

한국형 체감온도지수 개발연구(III) - 체감온도지수 개발을 위한 본실험 -

박종길 · 정우식* · 김병수** · 윤숙희*** · 이종태**** ·
김은별* · 박길운* · 김석철* · 정경석**

인제대학교 환경공학부, * 대기환경정보공학과, ** 데이터정보학과, *** 간호학과, **** 예방의학과,
대기환경정보연구센터

(2008년 6월 9일 접수; 2008년 9월 19일 수정; 2008년 10월 1일 채택)

A Study of the Development of a Korea Wind Chill Temperature Index(III) - Principal Experiment for Development of the Korea Wind Chill Temperature Index -

Jong-Kil Park, Woo-Sik Jung*, Byung-Soo Kim**, Sook-Hee Yoon***, Jong-Tae Lee****,
Eun-Byul Kim*, Gil-Un Park*, Seok-Cheol Kim* and Kyeong-Seok Jeong**

School of Environmental Sciences Engineering,

**Department of Atmospheric Environment Information Engineering,*

Department of Data Science, ***Department of Nursing, *Department of Pre-Medicine,*

Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

(Manuscript received 9 June, 2008; revised 19 September, 2008; accepted 1 October, 2008)

Abstract

This paper aims to provide a fundamental basis for the improvement and verification of existing wind chill temperature index through the observation of skin temperature change of human body with air temperature and wind speed. For this, we control air temperature 5°C interval from 0°C to -20°C and classify wind speed by 0, 2, 6 and 8 m s⁻¹ respectively. The results are as follows; At each combination of air temperature and wind speed, the reduction rate of the mean skin temperature are different. When our body is exposed to the atmosphere, the mean skin temperature decreases at an exponential rate. The duration of the steady state is more than one hour, while it decreases with strong wind speed. Among 4 sites on a face, the skin temperature of forehead is the highest, followed by one of chin, left cheek, right cheek in orders. Especially, since the skin temperature of right cheek is the lowest, we think that it is suitable to use the data set of the right cheek skin temperature for the development of a Korea wind chill temperature index as a worst case.

Key Words : Air temperature, Wind speed, The reduction rate of mean skin temperature, An arrival time of the steady state, A Korea wind chill temperature index

1. 서 론

우리나라 겨울철 기상조건은 낮은 온도와 강한 풍속으로 특징지을 수 있다. 그 외 일조시간이나 일

사람, 그리고 상대습도와 같은 기상요소 뿐 아니라, 연령, 신체조건, 건강상태, 성별, 피복상태, 심리적 요인 등에 따라 겨울에 느끼는 추위의 정도도 다르게 나타난다. 체감온도지수(Windchill temperature Index, WCTI)는 겨울철의 한기와 바람에 노출된 피부로부터 빼앗기는 열 손실률을 추정하여 느끼는 추운 정도를 나타내는 지수이다^{1,2)}. 이는 인체가 기온과 바람에 의해 느끼는 추위의 정도를 쉽게 알 수 있도록 정량화한 것으로 이와 관련된 선행연구는 다음과 같다.

Siple과 Passel³⁾은 남극의 West Base에서 플라스틱 실린더를 이용한 실험을 통해 한랭기후에서 기온과 바람에 기인한 냉각효과를 최초의 체감온도지수로 제안하였다. 그러나 Siple-Passel 모델(이하 S-P 모델로 기술)은 실제보다 냉각효과에 대한 과대평가로 인해 수정해야 한다는 지적들이 있어 왔다^{4~7)}. 이에 따라 S-P 모델을 기본으로 하는 체감온도지수 개발에 관련된 연구는 꾸준히 진행되어, Bluestein과 Zecher⁸⁾은 열평형 이론을 기초로 하여 사람 머리 직경과 동등한 수직 실린더를 이용해서 체감온도를 모델화 하였다. Oszcewski⁹⁾는 바람의 공간 대류에 의한 열 이동 영향을 고려하여 향상된 체감온도를 계산하였다. 그러나 S-P 모델을 기본으로 한 기존 연구와는 달리 보다 정확한 체감온도를 계산할 수 있는 모델 개선의 필요성이 요구되었다. 이에 따라 2001년 NWS(National Weather Service)와 MSC(Meteorological Services of Canada)에서는 새로운 최적의 모델을 개발하기 위한 연구팀인 JAG/TI(Joint Action Group for Temperature Indices)를 구성, JAG/TI 모델을 개발하였다. 현재 우리나라에서도 이 모델을 이용하여 체감온도를 계산하고 사용하고 있다. 이전의 모델이 실린더나 열평형 이론을 토대로 도출한 것이라면 JAG/TI 모델은 사람을 대상으로 하는 실험에 의해 도출한 것이라는데 그 의미가 있다. JAG/TI 모델은 태양복사 정도와 습도, 추위에 대한 개인적인 차이(성, 유전, 주거지역 등)에 대해서는 고려하지 않았고, 추운 환경에서는 증발에 의한 냉각이 적기 때문에 신체의 반응에 미치는 습도의 영향이 저온에서는 비교적 적다고 하였다.

국내에서 실시한 체감온도와 관련된 실험연구를

살펴보면, 금 등¹⁰⁾은 한국인을 대상으로 쾌적영역을 비교 검토한 결과 상온적습(18~27℃, 30~70%) 조건과 0.1 m s⁻¹ 정도의 정지 기류 상에서 측정된 겨울철 기온과 체감온도와와의 차이를 기준풍속의 영향에 의한 것으로 지적하였으나, 저온에서의 영향은 고려하지 못하였다. 성¹¹⁾은 22℃조건에서 적외선 카메라를 이용하여 성인여자의 피부온도를 측정하였을 때 안면부인 이마가 뺨에 비해 고온을 나타내며 거의 좌우대칭성이 보이고, 노출 후 일정시간 이후에는 피부온도가 현저히 저하한다고 하였다. 그러나 이 경우도 25℃, 50%와 같은 저온상태에서 비키니 차림의 나체로 있는 경우, 시간에 따른 피부온도 변화를 조사한 결과에 해당한다. 따라서 겨울철 저온시의 풍속에 따른 부위별 피부온도의 정량적인 온도를 제공하지 못하였다. 그러나 그 외에도 한국의 Windchill에 관한 연구¹²⁾, 체감온도이론의 비교 연구¹³⁾ 등을 행한 바 있으나 모델의 검증이나 새로운 모델을 개발하고자 하는 실험이나 연구는 없었다.

이에 본 연구에서는 한국인에 맞는 한국형 WCTI를 개발하는 기초 작업으로서 한국의 젊은 남녀를 대상으로 직접 풍동 내에서 기온과 풍속에 따른 피부온도의 변화실험을 실시하고자 하였다. 이를 위하여 우리나라를 대표할 수 있는 20대 성인 남녀를 선발하여 신체상황을 점검하고, 일정 대기환경 조건을 유지시키는 풍동 내에서 영하의 온도와 풍속의 변화에 대한 피부온도를 측정하였다. 그리고 이를 토대로 기온과 풍속에 따른 피부온도의 변화와 남녀 성별에 따른 차이, 부위별 피부온도의 변화 등을 살펴 한국형 체감온도지수 모형을 구축하는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

실험에 앞서 체감온도의 결정 요소라고 생각할 수 있는 온도, 풍속, 습도, 일사 중 습도와 일사에 대해서는 고려하지 않았다. 검증하려고 하는 JAG/TI 모델과 같은 조건을 적용하고자 하였고 앞 절에서 밝혔듯이 저온에서는 증발에 의한 열 손실량을 고려할 필요가 없으며 박 등¹⁾의 기존의 체감온도지수 모형의 검토 결과 습도 항은 본 연구에 있어 큰 의미가 없었다. 또한 풍동 내에서는 일사량을 고려할 수 없으므로 JAG/TI 모델 개발에서와 같이 본 연구에서도 고려하지 않았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 피험자 선발

피험자는 모집단의 대표성을 가지기 위해 다양한 연령층을 대상으로 실험을 하는 것이 바람직하나, 저온에서 하는 실험으로 중·장년층의 경우 위험성이 크므로 전문가의 의견과 수차례의 논의를 통해, 가장 활동량이 많은 20대 남녀를 대상으로 결정하였다. 모집공고를 통해 총 18명의 지원자를 받고 그 중 12명(남자 7명, 여자 5명)을 최종 선발하였다. 선발한 피험자들에게는 실험목적과 내용, 실험방법을 충분히 숙지할 수 있도록 설명하고 실험과 관련된 사항에 대한 문답을 실시한 후 ‘연구 참여 동의서’에 스스로 서명하도록 하였다. 그리고 학생 실험실습 종합보험에 가입시켜 만약의 사고 시에 보상을 받을 수 있도록 조치하였다.

실험에 참여한 피험자의 나이는 평균적으로 22.3세이고, 키와 몸무게는 각각 169.1 cm, 66.6 kg이다. 선발된 피험자들의 신장과 체중이 우리나라 20대를 대표할 수 있는지를 알아보기 위해 산업자원부¹⁴⁾에서 제공하는 ‘제5차 한국인 인체치수 조사 자료’를 이용하여 검증을 하였다. 그 결과 산업자원부의 자료에 의하면 20~24세의 평균 신장은 여자가 160.7 ± 4.94 cm, 남자가 173.8 ± 5.83 cm로 나타났다. 평균 체중은 여자가 53.5 ± 7.12 kg, 남자가 69.5 ± 10.2 kg 이었다. 본 실험에 참가한 남성과 여성의 신장, 남성의 체중은 범주에 포함되었다. 그러나 여성의 체중은 약간 초과하는 것으로 나타났으나, 75번째에서 90번째 분위수내에 포함되어 대체로 한국의 20대 성인임을 만족하고 있었다. 그 외 자세한 사항은 박 등²⁾에 자세히 소개되어 있다.

