

체감온도이론의 비교 연구

박정환 · 박래설* · 한 욱

육군사관학교 환경학과

A Comparative Study on the Windchill Indices

Jeonhwan Park · Raeseol Park* · Uk Han

Department of Environment Science, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

Abstract : The concept of sensible temperature in winter is an attempt to quantify the sensation of cold by dry-bulb temperature combined with wind speed. Siple-Passel's windchill equivalent temperature originated in experiments that are not conformable to various human conditions. Therefore, many investigators have found the flaws which are listed. Steadman's model is based on the concept of thermal equilibrium and more sound and more representative of human conditions. But no classifications exist for Steadman's windchill equivalent temperature, yet. The JAG/TI-model which was developed by US and Canada is more accurate, easy to understand and reflects human beings by conducting experiments using human volunteers but didn't take into account solar radiation, wet condition and physical state of the individual. Because of individual differences in people's age, activity, health, metabolic rate, etc., no experimental evidence exists to suggest whether Siple-Passel's, Steadman's and JAG/TI-model's windchill equivalent temperature is more applicable to the majority of people. Therefore we need the windchill model which is best applicable to Korean Army.

Keywords : sensible temperature, Siple-Passel's windchill equivalent temperature, Steadman's model, JAG/TI-model

요약 : 겨울철 체감온도는 온도와 바람에 의해 느끼는 추위의 정도를 정량화한 것이다. Siple-Passel은 최초로 바람에 의한 냉각효과를 이용하여 바람냉각상당온도를 제시하였으나 일반인에게 적합하지 않기 때문에 많은 문제점이 지적되어 왔으므로 이 논문에서 결점들을 비교 분석하였다. Steadman 모델은 열평형(thermal equilibrium) 이론에 근거하여 보다 현실적이지만 추위의 정도를 구분하여 설명하지 못하였다. 최근 캐나다와 미국에서 개발한 JAG/TI-모델은 보다 정확하고 이해하기 쉬우며 인체실험을 반영하였으나 태양복사, 습도, 개인의 신체적 차이 등은 고려하지 않았다. 나이, 사람의 활동, 건강, 신진대사 등이 다르기 때문에 어느 모델이 사람에게 적합한지는 실험 비교가 필요하다. 따라서 우리의 야전환경에 적합한 체감온도모델의 개발이 요구된다.

주요어 : 체감온도, Siple-Passel의 바람냉각상당온도, Steadman 모델, JAG/TI-모델

서론

인체는 환경의 변화에 민감하게 반응한다. 환경에 대한 인간의 활동가능기준을 제시해주는 여러 가지 지표 중 하나로 온도, 풍속, 습도, 일사 등에 의해 결정되는 체감온도(sensible temperature)를 들 수 있다. 겨울철 체감온도는 온도와 바람에 의해 느끼는 추위의 정도를 정량화한 것이다. 연령, 신체조건, 건강정도, 성, 심리적 요소 등에 따라 추위를 느끼는 정도가 다르기 때문에 추위를 객관화 하기는 어렵다. 그

러나 주변온도와 풍속은 추위를 결정하는 가장 지배적인 요소이며 객관적인 측정이 가능하기 때문에 이러한 변수를 사용하여 체감온도를 계산할 수 있다.

Siple and Passel(1945)이 최초로 바람에 의한 냉각효과(windchill)를 이용하여 체감온도를 제시한 이후 지금까지 체감온도에 관한 많은 연구들이 수행되었다. Siple-Passel 모델(이하 S-P 모델)은 그 계산이 쉽기 때문에 캐나다, 미국, 유럽 등에서 널리 사용되어 왔으며 우리 군에서도 체감온도표의 배경이 되는 모델이지만 실제보다 냉각효과를 크게 계산하였으므로 수정되어야 한다는 지적들이 있어왔다(Steadman, 1971; Dixon and Prior, 1987; Kessler, 1993; Osczevski, 1995).

