweat evaporation heat is velocity of air. The thermal environment of high-depth coal mines is likely to be improved by installing a structure that enables the maximum prevention of extended digging, air doors, or the leakage of the inflow of air in the first shaft.

Key words Heat stress indices, Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), Thermal Environment, Heat Stress Index (HSI)

초 록 본 연구에서는 현장실측을 통하여 강원도 태백에 위치한 대규모 석탄광산의 열환경을 평가하였다. 열환경 평가를 위하여 WBGT, HSI, ESI, KATA 지수 및 유효온도 등 다양한 열적지표를 적용하였고, 상관분석을 실시하였다. 분석결과 대부분의 작업장에서 높은 열환경이 평가되었고, 특히 열적지표 중 인체의 생리학적 특성을 반영하는 HSI와 최대 땀증발열의 상관계수는 -0.834이고 이것은 HSI 지표에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 최대 땀증발열에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 공기속도이다. 따라서 운영 중인 제 1수직갱의 연장 굴착 또는 공기 누기를 방지하기 위한 구조물을 설치함으로써 환기량 증대를 통해 작업장의 열환경을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 열적지표, WBGT, 열환경 평가, 열적스트레스 지수

1. 서 론

현재 국내 가행중인 석탄광산은 오래된 가행년수에 따라 점차 심부로 개발이 진행되고 있다. 이러한 심부 지역에서의 채광 시 갱내 환경 제어가 까다롭기 때문에,

최근 국내 석탄광산에서는 작업장의 온도 상승으로 인한 갱내 안전사고가 빈번하게 발생하고 있는 열악한 실정이다.¹⁾

강원도 태백에 위치한 고심도 석탄광산의 경우 갱내 온도가 33℃ 정도에 이르며, 습도는 90%를 상회하고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 열적지표를 통하여 연구광산의 열악한 작업환경의 원인을 파악하고, 작업환경을 개선하기 위한 방법을 제시한다.

작업자에게 미치는 열적지표를 나타내는 대표적인 방법에는 WBGT(Wet Bulb Globe Temperature), HSI(Heat Stress Index)를 포함하여 ESI(Environmental Stress Index), 유효온도(Effective Temperature), 카타지수(KATA Index) 등이 있다.²⁾ WBGT방법은 건구온도와 습구온

Received: Mar. 5, 2014

Revised: Mar. 26, 2014

Accepted: Mar. 26, 2014

***Corresponding Author:** Jin Kim

Tel) +82328727551, Fax) +82328727551

E-Mail) jinkim@inha.ac.kr

Department of Energy and Resources Engineering, INHA University 100 INHA-ro, Namgu, Incheon 402-751 Korea

도, 그리고 일사량에 의한 흑구온도를 바탕으로 계산하는 열적지표이고³⁾, HSI는 신진대사열과 같은 인체의 생리학적 지표를 바탕으로 계산되는 열적지표로서 인체의 생리학적 특성을 적용할 수 있어 열환경 평가에 가장 효과적인 방법이다. 건구온도 뿐만 아니라 다양한 인자들이 함께 적용되어 광산 내 열적지표로 활용이 되고 있지만, 국내의 경우 건구온도만을 기준으로 열적지표로 활용되고 있기 때문에 그 신뢰성에 대한 문제가 제기되고 있는 실정이다. 이에 따라서 본 연구에서는 다양한 방법을 적용하여 연구광산의 열적지표를 각각 산정해보고, 이를 바탕으로 국내광산보안법의 보완 및 개정에 도움이 되고자 하였다. 또한 HSI 지표의 정확한 분석을 실시하기 위하여 HSI에 포함된 각 인자들간의 상관관계를 분석하였고, 이러한 결과를 통해 광산의 열환경을 개선시키기 위한 방법을 제시한다.

2. 열적지표 이론

광산환경을 평가하기 위해서 필요한 인자들은 여러 가지가 있지만, 일반적으로 광산 내 열환경을 평가하는데 반영되는 인자들은 건구온도, 습구온도, 공기의 속도, 카타지수가 있다.⁴⁾

건구온도는 사용하는 범위와 측정도 쉽고 일상적으로 가장 많이 사용하는 온도이다. 실제로 현재 광산보안법에서도 갱내 온도에 대한 규정은 건구온도를 사용하고 있지만, 갱내 작업자들의 열적스트레스를 평가하기 위해서는 한계가 있다. 따라서 이를 보완하여 현재 광산 선진국가에서는 습구온도가 포함된 갱내 열적지표를 사용하고 있다. 온도가 높고 습한 작업환경에서 작업자가 실제로 느끼는 환경은 땀의 증발과 습기와 대기상태에 의한 의존비율이 높기 때문에 습구온도는 광산 내 법을 규정하는데 있어서 반드시 필요한 요소이다. 상대적으로 습구온도에서 0.6℃의 변화는 건구온도에서 5.6℃가 변화하는 것과 같은 생리학적인 느낌을 갖게 하기 때문에 습구온도의 제어가 광산환경평가에 매우 민감한 요소임을 알 수 있다.⁵⁾

습구온도 다음으로 작업자의 열적스트레스에 직접적인 영향인자는 갱도내의 공기 속도가 있다.⁵⁾ 온도가 높고 습한 환경에서 일정량의 공기량의 증대와 공기속도가 개선된다면 작업자가 느끼는 열적 스트레스는 감소할 수 있다. 하지만 공기속도를 증가시키는 것은 광산 내 전반적인 환기네트워크의 보완과 더불어 선풍기의 활용 등 운영비가 증가되기 때문에 사전에 계획적인 환기네트워크의 설계가 매우 중요한 요소로 자리 잡아야 한다.

