고신대학교 의과대학 학술지 제25권 제1호
Kosin Medical Journal
Vol. 25. No. 1, pp. 51～58, 2010

한 점의 피부온도를 이용한 평균피부온도의 산출

최장규

고신대학교 의과대학 생리학교실

Estimation of Mean Skin Temperature Using One Point Local Skin Temperature

Jang-Kyu Choi

Department of Physiology, Kosin University College of Medicine, Busan, Korea

Abstract

Mean skin temperature (T_{sk}) is a common parameter in the study of human's temperature regulation. The purpose of this study was to propose a conventional formula to estimate T_{sk} from one point local skin temperature (T_s). Infrared thermography was carried out in 10 naked males at rest while decreasing the room temperature from 40℃ to 4℃ at 4℃ intervals. T_{sk} and T_s were measured from 110 whole-body infrared thermograms using an image processing system. T_s was taken at 17 different sites as the temperature of one pixel, corresponding to 1.24㎠ plane area. T_{sk} was measured as the mean temperature of 10,841 pixels that was equivalent to about 88% of total body surface area, and it changed from 34.2℃ to 24.4℃ in average. Each of the T_s was linearly proportional to T_{sk} ($r = 0.92 \sim 0.99$, $p<0.001$), suggesting that T_{sk} can be estimated from one point T_s. The standard error of estimates in 17 linear regression equations were ±0.4～1.3℃. By the way, the physiologically reliable error range in T_{sk} estimation was assessed to be valid at below 0.5℃. In the estimation of T_{sk} using one point T_s, therefore, we proposed 4 different linear formulas of which the standard error of estimate was less than 0.5℃. The accuracy of the proposed formulas was 75～85% in the error range of ±0.5℃ and 95～99% in the error range of ±1.0℃, respectively. However, because of lower accuracy than 95% in the physiologically reliable error range, the proposed formulas should be suitable to use in the field and its corresponding studies.

Key words : Mean skin temperature-calculating formula, Mean skin temperature, Local skin temperature, Infrared thermography

서 론

평균피부온도(T_{sk})는 인체의 체온조절반응을 연구하는데 있어서 유용한 정보를 제공한다. 예를 들면, 덥거나 추운 환경에 노출될 때 평균피부온도는 변화하므로 변화된 평균피부온도로서 환경온도에 의한 자극 정도를 판정할 수 있다. 또한 평균피부온도는 체열함량의 변화[1-4], 체조직의 열절연도[2,5], 대사성 열생산량의 추정[6-8] 및 복사와 대류에 의한 체열손실량[4,9,10] 등을 산정하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 이러한 평균피부온도는 이론적으로 체표면 전체의 피부온도를 빠짐없이 동시적으로 측정하여 산술평균함으로서 구할 수 있다.[9] 그렇지만 현실적으로 이러한 방식의 평균피부온도 측정은 불가능하다. 그리하여 연구자들은 3～15 군데의 국소부위의 피부온도를 이용하여 평균피부온도를 구하는 간편한 산출식을 제안하였다.[10-15] 그렇지만 보다 간편하게 단 한 군데의 피부온도를 이용하는 평균피부온도 산출방식은 아직 보고되지 않고 있다.

평균피부온도 산출식은 이론적이든 실질적이든 일차방정식의 형태를 취하고 있는데, 이러한 형태는 평균피부온도가 한 점의 국소피부온도로도 추정될 수 있음을 암시하고 있다.[9-15] 이론적으로 평균피부온도는 체표면 전체에서 측정되는 무한한 수의 국소피부온도를 산술평균하여 구할 수 있다; $T_{sk} = 1/n \bullet (T_1 + T_2 + T_3 + T_n)$.[9]

교신저자 : 최 장 규
주소 : 602-703 부산광역시 서구 암남동 34번지
고신대학교 의과대학 생리학교실
TEL : 051-990-6414, FAX : 051-990-3081
E-mail : jkchoi@ns.kosinmed.or.kr

간편산출식에서도 평균피부온도는, 아래에 기술된 바와 같이, 제한된 수의 국소피부온도를 측정하여 산술평균함으로서 구할 수 있다 ;

T_{sk}= 0.50•T_{chest} + 0.14•T_{arm} + 0.36•T_{leg}[11]

T_{sk}= 0.07•$T_{forehead}$ + 0.35•$T_{abdomen}$ + 0.14•$T_{forearm}$ + 0.05•T_{hand} + 0.19•T_{thigh} + 0.13•T_{calf} + 0.07•T_{foot}[12]

그런데 평균피부온도 산출식에 따라 국소피부온도의 측정수, 측정위치 및 가중치계수 등은 다르지만[10,13,16], 어떤 산출식이든지 평균피부온도와 국소피부온도 간에는 직선적인 비례관계가 있음을 나타내고 있으며, 이들 간의 직선적인 관계는 어떤 부위의 국소피부온도에서도 성립됨을 시사하고 있다. 만일 이러한 직선적인 관계가 실제적으로 관찰된다면, 한 점의 국소피부온도로서 평균피부온도는 산출될 수 있을 것이다. 그렇지만 아직까지 한 점의 피부온도가 평균피부온도와 직선적으로 비례한다는 보고는 없었다.

그러므로 본 연구에서는 한 점의 피부온도를 이용하여 평균피부온도를 추정할 수 있는 산출식을 제안하기 위해서 국소피부온도와 평균피부온도 간에 직선적인 비례관계가 성립되는지를 조사하였다.

