Journal of the KIMST, Vol. 22, No. 5, pp. 644-653, 2019
ISSN 1598-9127(print), 2636-0640(online)
DOI https://doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.5.644

Research Paper 열 · 유체 부문

의복 소재 변경에 따른 인체 열상신호 변화 특성

장인중[1] · 배지열[2] · 이남규[1] · 곽휘권[3] · 조형희[*,1]

[1] 연세대학교 기계공학부
[2] 국방과학연구소 제4기술연구본부
[3] ㈜한화시스템

Variation of Human Thermal Radiation Characteristics Applying Different Clothing Materials

Injoong Chang[1] · Ji-Yeul Bae[2] · Namkyu Lee[1] · Hwykuen Kwak[3] · Hyung Hee Cho[*,1]

[1] *Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea*
[2] *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*
[3] *Hanwha Systems, Korea*

(Received 4 June 2019 / Revised 4 September 2019 / Accepted 20 September 2019)

ABSTRACT

With the development of themal observatory device(TOD), thermal camouflage system has been applied not only to the weapon system but also to the combat suit for soldiers. In this paper, the characteristic of thermal radiation of human body depending on the clothing material properties was analyzed through numerical simulations. The bioheat equation with thermoregulatory model was solved to obtain the realistic surface temperature of human body and these results are combined with the emissivity of human skin and clothing in order to calculate the thermal signature from the human body. According to each thermal resistance of clothing, the optimal background radiance which makes contrast radiance intensity(CRI) be lowest is different. Also, the average CRI variation per thermal resistance change is about twice as much as the case of evaporative resistance change.

Key Words : Human Thermal Signature(인체 열상신호), Clothing Properties(의복 물성), Thermoregulation(체온조절작용), Numerical Analysis(수치해석)

기 호 설 명

ρ : 밀도 (kg/m^3)
c : 비열 (J/kg-K)
T : 온도 (℃ or K)
k : 열전도도 (W/m-K)
w_{bl} : 혈류속도 (1/s)
Sh : 몸 떨림에 의한 발열 (W)
Cs : 혈관 수축과 관계된 체온 조절 변수

* Corresponding author, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

Sw : 시간 당 땀흘림양 (g/min)
Dl : 혈관 확장과 관계된 체온 조절 변수 (W/K)
β : 혈류의 에너지양 (W/K)
a_{dl} : 신체 부분 별 혈관 확장 계수
a_{cs} : 신체 부분 별 혈관 수축 계수
N : 적외선 이미지 내 표적의 픽셀 수
I : 확산방사강도 (W/m^2-sr)
q'' : 열유속 (W/m^2)
R_d : 의복의 열저항 (m^2-K/W)
$R_{e,d}$: 의복의 투습저항 (m^2-kPa/W)

1. 서 론

현대전에서 군사작전의 성공을 위해서는 적의 감시장비에 탐지되지 않도록 하는 저피탐지가 필수적이다. 탐지장비는 가시광선, 레이더, 근적외선 대역뿐만 아니라 상온의 온도를 가진 모든 물체가 방사하는 8-12 마이크로미터의 원적외선 대역을 탐지할 수 있는 열상감지장비(Thermal Observatory Device, TOD)에 이르기까지 다양한 대역을 감시하고 있다. 특히 TOD의 경우 아주 먼 거리에서도 열상대역 신호를 포착하고 탐지 대상을 구별할 수 있는 수준에 이르렀다. 이에 따라 최근 적용되고 있는 항공기, 전차와 같은 대형 무기체계의 적외선 저피탐 뿐만 아니라 병사의 군복에서 발생되는 적외선 신호의 저피탐 까지도 고려하는 것이 병력의 생존성 향상에 필수적이다. TOD는 표적와 배경의 적외선 신호 대비를 탐지에 이용하므로 이를 줄이기 위한 열상대역 저피탐 군복 설계를 위해서는 다양한 의복 소재에 대해 적외선 신호 변화특성을 예측하는 것이 필수적이다. Sitvjenkins 등[1]의 연구에서도 다양한 군복 및 의복을 착용함에 따라서 TOD에 포착되는 열상신호를 다양한 배경조건에 따라 분석하여 열상대역 저피탐성 확보에 활용하였다.

의복 소재 변경을 통하여 변화하는 물성은 크게 밀도, 비열, 열저항, 투습저항, 방사율이 있다. 그 중에서 밀도와 비열의 경우 시간에 따라 변화하는 의복의 온도에 관련된 물성이고, 의복의 두께가 수 mm 정도로 매우 얇아 이러한 비정상(Transient) 효과는 의복에서 거의 나타나지 않는다. 방사율의 경우에도 의복은 평균적으로 0.95의 값[2]을 가지는 것으로 알려져 있다.