갱내 열환경은 건구온도, 습구온도, 습도, 속도, 복사열 등 기후 인자들을 측정하여 열적지표를 나타낼 수 있다. 열적지표는 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 건구온도, 습구온도, 복사열의 값을 사용하여 평가하는 WBGT 방법과 Belding과 Hatch가 최대 땀 증발열, 복사열, 대류열, 신진대사열을 고려하여 제시한 HSI를 연구광산에 적용하였다.⁶⁾⁷⁾ 또한 Houghton와 Yaglou가 제안한 유효온도(Effective Temperature)⁸⁾, Moran 외 6인이 개발한 ESI⁹⁾, 영국의 생리학자 Hill.L이 개발한 카타지수(Kata Index)¹⁰⁾등의 열적지표도 함께 적용하였다.

2.1 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

WBGT 방법은 흔히 알고 있고 있는 건구온도뿐만 아니라, 습구온도와 태양복사열의 흑구온도를 반영한 지표이다.¹¹⁾ WBGT는 인체에 가장 큰 영향을 미치는 온도를 습구온도로 규정하며, 습구온도가 WBGT 온도값의 70%를 차지하게 된다. 여기에 실내와 실외를 구분하여 실외의 경우 20%의 흑구온도를 적용하여 계산하게 된다. 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 식 (2)로 각각 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$WBGT_{OUT} = (0.7 \times \text{습구온도}) + (0.2 \times \text{흑구온도}) + (0.1 \times \text{건구온도}) \quad (1)$$

$$WBGT_{IN} = (0.7 \times \text{습구온도}) + (0.3 \times \text{건구온도}) \quad (2)$$

2.2 HSI (Heat Stress Index)

HSI는 복사열교환, 대류열교환, 신진대사열 및 최대 땀 증발열의 값을 통하여 인체의 생리학적 특성을 반영할 수 있는 지수이다. HSI지수를 구하기 위해서는 다음과 같이 식 (3)을 통하여 계산할 수 있다.¹²⁾

$$HSI(\%) = \frac{M+R+C}{E_{max}} \times 100 \quad (3)$$

M 은 신진대사열, R 은 복사열교환, C 는 대류열교환, E_{max} 는 최대 땀 증발열을 의미한다.

식 (3)을 통하여 계산된 HSI지수가 0을 나타내면 이는 8시간의 작업 시 땀을 발생시키지 않고도 충분히 체온을 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 반대로 HSI 지수가 100을 초과하게 되면 작업장의 환경 및 주변 상황에 적응한 작업자가 견디는 최대의 열적 스트레스가 작용하고 있는 것을 나타낸다.⁷⁾ HSI지수는 고온 작업환

경에서 일정한 간격의 작업과 휴식을 반복 시 발한에 의한 발열량의 정도를 통하여 작업자의 작업환경을 평가할 수 있다.

HSI계산에 필요한 각 항목의 구체적 설명은 다음과 같다.

2.2.1 신진대사열의 계산

신체 내부의 온도는 근육을 사용하는 활동량에 따라서 36~38℃의 범위를 가지고 있으며, 피부온도는 신체의 표면, 의복, 작업장에서의 온도나 공기의 유속 등 다양한 변수가 발생할 수 있지만 평균 34℃정도를 나타낸다.¹⁴⁾ 인체는 적절한 온도수준을 유지하기 위해 끊임 없이 외부환경과의 열교환작용을 하며, 체내의 대사작용에 의해 생성되는 열량과 환경조건에 따른 열교환이 발생한다.¹⁵⁾

본 연구에서 신진대사열에 반영되는 작업자의 피부면적은 1.7 m, 70 kg로 가정하여 계산하였고, 피부면적을 구하기 위해서는 식 (4)를 통해 계산할 수 있다.

$$A_{sk}(m^2) = 0.202m_b^{0.425} \times h_b^{0.725} \quad (4)$$

위 식에서 m_b 는 사람의 몸무게(kg)를 의미하고, h_b 는 사람의 키(m)를 의미한다. 피부면적은 작업자의 신진대사열 기초자료에 필요한 것이며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 작업의 강도에 따라 신진대사열을 적용하였다.

복사열교환, 대류열교환, 증발열교환에 있어 작업자의 피부온도(t_{sk})는 중요한 영향을 미치는 인자이며, HSI지수를 구하는데 있어서도 기초적인 자료로 제공된다. 작업자의 피부온도는 작업장의 건구온도 및 공기속도와 밀접한 관련이 있으며, 작업자가 착용하고 있는 의복의 열 저항 및 피부의 수분성에 따라 다르게 나타

날 수 있다. 작업자의 피부온도는 다음과 같은 식 (5)를 통해 나타 낼 수 있다.

$$t_{sk}(\text{℃}) = 24.85 + 0.322t_d - 0.00165t_d^2 \quad (5)$$

위 식에서 t_d 는 건구온도를 의미한다.