연구대상 및 방법

피검자

체격이 다양한 건강한 남자 10명을 피검자로 선정하였다. 그들의 연령은 27.6 ± 2.0세 (평균 ± 표준오차)였으며, 신장은 171.0 ± 2.1㎝였고, 체중은 65.7 ± 2.8kg 였고, 체표면적은 1.73 ± 0.05㎡였다. 체표면적은 DuBois[17]의 직선식을 이용하여 산출되었다. 피검자의 체질량지수는 19.4~26.7kg/㎡로 다양하였고, 체질량지수의 평균치는 22.4 ± 0.8kg/㎡ (표준오차, n =10)였다. 피하지방층의 평균두께는 3.7 ± 0.5㎜ (표준오차, n =10)였고, 그 수치는 피검자별로 1.8~6.8㎜로 다양하였다. 피하지방층의 두께는 Lange skinfold caliper (Cambridge Scientific Instruments, Cambridge, MD)를 사용하여 10군데의 피부두겹두께를 측정하여 Allen 등[18]의 방법으로 산출되었다. 실험을 진행하기 전에, 연구의 성격, 목적, 방법 및 가능한 위험성 등을 각 피검자에게 자세히 설명하였고 이들의 동의를 구했다.

실험 과정

평균피부온도와 국소피부온도는 벌거벗은 상태의 피검자를 다양한 환경온도에 노출시키면서 촬영된 적외선 온도화상 (infrared thermograms)을 화상분석장비로 분석하여 측정하였다. 피부온도의 적외선 온도화상을 얻는 실험과정은 아래에 자세히 기술하였다. 넓은 범위의 피부온도를 얻기 위해서 T자형 팬티만 착용한 피검자를 40℃에서 4℃까지 실내온도가 변하는 상황에 노출시켰다. 즉, 벌거벗은 피검자를 40℃ 항온항습실에 들어가 3~5분 안정한 후에, 적외선 온도촬영기 (infrared thermograph, Infrared Thermoviewer 6T67, NEC San-ei, Tokyo, Japan)를 사용하여 Fig. 1과 같은 자세로 피검자 전면과 후면의 적외선 온도화상을 촬영하였다. 인체의 윤곽을 명확하게 하기 위해서 적외선 온도화상은 얼음물로 냉각시킨 커튼을 배경으로 촬영되었다. 신체 후면의 온도촬영은 신체 전면을 촬영한 후 20~30초 내에 행하였으며, 하나의 적외선 온도화상을 촬영하는 시간 "frame time" 은 1초로 고정하였다. 온도화상 촬영시 보다 넓은 체표에서 온도측정이 이루어지기 위해서 피검자는 30도 경사진 발판에 올라 발등이 보이는 상태에서 발을 어깨넓이로 벌리고 손가락은 붙이고 양팔은 45도로 벌리고 서있는 자세를 취했다 (Fig. 1).

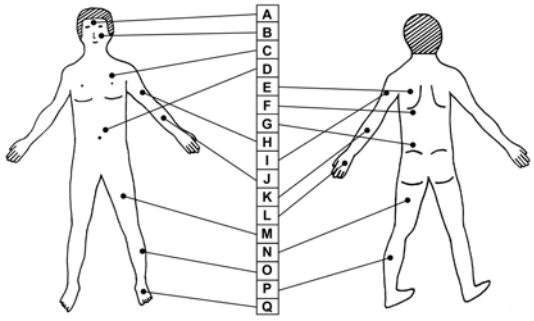

Fig. 1. Body posture for the measurement of whole-body infrared thermograms and the measurement sites of local skin temperature.

이어서, 항온항습실의 온도를 40℃에서 4℃까지 4℃ 간격으로 단계적으로 하강시키면서 각 실온에서 피검자 전면과 후면의 적외선 온도화상을 위에 언급한 바와 같은 동일한 자세에서 촬영하였다. 항온항습실의 온도를 4℃ 하강하는 데에 약 6분 정도 소요되었다. 그리고 4℃ 실온에서는 적외선 온도화상을 추위노출 5분경과 후 추가해서 촬영하였다. 항온항습실의 습도는 대략 50%로 유지되었고, 공기유동은 최소로 유지하였다. 육안으로 관

찰한 바, 40℃ 및 36℃ 실온에서 피검자의 얼굴에서 땀이 흐르지는 않았으며 12℃ 이하의 실온에서는 피검자들은 간헐적으로 혹은 약간씩 떨었다.

다양한 환경온도에 노출된 10명의 피검자로부터 총 110개의 체표 전체의 적외선 온도화상을 얻었다. 적외선 온도화상은 화상온도-전환프로그램 (Thermographic data-converting program, SAMPLE 1, NEC San-ei Co., Tokyo, Japan)을 사용하여 한 화상당 256×212 화소(pixel)로 디지털화하여 컴퓨터에 저장하였다. 본 연구에서 사용된 적외선 온도촬영기의 온도해상력은, 제조회사의 기기사용 설명서에 의하면, ±0.1℃였다.

