



체온 조절 작용을 고려한 의복 착용 시의 인체 열상신호 특성 분석

장 인 중¹ · 배 지 열¹ · 이 남 규¹ · 곽 휘 권² · 조 형 희^{1†}

¹연세대학교 기계공학과, ²한화시스템(주)

Thermal Signature Characteristics of Clothed Human Considering Thermoregulation Effects

Injoong Chang¹, Ji-Yeul Bae¹, Namkyu Lee¹, Hwykuon Kwak², and Hyung Hee Cho^{1†}

¹Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

²Hanwha Systems, Seoul, 04541, Korea

Abstract

Survivability of soldiers has been greatly threatened by the development of thermal observation device(TOD). Therefore, infrared, especially thermal, stealth technology is applied to combat suit to avoid detection from TOD. In this study, prior to the thermal camouflage performance evaluation of combat suit, thermal signature characteristic from clothed the human body was analyzed considering the realistic condition for human surface temperature compared to that from unclothed human body. To get the realistic surface temperature distribution of human, thermoregulation and multi-layer skin structure model is applied to the human model. Based on temperature distribution, surface diffuse radiance in thermal range is calculated and by assuming the background conditions, contrast radiance intensity(CRI) characteristic of human body is analyzed. By wearing clothing, the CRI between background and human body became reduced in low emissive background but in high emissive background, the contrast is much more prominent. Therefore, this issue should be considered in design process of thermal camouflage combat suit.

Keywords : Human thermal signature, clothing, contrast radiance intensity, numerical analysis

1. 서 론

온도를 가진 모든 물체는 외부로 적외선 신호를 방사한다. 특히, 인체는 36.5도의 체온을 유지한다고 알려져 있으며, 이에 따라 8~12 마이크로미터 파장을 갖는 열상대역의 적외선 신호를 방사한다. 인체에서 방사되는 적외선 신호는 일상 속 적외선 센서에서 군에서 사용하는 열상감지장비(TOD)에 이르기까지 다양한 방식으로 탐지되며, 특히 TOD의 경우 아우면 거리에서도 적외선 신호를 식별할 수 있는 수준까지 발전하였다. 따라서 군사작전의 성공을 위해 항공기나 전차와 같은 무기체계의 적외선 저피탐색만 아니라 병사의 피부 표면과 군복에서 발생되는 적외선 신호의 저피탐색까지도 고려하여야

한다. 열상감지장비는 인체에서 발생되는 적외선 신호와 배경에서 발생하는 적외선 신호의 대비(contrast radiance)를 포착하므로, 이를 줄일 수 있는 군복 설계를 위해 인체에서 발생하는 적외선 신호 특성을 파악하고 의복 착용 시의 적외선 신호 특성을 예측하는 것이 필요하다.

센서로 전달되는 적외선 신호는 병사가 착용한 군복 및 피부 표면에서 방사되며, 이 때문에 의복 또는 피부 표면의 방사율 및 인체의 표면 온도에 가장 큰 영향을 받는다. 인체 피부 표면 또는 의복의 방사율은 물성에 따라 정해진 값이지만, 피부 표면 온도는 주변 환경 조건의 변화나 어떤 옷을 착용하는가에 따라 달라질 수 있다. 이에 따라 인체의 피부 표면 온도를 정확히 측정하고, 이를 의복 또는 피부 표면의 방사율과 함께 고려함

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-7227; E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

Received December 3; Revised January 22 2019;

Accepted January 23 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

으로써 신뢰도 있는 인체의 적외선 방사 신호 분포를 얻을 수 있다. 현재까지 인체 피부 표면 온도에 대한 예측 모델은 건물이나 자동차, 항공기 등의 공조시스템을 설계하는데 있어서 인체가 느끼는 열적 편안함(thermal comfort)을 예측하기 위해서 진행되어 왔으며, 크게 인체를 비슷한 특징을 갖는 각 부문(compartment)으로 나누고 피부와 근육 들을 모사한 다층 구조의 모델링과 체온 조절 현상을 모델링하는 것으로 나된다.

대부분의 신체 부분들은 뼈, 근육, 지방, 외피의 4개 층으로 이루어져 있으며 흉부, 복부, 머리에는 폐, 내장, 뇌 등의 장기들이 함께 존재한다. 이러한 다층 구조를 모델링하기 위한 시도들은 Fanger(1971)의 단일 개체 모델에서 Fiala 등(1999)의 다중 개체 모델로 발전하였다. 이러한 선행 연구들에서는 각 신체 부분들을 여러 겹의 구 또는 원통으로 가정하고 다층 구조 피부의 물성을 반영하여 장기, 뼈, 근육, 지방, 외피 층을 나누어 모델링하였다.

또한 인체는 체온 조절 작용을 통해 주변 환경에 적응하여 체온을 일정 수준 이상 떨어뜨리거나 높이지 않도록 하므로 인체의 온도를 도출하는 과정에서는 반드시 이를 고려해야 한다. 체온 조절 작용은 뇌의 시상하부에서 음성 되먹임(negative feedback) 과정을 통하여 자율신경이나 호르몬 농도를 조절하는 기작을 수행함으로써 체온을 일정하게 유지하기 위한 인체 내부의 제어과정이며 크게 세 가지로 나뉜다. 먼저 추운 주변 환경에 적응하기 위해 근육을 떨어 열을 발생시키는 떨림(shivering)과 표피에 흐르는 혈류량을 조절하여 외부로의 열 발산을 조절하는 혈관운동(vasomotion)이 있다. 마지막으로는 더운 주변 환경에 적응하기 위해 땀을 흘려 증발열을 통한 열 소산을 목적으로 하는 땀흘림(sweating)이 있으며, 이를 통해 인체와 외부 환경 간에 발생하는 열전달 현상을 조절하게 된다.