신진대사열을 측정하는 방법은 ACGIH에서 제시한 작업자들의 작업강도 및 작업량에 따른 측정법을 사용한다. 일반적으로 신진대사열의 발생은 근육의 활동량, 개인의 건강상태나 심리적인 상태에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 Table 1을 활용하였다.¹⁵⁾

2.2.2 대류 열교환

대류열교환은 인체주위의 공기온도와 인체 피부의 온도차로 인한 주위 환경과 교환하는 열을 의미한다. 어떤 유체가 고체표면을 흐르게 되면 경계면을 통하여 층류가 흐르게 되는데 이 경계면이 열교환을 제어하는 역할을 하게 된다. 더 빠른 속도로 유체가 흐르게 되면 이 경계면은 굉장히 얇게 변하기 때문에 대류열교환은 건구온도와 피부온도 뿐만 아니라 공기의 속도에도 영향을 미치게 된다. 대류 열교환(C)의 계산은 식 (6)과 같다.

$$C = 0.756k \frac{BTU}{hr} \times (t_d - 95) \times V^{0.6} \quad (6)$$

t_d 는 건구온도(°F)를 의미하고, k 는 작업자가 착용한 의복의 계수이고 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. V 는 공기의 속도(fpm)를 나타낸다. 식 (4)는 공기의 속도가 0보다 클 때에만 적용 가능하다.

$$k = 1 - 0.5 \times (do) \quad (7)$$

Table 1. Metabolic rates for various activities¹⁵⁾

Activity	Metabolic heat production	
	W	W/m ²
Sleeping	73	40
Seated	107	58.5
Standing but relaxed	128	70
Walking on the level at	1m/s	130
	1.4m/s	175
	1.8m/s	220
Manual work	Very light	95
	Light	145
	Moderate	245
	Heavy	340

Table 2. Threshold limit value correction factors in °C for clothing¹⁵⁾

Clothing type	Clo. value
Summer work uniform	0.6
Cotton coveralls	1.0
Winter work uniform	1.4
Water barrier, permeables	1.2

식 (7)에서 clo는 착용하고 있는 옷의 종류에 따라 서로 다른 교정인자로서 Table 2와 같다.

2.2.3 복사 열교환

절대 0도 이상의 모든 물체는 복사열을 방출한다. 인체 또한 끊임없이 주위의 환경과 복사열 교환을 하고, 근적외선 대역의 주파수를 가진 전자기 방사선은 열로서 감지를 한다.¹⁶⁾ 복사열교환을 계산하기 위해서는 건구온도, 흑구온도, 공기속도가 필요하며 일반적으로 신체의 피부온도는 34°C이다. 이를 기준으로 신체의 피부온도가 34°C를 초과하게 되면 주위로 복사열을 방출하게 되며, 이 이하의 온도가 되면 신체는 복사열을 흡수하게 된다. 주위환경으로부터의 복사열에 의한 온도를 벽온도(Wall temperature)라고 하는데 공기가 존재하지 않는 환경에서 인체의 벽온도는 흑구온도와 같게 된다.¹⁶⁾ 하지만 태양복사를 통한 공기는 끊임없이 복사열을 통하여 에너지를 교환하고, 인체 또한 공기와의 마찰을 통하여 열을 손실하게 된다. 벽온도는 식 (8)을 통해 계산된다.¹⁶⁾

$$T_w = [(GT + 460)^4 + 1.03 \times 10^8 \times V^{0.5}(GT - t_d)]^{\frac{1}{4}} - 460 \quad (8)$$

위 식에서 GT는 흑구온도(°F)를 의미하고, V는 공기의 속도(fpm), t_d는 건구온도(°F)를 의미한다. 위 식에 언급된 460은 온도의 단위 환산을 통해 화씨온도로 바뀌주기 위해 필요한 상수이다. 또한 복사열 교환(R)은 벽온도(T_w°F)를 이용하여 다음과 같은 식 (9)을 통해 계산된다.¹⁷⁾

$$R = 17.5 \frac{BTU}{hr} (T_w - 95) \quad (9)$$

벽온도가 피부온도보다 높게 되면 복사열교환은 양의 값을 가지게 되며, 이는 주위 환경으로부터 복사열을 흡수하게 된다. 반대로 벽온도가 피부온도보다 낮게 된다면, 인체의 복사열교환은 주위환경으로 열손실이 일어난다.

2.2.4 최대 땀 증발열

인체의 신진대사열을 초과하여 과한 에너지를 갖게 되면 땀을 통해서 열을 제어하며, 열에너지가 땀의 증발을 통해 제거 될 수 있는 열의 양을 최대 땀 증발열(E_{max})이라고 부른다.

최대 땀 증발열은 작업장의 습도와 공기속도에 의해 영향을 받으며, 작업장의 상대습도가 100%를 나타내게 된다면, 최대 땀 증발열은 0이되며, 구하는 식 (10)은 다음과 같다.¹⁶⁾

$$E_{max} = 2k(V)^{0.6}(42 - PPA) \quad (10)$$

k는 작업자가 착용한 의복 계수, V는 공기의 속도(fpm), PPA는 공기 중 수분의 부분 압력(mm Hg)을 의미한다. 최대 땀 증발열은 공기의 속도와 공기 중 수분의 부분 압력에 의해 계산할 수 있다. 또한 공기 중 수분의 부분 압력(Partial Pressure of water in Air)은 습공기 선도표를 통하여 계산할 수 있다.

2.3 ESI (Environmental Stress Index)

ESI는 환경영향지수로서 건구온도, 상대습도 및 태양 복사열의 항목으로 새로운 열적지표로서 개발되었다.¹⁷⁾ ESI는 0~5범위로 나누어지며, 지수의 색(초록색, 노란색, 빨간색, 검은색)을 통해 작업장의 열환경을 평가할 수 있다.¹⁷⁾ ESI지수를 구하는 식은 식 (11)이며 이에 따른 열환경평가는 Table 3과 같다.

$$ESI = 0.63T_g - 0.03RH + 0.002SR + 0.0054(T_a \cdot RH) - 0.073(0.1 + SR)^{-1} \quad (11)$$

T_a는 건구온도(°C), RH는 상대습도(%), SR는 태양 복사(W/m)를 의미한다.