평균피부온도와 국소피부온도의 측정

화상분석장비 (Image processing system, IBAS-Kontron Bildanazyse, Zeiss, Germany)를 사용하여 총 110개의 평균피부온도와 국소부위의 피부온도가 디지털화된 적외선 온도화상으로부터 아래의 조작을 거쳐 측정되었다. 우선, 디지털화된 적외선 온도화상에서 배경의 온도화상을 제거하여 체표 전면과 후면의 온도화상을 추출하였다. 배경은 화상분석장비의 온도창 (temperature window)의 상단과 하단의 설정온도를 조정하여 제거되었다. 온도창의 온도 조정으로 인체와 배경이 명확하게 구분되게 하기위해서 적외선 온도화상은 항상 배경 온도를 낮춘 상태에서 촬영되었다. 체표의 온도화상에 배경의 온도가 혼입되는 것을 방지하기 위해서 인체의 윤곽선을 따라 화소 한 개 면적의 온도정보를 제거하였다. 머리털과 팬티로 가려진 부분은 적외선 온도기록술로 피부온도의 측정이 불가능하기 때문에 이 부분의 온도화상도 수동적으로 제거하였다.

평균피부온도는 체표 전면과 후면의 온도화상에서 10,841 ± 322 화소 (표준오차, n=10)의 온도를 산술평균하여 측정되었다. 적외선 온도화상의 각 화소에는 평면적 1.24 ㎠에 해당되는 온도정보가 수록되었다. 따라서 평균피부온도가 측정되는 체표면적은 평면적으로 단순히 계산해서 피검자의 총체표면적의 78 ± 1 % (표준오차, n=10)에 해당되었다. 화소 하나의 면적은 직사각형의 평면철판을 적외선 온도촬영한 후 평판의 면적을 평판이 차지하는 화소의 수로 나누어 측정되었다. 국소피부온도는 Fig. 1에 표시된 체표 17군데의 위치에서 화소 하나의 온도로 측정되었다. 국소피부온도의 측정 위치는 평균피부온도의 산출식을 제안하거나 평가한 문헌들을 참조하여 정했다.[10,13,16,19]

데이타 분석

평균피부온도와 국소피부온도 간의 상관성을 판별하기 위해서 측정 부위별로 두 온도 간의 상관분석과 회귀분석을 시행하였다. 평균피부온도와 국소부위의 피부온도가 직선적이고 유의한 상관관계를 나타내는 경우, 직선회귀식의 유의성을 분산분석으로 검정하였고 또한 직선회귀식에 의한 평균피부온도의 추정오차를 산출하였다. 모든 분석에서 p값이 0.05 미만일 때 통계학적으로 유의하다고 간주하였다.

결 과

항온항습실의 실내온도가 40℃에서 4℃까지 단계적으로 내려가는 동안, 평균피부온도는 34.2 ± 0.9℃ (표준편차, n=10)에서 24.4 ± 0.6℃까지 점차 하강하였다 (Table 1). 체표 17군데에서 측정된 국소피부온도는 전반적으로 머리 쪽이 높고 사지 말단으로 갈수록 낮았다. 체간, 팔 및 다리의 신체영역 내에서 국소피부온도는 측정위치 별로 달랐다. 실내온도가 내려가는 동안 국소피부온도는 모든 부위에서 점차 하강하였고, 피부온도의 하강은 머리나 체간보다 사지 말단으로 갈수록 컸다.

Table 1. Mean skin temperature and local skin temperature of each measurement site at various room temperatures

Skin temperature	Room temperature in the climatic chamber (℃)			
	40℃	28℃	12℃	4℃-5min later
Mean skin temperature T_{sk}	34.2 (0.9)	32.6 (0.4)	28.2 (0.3)	24.4 (0.6)
Local skin temperature at :				
site A (forehead)	35.8 (1.4)	34.2 (0.8)	31.5 (0.5)	28.7 (1.0)
site B (cheek)	35.9 (0.6)	34.3 (0.3)	29.7 (1.1)	24.5 (1.3)
site C (chest)	34.0 (1.4)	32.8 (1.1)	29.4 (1.3)	26.3 (2.3)
site D (abdomen)	34.3 (1.1)	32.9 (0.9)	29.3 (1.0)	25.5 (1.8)
site E (scapula)	34.0 (1.4)	33.1 (1.2)	30.0 (0.7)	26.9 (1.2)
site F (subscapula)	33.5 (1.5)	32.5 (1.1)	29.3 (0.5)	26.5 (0.9)
site G (lumbar)	33.4 (1.1)	32.1 (0.7)	28.5 (0.8)	24.5 (1.8)
site H (upperarm-front)	34.9 (0.9)	33.3 (0.6)	29.1 (0.9)	25.7 (1.4)
site I (upperarm-back)	34.1 (1.1)	32.6 (0.6)	27.6 (0.6)	23.3 (0.9)
site J (forearm-front)	34.9 (0.6)	33.4 (0.4)	29.4 (0.7)	25.5 (1.0)
site K (forearm-back)	34.5 (0.9)	33.1 (0.5)	28.8 (0.4)	24.9 (0.8)
site L (hand)	34.0 (1.4)	32.9 (0.9)	26.8 (1.2)	20.3 (1.2)
site M (thigh-front)	34.6 (0.7)	32.6 (0.3)	27.8 (0.4)	23.6 (1.0)
site N (thigh-back)	34.0 (1.1)	32.3 (0.5)	27.6 (0.9)	23.5 (1.2)
site O (calf-front)	34.6 (0.7)	32.8 (0.4)	29.1 (0.8)	25.1 (1.2)
site P (calf-back)	34.3 (1.0)	32.3 (0.5)	26.9 (0.8)	22.1 (1.2)
site Q (foot)	33.0 (1.5)	32.1 (1.0)	26.1 (0.7)	19.9 (1.4)

Numbers in parentheses indicate SD (n = 10). For the sake of convenience, data at the ambient temperature of 36, 32, 24, 20, 16, 8℃ and 4℃ at zero time were omitted.