이러한 체온 조절 작용의 모델링을 위해 선행 연구는 크게 두 가지의 방법론을 제시하였다. Tanabe 등(2002)은 Thermo-receptor 개념을 도입하여 체온 조절이 전혀 일어나지 않는 상태(thermoneutral)와 현재 피부 표면 온도의 차이에 따라 체온 조절 양이 결정되는 방법을 제시하였고, Fiala 등(2001)의 경우 Thermoneutral 상태 대비 현재 피부 표면 온도 차이 뿐만 아니라 시간에 따른 피부 표면 온도의 변화까지도 고려한 모델을 개발하고 기존에 발표된 논문들의 실험 결과를 토대로 비례 변수를 도출하여 이를 체온 조절 양을 결정하는 데 사용하였다. 이러한 연구들을 통해 인체 내부에서 발생하는 체온 조절 작용 및 인체와 외부 환경 간에 발생하는 열전달 현상에 대한 수치해석적 모델이 확립됨에 따라 정확한 인체의 피부 표면 온도 도출이 가능하게 되었다. 또한 인체 모델의 외부에 의복을

착용함으로써 달라지는 열전달 현상의 변화를 고려한 모델까지도 등장하였다(Wan *et al.*, 2008).

그러나 이런 모델을 바탕으로 병사에서 방출되는 적외선 신호를 도출하고, 이를 저피탐지 활용한 연구는 공개된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 다층 구조 피부 모델과 체온조절 모델을 수치해석에 적용하여 실제에 가까운 의복 및 인체 피부의 표면 온도를 도출함으로써 인체에서 발생하는 적외선 신호 특성을 파악하고자 하였다. 수치해석은 RadThermIR 10.4.0을 사용하여 수행하였으며, 해석에 사용된 피부 다층구조 모델 및 체온 조절 모델은 선행문헌의 실험 결과와 검증하여 타당성을 확보하였다. 검증된 모델을 적용하여 의복 미착용/착용 시 각각 의복 및 피부 표면 온도를 도출하고 이를 체온 조절 작용의 변화양상을 통해 설명하였다. 인체의 피부 및 의복의 표면 온도와 방사율을 이용하여 신체 부분 별 학산 방사 강도(diffuse radiance intensity)를 계산하고, 가상의 배경과의 대비를 제시하여 인체에서 발생하는 적외선 신호의 특성을 파악하고 군복의 저피탐지 측면에서 고려해야 할 사항을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 Bioheat 방정식

본 연구에서는 실제와 가까운 인체의 피부 표면 온도 분포를 실제와 유사하게 예측하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 인체 형상을 모델링하였다. Fiala 등(1999)의 연구에 제시된 신체 부분 별, 다층 구조 피부의 물성을 적용하기 위하여 총 20개의 부분으로 분할하여 모델링을 수행하였다. 모델링 된 신체 부분은 각각 구 또는 원통형으로 가정되며 Fig. 1(b)에 나타난 다층 구조 피부 모델 및 체온 조절 작용 모델을 적용하여 내부에서 발생하는 열전달 현상을 고려하게 된다. 모델링된 신체 부분들에 대하여 아래와 같은 축대칭의 Bioheat equation을 작성하고 해석함으로써 인체의 체온 분포를 얻게 된다(Fiala *et al.*, 1999).

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_m + \rho_w w_{bl} c_{bl} (T_{bl,a} - T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 k 는 각 신체 부분 별, 각 다층 구조 별 열전도도이며, ρ 는 밀도, c 는 비열, w 는 혈류 속도이다. 수식해서 하첨자 bl 은 혈액을 나타내며, a 는 동맥을 나타낸다.

식 (1)의 좌변 첫 번째 항은 다층구조 피부에서 발생하는 전도 열전달을 의미한다. 항에 나타난 ω 는 신체 부분 모델링의 형상에 따라 달라지는 계수로 구형 모델링의 경우 2, 원통형의

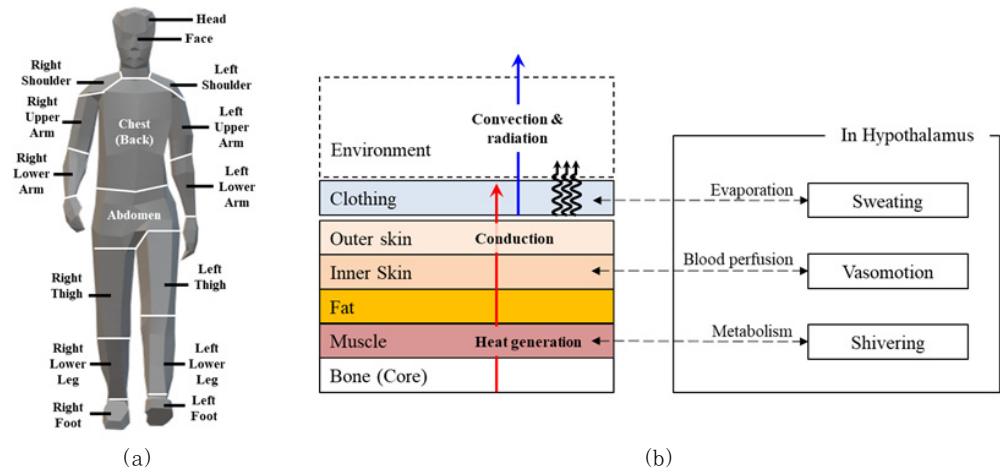


Fig. 1 (a) Analyzed human model with body compartment, (b) schematic of clothed multi-layer compartments and heat transfer phenomena with thermoregulation process in hypothalamus