*Corresponding author: earth@kma.ac.kr

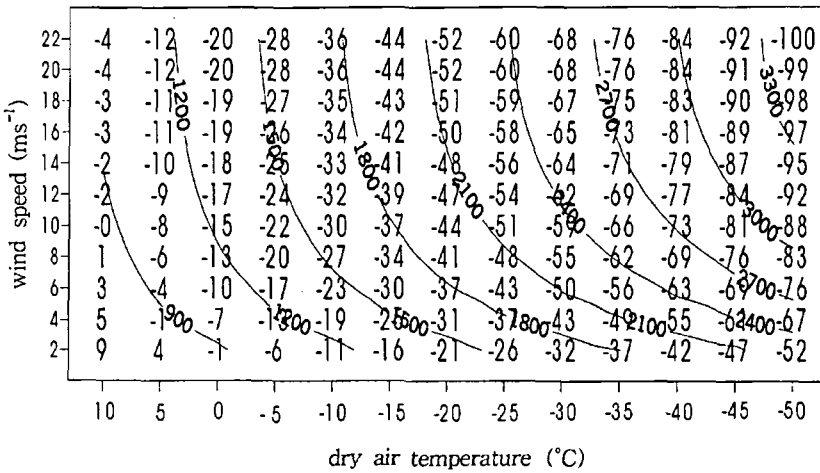


Fig. 1. The curves are lines of constant windchill factor (Wm^{-2}). Windchill equivalent temperature using calm condition of $1.79ms^{-1}$ (Siple and Passel, 1945).

체감온도를 명확히 적용하는 것은 주변의 환경에 대한 인체의 반응 정도를 제시하고 행동지침을 마련하기 위해서이다. 따라서 본 연구는 체감온도 이론을 고찰하고 S-P 모델의 문제점을 분석하면서 2001년부터 미국의 NWS(National Weather Service)와 캐나다의 MSC(Meteorological Services of Canada) 그리고 미군에서 채택한 JAG/TI-모델을 비교함으로써 체감온도에 대한 이해를 넓히고 우리 군에 적합한 체감온도 모델의 개발을 제안 하고자 한다.

체감온도 이론

Siple-Passel 모델

Siple과 Passel(1945)은 남극에서 플라스틱 실린더(길이 14.92cm, 직경 5.74cm, 두께 0.32cm)에 물($10^{\circ}C$, 250g)을 채워 건물 위에 매달아 두고 바람과 온도에 따라 실린더의 물이 어는 시간을 5분 간격으로 야간에 측정하였다. 실험데이터를 근거로 노출된 피부(온도를 $33^{\circ}C$ 로 가정)의 단위면적당 열손실량(cooling power of the atmosphere)을 계산하여 바람과 온도에 의한 냉각효과를 바람냉각인자(windchill factor, F_{wc})로 나타내었다. 바람냉각인자는 후에 Court(1948)에 의해 S-P 모델의 틀은 유지하면서 방정식의 상수를 수정하여 사용되었다.

Siple-Passel:

$$F_{wc} = 1.162(10.45 + 10\sqrt{V} - V)(33 - T) \quad (1)$$

Court:

$$F_{wc} = 1.162(9.0 + 10.9\sqrt{V} - V)(33 - T) \quad (2)$$

여기서,

V : 풍속(ms^{-1}), T : 건구온도($^{\circ}C$)

F_{wc} : 바람냉각인자($Wm^{-2} = 1.162 \times kcal\ m^{-2}\ h^{-1}$)이다.

S-P 모델의 바람냉각인자는 일반적으로 이해하기 쉽게 표현하기 위하여 실제 대기의 온도와 상응하는 바람냉각상당온도(windchill equivalent temperature)로 계산되어 겨울철 체감온도로 활용되어 왔다(Fig. 1).

바람냉각상당온도는 바람이 불 때의 바람냉각인자를 바람이 불지 않았을 때(기준풍속)의 바람냉각인자로 가정하고, 이때의 바람냉각인자 값을 갖는 온도로 정의하였다. 기준풍속(V_b)이 각각 $1.79ms^{-1}$, $2.22ms^{-1}$ 일 때 온도(T_e , $^{\circ}C$)와 풍속(V , ms^{-1})에 따른 바람냉각상당온도(T_e , $^{\circ}C$)는 식(3), (4)와 같다.

$$T_e = 33 - 0.0454(10.45 + 10\sqrt{V} - V)(33 - T) \quad (3)$$

$V_b = 1.79ms^{-1}$ (4mph) 일 때

$$T_e = 33 - 0.0432(10.45 + 10\sqrt{V} - V)(33 - T) \quad (4)$$

$V_b = 2.22ms^{-1}$ (5mph) 일 때

이때 기준풍속은 보행속도(walking speed)라고도 하며 무풍(calm)에서도 사람이 움직임으로써 생기는 상대적인 풍속으로 체감온도계산의 기준이 된다.

S-P 모델은 온도와 바람에 의한 냉각효과를 바람냉각인자로 계산하였지만 어느 정도 추운 것을 의미하

Table 1. The relationship between the sensation of cold and windchill factor by Terjung (1996).

sensation of cold	windchill factor (Wm ²)
cool	H<700
very cool	700<H<950
cold	950<H<1250
very cold	1250<H<1450
bitterly cold	1450<H<1700
freezing cold	1700<H

는지 이해하기 어렵다. 또한 바람냉각상당온도도 기준풍속에 따라 추위 정도를 숫자로 표현한 것이지만 실제 대기의 온도를 의미하는 것은 아니다. 따라서 동상의 위험을 경고하고 야외활동에 참고하기 위해서는 바람냉각인자를 객관적인 추위의 정도(sensation of cold)로 표현하는 것이 필요하다.

