

ORIGINAL ARTICLE

## 하계 항만열환경지수 최적화 방안연구: 항만작업환경을 반영한 MENEX모델의 입력변수 개선

윤진아 · 황미경<sup>1)</sup> · 김유근<sup>1)\*</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>부산대학교 대기환경과학과

### A Study on Optimization of Thermophysiological Indices for Harbor Workers in Summer: Improvement of MENEX Model's Input Data Considering the Work Environment

Jinah Yun, Mi-Kyoung Hwang<sup>1)</sup>, Yoo-Keun Kim<sup>1)\*</sup>

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

#### Abstract

To prevent increasing instances of heat-related illnesses due to heat waves generated by climate change, a customized thermal environment index should be developed for outdoor workers. In this study, we conducted sensitivity analysis of the Masan harbor during a heat wave period (August 9th to 15th, 2013) using the MENEX model with metabolic rate and clothing-insulation data, in order to obtain realistic information about the thermal environment. This study shows that accurate input data are essential to gather information for thermophysiological indices (PST, DhR, and OhR). PST is sensitive to clothing insulation as a function of clothing. OhR is more sensitive to clothing insulation during the day and to the metabolic rate at night. From these results, it appears that when exposed to high-temperature thermal environments in summer, wearing highly insulated clothing and getting enough rest (to lower the metabolic rate) can aid in preventing heat-related illnesses. Moreover, in the case of high-intensity harbor work, quantification of allowed working time (OhR) during heat waves is significant for human health sciences.

**Key words** : Clothing insulation, Harbor workers, Heat stress, Heat wave, MENEX, Metabolic Rate, Thermophysiological indices

#### 1. 서론

최근 전세계적으로 기후변화에 따라 인명 및 재산상의 피해가 속출하고 있으며, 극한기상현상(폭염, 한파, 홍수, 태풍 등) 중 폭염으로 인한 피해가 큰 부분을 차지하였다(CRED, 2015). 더불어 기후변화에 대한 정부간

협약체(intergovernmental panel on climate change, IPCC)는 향후 평균기온의 상승과 함께 폭염 발생빈도의 증가 및 강도가 더욱 심화될 것이라고 보고하고 있다(IPCC, 2014). 폭염 발생 시 고온 환경 노출에 따라 온열 질환(일사병, 열사병 등) 발생 등 건강에 악영향을 미칠 수 있으며, 특히 옥외근로현장에서는 폭염 기간 중 상해

Received 6 April, 2016; Revised 3 May, 2016;

Accepted 4 May, 2016

\*Corresponding author : Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone : +82-51-510-2282

E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발생이 6.2% 증가하는 것으로 나타나 고온환경에 더욱 취약한 것으로 나타났다(Xiang et al., 2014).

일반적으로 열 스트레스(heat stress)는 인체 체온조절중추에 의해 조절되는 체온조절 기능을 잃게 하여 온열질환의 발병 또는 심한 경우 사망에 이를 수 있다. 이에 열 스트레스를 지수화한 다양한 열지수를 개발하여 활용하고 있다. 열지수들은 기상요소만을 고려한 직접 지수(direct index)로써 다양한 작업환경에 노출되었을 때 신체열수지를 고려한 간접 지수(indirect index)로 구분된다. 대표적인 직접지수인 WBGT 지수(Wet-Bulb Globe Temperature Index, ISO 7243(1989))는 미국 군부대에서 군사훈련 시 열 관련 상해를 예방하기 위해 개발하여 현재 전 세계적으로 열스트레스 지수로 사용되고 있다(Yaglou and Minard, 1957). 또한 다양한 열지수 HI(heat index; Weisskopf et al., 2002), AT(apparent temperature; Smoyer et al., 2000), Humindex(Conti et al., 2005) 등과 건강(특히 사망)과의 관련성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 국내에서는 Park et al.(2008)은 열지수인 HI를 이용하여 한국형 폭염특보기준에 대한 일최고기온과 열지수의 비교에 관한 연구를 수행하였고, Choi et al.(2005)은 HI지수를 이용하여 높은 체감온도가 서울의 여름철 질병 사망자 증가에 미치는 영향에 대한 연구를 제시한 바 있다.

한편 간접지수는 생리학적 반응 및 물리적 환경과의 상호작용을 고려한 신체열수지방정식을 통해 산정되는 지수이다. 대표적으로 PMV (predicted mean vote)는 인체의 온열감을 이론적으로 예측한 것으로, Matzarakis and Mayer(1997)는 그리스지역을 대상으로 열스트레스를 평가하였다. 하지만 PMV는 주로 실내 열환경 평가 지표로, 독일기상청에서는 모든 분야에 적용 가능한 열수지 예보모델(Klima-Michel model)을 개발하여 perceived temperature (PT) 지수를 산출하였다. 한편 Blazejczyk(2011)은 PST (physiological subjective temperature)와 UCI (universal thermal climate index)를 이용하여 폴란드지역의 생기후를 평가하였다. Lee et al.(2010)은 신체열수지를 기본으로 인지온도를 이용한 여름철 폭염 스트레스와 초과사망률에 대한 연구를 제시하였다. Kim et al.(2014)은 신체열수지를 고려한 작업체감온도(PST)와 신체열스트레스(physiological strain; PhS)와 함께 직접 지수(열지수(HI), WBGT 지

수)를 활용하여 사례기간의 열쾌적성 비교평가를 수행하였다.