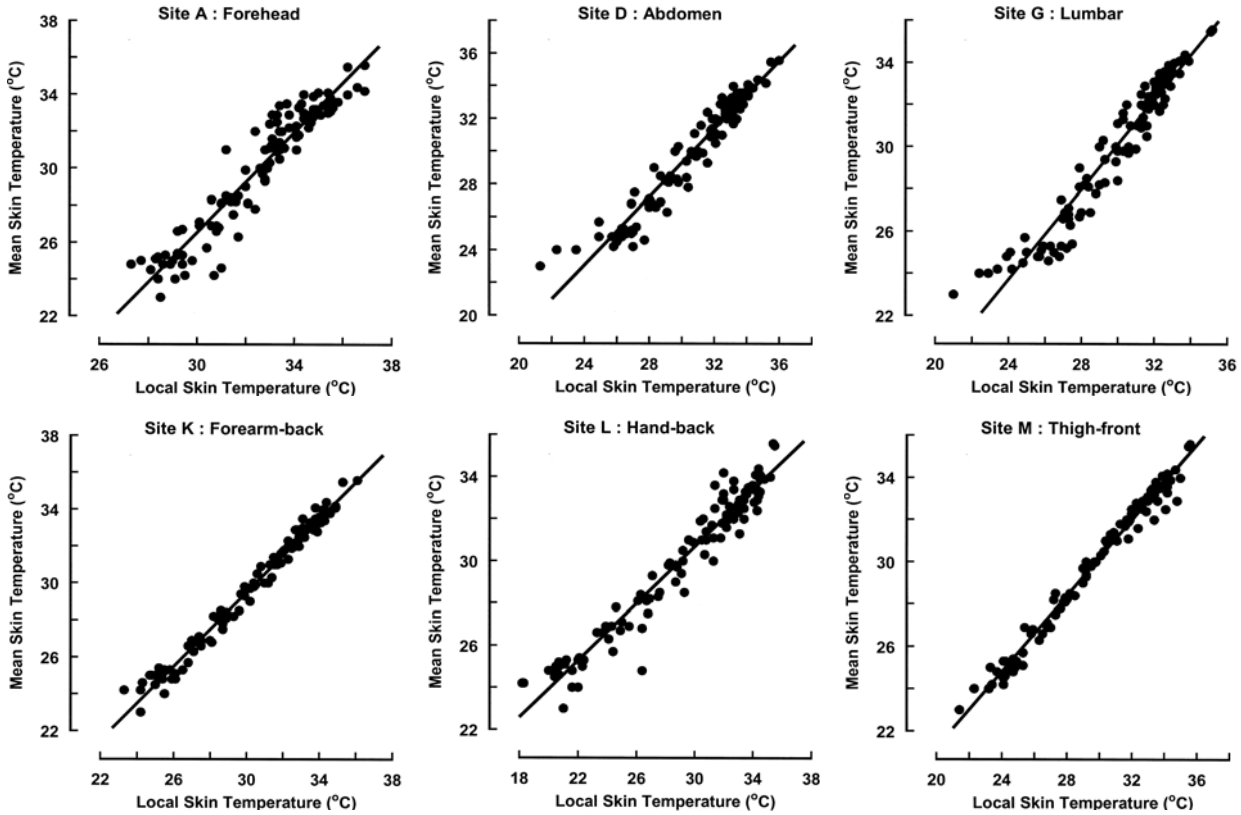

Fig. 2. Relationship between mean skin temperature and local skin temperature at various sites; a) site A (forehead), b) site D (abdomen), c) site G (lumbar), d) site K (forearm-back), e) site L (hand-back) and f) site M (thigh-front). The others were omitted for the sake of convenience.

Table 2. Linear regression and correlation analyses between mean skin temperature and local skin temperature of each measurement site

Skin temperature measurement Body Area	Site	Regression equation(℃)	r	SEE (℃)
Head	A	$T_{sk} = 1.32 \cdot T_A - 13.1^*$	0.944	1.1
	B	$T_{sk} = 0.83 \cdot T_B + 3.9^*$	0.963	0.9
	C	$T_{sk} = 1.05 \cdot T_C - 2.2^*$	0.919	1.3
Trunk	D	$T_{sk} = 1.04 \cdot T_D - 1.8^*$	0.966	0.9
	E	$T_{sk} = 1.21 \cdot T_E - 7.8^*$	0.954	1.0
	F	$T_{sk} = 1.28 \cdot T_F - 9.1^*$	0.969	0.8
	G	$T_{sk} = 1.07 \cdot T_G - 2.0^*$	0.968	0.9
Upperarm	H	$T_{sk} = 1.03 \cdot T_H - 1.8^*$	0.979	0.7
	I	$T_{sk} = 0.88 \cdot T_I + 4.0^*$	0.989	0.5
Forearm	J	$T_{sk} = 1.05 \cdot T_J - 2.6^*$	0.988	0.5
	K	$T_{sk} = 1.00 \cdot T_K - 0.5^*$	0.991	0.4
Hand	L	$T_{sk} = 0.68 \cdot T_L + 10.4^*$	0.971	0.8
Thigh	M	$T_{sk} = 0.90 \cdot T_M + 3.3^*$	0.992	0.4
	N	$T_{sk} = 0.91 \cdot T_N + 3.2^*$	0.985	0.6
Calf	O	$T_{sk} = 1.02 \cdot T_O - 1.1^*$	0.981	0.6
	P	$T_{sk} = 0.79 \cdot T_P + 6.9^*$	0.984	0.6
Foot	Q	$T_{sk} = 0.69 \cdot T_Q + 10.4^*$	0.955	1.0

r : correlation coefficient, SEE : standard error of estimates,
* : P <0.001, T_{sk} : mean skin temperature,
T_A~T_Q : local skin temperature at the site A~Q.