의복의 물성을 변화함으로써 인체는 외부 환경과의 상호작용이 달라지고 이에 따라 인체는 체온을 일정하게 유지하기 위한 체온 조절 작용인 발열, 땀 흘림, 혈류량 조절 작용을 수행하게 되어 결과적으로 인체 표면온도를 변화시키게 되며 이러한 표면온도의 변화는 인체로부터 나오는 열상대역 적외선 신호에 영향을 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 의복 소재를 변경함에 따라서 달라지는 열물성 중에서도 열저항 및 투습저항이 사람의 열상신호에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실제에 가까운 열상신호 도출을 위해 장인중 등[3]에서 확립한 적외선 신호 도출 방법을 적용하여 연구를 수행하였다. 열물성 변화에 따른 정상상태의 의복 및 인체 피부온도를 도출하고 이를 체온조절 작용의 결과로써 설명하였다. 이와 함께 인체 피부 및 의복의 방사율을 고려하여 확산방사강도(Diffuse radiance intensity)를 계산하고 가상의 배경을 설정하여 배경대비복사강도(Contrast Radiance Intensity, CRI)를 제시함으로써 적외선 신호의 정량지표를 제시하고 열물성에 따른 열상신호 특성을 파악하여 군복 저피탐지 측면에서 열물성 선정에 고려해야 할 사항을 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 수치해석 형상 및 모델

수치해석에 사용된 인체 모델은 Fig. 1(a)와 같이 의복을 착용한 신체 부분(의복 착용부, Covered)과 의복을 착용하지 않아 외부로 드러난 신체 부분(외부 노출부, Uncovered)로 나뉜다. 각 신체 부분들은 축대칭의 원통 또는 구 형태로 가정하며 다층 구조로 모델링 되었다. 의복 착용부의 경우 Fig. 1(b)와 같이 뼈(코어), 근육, 지방, 진피 표비의 다층 구조 신체 부분 위에 의복(clothing)이 감싸고 있는 형태를 갖는다. 반면 외부 노출부는 Fig. 1(c)와 같이 의복 없이 다층 구조로만 구성되어 있다. 외부 노출부는 얼굴, 머리, 목, 양 손으로 총 5개의 신체 부분으로 구성되어 있으며 의복 착용부는 이를 제외한 나머지 신체 부분으로 구성되어 있다. 이에 따라 외부에서 바라보았을 때 인체의 표면온도는 의복 착용부의 경우 의복의 표면온도(Clothing temperature)이며 외부 노출부의 경우 인체 피부 온도(Outer skin temperature)가 나타난다.

수치해석은 RadThermIR 10.4.0을 사용하여 수행하였으며 Bioheat 방정식 및 체온 조절 작용의 해석을 위하여 Human thermal module을 적용한 500분간의 비정

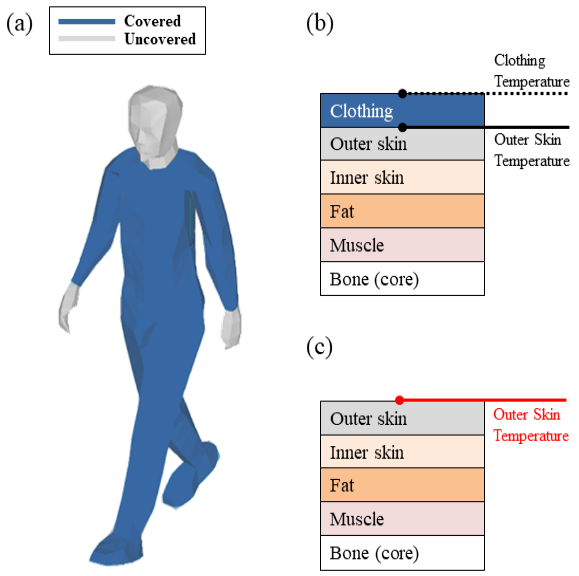

Fig. 1. (a) Analyzed human model and indication of covered(blue)/uncovered(gray) part, skin layer structure of (b) covered and (c) uncovered parts

Table 1. Comparison of mean skin temperature between simulation and experiment (Young et al.[3])

Time [min]	Mean skin temperature [℃] (simulation)	Mean skin temperature [℃] (Young et al.[3])	Error [%]
0	33.24	34.27	-3.1
30	24.06	25.07	-4.1
60	22.74	23.33	-2.6
90	22.38	22.35	0.1

상(Transient) 해석을 수행하였다. 수치해석의 타당성검증을 위해 Grid 및 Time step test를 수행하여 격자는 4만개 수준, Time step은 0.25분 기준[3]으로 해석을 수행하였다. Table 1에 실험과 수치해석간의 타당성 검증 결과를 나타내었다. Young 등[4]의 실험과 동일한 경계조건을 적용하여 수치해석을 수행한 결과 각 시간에 따라 인체 평균 표면온도의 경향성이 일치하고 값의 오차가 5 % 이내로 예측되었다.

본 연구에서는 인체의 다층 구조 피부 및 체온 조절 작용을 고려한 열전달 현상의 해석을 위해 Fanger[5]의 연구에서 제시된 식 (1)의 Bioheat 방정식을 풀어 피부의 표면온도를 계산하였다.

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

식 (1)에서 ρ, c, k는 신체 각 부분 별 밀도, 비열, 열전도도이며 T는 온도, t는 시간, r은 앞에서 가정하였던 신체 부분 모델의 반경 방향 길이이다. w는 혈류 속도를 의미하며 ω는 신체 부분 모델의 형상에 따라 달라지는 계수로 원통형은 1, 구형은 2를 사용한다. 하첨자 bl은 혈액을 의미하며 a는 동맥을 의미한다.

우변 첫 번째 항은 전도열전달을 의미하며, 두 번째 항은 활동 수준에 따라 달라지는 신진대사에 의한 발열량이다. 마지막 세 번째 항은 혈류에 의해 피부 표면으로 전도되는 전도열전달을 의미한다[3].