간접지수에서 사용되는 신체열수지와 관련된 주요 요소는 기온, 복사온도, 습도, 바람, 신진대사, 착의(의류절연, 투수성)이며(Fanger, 1970), 이 중 작업강도를 나타내는 신진대사와 작업복 특성을 반영하는 의류절연은 중요한 입력변수로 적용된다(Epstein and Moran, 2006). 이 변수들은 작업특성을 반영한 입력값이 요구되며 최종적으로 열환경지수 산정 및 예방대책 마련을 위한 중요 입력자료이다.

본 연구에서는 항만작업자에 최적화된 항만열환경정보를 제공하고자 항만현장조사를 통해 산정된 신진대사와 의류절연 개선입력자료의 영향을 평가하고 개선된 항만열환경지수를 산정하였다. 이를 위해 신체열수지 방정식을 바탕으로 개발된 생명기상모델 MENEX (man environment exchange model; Blazejczyk, 2005)모델을 이용하였다. 먼저 각 입력변수(신진대사율, 의류절연)별 열환경지수 민감도 실험을 수행/분석하여 각 입력자료의 중요성을 살펴보았다. 개선된 두 입력변수를 함께 고려하여 열환경지수 개선효과를 정량적으로 평가하였다. 민감도 분석시, 항만작업 중 고강도작업인 선내작업을 가정하고, 열환경지수는 physiological subjective temperature (PST, 단위:℃), dehydration risk (DhR, 단위:g/h), 그리고 over-heating risk (OhR, 단위:분)를 중심으로 평가/분석하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1. 대상지역과 기상학적 특성

대표적인 재래항만인 마산항은 지리적으로 무학산(761.4 m), 대곡산(516.8 m) 등으로 둘러싸여 있으며, 남해 리아스식 해안을 따라 내륙 깊숙이 형성된 진해만에 위치해 있는 폐쇄형 항만이다(Fig. 1). 연간 1천만 톤 이상의 화물을 처리할 수 있는 최신 항만시설을 갖추고 일본, 중국, 홍콩, 마닐라, 인도 등 환태평양과 동남아시아권의 중심교역항이다(<http://www.msipilot.co.kr/>).

2013년 대상 폭염발생일(기상청 기준, 일최고기온 33℃ 이상)인 8월 10~12일, 14일(4일 동안)을 포함한 2013년 8월 9~15일까지인 7일간을 대상 사례일로 선정하였다. 사례기간 동안 평균기온은 30.0℃로 높게 나타

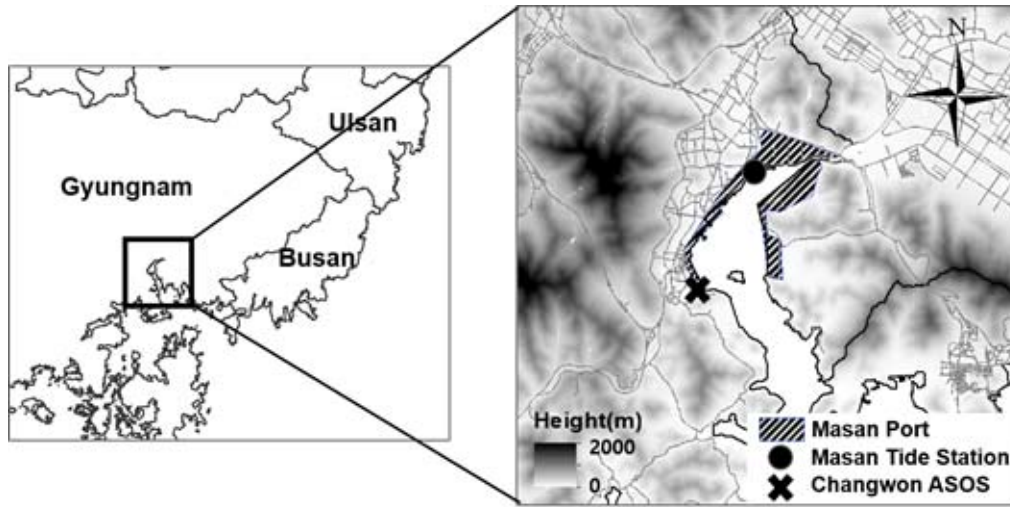


Fig. 1. Topography for Masan Port, Masan Tide Station and Changwon meteorological site.

내었으며, 평균풍속은  $2.8 \text{ ms}^{-1}$ , 상대습도는 69%였다. 특징적으로 운량이 4미만으로 낮은 값을 나타내어 이는 기존 증가에 중요한 영향을 미친 것으로 분석된다. 특히 8월 11일의 경우  $38.11 \text{ }^\circ\text{C}$  최고기온을 기록하였다.

2.2. MENEX 모델 개요 및 항만열환경지수

본 연구에서 사용한 MENEX 모델은 사람과 주위의 열환경을 다루는 생명기상모델로 생기후, 열생리학, 도시계획 등에 응용할 수 있으며, 주위 환경에 대한 신체의 변화를 정량적으로 나타내는 지표를 결과물로 제공하는 모델이다(Blazejczyk, 2002). MENEX모델은 신체가 온열환경에 노출되어 적응하기 전과 후의 열수지방정식 (Eq. 1과 Eq. 2)을 바탕으로 이루어진다. 여기서의 적응이란, 신체가 외기에 노출되어 초기 피부온도가 새로운 피부온도로 변하는 시점을 말한다.

$$M + Q + E + C + Res = S \quad (\text{Eq. 1})$$

$$M + Q_R + E_R + C_R + Res = S_R \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서  $M$ 은 신진대사,  $Q$ 는 사람의 복사평형,  $E$ 는 증발로 인한 열손실,  $C$ 는 대류로 인한 열교환,  $Res$ 는 호흡으로 인한 열손실,  $S$ 는 축열을 나타내며, 모든 항들의 단위는  $\text{Wm}^2$ 이다. Eq. 1과 Eq. 2는 각각 신체가 주위 환경에 적응 전과 후를 각각 의미하며 이를 이용하여 열지

수를 산정할 수 있다.