2.2. 풍동 실험실 환경

겨울철 바람에 의한 피부의 냉각정도를 측정하기 위하여 경기도 화성에 위치한 교통안전공단 자동차 성능시험연구소 내에 있는 풍동 실험실을 이용하였으며, 실험기간은 2005년 5월 24일부터 25일까지 2일간으로 하였다.

본 실험을 실시한 풍동 실험실의 크기는 6×15×4 m로 모든 벽과 천정, 바닥은 단열재로 충분히 단열하여 벽면의 온도와 실내의 공기온도가 거의 같도록 유지되는 chamber에 해당한다. 온도 제어범위는

-40~60℃이고, 풍속은 약 140 km h⁻¹(38.89 m s⁻¹)까지 조절이 가능하다. 풍동 실험실 환경과 피험자의 선발과정 및 선발된 피험자에 관한 상세한 정보는 예비실험에 관한 연구인 박 등²⁾에서 자세히 제시하였다.

2.3. 피부온도 센서

피험자의 안면부 피부온도를 측정하는 sensor는 박 등²⁾과 같이 Omega Engineering Inc.(www.omega.com)의 Self-Adhesive Thermocouples(SA1 Series)의 T-Type(Copper Constantan) Thermocouple을 사용하였다.

2.4. 실험과정 및 측정항목

본 실험에서는 최종 선발한 12명의 피험자들을 풍동 내부 크기 및 sensor의 개수를 고려하여 4인 1조로 3개조를 편성하였다(Table 1). 남성은 M, 여성은 F 기호로 표현하였다. 그 뒤에 붙어 있는 숫자는 피험자를 식별하는 기호이다.

JAG/TI에서는 단계를 0, 2, 6, 8 m s⁻¹로 설정하고 실험을 실시하고 있다. 그러나 예비실험을 실시한 결과²⁾, 13 m s⁻¹의 강한 풍속은 피험자들이 추위와 저림을 호소하였으므로 저온에서의 피부손상, 동상(frostbite)과 같은 인체에 미치는 영향을 최소화하기 위해 본 연구에서는 제외하였다. 피험자가 움직일 경우 운동으로 인한 대사량 차이로 정지해 있는 경우에 비해 피부온도의 감소가 적어지므로, 최악의 상태를 추정하기 위해서는 기준풍속으로 이동하는 경우보다는 정지해 있는 경우를 대상으로 실험하였다. 또한 대사량을 보정해 기준풍속을 고려할 수 있으므로 풍동 내에서 피험자 모두 정지해 있도록 하였다.

풍동에 들어가 실험을 실시하기 전에 충분한 휴

Table 1. Organization of experimental objects

Team	Objects			
	1*	2*	3*	4*
A	F1	M1	M2	F2
B	M5	M3	M4	F3
C	F4	M6	M7	F5

* M : man, F : woman, number of 1, 2 : standing objects on the treadmill, number of 3, 4 : standing objects near the treadmill

식과 안정을 취하는 과정에서 실험에 소요되는 시간이 길어져 실험 단계를 축소하였다. 이에 따라 예비실험 및 민감도를 분석한 결과^{1,2)}, 저풍속 ($0 \sim 2 \text{ m s}^{-1}$)에서는 피부온도의 감소가 크게 나타났다. 반면 풍속이 증가할수록 피부온도 감소량은 줄어들었다. 그런데 풍속이 $6, 8 \text{ m s}^{-1}$ 로 증가할 때 8 m s^{-1} 경우와 6 m s^{-1} 는 뚜렷한 피부온도 변화가 나타나지 않아 실험시간과 피험자의 고통을 최소화하기 위해 6 m s^{-1} 풍속단계를 생략하는 것이 적합하다고 판단하였다. 따라서 0°C 와 -5°C 와 같은 저온의 경우에는 풍속을 $0, 2, 8 \text{ m s}^{-1}$ 의 3단계로 조절하였고, 각 단계별 실험시간은 30분으로 하였다. 그러나 -10°C 에서는 8 m s^{-1} 의 풍속이 피부온도를 급격히 저하시켜 피험자의 인체에 악영향을 줄 우려가 있다고 판단되어 8 m s^{-1} 의 풍속을 제외하고 한 단계 약한 6 m s^{-1} 단계로 교체하였다. -15°C 에서는 피험자의 안전을 고려하여 6 m s^{-1} 단계도 제외시키고 $0, 2 \text{ m s}^{-1}$ 단계로만 실험을 실시하였으며, 실험시간도 30분에서 20분으로 줄였다. 가장 저온인 -20°C 에서는 풍속이 0 m s^{-1} 인 경우만 피험자의 요청에 의해 40분간 실험을 실시하였다. 그 이상의 풍속과 그 이하의 기온에서는 기존의 JAG/TI 모델에서 동상을 일으킬 위험이 있는 체감온도로 하강한다고 제시하고 있으므로 피험자의 안전을 위해 제외하였다. 또한 풍동 내 위치에 따른 피부온도 차이를 알아보기 위해 일부 피험자

는 $0, -5^\circ\text{C}$ 의 실험과 $-10, -15^\circ\text{C}$ 의 실험에서 서있는 측정위치를 상호 바꾸어 실험을 실시하였다. 그 외의 실험설정 조건에 관한 세부적인 사항은 Table 2와 같다.

센서의 부착은 JAG/TI와 동일한 위치인 이마, 코, 오른쪽 뺨 그리고 턱에 부착하려고 하였으나, 예비실험의 결과²⁾에서 코에 부착하여 얻은 자료의 경우 다른 부위와 비교할 때 피부온도 변화경향이 다르게 나타날 뿐만 아니라 전체적으로 자료가 불안정하게 나타났다. 이에 본 실험에서는 코 대신 4곳의 측정부위 중 가장 안정적으로 자료가 표출되었던 부위가 얼굴의 오른쪽 부위임을 고려하였고, 성¹¹⁾이 얼굴의 양쪽부위는 좌우대칭을 이룬다고 하였으므로 자료의 안정적 생산을 도모하기 위해 얼굴의 왼쪽 부위에 나머지 센서를 부착하였다.

-5°C 이하의 조건에서는 피험자가 실험에 의한 stress로 신체 이상 증상을 나타낼 수 있으므로 체열과 심장박동을 추가로 측정하여 살피고 족욕을 실시하여 심신의 안정을 취하도록 유도하였다. 피부온도와 심부온도(Ear Thermometer로 측정)가 지나치게 낮아지는 경향을 보이는 피험자는 다음 단계 실험에서 제외하였다. 이 외에도 자료 검증 시 실험도중 이상이 발생한 피험자의 분석 자료는 사용하기에 적절하지 못하다고 판단하여 해당 피험자의 자료는 삭제하였다(Table 3). 각 단계별 피험자들의

Table 2. Mean wind speed and air temperature of main experimental setting conditions

Team	Temp (°C)	Temp Statistics	Wind Speed		Wind Speed Statistics(km h ⁻¹)	Exposure Time (min)	Remark	
			m s ⁻¹	km h ⁻¹				
C(3rd)	0	0.26±1.72	0	0	0.35±0.01	30 (35min teamB -10°C 0 m s ⁻¹)	M6, M7, F3, F4, F5 data remove	
A(4th)		0.1±1.58	2	7.2	8.08±0.29			
B(5th)		0.01±1.32	8	28.8	28.49±0.76			
C(6th)	-5	-4.88±1.73	0	0	0.39±0.04			
A(7th)		-4.77±1.59	2	7.2	8.18±0.59			
B(8th)		-4.75±1.24	8	28.8	28.90±1.32			
A(9th)	-10	-9.85±1.63	0	0	0.43±0.05			
B(10th)		-9.88±1.59	2	7.2	7.29±0.63			
		-10.17±1.30	6	21.6	22.94±1.58			
A(11th)	-15	-14.67±0.26	0	0	0.47±0.07			30
B(12th)		-14.67±0.13	2	7.2	7.59±0.27			20
A'(13th)	-20	-19.52±0.24	0	0	0.42±0.01			40

Table 3. The data set lists removed through a disorder of the objects and experimental error

Team(Temp.)	Object	Data set lists
5th(0℃)	M4	2, 8 m s ⁻¹ data set
7th(-5℃)	F2	
8th(-5℃)	M4	8 m s ⁻¹ data set
9th(-10℃)	F2	6 m s ⁻¹ data set
10th(-10℃)	M3	0, 2, 6 m s ⁻¹ data set
	M4	6 m s ⁻¹ data set
11th(-15℃)	F2	2 m s ⁻¹ data set

실험에 대한 느낌은 실험 직후 작성하도록 하였다. 그 외 실험실시 조건은 예비실험에서와 동일하게 유지하였다²⁾.