이에 더하여 Bioheat의 신진대사 열(q_m), 혈류량(w_{bl}), 피부 표면의 경계조건으로써 Imposed heat으로 직접 주어지는 땀에 의한 증발열을 변화시키는 체온 조절 모델을 도입함으로써 실제에 가까운 인체 표면온도 분포를 예측하였다. Stolwijk[6] 및 Fiala 등[7,8]의 연구로부터 체온 조절 작용 모델의 변수는 총 네 가지이며 식 (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, Dl은 각각 떨림(Shivering), 혈관 수축(Vasoconstriction), 땀 흘림(Sweating), 혈관 확장(Vasodilatation)과 관련된 체온조절 변수이며, ΔT는

Thermoneutral 상태의 인체의 온도 대비 인체의 현재 온도 차이를 의미한다. 하첨자 sk는 인체 피부 표면, hy는 시상하부(Hypothalamus)를 의미한다.

Sh는 인체 신진대사 발열량에 더해져 내부 발열량을 조절하는 작용을 수행하며, Sw는 분당 땀 생성량으로 피부 표면에서의 증발열을 조절한다. Dl과 Cs는 다음 식 (6)으로부터 혈류량 조절 작용을 수행한다.

$$SBF = \frac{\beta}{\rho_{bl} c_{bl}} = \frac{1}{\rho_{bl} c_{bl}} \frac{(\beta_0 + a_{dl} Dl)}{1 + a_{cs} Cs \times e^{-Dl/50}} \times 2^{\frac{T_{sk} - T_{sk,0}}{10}} \quad (6)$$

여기서 SBF는 피부 표면 혈류량(Skin blood flow, SBF)이며 β는 혈류의 에너지량, T는 온도, ρ_{bl}, c_{bl}은 각각 혈류 밀도 및 혈류 비열을 의미한다. 하첨자 0은 인체의 기초대사만을 고려했을 때 열적으로 평형 상태인 Thermoneutral 일 때의 값이며 하첨자 sk는 표피를 의미한다. 상수 a_{cs} 및 a_{dl}은 각 신체 부분에서 혈관의 수축 및 이완의 양을 결정하는 상수로써 Fiala 등[6]의 연구의 값을 사용하였다. SBF는 SBF_0로 나누어 혈관 확장도로서 제시하였다. 이로부터 혈관 확장도(SBF/SBF_0)가 1보다 크면 혈관 이완상태, 1보다 작으면 혈관 수축 상태이다.

의복을 착용함으로써 인체 표면에서 의복 표면으로의 열전달 현상을 추가로 고려해야 하고 이를 위해 의복의 열저항 및 투습저항에 의한 의복 표면온도 및 땀 증발량이 결정된다[2]. 열저항은 의복의 두께 방향으로의 열전달을 방해하는 정도를 나타내는 물리량이다. 투습저항은 의복 내부에서 외부 대기로의 수증기 분압 차에 의한 열/물질전달을 방해하는 정도를 나타내는 물리량이다. 열저항과 의복 및 인체의 표면온도 관계를 식 (7)에 나타내었고 투습저항과 의복 및 인체의 수증기 분압 관계를 식 (8)에 나타내었다.

$$T_{sk} - T_{cl} = R_{cl} \times \frac{q_{sk}}{A_{sk}} \quad (7)$$

$$p_{sk} - p_{cl} = R_{e,cl} \times \frac{q_{e,sk}}{A_{sk}} \quad (8)$$

여기서 T는 온도, p는 수증기 분압, q는 전도열량(Dry heat loss), q_e는 증발열량(Evaporative heat loss)를 의미하며 R_d은 의복의 열저항, $R_{e,d}$은 의복의 투습저항을 의미한다. A는 표면적이고 하첨자 cl은 의복 표면을 의미하며 sk는 피부 표면을 의미한다.

2.2 수치해석 변수 선정 및 경계조건

본 연구에서는 열저항 및 투습저항에 따른 열상대역 신호 변화특성을 살펴보기 위해 Table 2와 같이 다섯 개의 수치해석 케이스를 선정하였다. Table 2의 각 수치해석 케이스 중 열저항은 영문자 T로 나타나며 ISO 8996 및 Standard KSU Uniform[9]에서 봄/가을의 옷차림에 해당하는 0.8 clo (TM)를 기준으로 여름 및 겨울의 옷차림에 해당하는 열저항인 0.4 clo (TL) 및 1.2 clo (TH)를 선정하였다. 투습저항은 영문자 E로 나타나며 ISO 9920으로부터 0.8 clo (TM)의 옷이 가지는 평균 투습저항인 0.022 m^2kPa/W (EM)를 기준으로하여 0.011 m^2kPa/W (EL) 및 0.033 m^2kPa/W (EH)를 선정하였다.

수치해석에 사용된 경계조건은 외부 대기온도 20 ℃, 대기의 바람 속도는 0.1 m/s, 대기의 상대습도는 60 %이다. 이에 따라 인체 외부에서 발생하는 대류열전달은 Wang[10]의 연구를 통해 제시된 인체의 대류열전달 계수를 사용하여 계산하였다. 또한 인체에서 외부로의 복사열전달을 계산하기 위해 인체를 둘러싸고 있는 가상의 육면체 벽을 가정하였고 벽의 온도는 대기온도와 같은 20 ℃, 벽의 방사율은 1로 두어 View factor를 고려한 표면 대 표면 복사를 계산하였다. 인체는 1.8 m/s(6.4 km/h)로 걷고 있다고 가정하여 활동수준을 3.8 met(220 W/m^2)으로 두고 수치해석을 수행하였다.