2.4 카타지수(KATA Index)

카타지수는 습구온도 및 공기속도만을 가지고 열환경을 평가하는 지수이다. 카타지수는 갱도 내 공기의 속도를 1 m/s을 기준으로 습구온도(t_w)와 함께 아래와 같

Table 3. Strain index of ESI¹⁸⁾

Strain	ESI	T_a (°C)
No / Little	0-1	25.6 - 27.7
Low	2(Green)	27.8 - 29.4
Moderate	3(Yellow)	29.5 - 31.0
High	4(Red)	31.1 - 32.1
Very high	5(Black)	> 32.2

Table 4. Grade of humidity KATA Index¹⁸⁾

K_w	<5	5~8	12~16	16~25	25~28	28~31	31	>35
State	Sultry hot	Very Hot	Very normal	normal	Very Normal	Cooler	cold	Very cold

은 식 (12)를 통해 계산할 수 있다.¹⁸⁾

$$K_w = (0.35 + 0.85 \sqrt[3]{v} \times (36.5 - t_w)), v < 1m/s$$

$$K_w = (0.10 + 1.10 \sqrt[3]{v} \times (36.5 - t_w)), v > 1m/s \quad (12)$$

위 식 (12)을 바탕으로 하여 작업장의 환경영향을 평가 할 수 있으며, 카타지수를 사용하여 나타난 환경평가는 Table 4와 같다.

2.5 유효온도(Effective Temperature)

유효온도는 경험적인 지표로써 산업현장 및 광산에서 많이 활용이 되고 있다. 유효온도는 작업 시 27°C를 초과하게 되면 유효온도를 감소시켜 작업장의 열환경을 개선해야 하며, 32°C이상을 초과하게 되면 진행중인 작업을 모두 종료해야한다.¹⁹⁾

유효온도를 계산하기 위해서는 건구온도, 습구온도, 공기속도가 포함된 Fig. 1을 바탕으로 계산하게 된다.²⁰⁾

유효온도를 측정하기 위해서는 우선 현장 측량을 통해 건구온도와 습구온도의 데이터를 수집한다. 또한 데이터 수집 측정지점에서의 공기의 속도를 구하여 이를 종합적으로 적용하게 된다. 측정된 건구온도와 습구온도의 데이터를 직선으로 그은 선과 공기속도 그래프의 교차지점이 유효온도가 된다. 수작업을 통한 직접계산이 이루어지기 때문에 측정시간, 구역, 온도에 따라 오차가 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있지만, 현장에 있는 작업자들이 빠른시간 내에 경험적인 지표로 계산하여 갱내 열환경을 빨리 판단하여 조치를 취할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 광산 선진국에서 많이 사용하고 있다.

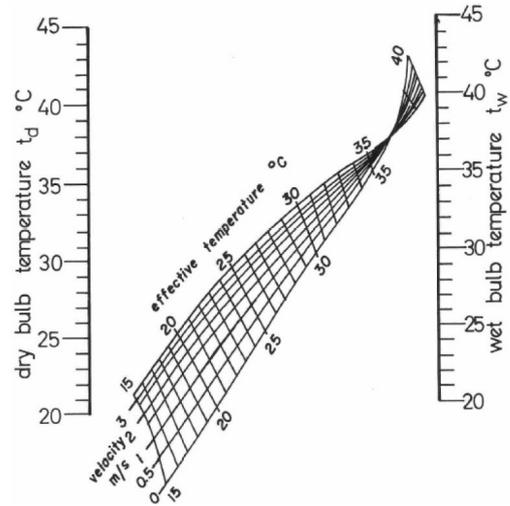


Fig. 1. Effective temperature chart for lightly clothed personnel²⁰⁾

3. 데이터 측정

본 연구광산은 국내 최고심도 석탄광산으로 이곳은 갱구기준 600ML부터 최하부 작업장인 -475ML까지 심부화가 진행되고 있다. 이러한 고심부에서 채탄이 진행됨에 따라서 지하 하부 작업장에서는 평균온도가 33°C, 평균 상대습도가 90%에 도달하여 굉장히 열악한 열환경이 형성되어 있다. 현재 채탄중인 레벨은 -375ML, -425ML, -475ML 이며, 이 중 -375ML에서는 채탄을 마무리 중에 있고, -475ML에서는 채탄을 위한 굴진작업이 진행중이다. 본 연구광산은 -425M에서 가장 활발히