Table 1 Properties of garment and body element covered by each clothing

Clothing	I_{cl} ($m^2 K/W$)	f_{cl}	$R_{e,cl}$ ($m^2 kPa/W$)	Body element covered
Shirts: Long-sleeve, shirts collar(broadcloth)	0.125	1.235	0.0119	Chest, Back, Shoulders, Arms
Trousers: Straight, long, loose(denim)	0.129	1.444	0.0151	Thighs, Lower Legs, Abdomen(outer)
Underwear : Brief(knit)	0.089	1.083	0.0079	Abdomen(inner)
Footwear: Calf length dress socks(knit)	0.075	1.077	0.0417	Feet

경우 1을 사용한다. 두 번째 항은 신진대사에 의한 열 발생량이며 활동 수준(activity level)에 의하여 결정되는 인체 내부의 발열량을 의미한다. 마지막 세 번째 항은 혈류에 의해 발생하는 열 전달양이다. 수치해석 상에서 혈류는 가상의 심장이라고 볼 수 있는 Central blood pool에서 각 신체 부분의 다층 구조에 열을 공급하는 열원으로 작용하며, 특히 신체 말단이나 어깨에는 동맥과 정맥이 서로 가깝게 분포하고 있어 동맥-정맥간 상호 열전달(countercurrent heat exchange)까지도 고려하여 식을 해석하게 된다. 즉, 시간에 따른 인체의 온도 변화는 인체 내부에서 외부로 전도되는 열, 신진대사에 의해 발생하는 열, 혈액에 의하여 전달되는 열과 외부 경계조건인 주변 환경의 기온 및 습도에 의하여 결정된다.

체온 조절 모델은 수치해석시 각 시간 구간마다 Bioheat 방정식의 열 발생 항(q_m), 혈류 속도(w_{bl}), 그리고 땀에 의한 증발열을 조절하는 역할을 수행한다. 체온 조절 작용 모델은 다음식 (2)~(5)로 표현된다.

$$Sh = 10[\tanh(0.48\Delta T_{sk,m} + 3.62) - 1]\Delta T_{sk,m} - 27.9\Delta T_{hy} + 1.7\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} - 28.6 \quad (2)$$

$$Cs = 35[\tanh(0.34\Delta T_{sk,m} + 1.07) - 1]\Delta T_{sk,m} + 3.9\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} \quad (3)$$

$$Sw = [0.8\tanh(0.59\Delta T_{sk,m} - 0.19) + 1.2]\Delta T_{sk,m} + [0.57\tanh(1.98\Delta T_{hy} - 1.03) + 6.3]\Delta T_{hy} \quad (4)$$

$$Dl = 21[\tanh(0.79\Delta T_{sk,m} - 0.70) + 1]\Delta T_{sk,m} + 32[\tanh(3.29\Delta T_{hy} - 1.46) + 1]\Delta T_{hy} \quad (5)$$

여기서, Sh , Cs , Sw , Dl 은 각각 떨림(shivering), 혈관 수축(vasoconstriction), 땀 흘림(sweating), 혈관 확장(vasodilatation)과 관련된 체온조절 변수이며, ΔT 는 Thermo-neutral 상태의 인체의 평균 온도 대비 인체의 현재 온도 차이를 의미한다. 하침자 sk 는 인체 피부 표면, hy 는 시상하부(hypothalamus)를 의미한다.

인체 외부에 작용된 의복은 머리, 얼굴, 목 양손을 제외한 모든 부위에 적용하였으며 상의는 복부(abdomen)를 포함한 상부의 신체 부분에, 하의는 복부를 포함한 하부의 신체 부분에 적용한 것으로 가정하였다. 특히, 복부에는 속옷과 하의가 함께 존재하여 실제 의복 착용 형상과 유사하도록 설정하였다. 해석에 사용된 의복의 물성 및 의복이 착용된 부위를 Table 1에 나타내었다. 비정상(transient) 해석 시, 의복은 두께가 매우 얇아 비정상 효과에 비해 정상상태 효과가 지배적이므로 의복의 밀도와 비열은 없다고 가정하였다.

2.2 수치해석 조건 및 격자

수치해석은 RadThermIR 10.4.0을 사용해 수행했으며, 인체에서 발생하는 열전달 현상의 해석을 위해 Human Thermal module을 사용하였다. Table 2에 나타낸 경계조건 및 활동수준을 인체 모델에 적용하였으며, 체온조절현상을 반영하기 위해 비정상해석을 수행하였다. 해석에 사용된 격자는 Fig. 2에 나타내었으며 제시된 형상 및 격자를 이용하여 Bioheat equation을 해석하였다. 인체의 외부에서 발생하는 대류, 복사, 증발열을 Fig. 2의 우측에 나타내었다. 복사열전달은 view factor를 고려한 표면 대 표면 복사(surface to surface radiation)를 계산하였으며 대류열전달은 신체 부분별로 대류열전달 계수를 측정한 Wang(1990)의 연구를 바탕으로 식 (6)을 적용하였다. 특히 인체의 피부 표면에서 땀의 증발로 발생하는 증발열의 경우 체온조절작용을 바탕으로 계산된 땀의 양과 의복의 투습저항에 의한 의복 내부 수증기압을 고려하여 표면에 직접 작용하는 열유속(imposed heat flux)으로 계산하였다.