Table 2. Cases of numerical simulation for evaluating clothing property effects on human thermal signature

Case #		Thermal resistance (R_{cl}) [clo]	Evaporative resistance ($R_{e,cl}$) [m^2kPa/W]
1	TH-EM	1.2	0.022
2	TL-EM	0.4	0.022
3	TM-EM	0.8	0.022
4	TM-EH	0.8	0.033
5	TM-EL	0.8	0.011

2.3 인체 열상신호 평가

적외선 신호 탐지기는 적외선 이미지에서 표적과 배경의 복사에너지 대비를 이용하여 표적을 탐지한다. 따라서 표적에서 방사되는 복사강도가 같아도 배경의 복사강도가 다르면 대비가 변화하게 된다. 일반적으로 표적에서의 방사강도가 배경보다 큰 경우 양의 대비, 작은 경우 음의 대비가 발생한다. 이러한 양과 음의 대비를 모두 반영하기 위하여 대비의 절댓값을 평균낸 값을 사용하는데 이를 평균 절대 복사 대비 C_{abs}라 부르며 다음 식 (9)과 같다[11].

$$C_{abs} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}|I_{tg,n} - I_{bg,n}| \tag{9}$$

여기서 N은 적외선 이미지 내 표적의 픽셀 수, I는 확산방사강도(Diffuse radiance intensity)이며 하첨자 tg는 표적(Target), 하첨자 bg는 배경(Background)를 의미한다.

식 (9)에 표적의 전체 면적을 곱하면 적외선 신호의 정량지표인 배경대비복사강도(CRI)를 얻게 되며 이는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$CRI[W/sr] = C_{abs} \cdot A_T \tag{10}$$

여기서 A_T는 표적의 전체 면적이다.

본 연구에서는 의복 물성 변화에 따라 달라지는 인체의 8-12 μm 파장대역 확산방사강도를 계산하고 이와 함께 배경조건 변화를 고려하여 인체의 배경대비 복사강도를 제시함으로써 인체의 열상신호를 평가하였다.

3. 연구 결과

3.1 열저항 변화에 따른 인체 표면온도 영향

열저항 변화에 따른 인체 표면온도 변화를 분석하기 위해 체온 조절 작용을 고려한 비정상 해석을 수행하였다. Fig. 2는 열저항 변화에 따른 인체 표면온도를 나타낸 것으로 Fig. 2(a)는 외부에서 바라본 인체의 표면온도 분포를 나타내며 Fig. 2(b)는 의복 착용부의 의복 표면온도 및 인체 피부온도, 외부 노출부의 인체 피부온도의 정량적인 값을 나타낸다. 의복 착용부의 의복 표면온도는 외부 노출부의 인체 피부온도에 비해 낮은 특징을 보인다. 또한 의복 열저항의 증가에 따라 의복 표면온도는 감소하는 반면 인체 피부온도는 의복 착용부 뿐만 아니라 외부 노출부에서도 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 온도 변화를 분석하기 위해 체온 조절 작용에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 3은 열저항 변화에 따른 체온 조절 작용의 변화 양상을 나타낸 것으로 Fig. 3(a)는 열저항 변화에 따른 분당 땀 흘림 양(Sweating)과 인체 표피에서의 증발열량(Evaporation)의 관계를 나타내고 Fig. 3(b)는 열저항 변화에 따른 혈류 온도 및 혈관 확장도(SBF/SBF_0)를 나타낸다. 앞서 도출한 인체 표면온도 분포를 바탕으로 식 (2)-(5)의 체온 조절 변수를 계산한 후 분당 땀 흘림 양 Sw 및 식 (6)을 통해 SBF 및 혈관 확장도를 얻었다. 이 때 몸 떨림에 의한 발열량은 본 연구의 경계조건 상에서는 0이므로 고려하지 않았다.

열저항이 증가함에 따라 단열 효과가 커지고 이에 따라 몸의 열을 방출하기 위해 인체는 분당 땀 흘림 양을 증가시킨다. Fig. 3(a)의 TL 대비 TH에서 분당 땀 흘림 양은 42 % 증가하며 인체에서의 증발열량도 35 % 증가한다. 분당 땀 흘림 양의 증가에 비해 증발열량의 증가는 상대적으로 적은데, 이는 의복의 존재로 인하여 흘린 땀이 모두 증발하지 못하기 때문이다. 이에 따라 인체에서 발생한 열이 외부로 충분히 소산되지 못하므로 높은 열저항의 의복을 착용할수록 의복 착용부의 피부 표면온도가 증가하게 된다. 또, 인체 내부의 혈액이 데워지므로 Fig. 3(b)에서 혈액의 온도가 0.1 ℃ 증가하며 피부 표면의 모세혈관이 확장하여 혈류량이 TL 대비 TH에서 40 % 증가한다. 식 (1)에서 혈류에 의한 피부로의 전도열전달은 혈류 온도(T_{bl})가 높고 혈류량(w)이 클수록 증가하므로 높은 열저항의 의복을 착용할수록 외부 노출부의 피부온도 또한 증가한다.