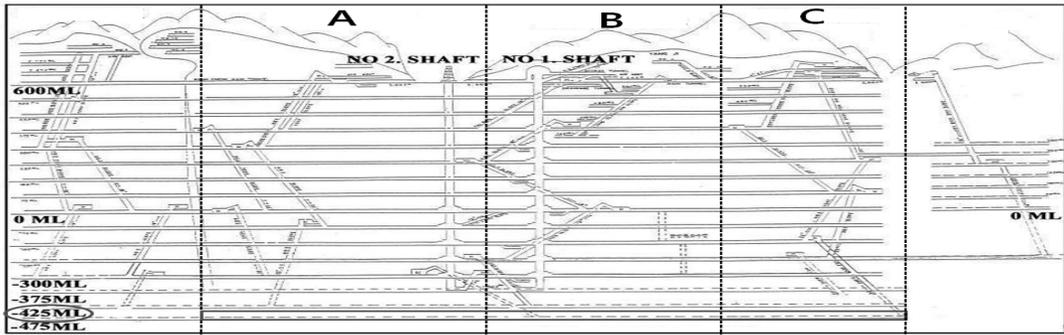


Fig. 2. Sectional view of the coal mine in Taebak

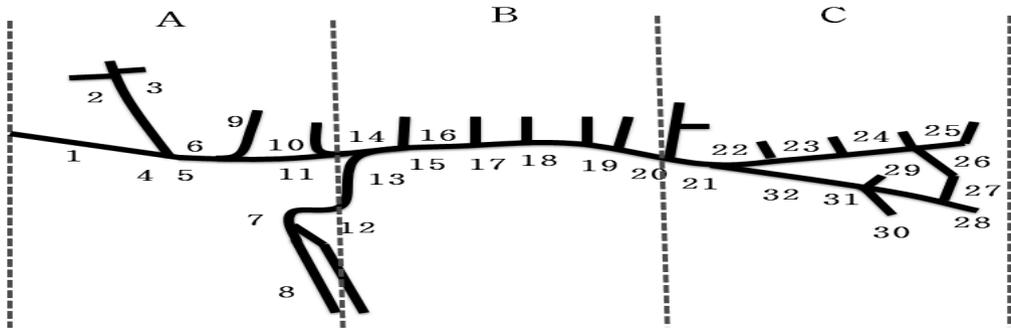


Fig. 3. Data measurement point at -425ML

채탄작업이 진행중이며, 가장 많은 작업자들이 분포되어 있어 열환경 평가가 반드시 필요한 실정이다.

본 연구광산의 개략적인 측면도는 Fig. 2와 같다. 2개의 수직갱을 활용하고 있으며, 2개의 수직갱 이외에도 C지역에서는 사갱을 통한 입기가 형성되어 있으며, -425ML의 냉각기는 주로 B지역에 설치되어 있다. A지역은 현재 가행되지 않고 있는 지역이기 때문에 별도의 냉각기는 설치되어 있지 않다. A지역을 제외한 B,C지역에서는 현재 작업장이 형성되어 있고, 채탄이 활발히 진행되고 있다. 주요 작업장이 분포되어 있는 -425ML에서 Fig. 3과 같은 32개의 측정지점을 선정하고 데이터 수집을 위한 측정을 실시하였다. 실시된 측정 항목은 앞서 언급된 열환경 평가에 공통적으로 활용되고 있는 건구온도, 습구온도, 공기속도 등을 측정하였다. 본 연구의 온도측정에 사용된 정밀 온습도계(CENETR 342)를 사용하였고, 온도계 측정범위는 -30~70℃, 습도 0~100%까지 측정가능하며, 정밀도는 ±0.7℃, ±3%를 나타낸다. 공기속도 측정은 Vane anemometer(TSI사 8324-M-63)와 Hot wire(EXTECH사 407123)를 사용하였으며,

Vane anemometer는 공기공급용 및 배기용의 커다란 개구를 통하여 흐르는 공기의 유속을 정확하게 측정하는 계기이며, 계기의 단면적은 덕트나 후드개구 단면적의 5.0% 이상을 초과해서는 안된다. 또한 Hot wire는 측량하기 곤란한 갱도의 윗부분이나 사람이 쉽게 측량하기 어려운 지역에서 열선풍속계를 사용하여 측정하는 계기이다. 습구온도는 정밀 온습도계를 통하여 측정된 상대습도를 바탕으로 역산하여 계산하여 적용하였다.

4. 연구결과

4.1 WBGT 계산 결과

주 작업레벨-425ML에 위치한 각 작업장에서의 습구온도, 건구온도, 상대습도 및 유속의 측정을 통하여 WBGT를 계산하였다. 전체 입기량의 85%가 입기 되는 제1수직갱근처 A지점에서는 WBGT 온도가 25.4℃ ~ 30.0℃의 WBGT온도가 계산되었다. 이후 B지점과 C지점으로 갈수록 WBGT 온도가 점점 상승하는 것을 확인할 수 있었고, 특히 C작업장에서의 최대 WBGT는

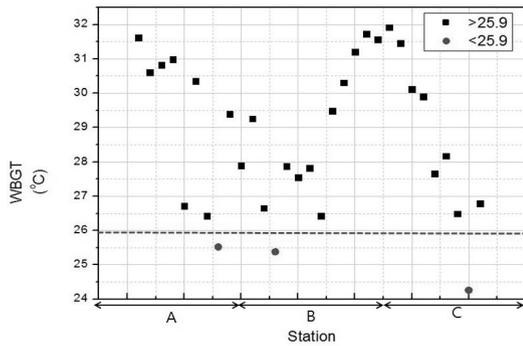


Fig. 4. Results of WBGT calculation and limited value of WBGT in -425ML

31.9°C로 나타났다. 작업자들의 작업시간 및 휴식시간에 따라 다른 값이 나타날 수 있기 때문에 하루 전체시간 중 시간 평균 가중치를 적용하여 WBGT를 계산하였으며, 측정위치는 Fig. 3의 순서대로 나타났다.

A지역에서부터 B지역 사이에서는 제1수직갱의 공기량의 입기로 인하여 WBGT가 감소하는것을 Fig. 4를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 4에 나타난 점선은 현재 ACGIH 및 산업안전보건법에서 제시한 중작업시 75%의 작업과 25%의 휴식시 규정되어있는 WBGT인 25.9°C를 기준을 나타낸다. 대부분의 작업장에서는 25.9°C를 초과하였으며, 이는 -425ML에서 현재 작업 중인 작업자들의 보건 및 안전에 문제점이 있다는 것을 확인할 수 있다. 25.9°C 이상의 지점에서는 위에서 붉은색 점으로 표시하였고, 그 이하의 온도를 나타내는 곳에서는 검은색 점으로 나타났다. 본 연구에서 WBGT 측정 결과 -425ML의 32개 데이터 측정 지점 중 산업안전 보건법에 의한 온도기준 이하인 곳은 단 3곳에 불과하였다.