본 연구에서는 MENEX 모델에서 산출되는 지수 중 PST, DhR, OhR을 중심으로 입력파라미터에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 각 지수는 Blazejczyk(2005)에 자세히 기술되었으며, 간략하게 살펴보면 다음과 같다. 먼저 PST는 작업체감온도로 사람이 주위환경에 대해 적응 후 느끼는 주관적인 느낌을 말하며, 신체가 실외에서 15 ~ 20분 정도의 적응과정을 통해 초기 피부온도로부터 새로운 피부온도로 변환된 후 사람이 인지하는 열 상태를 말한다. 아래와 같이 인체가 외부에 에너지를 빼앗기는 경우 ( $S_R < 0$ )와 외부로부터 에너지를 받는 경우 ( $S_R > 0$ )로 계산된다(Eq. 3과 Eq. 4).

$$PST = iMRT - \left\{ \left[ \frac{|S_R|^{0.75}}{S_h \sigma} + 273^4 \right]^{0.25} - 273 \right\} \quad (S_R < 0 \text{ W/m}^2) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$PST = iMRT + \left\{ \left[ \frac{|S_R|^{0.75}}{S_h \sigma} + 273^4 \right]^{0.25} - 273 \right\} \quad (S_R \geq 0 \text{ W/m}^2) \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서,  $iMRT$ 는 의복에 따른 내부 평균복사온도,  $S_h$ 는 신체로부터의 방출률계수,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만 상

수이다.

두번째 지수인 DhR은 탈수위험도로 신체의 수분손실 (Water loss)양에 따라 나타난 것으로 피부를 통해 땀이 되는 물의 양을 의미한다(Eq. 5).

$$DhR = -2.6 \cdot [he \cdot (epot - es) \cdot w \cdot I_e - [0.42 \cdot (M - 58) + 5.04]] \quad (\text{Eq. 5})$$

here,

$$epot = 6.112 \cdot 10^{\left[\frac{7.5 \cdot t}{237.7+t}\right]} \cdot 0.05$$

$$es = e(0.058 \cdot T_s + 2.003)$$

$$he = [t \cdot (0.00006 \cdot t - 0.00002 \cdot p + 0.011) + 0.02 \cdot p - 0.773] \cdot 0.53 / \{I_{cl} \cdot [1 - 0.27 \cdot (v + v') \cdot 0.4]\}$$

$$I_e = hc' / (hc' + hc)$$

여기서,  $he$ 는 증발열전달계수,  $w$ 는 피부습윤계수,  $I_e$ 는 피부에 따른 기화열 전달계수,  $M$ 은 신진대사,  $t$ 는 기온,  $e$ 는 수증기압,  $T_s$ 는 최종피부온도,  $p$ 는 기압,  $I_{cl}$ 은 의류절연,  $v$ 는 풍속,  $v'$ 는 사람의 운동속도,  $hc$ 는 대류와 복사열 전달계수,  $hc'$ 는 의복에 의한 열전달 계수를 의미한다.

마지막으로 OhR은 연속작업허용시간으로 고온열환경에서 열 관련 증상(열사병 등)이 나타나는데 걸리는 시간을 의미하며, Eq. 6과 같다.

$$OhR = [(900000 - 1.6 \cdot 1200 \cdot |S|) / (1.6 \cdot |S_R|)] / 60 \quad (S_R \geq 0 \text{ W/m}^2) \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서  $S$ 와  $S_R$ 은 축열을 의미한다(Eq. 1과 Eq. 2참조).

### 2.3. MENEX 모델 입력자료

MENEX 모델의 입력자료는 크게 기상 자료와 생리학 자료로 나눌 수 있다. 기상학적 자료에는 기온, 풍속, 수증기압, 상대습도, 운량, 기압, 태양고도, 지표온도, 태양복사 값 등이 있으며, 생리학 자료에는 신진대사, 평균피부온도, 피부습윤도, 의류절연도, 의복반사도, 사람의 행동속도 등이 있다.

본 연구에서 사용한 기상자료는 마산조위관측소의 기온, 풍속, 기압 자료와 함께 마산항과 인접해 있는 창원종관기상관측소(기상청 155지점)의 습도와 운량 자료를 활용하였다(Fig. 1 참조). 여기서 마산조위관측소의 경우, 기상관측소지점 시간해상도를 고려하여 매분 단위 자료를 매시 자료로 변환하여 사용하였다.

시간가중치를 적용한 신진대사율은 Eq. 7와 같이 ISO 8996(2004) 기준을 이용하여 선내작업의 신진대사율 410 W/m<sup>2</sup>(Busan Regional Office Meteorology, 2014)과 휴식 시 신진대사율(55 W/m<sup>2</sup>)에 시간가중치를 적용하였다.

$$\text{Metabolicrate}(M) = \frac{\text{working time} \times M(i) + (\text{resting time} \times M_{rest})}{\text{total working time}} \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서 시간가중치는 현장조사의 작업스케줄 결과를 이용하였으며, 일중 작업시간 중 작업시간(working time)은 780분이었으며 휴식시간(resting time)은 120분, 전체작업시간은 900분으로 조사되었다. Eq. 7을 통해 시간가중치 적용 후 신진대사율은 363 W/m<sup>2</sup>로 약 10% 감소하였다.