의복의 표면온도는 의복 착용부의 피부 표면온도가 일정하다면 식 (7)과 같이 열저항에 의하여 결정되므로 열저항이 증가할수록 의복 표면온도는 감소하는 것이 타당하다. 그런데 의복 착용부의 피부 표면온도가 증가함에도 불구하고 의복의 표면온도가 감소하는 것으로 보아 의복의 열저항 증가에 의한 의복 표면온도 감소효과가 체온 조절 효과에 의해 발생하는 피부온도 증가효과에 비해 더 지배적임을 알 수 있다.

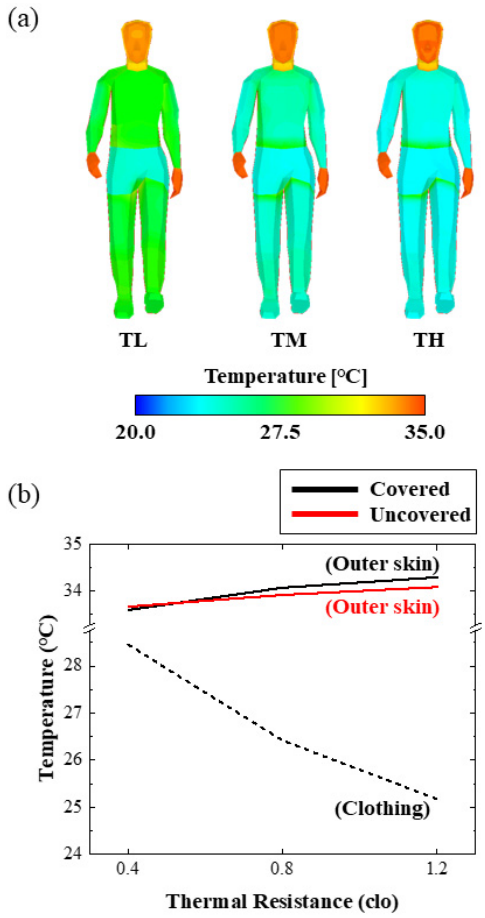

Fig. 2. For different thermal resistance of clothing, (a) temperature distribution of outermost human skin temperature and (b) temperature of outer skin and clothing for human body parts

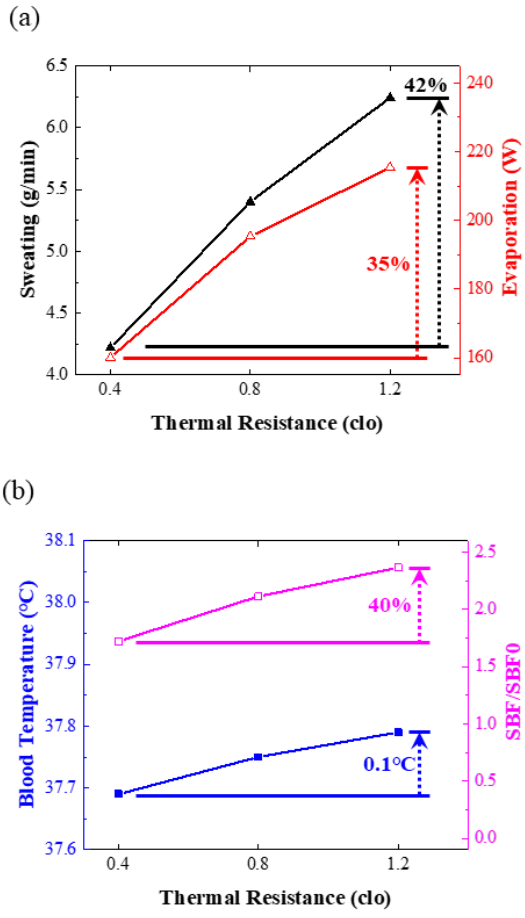

Fig. 3. Change of thermoregulation phenomena inside the human body for different thermal resistance of clothing. (a) Sweating and evaporation and (b) blood temperature and normalized skin blood flow

3.2 투습저항 변화에 따른 인체 표면온도 영향

투습저항 변화에 따른 인체 표면온도 변화를 분석하기 위해 체온 조절 작용을 고려한 비정상 해석을 수행하였다. Fig. 4는 투습저항 변화에 따른 인체 표면온도를 나타낸 것으로 Fig. 4(a)는 외부에서 바라본 인체 표면온도 분포를 나타내며 Fig. 4(b)는 의복 착용부의 의복 표면온도 및 인체 피부온도, 외부 노출부의 인체 피부온도의 정량적인 값을 나타낸다. 투습저항을 변화시키는 경우, 의복의 열저항은 일정하므로 의복 착용부의 의복 표면온도는 인체 피부온도와 같은 경향성을 나타내며 의복의 투습저항 증가에 따른 외부 노출부의 인체 피부온도 변화는 의복 착용부의 인체 피부온도의 변화에 비해 상대적으로 크다. 이러한 온도변화를 분석하기 위해 체온 조절 작용에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 5는 투습저항 변화에 따른 체온 조절 작용의 변화 양상을 나타낸 것으로 Fig. 5(a)는 투습저항 변화에 따른 분당 땀 흘림 양과 인체 표피에서의 증발열량의 관계를 나타내고 Fig. 5(b)는 투습저항 변화에 따른 혈류 온도 및 혈관 확장도를 나타낸다. 투습저항이 증가함에 따라 의복 내부 수증기압이 증가하고 이에 따라 땀의 증발이 억제되므로 Fig. 5(a)의 EL 대비 TH에서 몸의 열을 방출하기 위해 인체는 분당 땀 흘림