$$h_{c,mix} = \sqrt{a_{nat} \sqrt{T_{sf} - T_{air}} + a_{frc} v_{air,eff} + a_{mix}} \quad (6)$$

여기서, $h_{c,mix}$ 는 자연대류 및 강제대류를 고려한 인체 표면에서의 혼합 열전달 계수이며 T_{sf} 는 인체의 표면 온도, T_{air} 는

Table 2 Boundary conditions and activity level for numerical analysis

Parameters	Value
Ambient air temeprature(°C)	35
Air flow speed(m/s)	0.05
Relative Humidity(%)	0
Room wall temperature(°C)	35
Room wall emissivity	1
Activity level(met*)	3.8(Walking)

* 1 met = 58.2W/m²

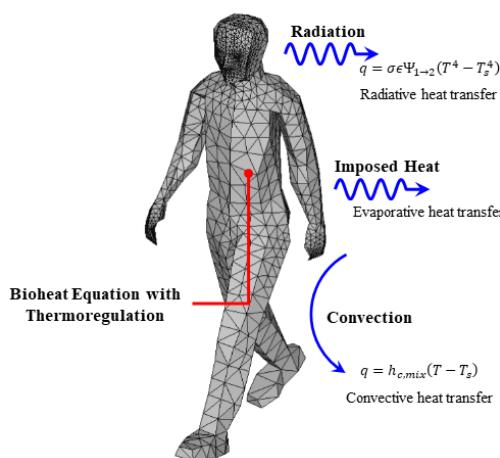


Fig. 2 Computational grid of human model with thermal boundary conditions applied on the model

공기의 온도, $v_{air,eff}$ 는 풍속이다. a_{nat} , a_{frc} , a_{mix} 는 각 신체 부분마다 달라지는 자연대류, 강제대류, 혼합대류에 의한 계수로 Fiala 등(1999)의 연구에 제시된 값을 이용하였다.

2.3 모델 및 해석기법 검증

사용한 수치해석 모델의 격자 및 시간 간격(time step) 테스트 결과 인체의 평균 표면 온도가 격자 개수에 영향을 거의 받지 않음을 확인하였으며, 시간 간격은 30초 이하일 때 평균 표면 온도가 수렴함을 확인하였다. 본 연구에서는 약 55,000 개의 격자를 사용하였으며, 주변 환경이 고온 또는 저온의 극한 조건이므로 체온 조절 작용에 의한 표면온도의 수렴성을 증가시키기 위하여 15초의 시간 간격으로 해석을 진행하였다. 타당성 검증을 위하여 Young 등(1986)의 실험조건에 대한 validation을 수행하였고 실험에서 제시한 시간 변화에 따른 인체의 평균 피부 표면 온도와 수치해석을 통해 계산한 평균 피부 표면 온도를 Fig. 3에 나타내었다. 평균 피부 표면 온도는 식 (7)을 통하여 계산했다.

$$T_{sk,m} = \sum_i \frac{a_{sk,i}}{A_i} \int_{A_i} T_{sk} dA \quad (7)$$

여기서, A 는 표면적이며, T_{sk} 는 피부 표면 온도이다. 하첨자 i 는 각 신체 부분을 의미한다. $a_{sk,i}$ 는 표면 민감도 계수이며 신체 부분에서 저온 또는 고온 자극에 대한 민감도를 나타내는 계수이다. 측정 결과와 수치해석 결과의 경향성과 값 모두 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 체온조절 모델 및 다층 구조 피부 모델이 잘 확립되었다고 판단하여 이후 해석을 진행하였다.

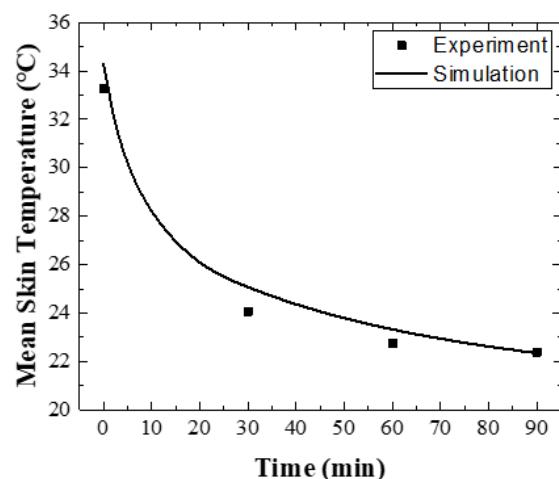


Fig. 3 Comparison of mean skin temperature derived by simulation and experiment(Young et al., 1986)