의류절연 또한 현장조사를 바탕으로 작업복의 의류절연을 산정하여 적용하였다. 기존 연구(Blazejczyk, 2011; Kim et al., 2014)에서는 의류절연을 기온의 함수로 기본 의류절연도인 0.6 clo가 적용되었다. 본 연구에서는 항만근로자의 실제 작업복의 의류절연 0.83 clo (Hwang et al., 2016)으로 개선하여 열환경지수 민감도 분석을 실시하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 신진대사율 민감도 분석

신진대사율 개선에 따른 열환경지수 변화를 정량적으로 분석하기 위해 MENEX 모델링 민감도 실험을 수행하였다. 여기서 고강도작업에 해당하는 선내작업을 대상으로 실험을 수행하였으며 입력된 신진대사율은 각각 410 W/m<sup>2</sup> (개선 전), 363 W/m<sup>2</sup> (개선 후)이다.

Fig. 2는 폭염사례기간 동안 신진대사율 개선 전/후의

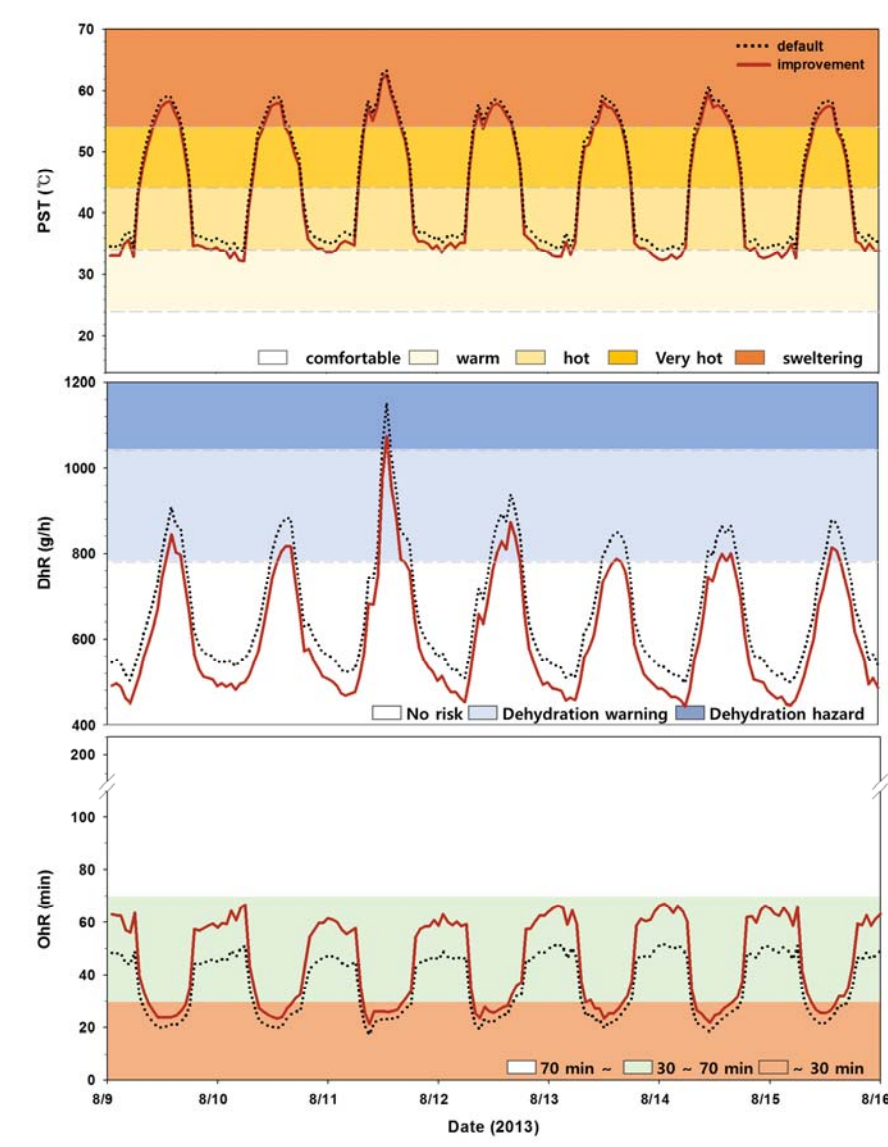


Fig. 2. The time series of sensitive of metabolic rate about heat indices (PST, DhR, OhR).

열환경지수 PST, DhR, OhR의 시간별 변화이다. 이와 함께 일최고 열환경지수의 정량적인 변화를 Table 1에 함께 제시하였다. 먼저 개선 전의 PST는 기온변화와 유사한 패턴을 나타내었으며 특히 기온이 가장 높았던 8월 11일 최대 63.5°C를 나타내었다. 개선 후 PST의 일변동은 유사하였으며 정량적인 변화도 미비하였다. 구체적으로 주간의 경우 가장 높은 단계인 극한더움(sweltering)

단계를, 야간은 더움(hot) 또는 조금더움(warm) 단계를 나타냈다. 신진대사율 개선에 따라 일최대평균값은 약 1°C 미만(약 1.6%)의 변화를 보여 정량적으로 최대값 변화는 거의 나타나지 않았으며, 위험단계는 극한더움에서 아주더움(very hot)으로 단계적 변화(약 5%)는 확인되었다.