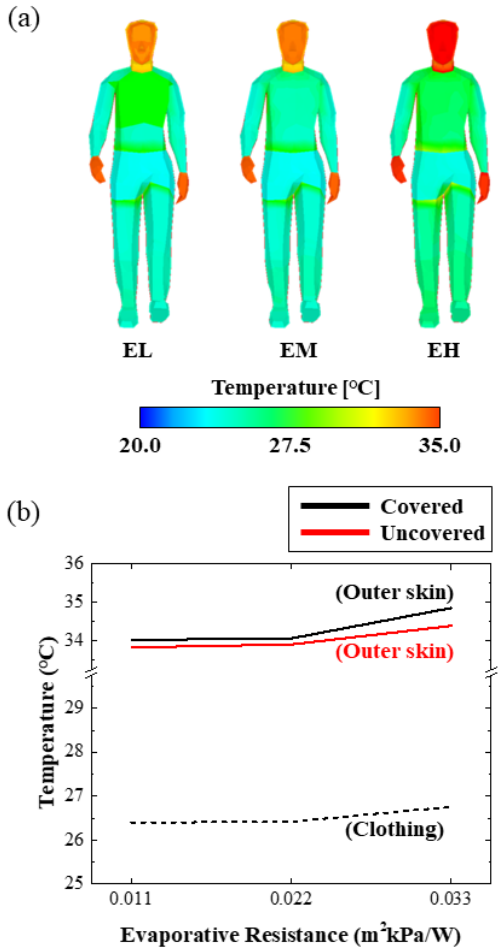

Fig. 4. For different evaporative resistance of clothing, (a) temperature distribution of outermost human skin temperature and (b) temperature of outer skin and clothing for human body parts

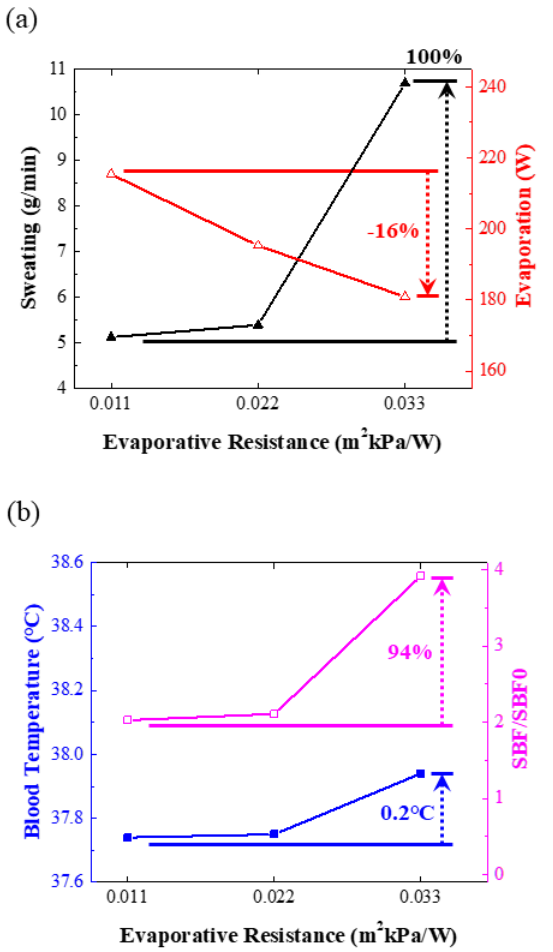

Fig. 5. Change of thermoregulation phenomena inside the human body for different evaporative resistance of clothing. (a) Sweating and evaporation and (b) blood temperature and normalized skin blood flow

양을 2배 증가시킨다. 그럼에도 불구하고 오히려 증발열은 16 % 감소하게 된다. 이에 따라 인체에서 발생한열이 외부로 충분히 소산되지 못하므로 높은 투습저항의 의복을 착용할수록 의복 착용부의 피부 온도는 증가하게 된다. 인체 내부의 혈액온도 또한 데워지므로 Fig. 5(b)의 EL 대비 EH에서 혈액의 온도가 0.2 °C 증가하며 피부 표면의 모세혈관 확장에 따른 혈류량이 94 % 증가한다. 식 (1)에서 혈류 온도가 높고 혈류량이 많을수록 피부로의 전도열전달이 증가하므로 높은 투습저항의 의복을 착용할수록 외부 노출부의 피부온도 또한 증가한다.

의복 표면온도는 투습저항을 변화시킬 때 열저항은 TM의 경우로 일정하게 고정하였으므로 인체 피부온도의 경향과 일치한다. 또한 EM대비 낮아질 때(EM→EL) 보다 높아질 때(EM→EH) 표면온도 변화량이 더 크다는 특징을 갖는다. 이는 ISO 9920을 기준으로 평균 투습저항보다 작거나 같은 경우 열 소산이 충분히 이뤄져 표면온도의 변화가 상대적으로 작은 반면 투습저항 증가하게 되면 땀으로 인한 열 방출이 어려워지고 외부 노출부 온도 증가에 크게 기여함을 알 수 있다.