2.5. 측정자료 검증

풍동 실험실에서 직접 측정된 자료는 다음의 단계를 거쳐 검증을 실시하였다. 먼저 측정과정에서 각 조별 실험이 끝나면 자료를 전송받아, SAS에 의해 자료를 처리하고 시계열 분포도를 작성하였다. 개인의 특성을 고려하지만 평균과 편차의 온도범위에서 크게 벗어나는 것을 이상치로 보아 자료를 삭제하였다. 두 번째로는 각 조의 풍속 단계별 경계치는 풍속이 급변하거나, 풍속의 분산값이 주변 자료

에 비해 현저히 증가하는 경우로 하였다. 개인별 최종 피부온도가 상승하는 경우 그 이후의 자료는 삭제하였는데, 이는 추위를 견딜 수 없는 경우 위험에 노출되는 것을 줄이기 위해 약간의 활동을 피험자에게 허락하였으므로 이로 인한 대사량 증가로 피부온도가 상승한 것으로 판단하였다.

마지막으로는 sensor를 몸에 부착하여 풍동에 들어간 후 sensor를 data logger에 연결하여 모든 피험자가 동일 시점에서 자료를 수집하기 전에 생기는 각 피험자의 자료를 삭제하였다. 전 단계 실험에서 피부온도나 심부온도가 저온으로 나타나는 경우 위험을 최소화하기 위해 피험자를 다음 단계 실험에서 제외함으로써 생기는 자료수의 차이를 조절하기 위해, 각 조별 2/3 이상의 피험자가 실험에 참여하여 자료가 산출되는 경우까지를 유효 자료로 간주하고 정리하였다.

이러한 방법으로 자료를 검증한 결과 Table 4와 같이 각 실험별, 각조별 유효 자료는 99.5~100% 이내로 Larsen(1973)이 제시한 실측자료수가 전체자료수의 %이상일 때 유효하다는 범위를 만족하고 있으며, 풍속별로도 최저 99.8%에서 100.0%로 조건을 만족하고 있으며, 전체적으로는 99.9%의 유효자료율을 가지므로 측정 자료의 분석 및 통계적 해석에 무리가 없을 것으로 판단된다.

Table 4. The effective data number and percentage of the observed data at each experiment for 23 May to 25 May, 2005

The number of Experiment	Temp (℃)	Wind Speed								Sum	
		0 m s ⁻¹		2 m s ⁻¹		6 m s ⁻¹		8 m s ⁻¹			
			(%)		(%)		(%)		(%)		(%)
3rd 4th 5th	0	8832 /8832	100	7920 /7920	100			7920 /7920	100	24672 /24672	100
6th 7th 8th	-5	8736 /8736	100	7921 /7964	99.5			6920 /6920	100	23577 /23620	99.8
9th 10th	-10	3912 /3912	100	4296 /4296	100	1920 /1920	100			10128 /10128	100
11th 12th	-15	5096 /5096	100	4224 /4224	100					9320 /9320	100
13th	-20	2904 /2904	100							2904 /2904	100
Sum		29480 /29480	100	24361 /24404	99.8	1920 /1920	100	14840 /14840	100	70601 /70644	99.9

3. 결과 및 고찰

실험을 통해 수집된 자료에 대하여 동일 조건에서의 평균값을 이용하여 다음과 같은 분석을 실시하였다.

3.1 개인별 피부온도 변화 경향

개인별 피부온도의 변화를 살펴보면(Fig. 1), 동일한 기온과 풍속의 조건에서도 피험자에 따라 피부온도 차이가 크게 나타나고 있다. 이는 연령, 신체조건, 건강상태, 성별, 피복상태, 심리적 요소 등의 복합적 요인의 결과로 설명되어진다.

무풍인 경우, 각 기온별 개인 피부온도의 최대차는 0℃의 경우 6.81℃, -5℃에서는 8.21℃, -10℃에서는 5.55℃, -15℃에서는 7.55℃, 그리고 -20℃에서도 7.03℃ 정도로 차이가 나타

나 동일한 외기 조건이라도 개인별로 확연한 차이를 보이고 있다. 특히 -20℃에서는 다른 조건에 비해 피험자들 간에 차이가 적게 나타나고 있지만 온도 감소율은 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

풍속이 2 m s⁻¹일 때의 실험은 앞서 무풍상태에서의 실험을 통해 피부온도가 충분히 떨어진 후이므로 사실상 변화는 크지 않다. 이 조건에서도 앞의 경우와 마찬가지로 피험자 간에 피부온도차가 나타나고 있으며 피부온도의 최대차는 0℃에서 6.11℃, -5℃에서 7.9℃, -10℃에서 7.36℃, -15℃에서 8.34℃이었다. 무풍의 경우에 비해 -5℃의 저온에서는 다소 작게 나타났으며, -10℃이하의 저온에서는 무풍의 경우에 비해 피부온도차가 크게 나타났다. 6, 8 m s⁻¹의 풍속에서는 2 m s⁻¹의 풍속에서보다도 작은 피부온도 감소율을 보이며 일정한 값에 수렴하는 정상상태의 피부온도를 나타내는 결과를 보였다. 개인별 피부온도의 최대차는 -10℃, 6 m s⁻¹에서 7.09℃, 0℃, 8 m s⁻¹에서 6.2℃, -5℃, 8 m s⁻¹에서 8.03℃으로 여전히 큰 개인차를 보여주고 있다.

따라서 개인별 피부온도의 변화는 조건에 따라 개인별 차이가 크게 나타났으며, 추위에 노출될 경우 노출 초기에 급격한 피부온도 감소를 나타내다가 일정시간이 지나면 정상상태에 근접하는 경향을 보이고 있으며, 개인별 차이에서도 대체적으로 남성은 여성에 비해 높은 초기피부온도를 가지며, 노출시간에 따른 피부온도의 감소는 작게 나타난다.

3.2. 평균 피부온도의 변화 경향

Fig. 1을 통해서 살펴본 결과 개인별 피부온도는 조건에 따라 달라지므로 해당 온도에 가장 적합한 피부온도 변화 곡선을 찾아내기 위해서는 개인의 자료 선정이 매우 중요하게 작용할 것이라 생각되어 본 연구에서는 동일온도, 동일풍속에서 측정된 값들을 평균하여 각각의 풍속에서 노출시간과 기온에 따라 피부온도가 어떠한 변화 경향을 보이는지 알아보았으며(Fig. 2), 개인의 초기 피부온도는 30℃로 가정하였다. 각 풍속 단계별 소요시간은 2.4절에서 언급하였듯이 30분정도로 풍속의 단계가 높아질수록 제시된 시간에 30분을 더하면 된다. 예를 들어 2 m s⁻¹의 경우 안정단계가 1800초(30분)에 해당하므로 30분을 더하면 60분정도에서 안정화 되었다고 판단하면 된다. 그리고 6 m s⁻¹와 8 m s⁻¹는 그 다음 단계이니 60분을 더하면 된다.

Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 0 m s⁻¹일 때 피부온도가 감소하는 경향은 각 온도에서 유사하게 나타났으며, 이는 2, 6, 8 m s⁻¹의 풍속에서도 역시 동일한 결과를 보여주고 있다. 그러나 -5℃일 때와 -10℃일 때의 피부온도의 감소율의 차이는 다른 온도 조건들 사이의 피부온도 감소율 차이에 비해 작게 나타났다. 이 같은 결과는 개인별 특성과 저온에서 피험자의 실험 참여 횟수에 의한 영향도 무시할 수 없는 것으로 사료된다.

실험시간이 0~30분에 속하는 0 m s⁻¹의 실험결과에서는 노출시간이 짧아 피부온도가 정상상태에 도달하지 못하고 있는 것을 보여주며, 30~60분대의 2 m s⁻¹, 60~90분대의 6, 8 m s⁻¹ 실험에서는 어느 정도 정상상태에 도달하는 결과를 나타냄으로서 임의의 추위에 노출되었을 때 인체가 주위 환경에 적응하는 시간은 대체로 60~90분 정도 소요된다고 생각된다.

따라서 각 조건에 따른 평균 피부온도의 변화경향은 감소율의 차이는 있으나 노출시간에 따라 지수적으로 감소하여 일정 시간이 지난 후 정상상태에 도달한다. 정상상태에 이르는 시간은 기온에 따라 다소 차이는 있으나 대체로 60~90분 정도였다. 특히 -5℃와 -10℃에서 피부온도 변화를 차이는 작았으며 이는 개인별 특성과 저온에서 자료의 수의 감소가 일부 영향을 주었을 것으로 사료된다.