4.2 HSI 계산 결과

앞서 설명한 HSI계산에 적용되는 복사열교환, 대류열교환, 최대 땀 증발열의 결과값을 바탕으로 HSI지수를 계산하였다. 작업장에서의 HSI지수가 100을 초과하게 되면 매우 열악한 작업환경을 의미한다는 Belding과 Hatch가 제안한 기준을 바탕으로 Fig. 5에 계산결과값을 나타내었다. 계산결과, 제 1수직갱이 분포되어 있는 A 지점과 B지점에서는 40~90%의 HSI 지수가 분포되어 있어, 기준치인 100%를 초과하지 않았다. 하지만 B지역과 C지역에 분포되어 있는 작업장에서는 공기속도의 정체와 전차갱도 내의 높은 온도로 인하여 HSI지수의 기준인 100%를 대부분 초과하였다. 제 1수직갱으로부터 입기된 공기의 양을 B지역과 C지역사이로 효율적으

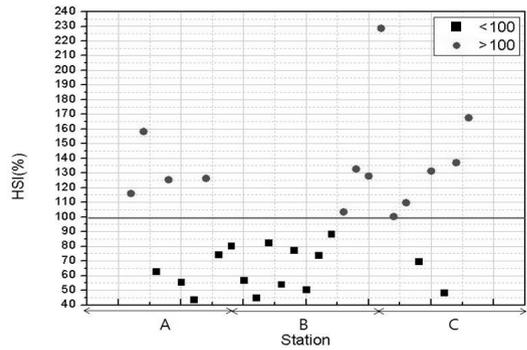


Fig. 5. Results of HSI calculation and limit value of HSI in -425ML

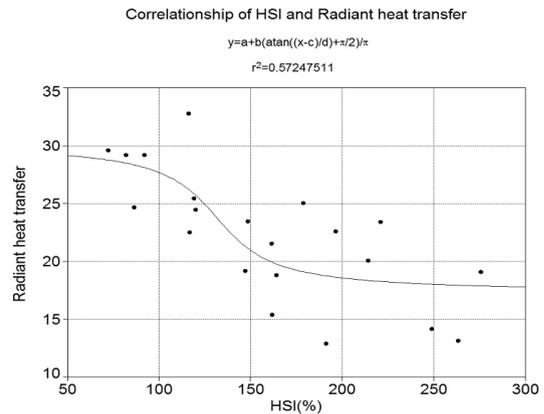


Fig. 6. Correlation analysis of HSI and Radiant heat transfer

로 보낼 수 있는 작업환경 개선방안이 필요한 것으로 판단된다.

HSI지수는 신진대사열, 복사열교환, 대류열교환, 최대 땀 증발열을 통해 계산되며, 계산된 결과를 바탕으로 HSI와의 상관계수를 확인하여 가장 영향력이 있는 인자를 구한다. 이는 열적 스트레스 지수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단 할 수 있으며, 큰 영향인자를 증가 또는 감소시키면 높은 HSI지수를 낮출 수 있다. 각각의 영향인자에 대한 상관분석 그래프를 Fig. 6~8에 나타내었으며, 측정위치는 Fig. 3의 순서대로 나타났다. HSI와 최대땀증발열(Emax)의 상관계수는 -0.834, 복사열전달계수와와의 상관계수는 0.612, 대류열전달과의 상관계수는 0.826으로 나타났다. HSI지수에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 결정된 최대 땀 증발열을 제어할 수 있다면 HSI지수를 효과적으로 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

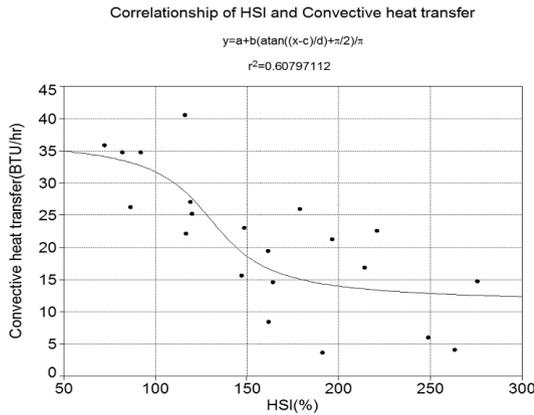


Fig. 7. Correlation analysis of HSI and Convective heat transfer

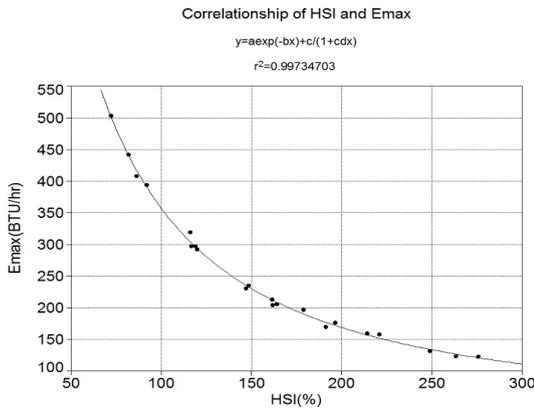


Fig. 8. Correlation analysis of HSI and Emax

4.3 기타 열적지표 결과

WBGT, HSI지수 이외에 앞서 언급한 ESI, KATA 지수, 유효온도에 대한 열적지표를 주 작업레벨 -425ML의 작업장에 적용시켜 열환경을 평가하였고, 이와 관련된 그래프는 Fig. 9~Fig. 11에 나타냈으며, 데이터 측정 위치는 Fig. 3의 순서에 따라 나타내었다. 작업장 A지역은 현재 가행중이지 않음에 따라 냉각기가 설치되어 있지 않다. 따라서 높은 온·습도, 공기의 정체로 인하여 ESI지수는 가장 열악한 평가인 5(Black)를 초과하였다. 또한 KATA지수도 열환경 평가에 있어 가장 열악한 지수인 2~4의 결과값을 나타내었으며, 유효온도 역시 작업중단 온도인 32°C에 근접한 결과를 나타내었다. 작업장 B지역의 초기 데이터측정 지점은 제1수직갱이 위치한 곳이고, 이를 통해 들어오는 신선한 공기에 의해 비교적 안정된 열환경으로 평가되었다. 그러나 주요 작업