3.3 인체 열상대역 적외선 신호 분석

열저항 및 투습저항 물성 변화에 따른 표면온도 특성을 파악한 후 이를 적용하여 8-12 마이크로미터 파장대역의 열상대역 적외선 신호를 계산하였다. 적외선 신호는 TL, TH, EL, EH의 네 가지 경우에 대하여 확산방사강도를 계산하였으며 이 때 의복의 방사율은 0.95, 사람 피부의 방사율은 0.98을 사용하였다[2]. 열저항이 클수록 의복 표면온도가 낮고 외부 노출부의 피부온도는 높으므로 TH의 경우에 의복 착용부에서 상대적으로 작은 적외선 신호를 나타내는 반면 외부 노출부의 적외선 신호는 더 높다. 그러나 의복 착용부의 적외선 신호 차이는 TL과 TH에서 크게 발생하는 반면 외부 노출부분의 적외선 신호 차이는 상대적으로 작게 발생한다. 투습저항이 클수록 의복 표면온도 및 외부 노출부의 피부 온도 모두 높기 때문에 인체 전반적인 적외선 신호가 높아지지만 그 차이는 열저항이 증가하는 경우에 비해서 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이로부터 인체 전반적인 적외선 신호는 투습저항보다 열저항의 변화에 더 지배적임을 알 수 있다.

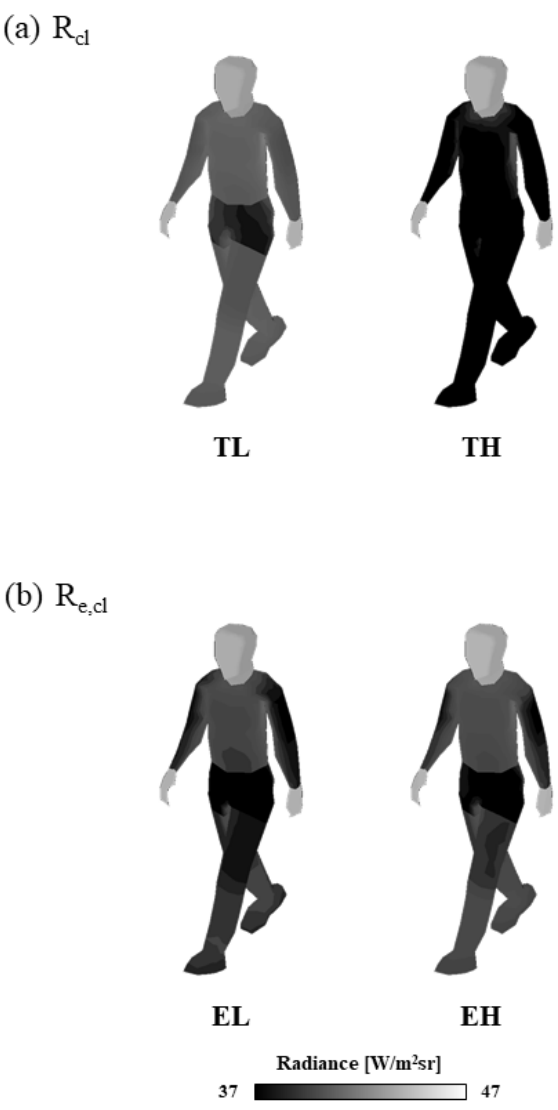

Fig. 6. Comparison of radiance intensity for different (a) thermal resistance and (b) evaporative resistance

이에 더하여 배경조건의 영향을 파악하기 위해 세 가지 배경복사 조건을 선정하였다. 낮은 배경복사 조건(I_{bg} = 37 W/m^{2}sr), 중간 배경복사 조건(I_{bg} = 42 W/m^{2}sr), 높은 배경복사 조건(I_{bg} = 47 W/m^{2}sr)으로 가상의 배경조건을 선정하였으며 각 배경조건은 밤, 아침/저녁, 낮의 배경복사에너지와 유사하다[12].

열저항이 낮은 경우, 낮은 배경복사 조건에서는 양의 대비가 높은 배경복사 조건에서는 음의 대비가 나타나며 중간 배경복사 조건에서 주변 환경과 인체 열상신호가 비슷하여 피탐지성이 $CRI_{min,TL}$ = 4.8 W/sr로 가장 낮음을 알 수 있다. 열저항이 높은 경우, 낮은 배경복사 조건에서 $CRI_{min,TH}$ = 3.4 W/sr로 가장 피탐지성이 낮고, 그보다 높은 배경복사 조건에서는 모두 음의 대비가 나타난다. 반면 투습저항을 변화시키는 경우에는 낮은 배경복사와 중간 배경복사 조건에서 비슷한 피탐지성을 보이며 높은 배경복사 조건에서는 음의 대비를 나타낸다. 또한 두 투습저항 간 배경대비 복사강도 값이 큰 차이가 없음을 확인하였다. 즉, 열저항 변화에 따라서는 최적의 피탐지성을 갖는 배경조건이 달라지는 반면 투습저항 변화에 의해서는 최적 피탐지성을 갖는 배경조건이 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

각 열저항에 따른 인체의 CRI는 서로 다른 배경조건에서 최솟값을 가지며 열저항이 낮은 경우에는 낮은 배경복사 조건, 열저항이 높은 경우에는 중간 배경복사 조건에서 최솟값을 갖는다. 또한 각 배경조건에서 열저항의 변화에 따른 평균 CRI 변화는 4.5 W/sr를 나타내었다. 반면 각 투습저항에 따른 인체의 CRI는 가장 낮은 배경복사 조건에서 최솟값을 가지며 각 배경조건에서 투습저항 변화에 따른 평균 CRI 변화는 2 W/sr로 열저항 변화에 따른 CRI 변화의 절반보다 낮음을 확인하였다. 즉 배경조건과 인체의 열상신호

차이를 나타내는 CRI 또한 투습저항 보다는 열저항의 변화에 지배적임을 알 수 있다.