평균피부온도는 국소피부온도가 상승함에 따라 직선적으로 비례하여 상승하였고, 이러한 현상은 국소피부온도를 측정한 모든 부위에서 예외없이 관찰되었다 (Fig. 2). 국소피부온도와 평균피부온도 간의 직선적 관계를 분산분석으로 검정한 결과, 모든 직선회귀식은 통계적으로 매우 유의하였다 ($p<0.001$). 개개의 국소피부온도와 평균피부온도 간의 상관계수는 0.92~0.99로 전반적으로 높았으며, 그 수치는 머리와 체간 쪽보다 팔과 다리 쪽에서 높았다 (Table 2).

직선회귀식을 이용한 평균피부온도의 추정오차는 0.4~1.3℃였으며, 추정오차의 크기는 이용된 국소피부온도에 따라 달랐다 (Table 2). 대체로 평균피부온도의 추정오차는 머리, 체간 및 손과 발의 국소피부온도를 이용한 경우보다 팔과 다리의 국소피부온도를 이용한 경우에 작았다. 측정부위 K (전완부 뒷면)와 M (대퇴부 전면)의 국소피부온도가 포함된 두 직선회귀식에서 평균피부온도의 추정오차는 가장 작았으며, 반대로 평균피부온도와 국소피부온도와의 상관계수는 가장 높았다.

고 찰

본 연구에서 평균피부온도를 정확히 측정하는 것은 무엇보다도 중요하다. 참값의 평균피부온도는 이론적으로 체표면 전체에 걸쳐 무한한 수의 국소피부온도를 측정하여 산술평균함으로서 구할 수 있다. 이것은 국소피부온도의 측정수가 많을수록, 바꾸어 말해서 국소피부온도를 측정하는 체표면적이 넓을수록 평균피부온도의 측정치가 정확하다는 것을 의미한다. 이러한 이유에서 과거 많은 연구자들은 평균피부온도 산출식을 새롭게 제안하거나 또는 이미 제안된 산출식의 신뢰성을 평가할 때 피부온도의 측정수가 보다많은 산출식으로 평균피부온도를 측정하였고 이를 비교판단의 기준치로서 이용하였다.[13,14,16,19-21] 이들의 연구에서 피부온도 측정수가 가장 많은 평균피부온도 산출식은 국소피부온도를 15군데에서 측정하였다.[13,21] 열전대나 thermistor와 같은 접촉식 온도센서에서 온도감지면적이 0.27㎠라고 간주할 경우[22], 15개의 접촉식 온도센서가 피부온도를 실제 측정하는 면적은 총체표면적의 0.03% 미만에 불과하였다. 본 연구에서는 적외선 온도기록술 (infrared thermography)로 체표전체의 피부온도를 촬영하여 피검자당 약 11,000개 화소의 국소피부온도의 평균치로서 평균피부온도를 측정하였는데, 이 측정수는 다른 연구[13,21]에 비해 700배 이상이나 많았다. 피부온도가 측정되는 면적은 위에서 단순하게 총체표면적의 78%라고 기술하였는데 (*방법 참조*), 이 면적만 하더라도 다른 연구에 비해 3000배나 넓었다. 그렇지만, 적외선 온도기록술의 특성상 굴곡진 부분의 온도는 평면적으로 측정되기 때문에, 실제로 평균피부온도 측정에 참여된 피부면적은 총체표면적의 약 88%로 추정되었다. 머리털과 팬티로 가린 피부, 발바닥, 손가락과 발가락의 측면적 및 인체 윤곽선을 따라 제거된 화소 하나의 면적 등 적외선 온도기록술로 온도측정이 불가능한 피부면적을 2명의 피검자에서 실측한 결과, 그 면적은 총체표면적의 약 12%에 해당되었다. 그러므로 본 연구에서 적외선 온도기록술로 측정된 평균피부온도는 새로운 평균피부온도 산출식을 제안하거나 기존의 평균피부온도 산출식을 평가할 때 기준치로서 최적이라고 판단된다.

예측한 바와 같이, 국소피부온도와 평균피부온도 사이에 직선적인 관계가 있음이 측정된 모든 부위의 국소피부온도에서 관찰되었다 (Fig. 2). 이들의 직선적인 관계는 통계적으로 모두 유의하였고 ($p<0.001$) 또한 0.92~0.99의 높은 상관성을 나타냈다 (Table 2). 이러한 결과는 측정 부위에 무관하게 한 점의 피부온도로서 평균피부온도를 추정할 수 있음을 강력하게 암시한다. 그렇지만 직선회귀식에 의한 평균피부온도의 추정오차는 피부온도의 측정 부위에 따라 달랐다 (Table 2). 그 수치는 팔의 I, J 및 K 위치와 허벅지의 M 위치의 국소피부온도를 이용한 4개의 직선회귀식에서 ±0.4~0.5℃로 가장 작았으며, 머리, 체간 및 손과 발의 국소피부온도를 이용한 경우에는 ±1.0℃ 이상으로 컸다. 통계적으로 볼 때, 평균피부온도의 추정오차는 산출치와 표준치 간의 차이에 대한 표준편차와 일치하며, 산출치의 95%는 표준치 ± 추정오차 2배의 범위 내에서 관찰된다. 그러므로 본 연구에서는 한 점의 국소피부온도로서 평균피부온도를 산출하는 경우에는 평균피부온도의 추정오차가 적은 4개의 직선회귀식을 이용할 것을 추천한다.