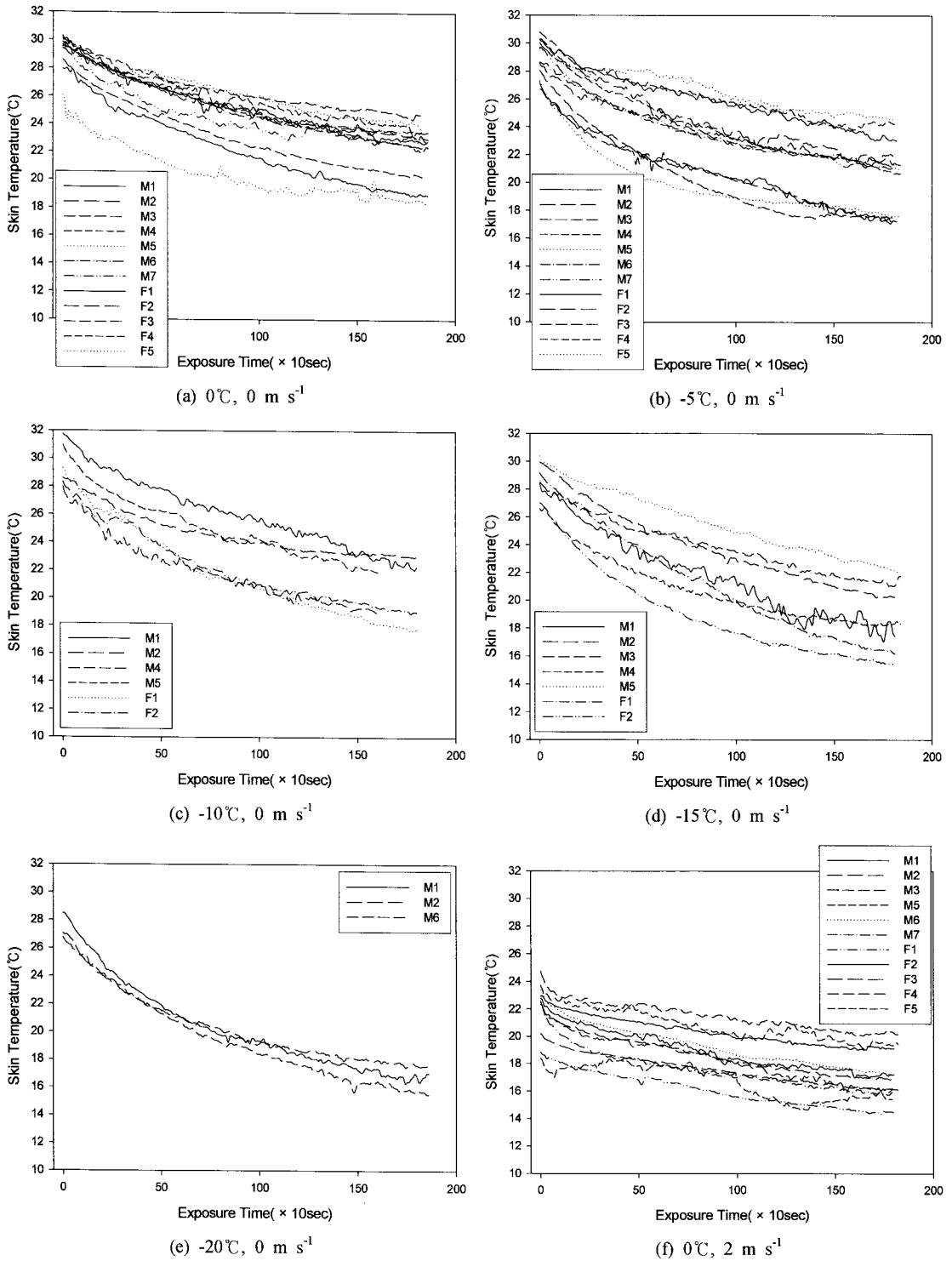
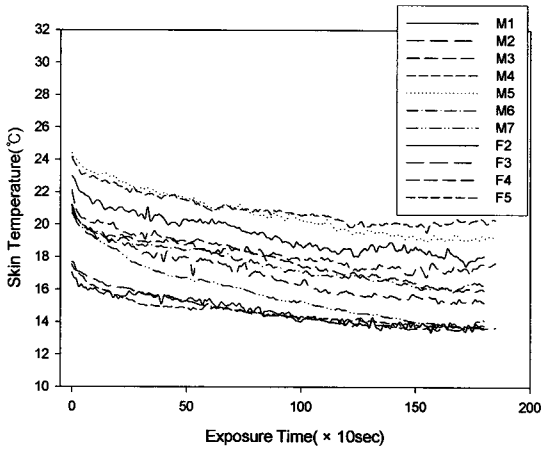
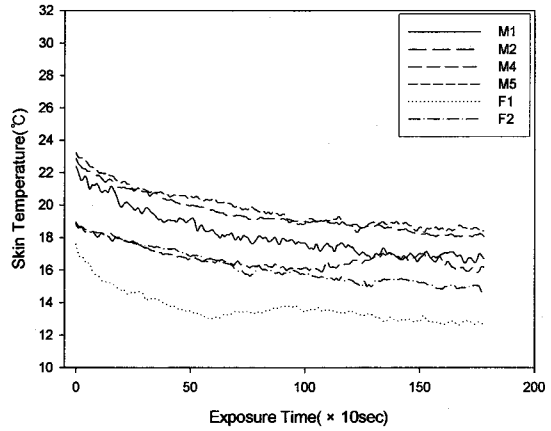


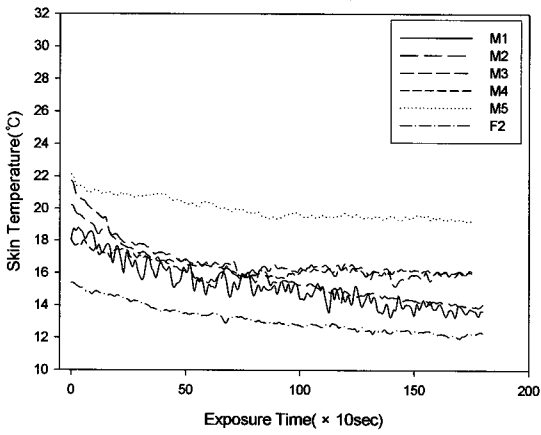
Fig. 1. The change of individual skin temperature at each air temperature and wind speed conditions.



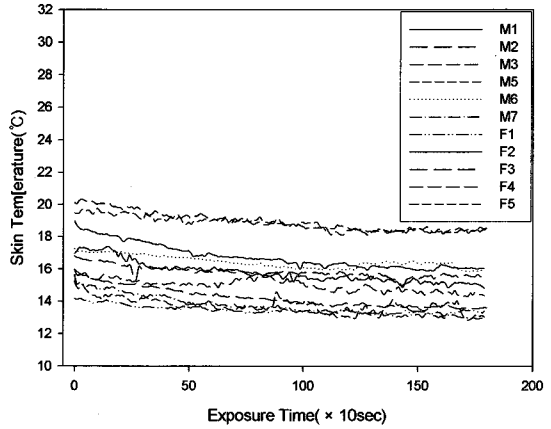
(g) -5°C , 2 m s^{-1}



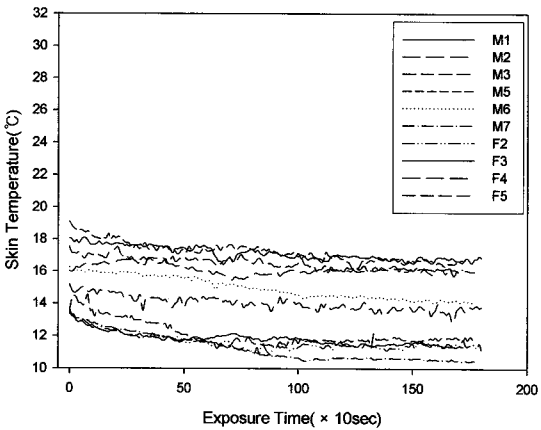
(h) -10°C , 2 m s^{-1}



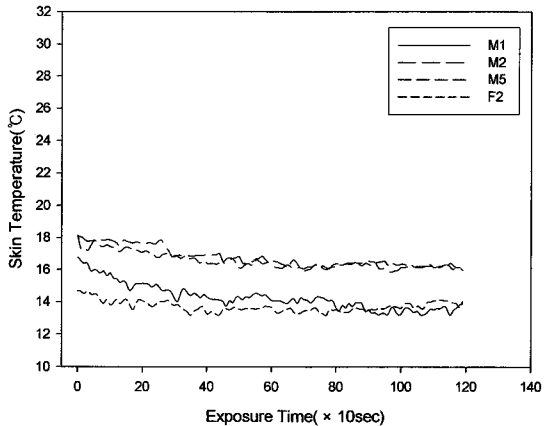
(i) -15°C , 2 m s^{-1}



(j) 0°C , 8 m s^{-1}



(k) -5°C , 8 m s^{-1}



(l) -10°C , 6 m s^{-1}

Fig. 1. (Continued).