3. 해석결과 및 고찰

3.1 인체의 표면온도 특성

인체의 적외선 신호 도출을 위하여 의복 미착용 시와 착용 시에 각각 500분의 시간동안 체온조절 작용을 고려한 비정상 해석을 수행하여 Fig. 4의 피부 표면 온도 분포를 얻었다. 두 경우 모두 시간에 따라 피부 표면 온도가 증가하다 점차 수렴하는 경향을 나타내었다. Fig. 4(a)를 보면, 신체 부분마다 유사한 온도를 갖는 것이 아니라 국부적으로 온도 분포의 차이가 있으며 온도가 수렴한 이후에도 차이가 존재함을 알 수 있다. 이는 체온조절 작용이 식 (2)~(5)와 같이 인체의 평균 피부 표면 온도에 의하여 결정되지만, 결정된 체온조절 작용의 양은 몸 전체에서 고르게 발생하는 것이 아니라 각 신체 부분에 따라 다르게 나타나기 때문이다. Fiala 등(1999)의 연구에 따르면 체온 조절 효과의 분배는 각 신체 부분마다 다르게 일어나고, 이 비율을 체온조절 분배 계수로 제시하였다. 체온 조절 분배 계수는 땀 흘림, 혈관 확장, 혈관 수축, 몸 멀림에 관련된 네 가지로 이뤄져 있으며 각각에 대한 설명 및 값은 Stolwijk (1971) 및 Fiala 등(1999)의 연구에 제시되어 있다. 또한 피부가 두꺼운 복부, 허벅지, 팔뚝은 온도변화가 급격히 일어나지 않고 체온 조절 분배 계수도 크기 때문에, 피부가 얇은 얼굴, 손 등에 비하여 외기조건에 민감하게 반응하지 않고 원래의 온도를 유지해 다른 신체 부문과의 온도 차이가 나타나게 된다.

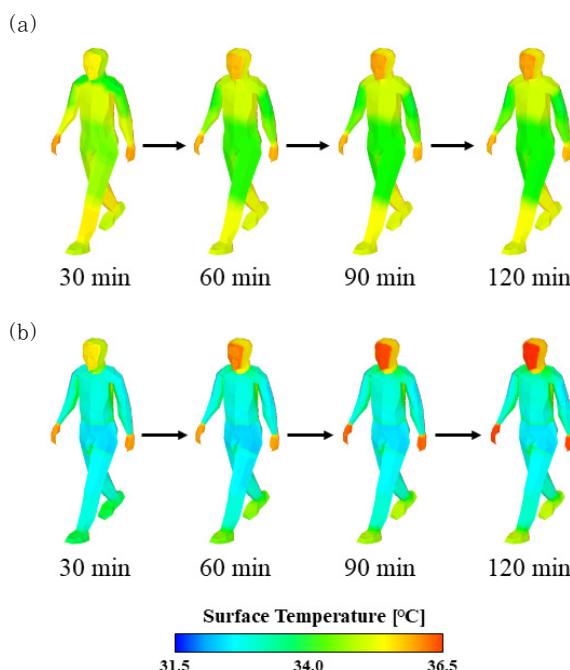


Fig. 4 Temperature distribution of outermost surface for (a) unclothed human and (b) clothed human

Fig. 4(b)는 의복을 착용한 상황에서 인체의 피부 표면 온도 분포를 나타내는데, 전반적으로 의복을 착용하여 가려진 복부, 다리, 발 등의 온도가 외부로 노출된 신체 부분들에 비해 온도가 낮다. 또한, 의복 미착용 시에 비하여 얼굴이나 손의 온도가 더 높은 것이 특징이다.

이러한 특징을 분석하기 위해 Fig. 5에 의복 착용 부분 (covered)인 흉부(chest)와 외부 노출 부분(uncovered)인 얼굴(face)의 피부 표면 온도를 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타나는 것처럼 의복 착용 부분의 피부 표면 온도는 의복의 단열효과로 인하여 의복 미착용시보다 증가하나, 실제 외부로 드러난 의복 표면 온도는 의복 미착용시보다 감소하게 된다. Fig. 5(b)에 나타나는 것처럼 외부 노출 부분의 피부 표면 온도 또한 증가하는데 의복에 의해 가려져있지 않아 열저항의 영향이 없음에도 불구하고 의복 미착용 시보다 표면온도가 증가한다. 이는 체온 조절 현상의 분석을 통하여 설명할 수 있다.

이를 위해 도출한 체온을 이용하여 식 (2)~(5)의 체온 조절 작용 변수들을 계산하고, 식 (3), (5)를 이용하여 인체 표면에 흐르는 혈류량(skin blood flow)을 식 (8), (9)을 통해 계산한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

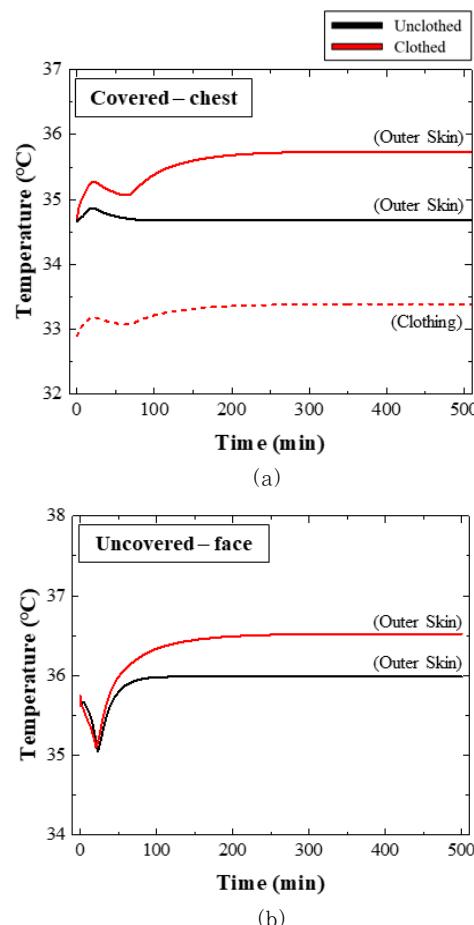


Fig. 5 Change in surface temperature of (a) chest and (b) Face for unclothed/clothed human body