한편 탈수와 관련된 DhR은 신진대사율 변화에 민감

**Table 1.** Variation of heat indices (PST, DhR, OhR) according to parameter improvement of metabolic rate

Index	Default (410 W/m <sup>2</sup> )	Improvement (363 W/m <sup>2</sup> )	Difference (%)
PST (°C)	59.8	58.9	-0.9 (-1.6)
DhR (g/h)	925.1	859.0	-66.1 (-7.2)
OhR (min)	19.4	23.2	+3.8 (+19.7)

하게 반응하는 것으로 나타났다. 개선 전 주간에는 800 g/h 이상으로 주의(warning) 단계가 나타났으며, 기온이 가장 높았던 8월 11일에는 위험(hazard) 단계까지 상승하기도 하였다. 신진대사를 개선 후, 평균적으로 일최대 평균 925.1 g/h 에서 859.0 g/h로 기존대비 7.2% 감소하였다. 위험단계를 살펴보면, 주의단계가 43시간이 24시간으로 12% 감소하였으나 일최대위험단계의 변화는 나타나지 않았다.

마지막으로 연속작업가능시간을 나타내는 OhR의 경우, 전반적으로 주간보다는 야간시간대의 허용작업시간이 길게 나타나 기온분포와는 역상관을 나타내었다. 사례기간동안 주간은 30분 이내의 작업시간이 권장되는 것으로 나타났다. 신진대사율 감소에 따라 주간동안(최저) 작업허용시간이 기존 19.4분에서 23.2분으로 약 4분 증가가 나타나 신진대사율에 따라 OhR의 변화를 확인할 수 있었다.

### 3.2. 의류절연 민감도 분석

의류절연 민감도 분석은 현실적인 작업복 고려에 따른 열환경 정보 개선효과를 분석함과 동시에 작업복 개선(의류의 특성, 복장의 종류 및 착용 유무) 효과를 추정하기 위해 실시하였다. 본 연구에서는 의복절연값이 각각 0.6 clo (개선 전)와 0.83 clo (개선 후)에 대한 결과를 제시하였다. Fig. 3은 폭염기간 동안의 의류절연 개선 전/후의 시간별 열환경지수의 변화를 나타내었으며 Table

2는 일최고 지수의 변화를 수치적으로 분석하여 제시하였다.

의류절연도 증가에 따라 PST 변화가 가장 크게 나타났다. 특징적으로 PST는 아주더움 ~ 조금더움 단계로 전체적으로 개선 후 위험단계가 한 단계씩 하향평가가 되었다. 이는 신진대사율의 변화와 뚜렷한 차이를 나타내는 것으로, 착의 특성이 작업체감온도에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 제시하는 것이다. 구체적으로 일최고평균 59.8°C에서 48.8°C로 약 11°C 감소(기존대비 -18.4%) 효과가 나타났으며, 전체 사례기간 중 약 30% 이상을 차지하던 극한더움 단계의 일최고 PST값들이 개선 후 모두 아주더움 단계로 하향되었다.

DhR의 경우 일최고 DhR값이 1400 ~ 1500 LST 에 집중되었다. 기존 925.1 g/h에서 개선 후 860.2 g/h 로 약 7.0% 감소하였으며, 신진대사율 개선 전/후의 DhR 개선효과와 유사하게 나타났다. 탈수위험단계의 경우 주의 단계가 43시간(26%)에서 27시간(16%)로 감소하였으나, 8월 11일 사례는 위험(hazard)단계까지 나타나기도 하였다.

한편 OhR은 개선 전/후 모두 짧은 작업시간(주간, 30분 미만)을 가지고 자주 휴식을 취해야 하는 것으로 평가되었다. 개선 전/후 주간 (최소)작업가능시간이 각각 19.4분에서 25분으로 약 5분가량 증가하는 효과를 나타내었다. 이처럼 주간 경우 의류절연도를 개선함으로써

**Table 2.** Variation of heat indices (PST, DhR, OhR) according to parameter improvement of clothing insulation

Index	Default (0.6 clo)	Improvement (0.8 clo)	Difference (%)
PST (°C)	59.8	48.8	-11.0 (-18.4)
DhR (g/h)	925.1	860.2	-64.9 (-7.0)
OhR (min)	19.4	25.0	+5.6 (+28.6)