평균피부온도 산출식을 새롭게 제안할 때 중요한 것은 산출치의 정확성인데, 이것은 산출오차와 오차범위 내에서 산출치와 기준치 간의 일치도로 판별할 수 있다. 문제는 생리학적으로 타당한 오차범위의 설정이다. 평균피부온도를 이용하여 체조직의 열절연도[2,5], 체열함량의 변화[1-4] 및 대사성 열생산량의 예상치[6-8]를 산출할 때, 이들의 추정치들은 평균피부온도 33℃~24℃의 범위에서 평균피부온도 0.5℃ 차이에 의해 5% 변했다. 그런고로 생리학적으로 타당한 평균피부온도의 산출오차는 ±0.5℃로 판단된다. 이를 기초로 해서 Table 2에 제시된 평균피부온도 산출식의 정확성을 평가하였다. 그 결과 (Table 3), 본 연구에서 추천된 4개의 산출식으로 추정된 평균피부온도는 ±0.5℃ 오차범위에서 기준치와 75~85% 일치하였고, 오차범위의 2배인 ±1.0℃ 범위에서는 95~99% 일치하였다. 일반적으로 산출치의 95% 이상이 오차범위 내에서 기준치와 일치하는 경우에 그 산출치는 정확하다고 말할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 본 연구에서 추천된 직선식으로 산출된 평균피부온도의 정확성은, 비록 ±1.0℃ 오차범위에서는 95% 이상 일치하였지만, 다소 낮다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 추천된 4개의 평균피부온도 산출식은 야외연구나 그에 준하는 상황에서 사용할 것을 권장한다.

이론적으로, 국소피부온도와 평균피부온도가 $r = 1.00$의 상관성이 있는 경우에는 한 점의 피부온도로서 평균피부온도를 정확하게 추정할 수 있다. 그러나 국소피부온도와 평균피부온도 사이의 상관계수는 17개의 직선식에서 모두 1.00보다 낮았고 (Table 2) 또한 산출된 평균피

부온도의 정확성도 95% 이하로 낮았다 (Table 3). 이러한 현상의 주된 원인은 국소피부온도의 측정위치가 측정할 때마다 약간씩 다른데 기인할 가능성이 높다. 본 연구에서 국소피부온도의 측정 위치는 컴퓨터 모니터 상에 나타난 적외선 온도화상에서 육안으로 선정되었다. 더구나 온도화상의 크기는 인체의 실물 크기보다 수십 배 작기 때문에, 국소피부온도의 측정위치는 피검자마다 또한 동일한 피검자라 하더라도 측정시마다 조금씩 달랐을 것이다. 그런데 인체의 피부온도는 특정 신체영역 내에서도 측정위치에 따라 다르다고 한다. 체간에서 특정위치의 피부온도는 2~5 cm 옆의 피부온도와 2~3℃ 달랐으며, 인접위치와의 피부온도 편차는 피하지방 분포의 경사가 클수록 컸다.[23,24] 본 연구에서도 피부온도 분포가 균일하지 않은 현상이 체간과 사지의 적외선 온도화상에서 확인되었으며, 피부온도가 불균일한 정도는 대체로 사지보다도 체간에서 컸다. 그러므로 본 연구에서 정확한 평균피부온도 산출식을 도출할 수 없었던 원인은 피부온도 분포가 균일하지 않은 상황에서 국소피부온도의 측정위치 선정이 불안정했기 때문으로 판단된다. 체간이나 사지말단보다 팔과 다리의 국소피부온도를 이용해서 평균피부온도가 보다 정확하게 산출된 것 (Table 3)은 측정위치 근방의 피부온도가 비교적 균일하기 때문으로 생각된다.

산출된 평균피부온도의 정확성이 낮은 또다른 원인은 피검자의 내적상황의 차이에 기인할 수도 있다. 인체에서 피부온도는 체심부에서 체표로 대류와 전도에 의해 이동되는 열량에 의해 결정되는데, 대류성 열량은 혈액의 흐름에 따라 다르며 전도성 열량은 열이동 경로의 피하지방과 근육 등의 조직 구성과 이동경로의 길이에 좌우된다.[10,25] 본 연구에서 피검자에게 적외선 온도화상을 촬영할 때마다 동일한 자세를 취해줄 것을 요구했다고 하더라도, 피검자의 자세나 근육의 긴장도 등은 온도화상을 촬영할 때마다 약간씩 다를 수 있다. 이로 인해 근육과 혈관의 위치 및 피하지방의 분포 상황 등이 국소적으로 변하게 되며, 특정 위치에서 피부온도는 열이동 경로의 변화로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 특정 위치의 피부온도와 평균피부온도 사이의 직선상관성은 피검자의 해부생리학적 상황에 따라 낮아질 수 있으며, 이러한 직선식으로 산출된 평균피부온도의 정확성은 낮게 된다.