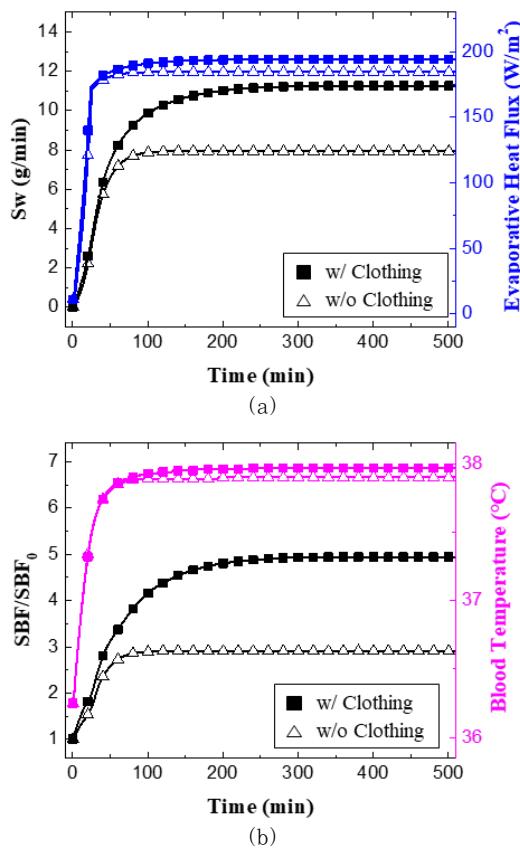


Fig. 6 Comparison of thermoregulation phenomena inside the human body for unclothed/clothed human body. (a) Sweating and evaporation and (b) normalized skin blood flow and blood temperature

$$\beta = \rho_{bl} c_{bl} SBF \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\beta_0 + a_{dl} Dl}{1 + a_{cs} Cs} \times 2^{\frac{T_{sk} - T_{sk,0}}{10}} \quad (9)$$

여기서, a_{dl} 은 혈관 확장에 관련된 계수이며, a_{cs} 는 혈관 수축에 관련된 계수이다. 또한, 체온 조절 작용 중 떨림(shivering)은 외기 온도가 높기 때문에 발생하지 않는다.

고온의 외기 조건에 노출된 인체는 표면에서 열을 더 많이 소산시키기 위해 땀 발생량을 증가시킨다. Fig. 6(a)에서 의복 착용으로 인해 땀 발생은 약 42% 증가하고 이에 따라 외부로 방출되는 증발열도 5% 증가하는데, 증발열이 조절되는 땀흘림 양만큼 증가하지 않는 이유는 의복의 투습저항 영향 때문이다. 의복을 착용함으로써 투습저항이 증가하고 이에 따라 수증기 분압이 높아져 땀의 증발을 억제한다. 즉, 땀 생성량이 증가 하더라도 땀의 증발이 억제되므로 의복 착용 시에는 충분한 열량 소산이 이뤄질 수 없게 된다. 이에 따라 피부 표면 온도가 초기보다 더 증가하게 되며, 이는 앞의 Fig. 5(a)의 결과와도 일치한다.

또한 의복 착용 부분의 체온이 증가함에 따라서 인체 내부 혈액의 온도가 증가하며 피부 표면의 혈관이 확장된다. Fig. 6(b)에서 혈액의 온도는 약 0.1도 증가하며 외부로의 열 발산을 위하여 혈류량이 70% 이상 증가한다. 이 때, 혈액에 의해 외부로 전달되는 전도열량은 식 (1)에 의해 $w\Delta T_{bl}$ 에 비례하고 혈류량 (w)과 혈액 온도 (T_{bl})가 모두 증가하므로 외부 표면으로 전도 되는 열량이 증가한다. 이러한 이유에 의해 의복 착용 부분뿐만 아니라 의복 미착용부의 피부 표면 온도 또한 증가하게 된다.

3.2 인체의 적외선 신호 특성

인체의 피부 및 의복의 표면 온도 특성을 파악한 후 이를 적용하여 파장 8~12 마이크로미터의 열상대역 적외선 신호를 도출하였다. 적외선 신호는 의복 미착용 시와 의복 착용 시에 각각 방사되는 확산방사강도를 계산하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 확산방사강도의 분포는 앞에 제시하였던 Fig. 4의 인체의 표면온도 분포와 유사한 경향성을 보인다. 의복 미착용 시 몸 전체적으로 방사강도는 균일한 반면 의복 착용 시는 의복 착용 부위와 외부 노출 부위가 극명하게 대비된다. 이러한 특성을 나타내는 이유는 의복 착용 시 적외선 신호를 결정하는 피부 및 의복 표면 온도가 열저항으로 인해 감소하기 때문이다.