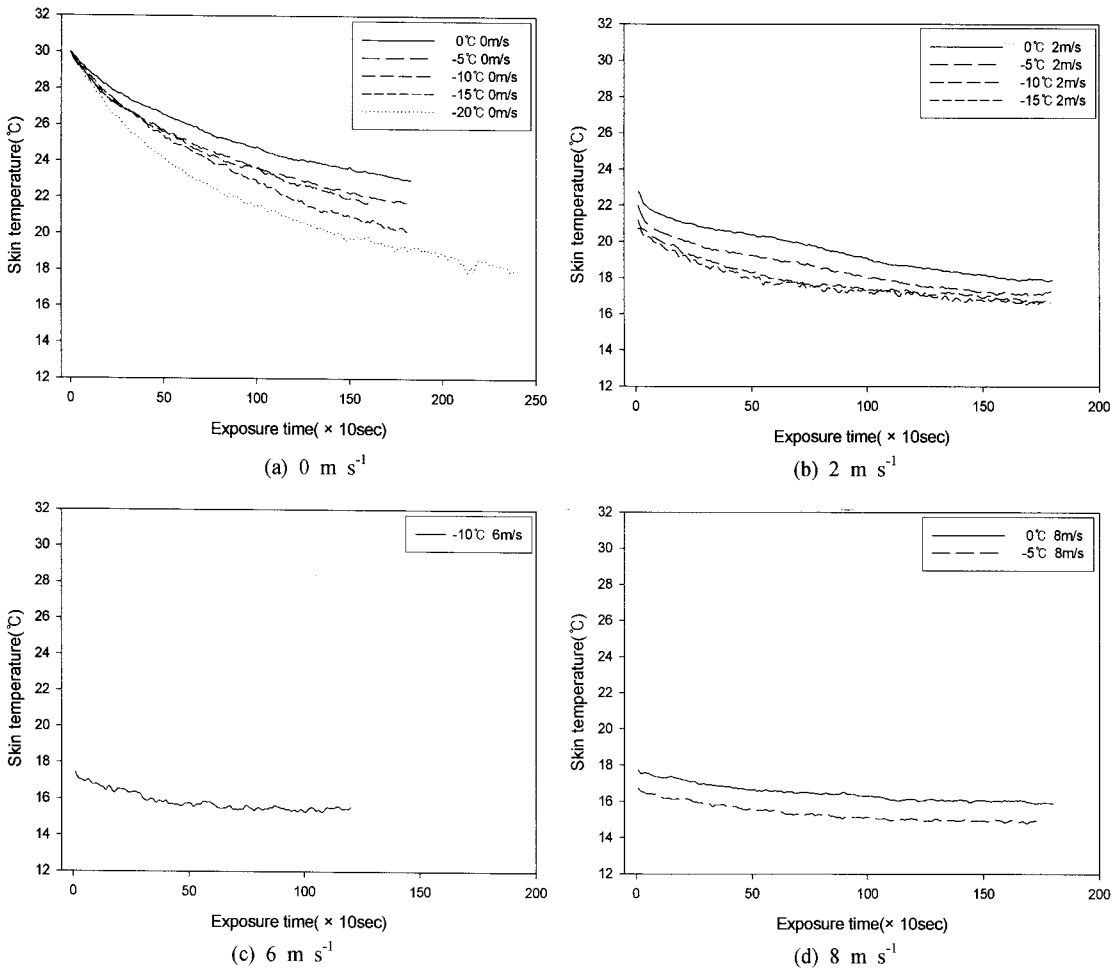
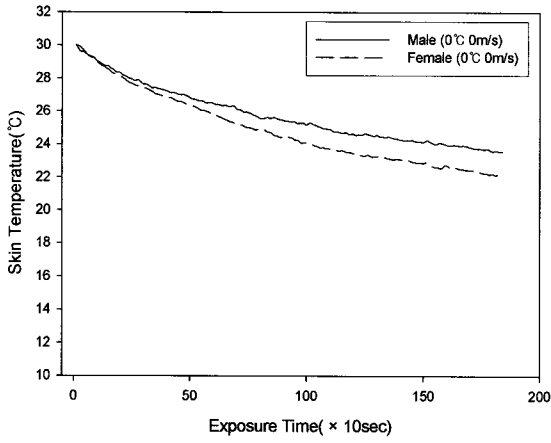


Fig. 2. The change of mean skin temperature at each air temperature and wind speed conditions.

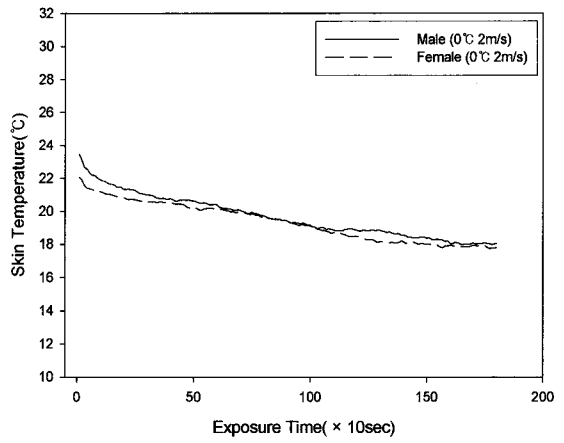
3.3. 성별에 따른 피부온도 변화 경향

피험자들의 성별에 따른 피부온도의 변화경향을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 남성의 피부온도가 여성보다 전체적으로 높은 것으로 나타났다. 이런 결과는 생리학분야에서도 밝히고 있는 것처럼 여성이 추운 환경에 노출되었을 때 남성보다 외부 기온에 더 민감하여 신체의 냉각이 더 잘 이루어진다는 것을 보여준다. 이는 여성들이 남성에 비해 전신대비 넓은 체표면적 비율과 남성보다 적은 근육량(보다 적은 열 생산)과 큰 관계가 있다. 또한 남성과 여성의 차이는 휴식중일 때 뿐 만 아니라, 차가운 환경에서 운동하고 있을 때에도 나타난다고 하였다¹⁵⁾.

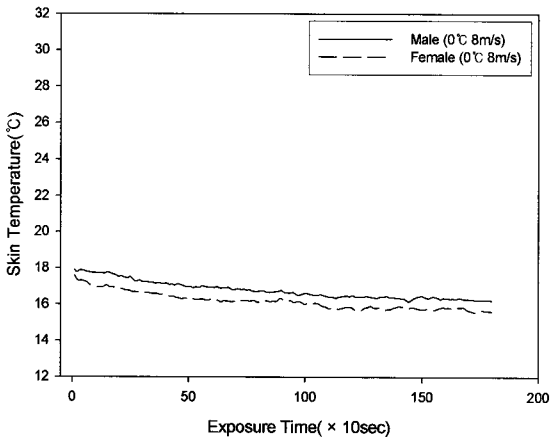
0 m s⁻¹일 때 모든 온도에서 남성 피험자가 여성 피험자보다 피부온도 감소율은 더 작은 것으로 나타났다. 남성과 여성의 피부온도 최대차는 -15°C 조건에서 2~3°C 정도였다. 2 m s⁻¹에서는 온도가 낮아질수록 남녀 피부온도의 차이가 커지는 경향을 보였다. 여성의 경우 낮은 온도조건일수록 더 빠른 피부 냉각이 이루어진다는 것을 설명해주는 결과로 볼 수 있다. 6 m s⁻¹일 때는 남성의 경우 지속적인 하강을 보이다 정상상태에 근접하는 결과를 보인 반면 여성의 피부온도는 불규칙한 변화를 보이며 초반에 떨어지다가 다시 상승하는 경향을 보였다. 온도변화는 남녀 모두 1.5°C 범위 내에서 이루어져 그 전 풍속에 비해 큰 영향을 미치지 못한 것으로