본 연구에서 추천된 평균피부온도 산출식들을 이용하는 데에는 몇 가지 제한이 있다. 첫째로, 인체가 전체적으로 온도자극을 받는 상황에서 제안된 것이므로, 본 연구의 산출식은 신체 일부가 자극받는 상황에서는 이용하지 않는 것이 좋을 것으로 생각된다. 둘째로, 본 연구의 산출식들은 한 점의 피부온도로서 간편하게 평균피부온도를 산출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 측정위치의 피부온도 외에 다른 부위의 피부온도 정보는 직접적으로 얻을 수 없다. 체온반응을 야기하는 체표로부터의 온도입력정보는 그 기여도가 체표 부위별로 다르다고 한다.[7,26,27]

한 점의 피부온도로서 평균피부온도를 추정할 수 있는 또다른 방법은 평균피부온도를 항상 나타내는 특정 위치에서 국소피부온도를 측정하는 것이다. 평균피부온도 산출식을 제안하는 연구자들은 국소피부온도가 해당되는 신체영역의 평균체표온도를 반영하는 위치의 피부에서 측정되어야 한다고 언급하였다.[9,11,12] 그러나 그들은 국소피부온도의 측정위치를 가슴, 배, 팔, 다리, 장딴지 등으로 기술했을 뿐 명확하게 표시하지 않았다.[11,12,14,15,20] 우리의 선행연구에서 20군데의 국소피부온도가 해당되는 신체영역의 평균체표온도를 ±0.4℃ 오차범위에서 정확히 일치하는 빈도를 분석하였는데, 그 일치도는 70% 미만에 불과하였다.[28] 따라서 환경온도의 변화나 피하지방

Table 3. Agreement frequency of the mean skin temperature-calculating formulas using one point local skin temperature within various error ranges

T_{sk}-calculating formulas (℃)	Agreement frequency (%)		
	±0.2℃	±0.5℃	±1.0℃
$T_{sk} = 1.32 \cdot T_A - 13.1$	25	45	73
$T_{sk} = 0.83 \cdot T_B + 3.9$	30	54	78
$T_{sk} = 1.05 \cdot T_C - 2.2$	20	41	62
$T_{sk} = 1.04 \cdot T_D - 1.8$	27	56	79
$T_{sk} = 1.21 \cdot T_E - 7.8$	24	45	74
$T_{sk} = 1.28 \cdot T_F - 9.1$	25	52	79
$T_{sk} = 1.07 \cdot T_G - 2.0$	25	48	77
$T_{sk} = 1.03 \cdot T_H - 1.8$	35	67	86
$T_{sk} = 0.88 \cdot T_I + 4.0$	48	85	96
$T_{sk} = 1.05 \cdot T_J - 2.6$	35	75	95
$T_{sk} = 1.00 \cdot T_K - 0.5$	47	76	99
$T_{sk} = 0.68 \cdot T_L + 10.4$	34	55	84
$T_{sk} = 0.90 \cdot T_M + 3.3$	49	82	97
$T_{sk} = 0.91 \cdot T_N + 3.2$	34	69	94
$T_{sk} = 1.02 \cdot T_O - 1.1$	38	66	90
$T_{sk} = 0.79 \cdot T_P + 6.9$	24	55	93
$T_{sk} = 0.69 \cdot T_Q + 10.4$	20	45	70

T_{sk} : mean skin temperature ; T_A ~ T_Q : local skin temperature at the site A~Q. ±0.2℃ : error of the temperature measurement itself with contact sensor, e.g. thermistors, etc.; ±0.5℃ : physiologically reliable error range in the estimation of mean skin temperature, which was assessed by the present study; ±1.0℃ : two times of ±0.5℃ error range.

층의 두께 등과 같은 피검자의 신체적 특징에 무관하게, 평균피부온도를 항상 나타내는 국소적인 체표 부위가 존재하는지 의심스럽다. 이에 대해서는 추가적인 조사가 진행되어야 할 것이다.

결 론

평균피부온도는 환경온도의 자극정도, 체열함량의 변화, 체조직의 열절연도 및 대사성 열생산량 등을 판단하는데 유용한 정보를 제공한다. 본 연구는 한 점의 피부온도로서 평균피부온도를 측정할 수 있는 간편한 산출식을 제안하기 위해서 국소피부온도와 평균피부온도 사이에 직선적인 관계가 성립하는지를 조사하였다. 넓은 범위의 피부온도를 얻기 위해서 피하지방층의 두께가 다양한 10명의 누드피검자를 대상으로 항온항습실의 공기온도를 40℃에서 4℃까지 4℃ 간격으로 단계적으로 하강시켰다. 각 실온에서 피검자 전면과 후면 전체의 피부온도를 적외선 온도기록술로 측정하였고, 화상분석장치를 사용하여 총110개의 전신의 적외선 온도화상에서 평균피부온도와 국소피부온도를 판독하였다. 국소피부온도는 체표 17군데에서 1.24 ㎠의 평면적에 해당되는 화소 하나의 온도로 측정되었다. 평균피부온도는 총체표면적의 약 88%로 추정되는 체표에서 얻은 평균 10,841개 화소의 온도 평균치로서 측정되었는데, 그 수치는 평균 34.2℃에서 24.4℃까지 변하였다. 국소피부온도는 평균피부온도와 직선적으로 비례하였고 ($p<0.001$, $r = 0.92 \sim 0.99$), 이런 현상은 17군데의 모든 국소피부온도에서 관찰되었다. 직선회귀식을 이용하여 평균피부온도를 추정한 결과, 그 산출치는 모든 수식에서 측정치와 통계적으로 차이가 없었다. 그러나 평균피부온도의 추정오차는 이용된 국소피부온도에 따라 ±0.4~1.3℃로 달랐다. 본 연구에서 생리학적으로 타당한 평균피부온도의 산출오차는 ±0.5℃로 분석되었다. 따라서 평균피부온도의 추정오차가 0.5℃ 이하인 4개의 직선식을 본 연구는 한 점의 국소피부온도로서 평균피부온도를 추정하는 산출식으로 추천한다. 이 산출식에는 상완의 후면중앙, 전완의 전면과 후면의 중앙 및 허벅지의 전면중앙의 국소피부온도가 각각 포함되었다. 4개의 산출식으로 각각 추정된 평균피부온도와 적외선 온도기록술로 측정된 평균피부온도와의 일치도는 ±0.5℃ 오차범위에서 75~85%였고 ±1.0℃ 범위에서는 95~99%였다. 평균피부온도 산출의 정확성이 생리학적으로 타당한 오차범위에서 95% 이하이므로, 선정된 평균피부온도 산출식들은 야외연구나 그에 준하는 상황에서 이용해 줄 것을 권한다.