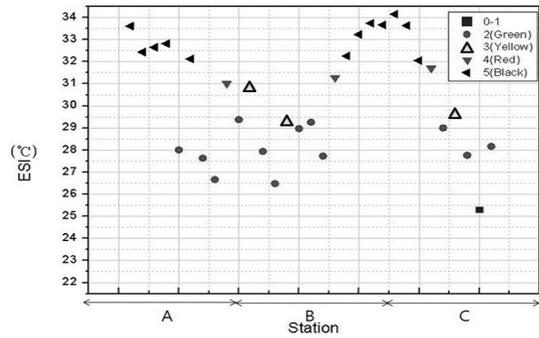


Fig. 9. Evaluation of ESI

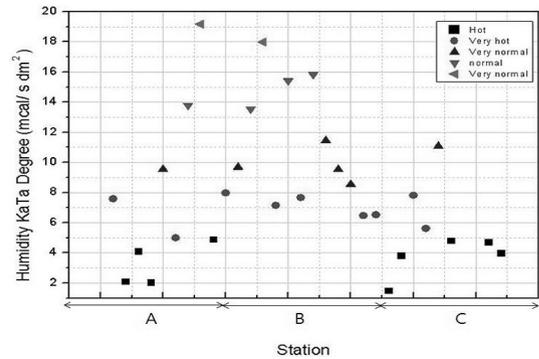


Fig. 10. Evaluation of Kata degree

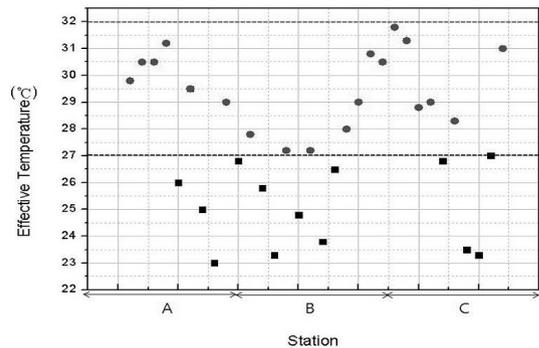


Fig. 11. Evaluation of Effective temperature

장이 분포되어 있는 B지역 데이터 측정 지점과 C지역 사이에서는 공기의 정체, 높은 온도와 습도로 인하여 매우 높은 열환경이 나타났다. 이로 인하여 B~C지역에서는 A지역과 비슷한 ESI지수 5(Black)로 나타났다. 또한 유효온도를 계산해 본 결과 최소값은 23°C 이었으며, 최대값은 31.8°C를 나타내었다. 유효온도 계산 결과, 갱내의 권고온도를 초과한 지역은 17곳으로 나타났

으며 이 역시 대부분이 B~C지역이었다. 붉은점으로 표시된 곳은 권고온도를 초과한 곳이며, 위쪽 붉은 실선은 32℃를 초과하여 작업을 중단해야 하는 온도기준이다. 특히 B와 C지역사이에 분포한 작업장은 전체의 생산량을 담당하는 주요작업장이 분포되어 있다. 따라서 작업자의 보건 및 안전을 위해서는 B와 C지역의 열환경 개선이 가장 시급한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 다양한 열적지표를 적용하여 태백시 고심도 석탄광산의 열환경을 평가하였다. 다양한 열적 지표 중 HSI는 인체의 생리적인 특성을 반영하는 유일한 열적지표로서 HSI를 낮추게 되면 작업자 뿐만 아니라 광산 전체의 열환경을 개선시킬 수 있다. HSI에 반영되는 인자 중 HSI와의 상관계수가 가장 높은 영향인자는 최대 땀 증발열로 나타났으며, 최대 땀 증발열 계산시 반영되는 공기속도는 HSI뿐만 아니라 KATA지수, 유효온도에도 큰 영향을 미친다. 수직갱과 사갱을 통한 입기량을 증대시켜 공기의 속도를 개선하는 방법은 수직갱의 연장굴착을 통해 작업장의 열환경 개선에 도움이 될 수 있지만, 무분별한 연장굴착은 갱도의 저항을 증가시켜 오히려 갱내환경을 악화시킬 수도 있어 연장굴착에 대한 타당성 검토가 필요하다. 또한 복잡한 환기네트워크로 인한 비작업구간으로 누기되는 공기량을 줄일 수 있는 풍문이나 기타 구조물들을 설치함으로써 주 작업구간에 공기량을 집중시켜 열환경을 개선시킬 수 있을 것으로 예측된다. 또한 현재 광산보안법 시행 규칙인 단순 건구온도 35℃의 기준은 작업자의 생리학적 열적 스트레스를 반영하기에는 한계가 있다고 판단되며, 단순건구 온도뿐만 아니라 습구온도 및 작업자의 생리학적 열적지표를 적용한 새로운 온도기준을 제시할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 최대의 고심도 석탄광산을 대상으로 다양한 열적지표를 적용하여 광산의 열환경을 평가하였다.