의복을 착용함으로써 신체와 배경간의 복사강도 차이 또한 다른 특성을 나타낸다. 배경복사가 낮은 조건(low background radiance, Low $I_{sr} = 43W/m^2sr$) 및 배경복사가 높은 조건 (high background radiance, High $I_{sr} = 45W/m^2sr$)으로 가상의 배경조건을 설정 후, Fig. 8(a)에 배경조건에 따른

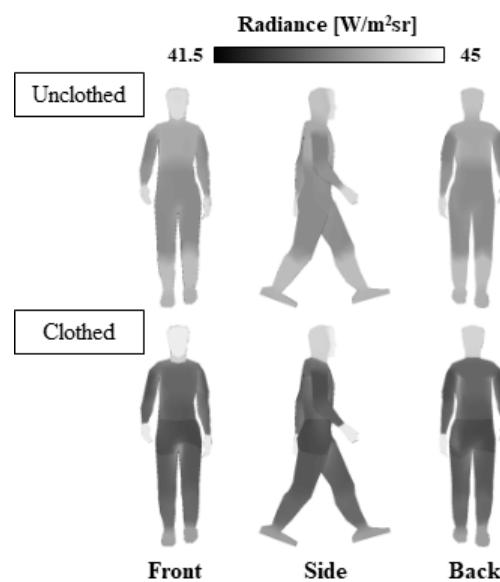


Fig. 7 Comparison of diffuse radiance intensity of unclothed/clothed human body

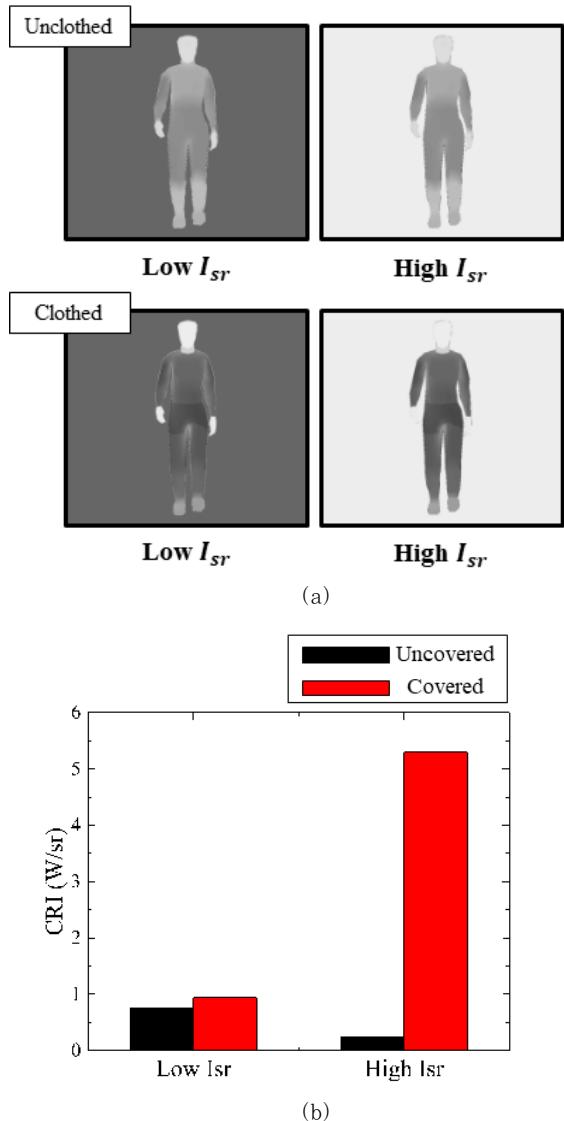


Fig. 8 (a) Infrared image of human with assumed background and (b) Mean and maximum contrast radiance of unclothed and clothed human body

인체의 적외선 신호를 나타내었다. 각 배경조건은 겨울 및 여름의 배경복사를 가정한다고 볼 수 있다. 의복 미착용 시에 비하여 의복 착용 시에는 다음과 같은 특징을 보인다.

먼저, 낮은 배경복사 조건에서 의복 착용 부분은 Radiance 감소로 배경과의 신호 차이가 더 작게 나타난다. 반대로 외부 노출 부분은 Radiance 증가로 배경과의 신호 차이가 더 크게 나타난다. 전반적으로 대비가 크지 않아 피탐지성이 낮다.

그러나 높은 배경복사 조건에서는 의복 착용 부분은 Radiance 감소로 배경과의 신호 차이가 크게 나타난다. 반대로 외부 노출 부분은 Radiance 증가로 배경과의 신호 차이가 더 작게 나타난다. 전반적으로 대비가 커져서 피탐지성이 높다.

이로부터 의복 착용 시의 적외선 신호특성을 분석하기 위하여 의복 착용 부분과 외부 노출 부분의 면적을 고려한 배경 대비

적외선 신호(contrast radiance intensity, CRI)를 아래 식을 통하여 도출하여 Fig. 8(b)에 나타내었다.

$$CRI[W/sr] = (I_{body} - I_{sr}) \times A_{body} \quad (10)$$

식 (10)에서 I 는 확산방사강도이며 A 는 표면적이다. 하침자 body는 인체, sr은 배경을 의미한다.

저방사 배경조건에서는 Fig. 8(a)의 복사에너지 차이를 비교한 것과는 다르게 외부 노출 부분의 CRI가 의복 착용 부분의 CRI보다 낮게 나타난다. 이는 배경 복사 에너지 자체의 효과보다는 각 신체 부분이 차지하는 면적의 효과가 더 크기 때문으로 외부 노출 부분과 배경의 신호대비가 큼에도 불구하고 면적이 작아 CRI 자체는 낮은 값을 보이는 반면, 의복 착용 부분은 신호대비는 작지만 면적이 커서 CRI가 큰 값을 나타낸다. 고방사 배경조건에서는 앞의 결과와 같은 경향을 나타내게 되고, 이는 배경과 의복 착용 부분의 역대비가 면적 효과에 의해 극대화되었음을 보여준다.