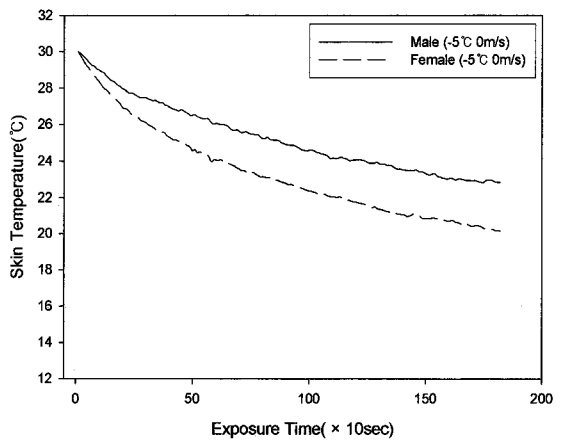
(a) 0°C, 0 m s⁻¹



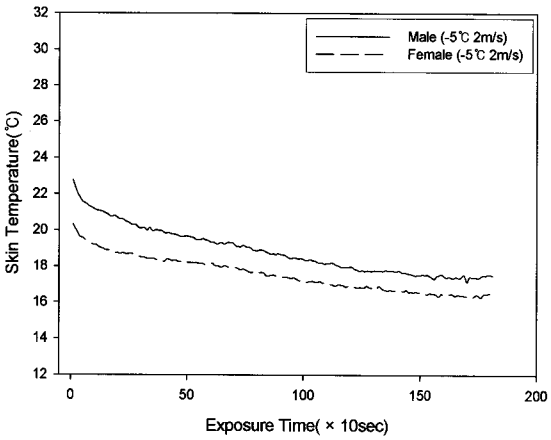
(b) 0°C, 2 m s⁻¹



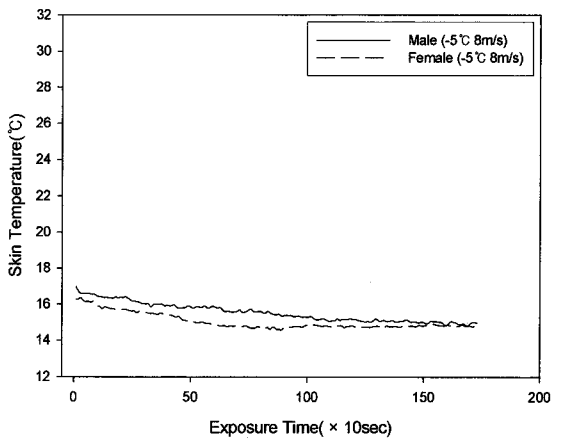
(c) 0°C, 8 m s⁻¹



(d) -5°C, 0 m s⁻¹

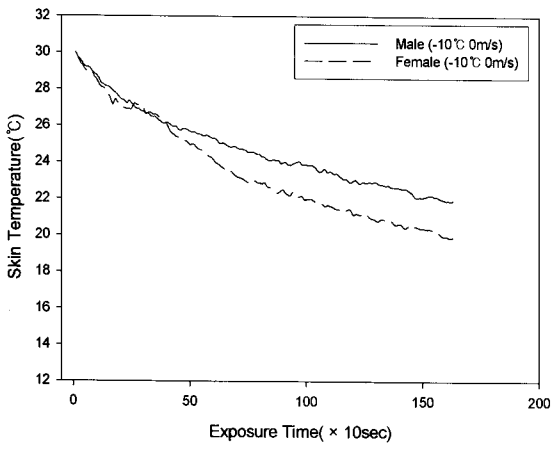


(e) -5°C, 2 m s⁻¹

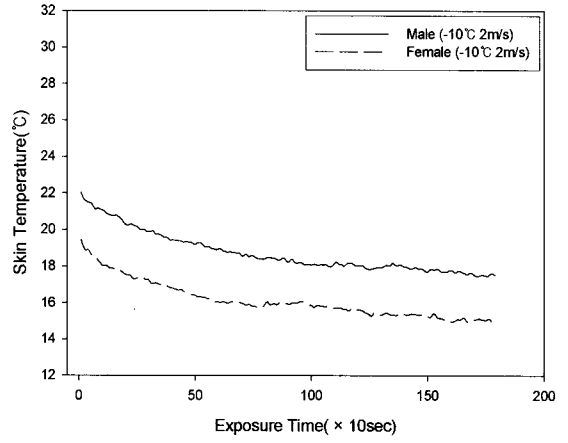


(f) -5°C, 8 m s⁻¹

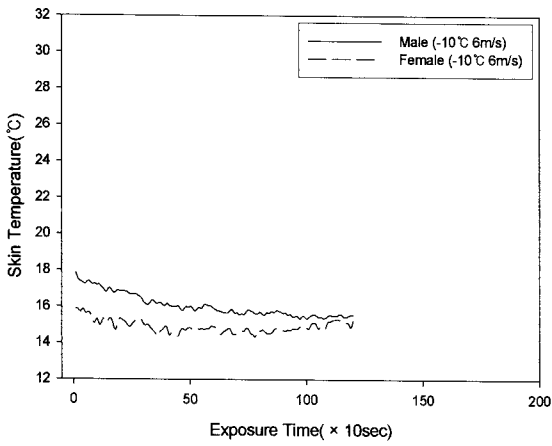
Fig. 3. The change of mean skin temperature with the distinction of sex at the given conditions.



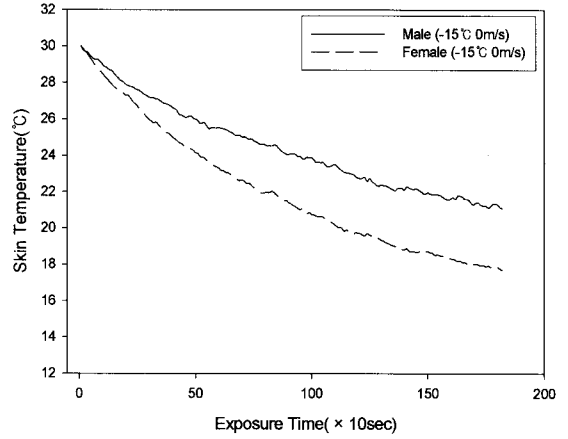
(g) -10°C , 0 m s^{-1}



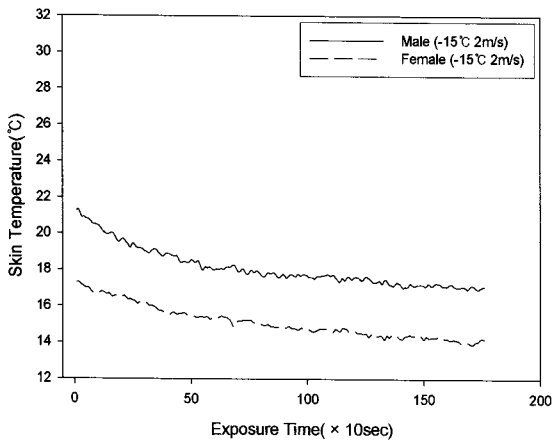
(h) -10°C , 2 m s^{-1}



(i) -10°C , 6 m s^{-1}



(j) -15°C , 0 m s^{-1}



(k) -15°C , 2 m s^{-1}

Fig. 3. (Continued).

생각된다. 남녀의 피부온도의 최대차는 2°C 미만이었다. 8 m s⁻¹에서의 피부온도는 정상상태에 근접하는 결과를 보여주고 있으며, 남녀 피부온도의 최대차는 0°C와 -5°C 조건에서 1°C 미만이었다.

따라서 남녀 성별차이에 따른 피부온도의 변화경향은 여성이 남성에 비해 외기의 온도에 민감하였으며 노출에 따른 피부온도 감소율이 크게 나타났다. 그리고 노출시간이 길어짐에 따라 그 차이는 점점 작아졌는데, 이는 남성이 여성보다는 내한성이 우수하다는 것을 보여주었고, 내한성은 유산소 운동력, 작업 시 상대적인 에너지 소비량, 피하지방의 두께, 신체 부피에 대한 체표면적 비율과 같은 요소에 따라 달라질 수 있다고 사료된다.

3.4. 안면 부위별 피부온도 변화 경향

사람의 인체 가운데 안면부에 해당하는 이마와 얼굴 양쪽 부위, 그리고 턱에서의 피부온도가 외기의 기온과 풍속에 따라 피부온도가 어떠한 변화경향을 나타내는지 알아보았다. 그 결과 이마의 피부온도가 가장 높게 나타나 성¹¹⁾의 결과와 일치하였으며, 그 다음으로는 턱, 얼굴의 왼쪽 부위, 오른쪽 부위의 순으로 나타났다(Fig. 4).

여기서 예상치 못한 결과는 얼굴의 양쪽 부위의 피부온도 변화였는데, 같은 신체 부위인 얼굴의 양쪽 부위에서 온도차가 발생했다. 대체로 왼쪽 부위의 온도가 오른쪽 부위의 온도보다 비슷하거나 높은 피부온도를 나타내었고, 그 차이는 -10°C, 0 m s⁻¹의 경우에서 최대 2°C 정도였다. 이러한 결과는 JAG/TI 실험에서도 동일하게 관측된 것으로 보고되었는데 그 때문에 오른쪽 부위의 온도를 JAG/TI 모델 개발 시에 worst case의 기본 자료로 사용되었다. 지금까지 얼굴 양쪽 부위의 온도가 서로 다른 이유에 대한 자료는 찾을 수 없었지만, 가장 신빙성 있는 의견으로는 왼쪽 부위가 오른쪽 부위에 비해 심장에서 가깝기 때문이라고 추측하고 있다.

3.5. 풍동 내 측정위치에 따른 피부온도의 변화 경향

풍동 내에서는 기온과 풍속의 분포가 동일하게 나타나야 하지만, 피험자들이 풍동 내 위치에 따라 느껴지는 추위가 다르다는 의견을 제시하여 측정위치(Treadmill, Non-Treadmill)에 따라 피부온도가 어

떻게 변화하는지를 알아보았으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 대체로 Non-Treadmill의 위치인 3, 4번이 1, 2번에 비해 더 춥게 느껴졌다고 하나, 분석 결과는 0°C와 -10°C, -15°C에서는 Treadmill과 Non-Treadmill에서의 피부온도가 비슷하게 나타났고 -5°C의 온도에서는 Treadmill에서의 피부온도가 더 높게 나타났지만 그 차이는 1°C 이내로 풍동 내 위치에 따른 피부온도 차이에 대한 영향은 크지 않은 것으로 생각된다. 실제로 -15°C일 때 풍동내의 각 위치에서 실제 실험에 사용한 센서를 들고서 온도를 측정하여 본 결과 Non-Treadmill과 Treadmill의 위치에서의 온도는 큰 차이가 없었다.

따라서 측정위치의 온도차에 의해 나타난 결과라기보다는 그 위치에서의 피험자의 주관적 느낌에 의한 추위의 차이일 뿐이고 또한 어떤 피험자가 어느 위치에서 측정을 했는가 위치에 따른 온도 값을 결정할 가장 큰 요인일 것으로 사료된다.

4. 결 론

외기의 기온과 풍속에 따른 인체 피부온도의 변화 경향을 측정하여 현재 기상청에서 제공하고 있는 체감온도지수를 검증·개선하고자 실시한 풍동 실험 결과는 다음과 같다.

실험조건은 기온이 0~ -20°C 범위로 5°C 간격으로 풍속을 0, 2, 6, 8 m s⁻¹로 변화시켜가며 안면부 4개 지점의 피부온도를 측정하였는데, 각 단계별 소요시간은 일부 조건을 제외하고 30분으로 하여 1개 조의 실험은 2시간 30분이 소요된다.

동일한 조건의 추위에 노출되더라도 이에 반응하는 피부온도의 변화경향은 개인의 특성(성별, 건강상태, 활동여부 등)에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며, 특정 조건에서 개인의 온도차는 최대 8°C 이상으로 나타났다. 외기에 노출된 초기에는 급격히 피부온도가 감소하였으며, 개인별 차이는 있으나, 대체적으로 남성이 여성에 비해 높은 피부 초기온도를 가지고, 노출시간에 따른 피부온도의 감소는 작게 나타난다.