참고문헌

1) Bittel JHM : Heat debt as an index of cold adaptation. J Appl Physiol 62:1627-1634, 1987
2) Burton AC, Edholm OG : Man in a Cold Environment, Hafner publishing co., New York, 1969, 47-89
3) Colin J, Timbal J, Houdas Y, Boutelier C, Guieu JD : Computation of mean body temperature from rectal and skin temperatures. J Appl Physiol 31(3):484-489, 1971
4) Vallerand AL, Savourey G, Bittel JHM : Determination of heat debt in the cold: partitional calorimetry vs. conventional methods. J Appl Physiol 72:1380-1385, 1992
5) Choi JK, Lee HS, Park YS : Effect of uniform and non-uniform skin temperature on thermal exchanges in water in humans. Int J Biometeorol 47:80-86, 2003
6) Hayward JS, Eckerson JD, Collis ML : Thermoregulatory heat production in man; prediction equation based on skin and core temperatures. J Appl Physiol 42(3):377-384, 1977
7) Nadel ER, Horvath SM, Dawson CA, Tucker A : Sensitivity to central and peripheral thermal stimulation in man. J Appl Physiol 29(5):603-609, 1970
8) Tikuisis P, Bell DG, Jacobs I : Shivering onset, metabolic response, and convective heat transfer during cold air exposure. J Appl Physiol 70(5):1996-2002, 1991
9) Bligh J, Johnson KG : Glossary of terms for thermal physiology. J Appl Physiol 35:941-961, 1973
10) Houdas Y, Ring EFJ : Human Body Temperature, Plenum press, New York, 1982, 57-103
11) Burton AC : Human calorimetry II. The average temperature of the tissue of the body. J Nutri 9:261-280, 1935
12) Hardy JD, DuBois EF : The technic of measuring radiation and convection. J Nutr 15: 461-475, 1938
13) Mitchell D, Wyndham CH : Comparison of weighting formulas for calculating mean skin temperature. J Appl Physiol 26:616-622, 1969
14) Ramanathan NL : A new weighting system for mean surface temperature of the human body. J Appl Physiol 19:531-533, 1964
15) Stolwijk JAJ, Hardy JH : Temperature regulation in man - a theoretical study. Pflügers Arch 291:129-162, 1966
16) Lund LL, Gisolfi CV : Estimation of mean skin temperature during exercise. J Appl Physiol 36:625-628, 1974
17) DuBois EF : 1936. Basal Metabolism in Health and Disease; Chapter VII. The estimation of the surface area of the body, Lea & Febiger, Philadelphia, 1936, 125-144
18) Allen TH, Peng MT, Chen KP, Huang TF, Chang C, Fang HS : Prediction of total adiposity from skinfold and the curvilinear relationship between external and internal adiposity. Metabolism 5:346-352, 1956

19) Olesen BW : How many sites are necessary to estimate a mean skin temperature ? In Hales J. R. S. (ed), Thermal Physiology, Raven press, New York, 1984, 34-38
20) Teichner WH : Assessment of mean body surface temperature. J Appl Physiol 12(2):169-176, 1958
21) Winslow C-EA, Herrington LP, Gagge AP : A new method of partitional calorimetry. Am J Physiol 116:641-655, 1936
22) Jirak Z, Jokl M, Štverák J, Pechlát R, Coufalová H : Correction factors in skin temperature measurement. J Appl Physiol 38(4):752-756, 1975
23) Frim J, Livingstone SD, Reed LD, Nolan RW, Limmer RE : Body composition and skin temperature variation. J Appl Physiol 68:540-543, 1990
24) Livingstone SD, Nolan RW, Frim J, Reed LD, Limmer RE : A thermographic study of the effect of body composition and ambient temperature on the accuracy of mean skin temperature calculations. Eur J Appl Physiol 56:120-125, 1987
25) LeBlanc J : Subcutaneous fat and skin temperature. Can J Biochem Physiol 32:354-358, 1954
26) Crawshaw LI, Nadel ER, Stolwijk JAJ, Stamford BA : Effect of local cooling on sweat rate and cold sensation. Pflügers Arch 354:19-27, 1975
27) Hensel H : Thermoreception and Temperature Regulation, Academic press, New York, 1981, 18-32
28) Choi JK, Miki K, Sagawa S, Shiraki K : Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography. Int J Biometeorol 41:68-75, 1997