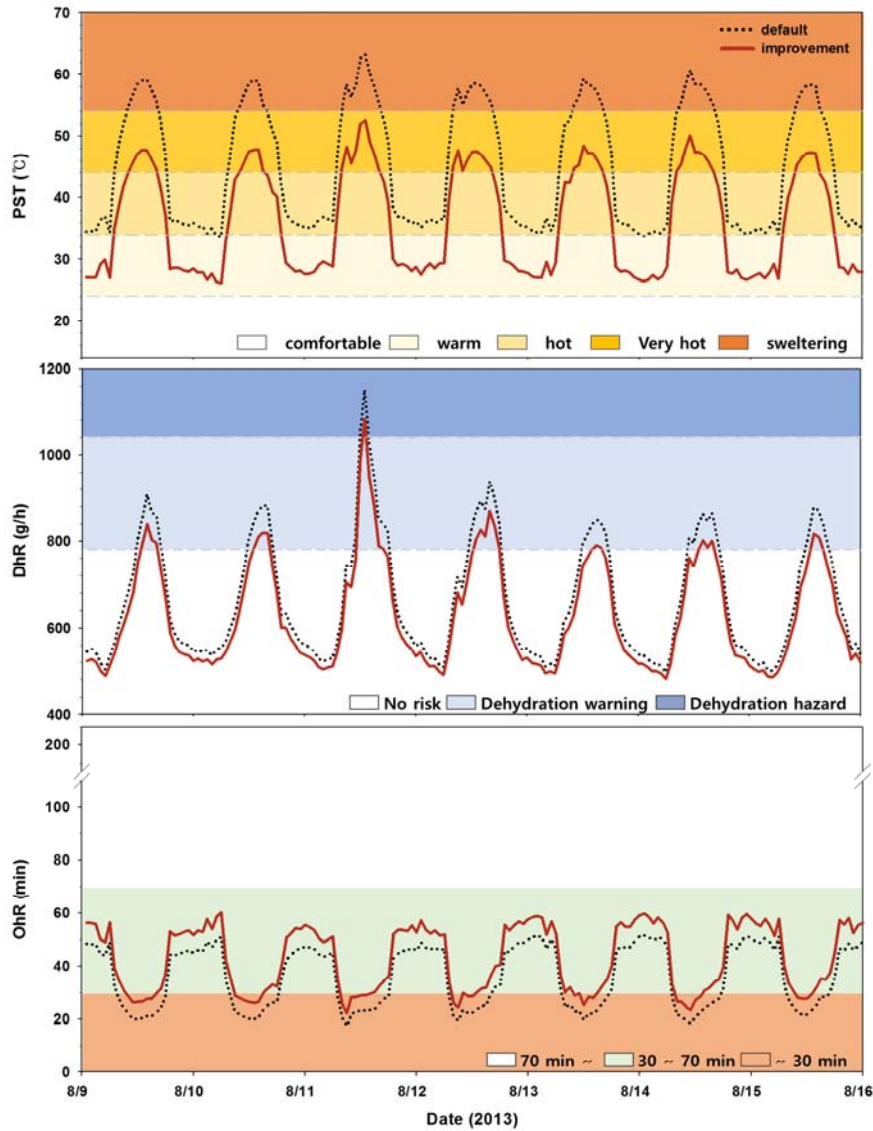


Fig. 3. The time series of sensitive of clothing insulation about heat indices (PST, DhR, OhR).

OhR에 대한 개선 효과도 나타남을 확인하였다.

#### 4. 고 찰

Inoue and Kondo(2013)와 Watkins(1984)에 의하면 신체가 열을 획득하는 방법에는 체내의 화학작용에 의해 열을 생산하는 방법과 환경으로부터 열에너지를 흡

수하는 방법이 있다. 우선 첫 번째 방법의 경우, 신체로 하여금 열평형에 도달할 수 있게 하는 열원은 바로 신진대사이다. 여기서 신진대사라는 개념은 신체 내부에서 일어나는 모든 화학적 그리고 물리적 반응들을 포함한다. 일반적으로 고온열환경에서의 고강도 운동, 다시 말해 신진대사율이 높은 작업을 할수록 근육의 사용으로 불가피한 대사 증가가 발생하고 열에너지가 생성됨으로 체온

**Table 3.** Variation of heat indices (PST, DhR, OhR) according to parameter improvement of metabolic rate and clothing insulation

Index	Default*	Improvement**	Difference (%)
PST (°C)	59.8	47.7	-12.1 (-20.3)
DhR (g/h)	925.1	795.4	-129.7 (-14.1)
OhR (min)	19.4	30.5	+11.1 (+57.0)

\*: applying default input parameters (metabolic rate: 410 W/m<sup>2</sup> and clothing insulation: 0.6 clo)

\*\* : applying improvement input parameters (metabolic rate: 363 W/m<sup>2</sup> and clothing insulation: 0.83 clo)

이 상승된다. 이때 체열을 빼앗아가는 땀은 체온 상승을 억제하는 가장 강력한 수단으로 땀으로 인한 탈수 수준은 인체에 영향을 미치게 된다. 두 번째 방법인 환경으로부터의 열에너지를 흡수하는 경우, 신체는 복사, 전도, 대류를 통하여 열을 흡수할 수 있는데, 특히 여름철 고온열 환경 하 직달일사에 인체가 노출된다. 따라서 의류절연도가 뛰어난 의복을 착용하는 것은 여름철 실외 태양복사에너지로 인한 체온상승을 감소시키는데 중요하게 작용하게 된다.

본 연구에서 MENEX 모델의 민감도실험 결과, PST는 신진대사율보다 의류절연에 더욱 민감하였다. 신진대사율이 약 10% 감소에 따라 PST는 약 1°C 미만의 변화에 그친 반면, 의류절연의 변화(0.2 clo 증가)에 따라 약 11°C 감소를 보였다. 이는 PST는 본 모델에서 의류 피부내 평균복사온도(inner mean radiant temperature under clothing, iMRT)와 적응 후 축열(net heat storage, SR)의 함수로 정의되어(Eq. 3과 Eq. 4 참조), 의류절연 증가에 따라 의류 피부내 평균복사온도의 감소와 이에 유도된 축열의 감소로 인하여 최종적으로 PST가 감소한 것으로 파악된다. 결과적으로 고온노출이 빈번한 작업자의 경우, 작업복 특성(의류절연)이 체감온도 감소에 중요함을 민감도 실험결과를 통해 추론할 수 있다.

한편 DhR은 두 입력변수(신진대사율, 의류절연)에 모두 민감하게 변화하였다. 신진대사율과 의류절연에 따라 각각 약 65 g/h (약 7%) 이상의 변화가 나타났다. 이는 DhR이 신진대사율에 직접적으로 의존함과 더불어 의류절연에 의존하는 증발열전달계수(coefficient of evaporative heat transfer)와 기화열 전달감소계수(coefficient reducing evaporative heat transfer due to

clothing)의 함수로 입력변수의 변화에 민감하게 반응하기 때문으로 분석된다(Eq. 5 참조).