각각의 기온과 풍속의 조건에서 평균 피부온도의 감소율은 차이는 있으나 추위에 노출되었을 때 시간에 따라 피부온도는 대체로 지수적으로 감소하는

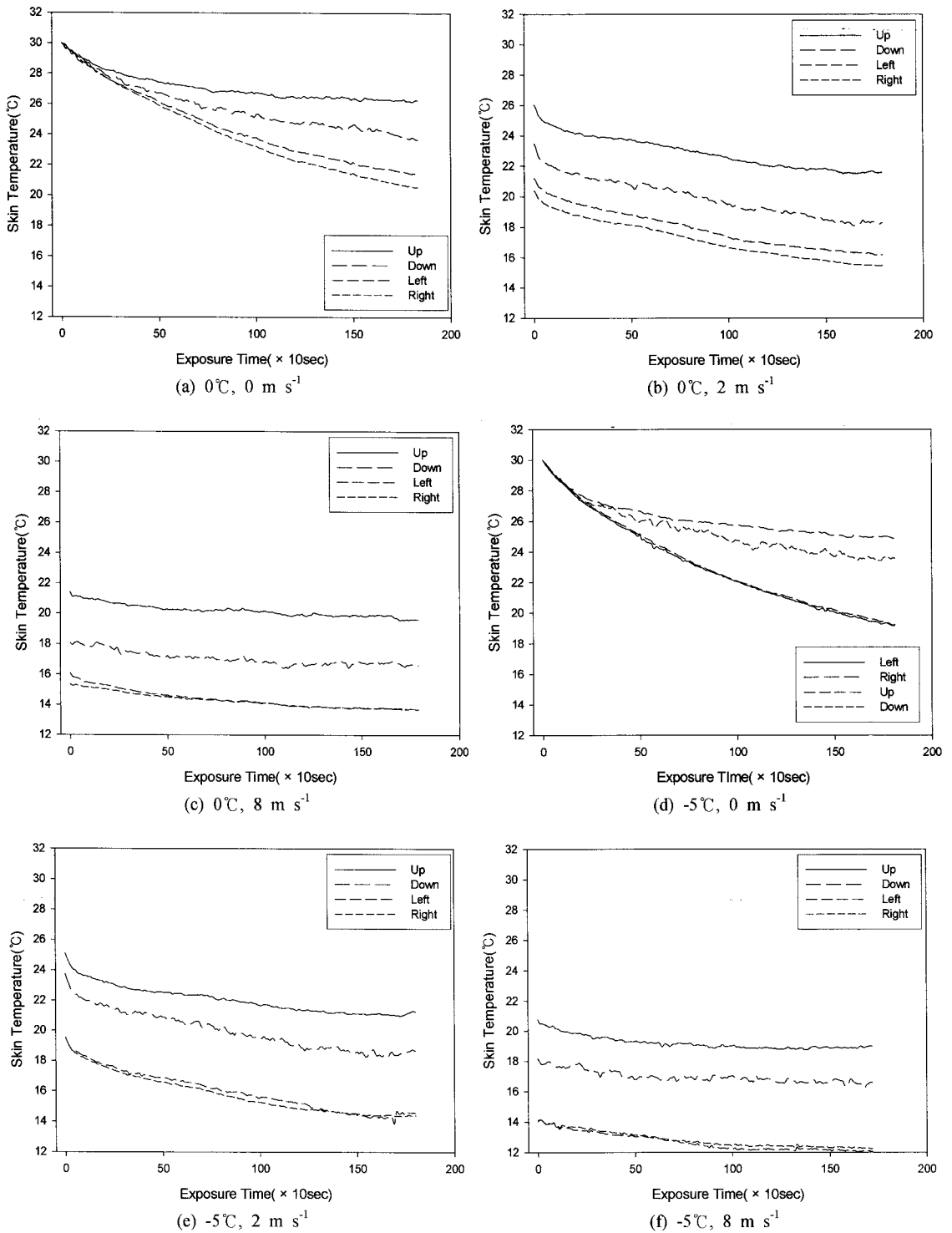
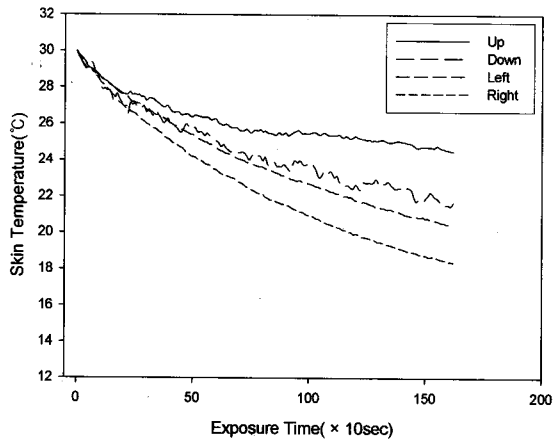
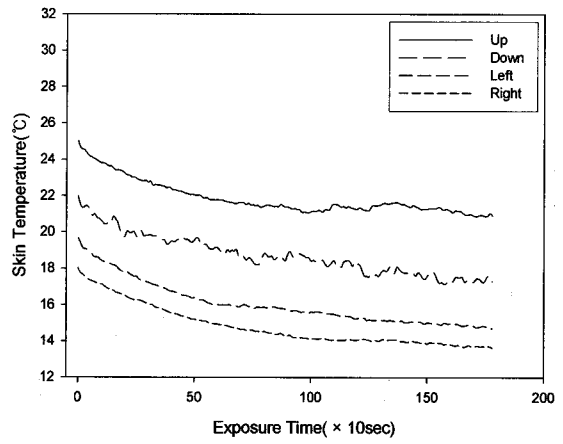


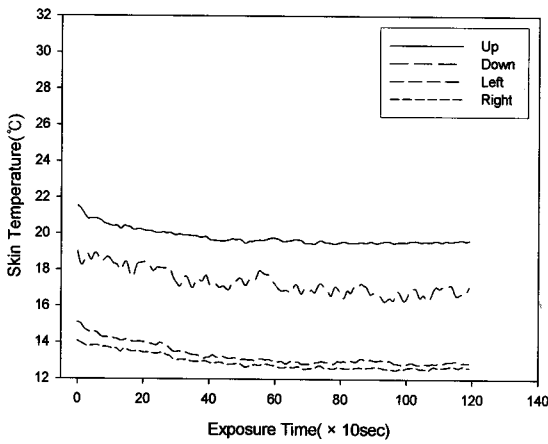
Fig. 4. The change of mean skin temperature on the forehead, right cheek, left cheek, and chin at the given conditions.



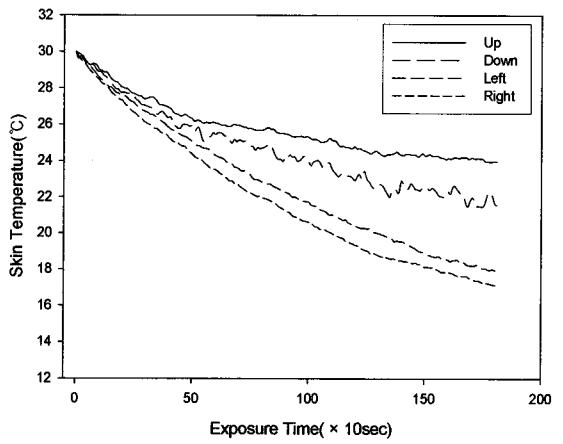
(g) -10°C , 0 m s^{-1}



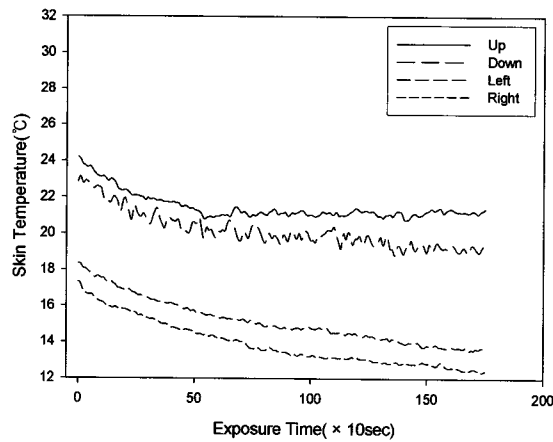
(h) -10°C , 2 m s^{-1}



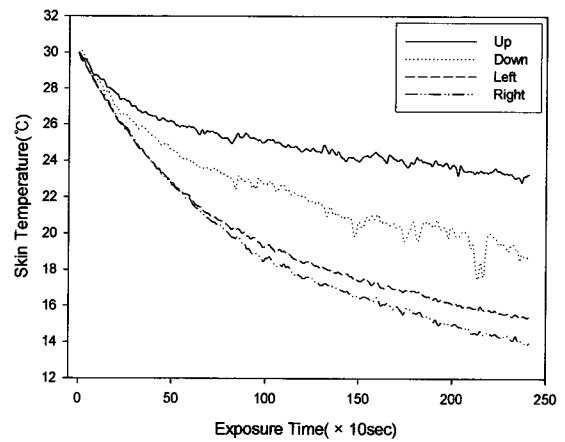
(i) -10°C , 6 m s^{-1}



(j) -15°C , 0 m s^{-1}



(k) -15°C , 2 m s^{-1}



(l) -20°C , 0 m s^{-1}

Fig. 4. (Continued).