객관적인 추위의 정도는 온도와 풍속 외의 조건들(옷을 입은 상태, 신진대사, 건강상태, 추위에 대한 적응정도, 심리적 요소 등)에 따라 다르지만 Terjung (1966)은 Court(1948)의 식(2)과 인체실험을 통하여 Table 1과 같이 추위의 정도와 바람냉각인자와의 관계를 객관적으로 제시하였다.

Steadman 모델

Steadman(1971)은 인체의 열 평형(thermal equilibrium) 이론을 기초로 완전히 새로운 모델을 제안하였다. 키 170cm, 신체면적 1.7m²의 사람이 1.33ms⁻¹의 속도로 걷고 있다고 가정하고, 얼굴(신체면적의 3%)은 노출시키고 손과 발(신체면적의 12%)은 장갑으로, 몸(신체면적의 85%)은 적절히 옷을 입고 있을 때 인체의 열생산량(heat generated)을 188Wm⁻²로 가정하였다. 이때 인체의 총 열손실량(heat lost)은 호흡에 의한 열손실량, 호흡으로 수증기 증발에 의한 열손실량, 노출된 피부의 열손실량, 장갑으로 보호된 손과 발의 열손실량, 그리고 옷으로 보호된 부분의 열손실량의 합이며 이것은 인체의 열생산량과 같다는 열 평형이론을 토대로 온도(T, °C)와 풍속(V, ms⁻¹)에 따라 인체의 단위면적당 열손실량(H, Wm⁻²)을 식(5)와 같이 계산하였다.

$$H = 16.3 + 0.22(37 - T) + (30 - T) \cdot [0.226(T/100 + 2.73)^3 + 0.017(T/100 + 2.73)^2 + (4.93 - 0.0109T)f(V)] \quad (5)$$

여기서,

$$f(V) = (V^2 + 2)^{0.375}, \quad V < 2.9 \text{ 일 때,}$$

$$f(V) = (V^2 + 2 + 2.1(2.9 - V)^{1/2})^{0.375}, \quad V \geq 2.9 \text{ 일 때,}$$

이다.

Steadman 모델은 S-P 모델과는 달리 노출된 피부 대신 인체의 열 평형이론과 피부, 신진대사, 증발량, 태양복사, 열 대류, 호흡에 의한 열 손실 그리고 기준풍속(1.33ms⁻¹) 등을 고려하여 인체의 열손실량을 계산하였으며, 특히 고도 10m에서의 풍속을 1.7m에서의 풍속으로 보정하였다는 점에서 보다 현실적으로 체감온도를 계산하였다.

Steadman 모델(1971)은 그 후 여러 번 수정(Steadman, 1979, 1984, 1994)되었지만 계산이 복잡하기 때문에 S-P 모델처럼 잘 활용되지 않았다. Quayle와 Steadman(1998)은 Steadman 모델(1994)을 보완하여 온도(T, °C)와 풍속(V, ms⁻¹)에 따른 열손실량을 식(6)과 같이 체감온도(ET, °C)로 제시하였는데, 이때 기준풍속은 1.33ms⁻¹(3mph)이다.

$$ET = 1.41 - 1.162V + 0.987T + 0.0124V^2 + 0.0185(VT) \quad (6)$$

Steadman의 모델들은 S-P 모델보다 체감온도의 영향요소를 더 잘 반영하였으며 25ms⁻¹ 이상의 풍속에서도 바람에 의한 냉각효과가 계속 증가한다는 점에서 S-P 모델과는 차이가 있다. 그러나 Steadman 모델들은 사람을 대상으로 하는 실험에 의해 도출된 모델이 아니며 체감온도의 활용을 위한 객관적인 추위의 정도를 Terjung(1966)과 같이 설명하지 못하였기 때문에 S-P 모델처럼 널리 활용되지 못하였다.

JAG/기-모델

배경

캐나다와 미국은 매년 극심한 추위 때문에 체감온도에 대한 관심이 지대하다. 특히 캐나다는 1992년부터 1996년까지 매년 추위로 82명이 사망하였음은 물론 약 82%가 체감온도 예보를 듣고 어떻게 옷을 입을 것인가와 옥외활동 여부를 결정한다고 한다(Maarouf and Bitzos, 2000). 이처럼 체감온도는 추위가 일상생활과 밀접한 관계가 있는 캐나다와 미국을 중심으로 발전되어 왔다.