마지막으로 피부적응 전과 후의 축열의 비로 얻어지는 OhR의 경우 민감도 분석결과, 주야간 변화에 큰 영향을 미치는 변수가 다르게 나타났다. 먼저 주간에는 의류절연에 따라 작업시간이 19분에서 25분으로 6분 증가한 반면, 야간에는 신진대사율의 변화에 따라 약 15분 증가하였다. 야간보다 주간에 의류절연의 증가에 따라 작업시간이 증가하는 이유는 높은 절연의복을 착용할수록 축열이 감소하여 OhR을 증가시킨 것으로 사료된다(Eq. 6 참조). 야간의 경우, OhR은 태양단파복사가 존재하지 않기 때문에 신진대사율 증가에 따른 체온증가가 유도되어 신진대사율 변화에 민감하게 나타난 것으로 분석된다. 결과적으로 폭염기간에는 주간의 착의 특성이, 야간에는 작업강도가 작업시간에 결정에 중요한 인자가 될 수 있을 것으로 분석된다. 뿐만 아니라 직달일사 하 고강도 작업이 이루어지는 항만작업의 경우, 폭염기간에 정량적 작업허용시간을 제시하는 것은 보건의학적으로 큰 의의를 가지는 것으로 사료된다.

마지막으로 개선된 신진대사율과 의류절연을 모두 고려한 열환경지수를 산정한 결과, Table 3 과 Fig. 4와 같이 PST, DhR, OhR은 각각 기존대비 약 20%, 14%, 57% 씩 감소하였으며, PST의 경우, 기존 sweltering단계에 머물렀던 52시간(31%)이 개선 후 모두 very hot단계로 나타남으로써 전체적 위험 단계의 하향이 나타났다. OhR의 경우 30분 미만 작업허용 단계가 개선 전 74시간(44%)에서 개선 후 3시간(2%)으로 작업제한이 감소하였다. 70분 이상 단계의 경우 개선 후 62시간(37%)을 나타내었다. 기본값(개선 전)을 적용한 Kim et al.(2014)의



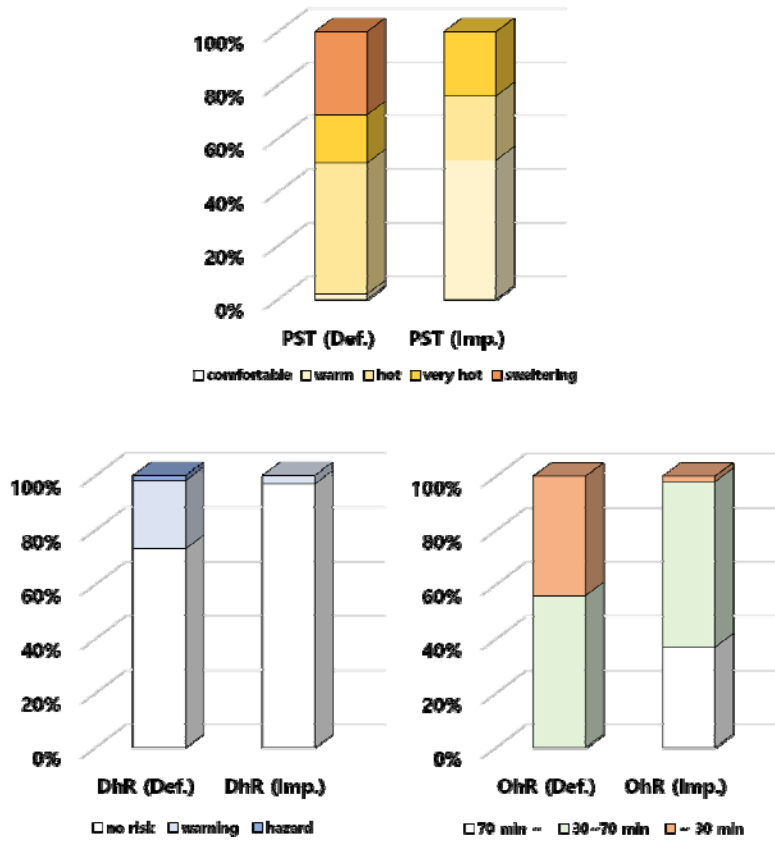


Fig. 4. Frequency of particular assessment classes of each indices (PST, DhR, OhR).

\*Def. : applying default input parameters (metabolic rate: 410 W/m<sup>2</sup> and clothing insulation: 0.6 clo)

\*\*Imp. : applying improvement input parameters (metabolic rate: 410 W/m<sup>2</sup> and clothing insulation: 0.83 clo)

연구와 비교해보면, 각 지수별 위험단계 및 정량적 지수 값과 뚜렷한 차이를 보여 항만작업환경이 고려되지 못함에 따라 각 지수가 과대평가되었음을 확인할 수 있었다. 이는 모델의 기본값만으로는 항만열환경을 충분히 설명하는데 한계를 가짐을 의미하며 정확한 입력자료의 구성이 현실적 열환경지수 정보제공을 위해 필수적임을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 작업환경 특성을 고려한 최적화된 항만열환경지수 제공은 작업자의 건강을 위한 보건기상정보로서 활용가치가 높을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 현실적인 항만열환경정보 제공을 위해

실제 항만근로자들의 작업환경(신진대사율, 의류절연) 적용에 따른 항만열환경지수(PST, DhR, OhR) 민감도 분석을 수행하고 최적화된 항만열환경지수를 산정하였다. MENEX 생명기상모델을 이용하여 신진대사율(약 10% 감소), 의류절연(0.8 clo)를 적용하였으며, 폭염기간(2013년 8월 9 ~ 15일)을 대상으로 평가하였다.