의복 착용 부분의 경우 배경조건에 상관없이 외부 노출 부분에 비해 더 큰 값을 가지며, 이에 따라 피탐지성은 의복 착용부에 의해 결정된다고 보아도 무방하다. CRI는 저방사 조건에서가 고방사 조건에서보다 약 82% 작게 나타나며, 이에 따라서 겨울과 같은 낮은 배경복사 조건에서는 의복 착용에 따른 저피탐 효과가 두드러진다고 유추할 수 있다. 반면 여름과 같은 고방사 조건에서는 의복 착용부의 역대비로 인해 오히려 피탐지성이 크게 증가하며 이를 고려한 군복 설계가 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

열상감지장비(TOD)의 성능이 향상됨에 따라 군사작전의 성공을 위해 항공기나 전차와 같은 무기체계의 적외선 저피탐뿐만 아니라 병사의 피부와 군복에서 발생되는 적외선 신호를 줄이기 위한 군복의 필요성이 대두되었다. 인체의 적외선 신호는 의복 및 인체 피부 표면의 방사율과 표면온도로 결정되는데, 수치해석적으로 정확한 적외선 신호를 예측하기 위해서는 이러한 표면 온도를 정확하게 도출하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 인체의 체온 조절 현상 및 디층구조 피부 모델을 적용하여 실제와 유사한 의복 및 피부 표면 온도를 도출하고, 이를 토대로 인체에서 발생하는 적외선 신호를 계산하였다. 도출된 적외선 신호를 가상의 여름/겨울을 나타내는 고방사/저방사 배경조건과 병치하여 의복 착용 시의 배경 대비 적외선 신호를 파악하였다.

인체에서 발생하는 적외선 신호는 의복 착용부와 외부 노출부에서의 국부적인 차이가 발생하는 특징을 가진다. 이는 인체의

표면온도 분포와 의복 및 사람 피부의 방사율 차이에 의하여 결정된다. 이를 저방사/고방사 배경조건과 비교하였을 때, 저방사 배경조건에서는 의복 착용 부분과 외부 노출 부분 모두 비교적 낮은 CRI를 나타내는 반면 고방사 배경조건에서는 의복 착용부 CRI가 저방사 조건에 비해 4.6배 증가하였다. 이는 겨울과 같은 저방사 조건에서는 의복 착용에 의한 저피탐 효과가 나타나지만 여름과 같은 고방사 조건에서는 오히려 역대비가 일어나 피탐지성이 크게 증가함을 알 수 있다.

향후에는 다양한 외기조건 및 태양, 하늘, 지표배경 등 실제 배경조건을 고려한 인체의 적외선 신호 특성을 파악하여 병사의 적외선 신호특성을 분석하는 연구 및 의복 방사율의 최적화를 통하여 고방사 배경조건에서의 피탐지성을 최소화하는 연구의 수행이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Fanger, P.O. (1973) *Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering*, New York: McGraw-Hill, pp.28~30.
- Fiala, D., Lomas, J.K., Stohrer, M. (1999) A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: The Passive System, *J Appl. Phys.*, 87(5), pp.1957~1972.
- Fiala, D., Lomas, J.K., Stohrer, M. (2001) Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions, *Int. J. Biometeorol.*, 45, pp.143~159.
- Stolwijk, J.A.J. (1971) *A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man*, NASA Contractor Report, NASA, USA, 77.
- Tanabe, S.-I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M. (2002) Evaluation of Thermal Comfort using Combined Multi-node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD), *Energy & Build.*, 34, pp.637~646.
- Wan, X., Fan, J. (2008) A Transient Thermal Model of the Human Body-clothing-environment System, *J. Therm. Biol.*, 33, pp.87~97.
- Wang, X.L. (1990) Convective Heat Losses from Segments of Human Body, *Climate Build.*, 3, pp.8~14.
- Young, A.J., Muza, S.R., Sawka, M.N. Gonzalez, R.R., Pandolf, K.B. (1986) Human Thermoregulatory Responses to Cold Air are Altered by Repeated Cold Water Immersion, *J. Appl. Phys.*, 60(5), pp.1542~1548.

요지

본 논문에서는 인체의 열상대역 저피탐을 위한 선행연구로써 인체에서 방사되는 적외선 신호는 인체 표면의 방사율과 표면온도에 의하여 결정된다. 따라서 적외선 신호해석을 위하여 표면온도를 정확히 도출할 필요가 있고, 이를 위하여 인체의 열적 편안함을 도출하는데 주로 사용 되어온 체온 조절 작용 및 다층 구조 피부 모델을 적용하여 인체의 표면온도 도출에 사용하였다. 기법의 검증을 위하여 비정상 해석 결과와 실험결과의 비교 검증을 수행하였으며, 이로부터 체온 조절 작용이 인체의 표면온도 결정에 미치는 영향을 파악하였다. 비정상 해석을 통해 도출된 표면온도와 피부 및 의복의 방사율을 이용하여 적외선 신호를 도출하였으며, 가상의 배경조건에 따라 나타나는 인체의 적외선 신호 특성을 파악하였다. 의복을 착용함으로써 인체는 저방사 배경과의 적외선 신호차이가 작아지는 반면 고방사 조건에서는 역대비로 인해 오히려 피탐지성이 증가하게 된다.

핵심용어 : 열상신호, 의복, 배경대비복사, 수치해석