1. 산업안전 보건법에서는 WBGT 기준 매시간 75% 작업, 25% 휴식의 중 작업 시 규정온도는 25.9℃이다. 하지만 본 연구 광산에서는 대부분이 25.9℃를 상회하였으며 특히 작업장 C구간에서는 WBGT 기준 33℃에 근접하는 위험한 상황에 노출되어 있는 것을 확인할 수 있었다.
2. ESI지수 분석결과 본 연구광산은 대부분이 ESI지수 4~5(Red-Black)을 나타냈으며, 이는 매우 열악한 열

환경을 의미한다. KATA지수는 대부분의 작업장이 카타지수 5~16을 나타내어 작업자는 답답하고 불쾌함을 느낄 수 있는 열환경으로 나타났다. 또한 대부분의 작업장에서 유효온도의 권고온도 기준인 27℃를 초과하였으며, C작업장의 일부지역에서는 작업 금지 온도인 32℃에 근접하였다.

3. WBGT 온도와 함께 인체의 생리학적인 피로특성이 반영된 열적지표인 HSI와의 상관계수는 0.744로 나타났고, HSI에 반영되는 여러 인자 중 가장 영향을 많이 미치는 인자는 최대 땀 증발열로 HSI와의 상관계수가 -0.834로 나타났다.
4. 최대 땀 증발열에 가장 영향력이 큰 인자는 공기속도이며, 연구광산의 환기량을 증대시켜 개선시킬 수 있다. 제 1수직갱의 연장굴착을 통하여 주 작업레벨인 -425ML에 들어오는 환기량을 증대시킬 수 있으나 이에 대한 타당성 검증이 필요하다. 또한 풍문이나 입기되는 공기량 누기를 최대한 막을 수 있는 구조물을 설치하여 열환경을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.
5. 국내 광산보안 시행규칙에는 건구온도만이 열환경 평가에 사용되어 갱내 작업장의 열환경 평가의 타당성을 검증할 수 없다. 따라서 국내 광산보안법은 작업자의 생리학적 현상을 반영할 수 있는 다양한 지표가 적용된 온도 규정의 보완이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

위 논문은 한국광해관리공단 및 자원개발특성화 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Seung-Hyun Jang, 2013, "A study on the improvement of work environment for deep coal mine", Master of science thesis, Graduate school of Inha University, pp. 1-3.
2. Ho-Yong Ryu, 1999, "A study on the WBGT measurement to evaluate the industrial environment due to heat exposure", Master of science thesis, Graduate of Kyungsan University, pp. 6-10.
3. Habibolah Dehghan, 2012, "Evaluation of wet bulb globe temperature index for estimation of heat strain in hot/humid condition in the Persian Gulf", Isfahan university of medical sciences, pp. 1108-1109.
4. Jae-Hong Ryu, Yong-ho Yoo, Jin Kim 2000, "A study on the Cooling Methods for Deep Coal Mines", University of Inha pp. 47-52.
5. Howard L. Hartman, 1982, "Mine Ventilation and Air

- Conditioning”, The university of Alabama, pp. 583-585.
6. ISO 7243, 1982, “Hot environments-Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index”, Geneva: International Standards Organization.
 7. Belding H.S, Hatch T.F, 1955, “Index for evaluation heat stress in terms of resulting physiological strain.”, Heat Pip Air Conditon 27, pp. 129.
 8. Houghton F.C, Yaglou C.P, 1923, “Determining equal comfort lines.”, J Am Soc Heat Vent Engrs, pp. 165.
 9. Moran D.S, Pandolf K.B, Shapiro.Y, Heled Y, Shani.Y, Mathew W.T, Gonzalez R.R, 2001, An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT), Heller Institute Medical Research, pp. 429-431.
 10. Hill L, Griffith O, Flack M, 1916, “The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation.”, Phil Trans Royal Soc 207(B), 183-220.
 11. Grahame M. Budd, 2007, “Wet-bulb globe temperature - its history and its limitations”, The university of Sydney, pp. 23-24.
 12. Gonzalez R.R, Gagge A.P, 1973, “Magnitude estimates of thermal discomfort during transients of humidity and operative temperature, ASHERAE Trans, pp. 89-96.
 13. Matjaz Prek, 2006, “Thermodynamical analysis of human thermal comfort”, University of Ljubljana, pp. 741-742.
 14. Tae-kyu Kim, 1995 “Effect of Wearing System on the Thermo-Physiological Properties and Wearing Sensation of Human Body”, Kyungil University, pp. 348-352.
 15. ACGIH world wide, 1998, “TLVs and BELs”, Threshold Limit Values of Chemical Substances and Physical Agents.
 16. Michael Dean Taggart, PhD, MPH, CIH, CSP, “IH for the CSP 8:Heat Stress Index”, North Carolina A&T State University, pp. 3-7.
 17. Moran D.S, Pandolf K.B, 2001, “Intergration Between the Environmental Stress Index(ESI) and the Physiological Strain Index (PSI) as a Guideline for Training.”, Heller Institute Medical Research, pp. 31-1.
 18. Xie Zhongpeng, 2012, “Distribution Law of High Temperature Mine’s Thermal Environment Parameters and Study of Heat Damage’s Causes”, China University, pp. 590.
 19. Wyndham C.H, 1978, “Ischaemic Heart Disease Mortality Rates in South Africans Compared with Other Populations, SA Medical Journal, pp. 595-599.
 20. A.Pharo Gagge, 1981, “Rational Temperature indices of Thermal Comfort”, Yale University, pp. 80-85.

박 선 오



2012년 인하대학교 환경공학과 공학사
2014년 인하대학교 에너지자원공학과
공학석사

Tel: 032-872-7551
E-mail: seonoh31@nate.com
현재 인하대학교 에너지 자원공학과 석사

노 장 훈



2009년 인하대학교 환경공학과 공학사
2012년 인하대학교 에너지 자원공학과
공학석사

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

김 진



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

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