4. 결 론

열상감지장비(TOD)의 탐지성능의 증가로 무기체계의 적외선 저피탐뿐만 아니라 병사의 군복에서 발생되는 적외선 신호의 저감을 위한 저피탐 군복의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 다양한 의복 소재에 대해 인체의 적외선 신호 변화특성을 예측하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 의복 소재 변경에 따라 달라지는 열물성 중에서 열저항 및 투습저항의 변화에 따라 달라지는 인체 표면온도를 도출하여 이를 도대로 인체에서 발생하는 열상신호를 계산하였다. 도출된 적외선 신호를 가상의 낮/밤의 배경조건과 병치하여 의복 물성에 따른 배경 대비 적외선 신호 특성을 파악하였다.

의복 열저항이 증가함에 따라 의복 표면온도는 감소하고 외부 노출부의 피부온도는 증가한다. 반면 의복 투습저항이 증가함에 따라 의복 표면온도 및 외부 노출부의 피부온도 모두 증가한다. 열저항 변화에 따라 의복 표면온도 변화가 더 두드러지게 나타나며 투습저항의 경우 ISO 9920 기준 평균 투습저항보다 커지는 경우가 작아지는 경우에 비해 표면온도 변화량이 더 큼을 확인하였다.

인체 적외선 신호는 열저항 변화 시에 더 민감하게 변화하는 특성을 나타내었다. 이를 낮과 밤으로 대표되는 배경조건과 비교하였을 때, 투습저항과는 다르게 열저항을 변화시키는 경우 인체의 최적 CRI를 가지는 배경조건이 다르며 각 배경조건에 따른 평균 CRI 또한 투습저항을 변화시키는 경우에 비해 약 2배 이상 민감하게 변화함을 파악하였다.

결과적으로 인체의 표면온도, 적외선 신호, CRI 모두 투습저항보다는 열저항의 변화에 대해 민감하게 변화함을 확인하였으며 이로부터 저피탐 군복의 설계 시에는 열저항을 조절함으로써 더 효율적인 CRI 저감이 가능함을 파악하였다.

후 기

본 연구는 2019년도 ㈜한화시스템의 재원을 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] I. Sitvjenkins, I. Abele, A. Vilumsone and H. Torbicka, “Camouflage Quality Evaluation of the Combat Individual Protection System in the Thermal Infrared Spectrum,” Material Science. Textile and Clothing Technology, Vol. 7, pp. 97-106, 2012.

[2] D. Fiala, G. Havenith, P. Brode, B. Kampmann and G. Jendritzky, “UTCI-Fiala Multi-node Model of Human Heat Transfer and Temperature Regulation,” International Journal of Biometeorology, Vol. 56, pp. 429-441, 2012.

[3] I. Chang, J. Bae, N. Lee, H. Kwak and H. H. Cho, “Thermal Signature Characteristics of Clothed Human considering Thermoregulation Effects,” Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 32, No. 2, pp. 109-116, 2019.

[4] A. J. Young, S. R. Muza, M. N. Sawka, R. R. Gonzalez and K. B. Pandolf, “Human Thermoregulatory Responses to Cold Air are Altered by Repeated Cold Water Immersion,” Journal of Applied Physiology, Vol. 60, No. 5, pp. 1542-1548, 1986.

[5] P. O. Fanger, “Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering,” McGraw-Hill, New York, pp. 28-30, 1973.

[6] J. A. J. Stolwijk, “A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man,” NASA Contract Report, CR-1855, 1971.

[7] D. Fiala, J. K. Lomas and M. Stohrer, “A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: The Passive System,” Journal of Applied Physiology, Vol. 87, No. 5, pp. 1957-1972, 1999.

[8] D. Fiala, J. K. Lomas and M. Stohrer, “Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions,” International Journal of Biometeorology, Vol. 45, pp. 143-159, 2001.

[9] S. Konz, 1979, “Work Design,” Grid Publishing, Columbus Ohio.

[10] X. L. Wang, “Convective Heat Losses from

Segments of Human Body," Climate Buildings, Vol. 3, pp. 8-14, 1990.

[11] T. Kim, J. Song, J. H. Cha, J. Bae, D. Jung and H. H. Cho, "IR Characteristics of an Aircraft in Different Atmospheric/Background Conditions," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 456-462, 2014.

[12] T. Kim, T. Kim, J. Bae, D. Jung and H. H. Cho, "Infrared Signature Analysis on Armored Vehicle Applied with Emissivity Controlled Structure," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 30, No. 2, pp. 179-184, 2017.