민감도 실험 결과, PST는 의류절연에 민감한 것으로 평가되었으며 고온열환경 노출시 작업특성(의류절연)이 작업자의 체감온도 감소를 유도할 수 있을 것으로 평가되었다. 한편 탈수지수인 DhR은 신진대사율과 의류절연의 두 입력변수에 의존함을 알 수 있었다. 마지막으로 연속작업허용시간 OhR의 경우, 폭염기간에는 주간의 작업특성이, 야간에는 작업강도가 작업시간에 결정에 중요

한 인자가 될 수 있음을 알 수 있었다. 민감도분석을 통해 작업복 특성 및 작업휴식시간 조절에 따른 신진대사율이 보건학적으로 작업자의 건강 및 효율에 영향을 미칠 수 있는지를 정량적으로 평가하였다. 본 연구결과는 다양한 타산업분야에 작업환경 관리 및 개선에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

최종적으로 최적화된 항만작업자 대상 항만열환경지수를 산정하였으며, 이후 시범운영기간 동안 작업현장 적용을 통한 지수의 보완/수정이 이루어져야 할 것이다. 향후 기후변화에 대한 적응방안 마련에 활용가능 할 것으로 기대되며, 다양한 산업분야의 옥외근로자들 대상 열환경정보 제공을 위한 기반연구로 활용되어 근로자들의 건강과 복지 향상에 기여될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 부산지방기상청의 지역맞춤형 기상정보 활용 서비스(과제번호:SVR2015118) 및 기상청 기상기술 개발사업(KMIPA2015-8061)의 지원으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Blazejczyk, K., 2002, Role of air circulation and local factors for climate and bioclimate of Warsaw agglomeration, *Dokumentacja Geograficzna*, 26, 162.
- Blazejczyk, K., 2005, MENEX\_2005, The updated version of man-environment heat exchange model, [http://www.igipz.pan.pl/tl\\_files/igipz/ZGiK/opracowania/indywidualne/blazejczyk/MENEX\\_2005.pdf](http://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/opracowania/indywidualne/blazejczyk/MENEX_2005.pdf).
- Blazejczyk, K., 2011, Assessment of regional bioclimatic contrasts in Poland, *MGRSD*, 15, 79-91.
- Busan Regional Office of Meteorology, 2014, Development of thermal environmental information in Busan port, Report, No. 11-1360072-000090-01, Institute for Research & Industry Cooperation, PNU, Busan.
- Choi, G. Y., Choi, J. N., Kwon, H. J., 2005, The impact of high apparent temperature on the increase of summertime disease-related mortality in Seoul: 1991-2000, *J. Prev. Med. Public Health*, 38(3), 283-290.
- CRED, 2015, [http://www.emdat.be/disaster\\_list/](http://www.emdat.be/disaster_list/)
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., Beltrano, C., Perini, L., 2005, Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy, *Environ. Res.*, 98(3), 390-399.
- Epstein, Y., Moran, D. S., 2006, Thermal comfort and the heat stress indices, *Ind. Health*, 44(3), 388-398.
- Fanger, P. O., 1970, Thermal comfort, Danish Technical Press, Copenhagen.
- Hwang, M. K., Yun, J. A., Kim, H. S., Kim, Y. J., Lim, Y. J., Lee, Y. M., Kim, Y. N., Yoon, E. K., Kim, Y. K., 2016, Heat stress assessment and development of its forecast system to provide thermophysiological indices for harbor workers in summer, *J. Environ. Health Sci.*, 42(2), 92-101.
- Inoue, Y., Kondo, N., 2013, Body temperature II, Kyomunsa Publishing CO., Japan.
- IPCC (Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels et al.), 2014, Climate change 2013: The physical science basis, T. Stocker (Ed.). Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press.
- ISO 7243, 1989, Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index, ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO 8996, 2004, Ergonomics - determination of metabolic heat production, ISO, Geneva, Switzerland.
- Kim, Y. J., Kim, H. S., Kim, Y. K., Kim, J. K., Kim, Y. M., 2014, Evaluation of thermal environments during the heat waves of summer 2013 in Busan metropolitan area, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(11), 1929-1941.
- Lee, D. G., Byon, J. Y., Choi, Y. J., Kim, K. R., 2010, Relationship between summer heat stress(perceived temperature) and daily excess mortality in Seoul during 1911~2005, *J. KOSAE*, 26(3), 253-264.
- Masan pilot's, 2016, [http://www.msipilot.co.kr/masan\\_habor.asp](http://www.msipilot.co.kr/masan_habor.asp)
- Matzarakis, A., Mayer, H., 1997, Heat stress in Greece, *Int. J. Biometeorol.*, 41(1), 34-39.
- Park, J. K., Jung, W. S., Song, J. H., Kim, E. B., 2008, Study on the examination and revision about the standard level of the extreme heat watch warning system for reduction of personal or property injury, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 89-92.
- Smoyer, K. E., Rainham, D. G., Hewko, J. N., 2000, Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980 - 1996, *Int. J. Biometeorol.*,

- 44(4), 190-197.
- Watkins, S. M., 1984, *Clothing: The portable environment*, Ames, IA: Iowa State University Press.
- Weisskopf, M. G., Anderson, H. A., Foldy, S., Hanrahan, L. P., Blair, K., Török, T. J., Rumm, P. D., 2002, Heat wave morbidity and mortality, Milwaukee, Wis, 1999 vs 1995: An improved response?, *Am. J. Public health*, 92(5), 830-833.
- Xiang, J., Bi, P., Pisaniello, D., Hansen, A., 2014, The impact of heatwaves on workers health and safety in Adelaide, South Australia, *Environ. Res.*, 133, 90-95.
- Yaglou, C. P., Minaed, D., 1957, Control of heat casualties at military training centers, *Arch. Indust. Health*, 16(4), 302-16.