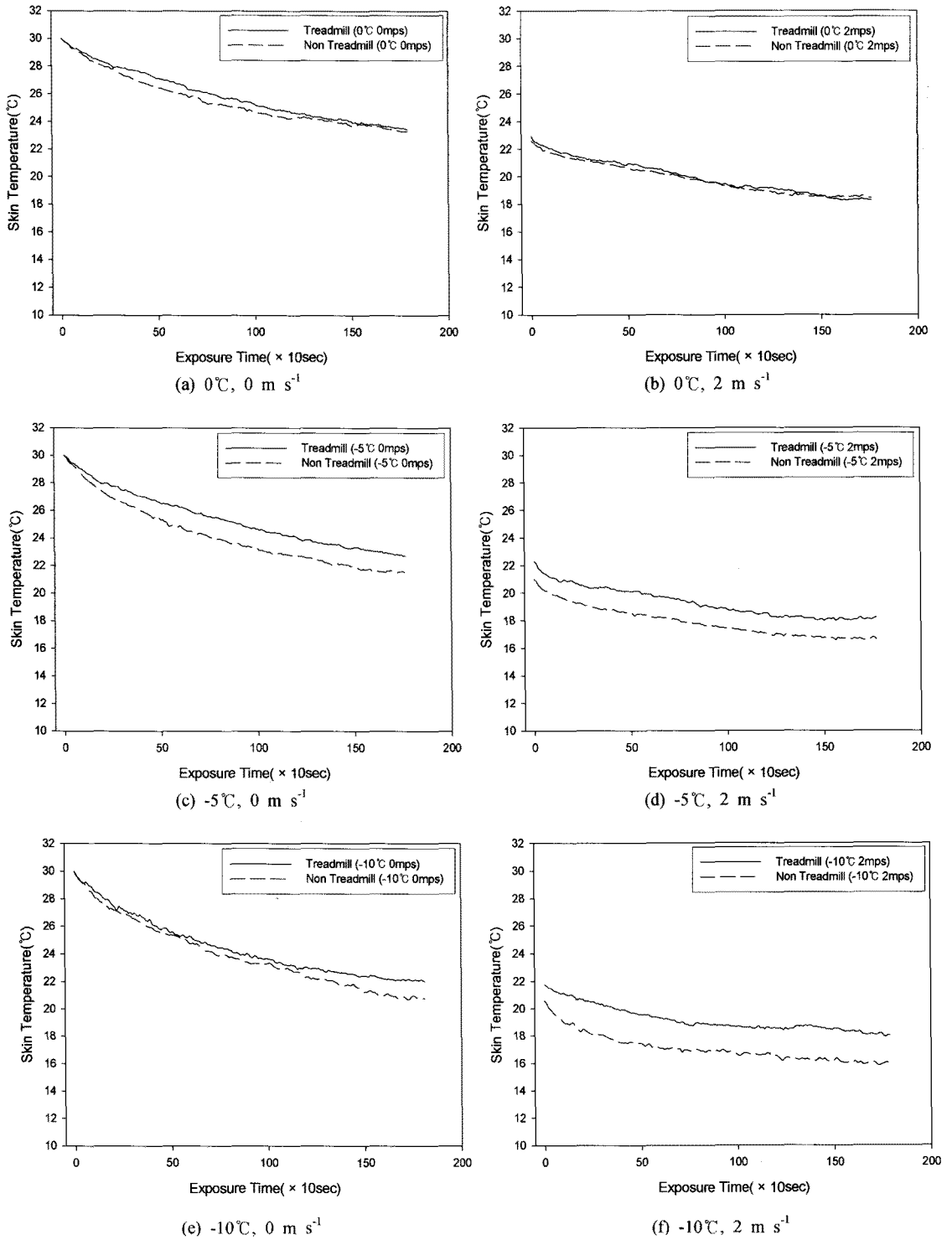


Fig. 5. The change of mean skin temperature with location in the wind tunnel at the given conditions.

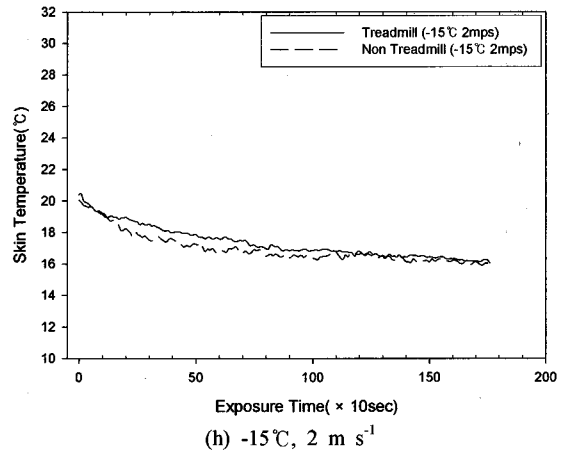
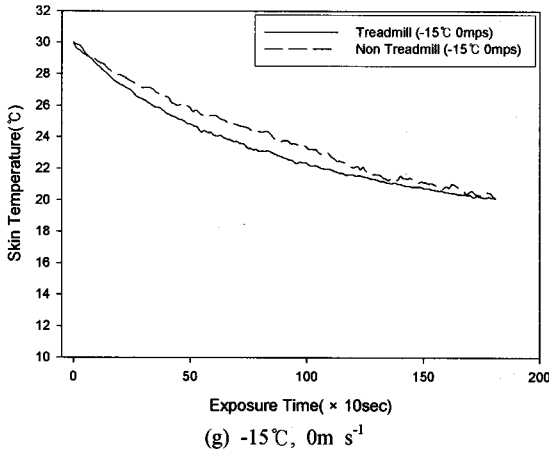


Fig. 5. (Continued).

형태였으며 정상상태에 도달하기까지는 최소 1시간 이상 소요되며 풍속이 강할수록 이 시간은 단축될 것으로 판단된다.

각 실험에서 피부 초기온도는 모두 다르게 나타나는데 본 연구에서는 피부 초기온도를 30°C 로 가정하였다. 보다 정확한 안면부의 열손실량을 구해내기 위해서는 신뢰할 수 있는 초기온도 값이 필요할 것이라 생각된다.

인체의 안면부 4개 지점 가운데 이마가 가장 피부온도가 높았으며, 그 다음은 턱, 얼굴의 왼쪽 부위, 오른쪽 부위의 순이었으며, 특히 오른쪽 부위는 가장 낮은 온도를 나타내어 worst case로서 WCT 지수 개발에 이용하는 것이 적절할 것으로 사료된다. 그리고 여성이 남성에 비해 외기의 온도에 민감하고 피부온도 감소율이 크다. 그리고 노출시간이 길어짐에 따라 온도 변화는 점점 적게 나타났다.

이상의 실험결과는 인체를 대상으로 하는 실험이므로 특히 저온에서 위험에 노출될 확률이 높아 다양한 연령층을 상대로 하지 못한 한계는 있으나, 노년층의 경우 20대에 비해 더 위험할 것으로 해석하여도 무리가 없을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상연구소 주요사업 “생명기상기술 개발연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 박종길, 정우식, 김은별, 박길운, 2007, 한국형 체감온도지수 개발연구(I) : 기존 체감온도지수 분포 및 민감도 분석, 한국지구과학회지, 28(7), 878-890.
- 2) 박종길, 정우식, 김병수, 윤숙희, 이종태, 남재철, 류상범, 김은별, 박길운, 송정희, 2007, 한국형 체감온도지수 개발연구(II) : 체감온도지수 개발을 위한 예비실험, 한국지구과학회지, 28(7), 891-902.
- 3) Siple P. A., Passel C. F., 1945, Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperature. *Proceeding of the American Philosophical Society*, 89(1), 177-199.
- 4) Steadman R. G., 1971, Indices of wind chill of clothed persons, *J. Appl. Meteor.*, 10, 674-683.
- 5) Dixon J. C., Prior M. J., 1987, Windchill indices a review, *The Meteorological Magazine*, 116(1374), 1-16.
- 6) Kessler E., 1993, Wind chill errors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 1743-1744.
- 7) Osczevski R. J., 1995, The basis of wind chill, *Arctic*, 48, 372-382.
- 8) Bluestein M., Zecher J., 1999, A new approach to an accurate wind chill factor, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(9), 1893-1899.
- 9) Osczevski R. J., 2000, Windward Cooling: An Overlooked Factor in the Calculation of Wind Chill, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(12), 2975-2978.
- 10) 금중수, 최광한, 김동규, 주익성, 김종열, 박희욱, 이구형, 최호선, 1998, 한국인의 온열쾌적감에 관한 연구 (Part I: 겨울철 체감실험 결과), *Korean Journal of The Science of Emotion & Sensibility*, 1(1), 199-211.
- 11) 성수광, 1989, 환경온도 22°C 에서의 성인여자 피부

온도의 분포, 대구가톨릭대학교 자연과학연구소 기초과학연구논집, 91-96.

12) 김혜정, 1988, 남한의 Windchill에 관한 연구, 이화여자대학교 석사학위논문, 75pp.

13) 박정환, 박래철, 한옥, 2002, 체감온도이론의 비교 연구, 한국지구환경과학회지, 23(8), 676-682.

14) 산업자원부, 2005, 제5차 한국인 인체지수 조사 자료; 직접측정에 의한 인체지수 통계, 299pp.(<http://www.ats.go.kr/>)

15) 위승두, 안의수, 남상남, 여남희, 김형돈, 김명화, 이대택, 배운정 공역, 2002, 운동생리학, 대한미디어, 632pp.