2001년 이전까지 캐나다와 미국에서는 S-P 모델에 기초한 체감온도 공식을 사용하였으나 체감온도가 정확하지 않기 때문에 추위를 잘 설명하지 못한다는 매스컴의 비난과 함께 개선의 요구가 있어왔다. NWS와 MSC는 지금까지의 체감온도 이론을 토대로

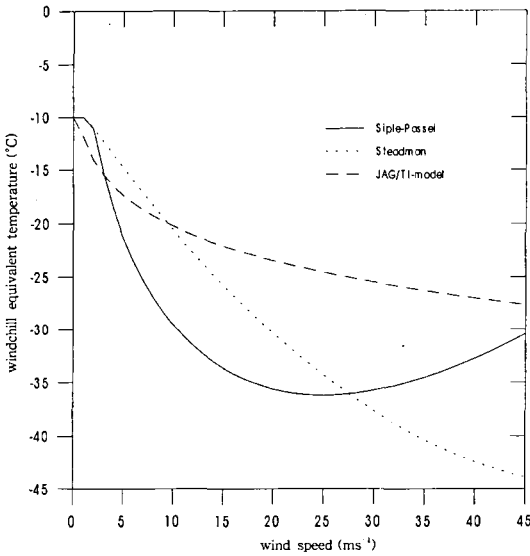


Fig. 2. Values of the S-P, Steadman, and JAG/TI windchill equivalent temperature for a fixed air temperature of -10°C at various wind speeds.

새로운 최적의 모델을 개발하기 위한 연구팀, JAG/TI (Joint Action Group for Temperature Indices)를 구성하여 JAG/TI- 모델을 개발하였고 2001년 10월 1일부터 공식적으로 사용하게 되었다. 특히 미군교범(U. S. Army, 2001)에서도 이를 채택하고 있다.

JAG/TI-모델

JAG/TI-모델은 자발적으로 실험에 참여한 캐나다인 12명의 얼굴을 기준으로 풍동실험 데이터 분석을 통하여 개발되었다. 풍동내부의 실험대상자들은 태양복

사가 없는 조건에서 얼굴의 온도와 열손실량을 측정할 수 있는 센서를 코, 턱, 이마, 뺨에 부착하였다. 이때 내부의 온도와 풍속을 다양하게 변화시키면서 피부온도와 열손실량을 측정·분석하여 온도(T)와 풍속(V)에 따른 최적의 체감온도(WC)를 공식(7), (8)과 같이 제시하였다(Nelson *et al.*, 2002).

$$WC(^{\circ}\text{C}) = 13.13 + 0.62T - 13.95V^{0.16} + 0.486TV^{0.16} \quad (7)$$

, $T(^{\circ}\text{C})$, $V(\text{ms}^{-1})$ 일 때

$$WC(^{\circ}\text{F}) = 35.74 + 0.6215T - 35.75V^{0.16} + 0.4275TV^{0.16} \quad (8)$$

, $T(^{\circ}\text{F})$, $V(\text{mph})$ 일 때

이때 풍속은 고도 10m에서의 풍속에 2/3를 곱하여 사람의 평균 얼굴높이 1.5m에서의 풍속으로 환산하였고 기준풍속은 측정을 통하여 사람이 서로 교차할 때의 풍속 1.3ms^{-1} (3mph)로 설정하였다. JAG/TI-모델은 Fig. 2와 같이 S-P 모델과는 달리 풍속이 증가할수록 체감온도도 계속 낮아지며 풍속이 3ms^{-1} 이하 구간을 제외하고는 S-P 모델보다 체감온도가 높게 계산된다.

또한 추위의 정도를 노출된 피부가 동상에 걸리는 시간(time-to-frostbite)으로 제시하였다는 점에서 그 활용가치가 크다. 즉 Table 2와 같이 노출된 피부의 경우 95%의 사람들은 체감온도가 -60 이상일 때 2분 이내, -35 이상일 때는 10분 이내에 동상이 발생하고, -25 이상에서는 피부가 얼기 시작하기 때문에 동상의 위험이 있다는 것이다. 그러나 JAG/TI-모델은 여전히 태양복사 정도와 습도의 변화, 그리고 추위에

Table 2. JAG/TI windchill chart-windchill equivalent temperature and time to frostbite (Nelson *et al.*, 2002).

wind speed (ms ⁻¹)	air temperature (C)										
	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
5	1	-5	-11	-17	-24	-30	-36	-42	-49	-55	-61
10	0	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47	-53	-60	-67
15	-2	-8	-15	-22	-29	-36	-43	-49	-56	-63	-70
20	-2	-9	-16	-23	-30	-38	-45	-52	-59	-66	-73
25	-3	-10	-17	-25	-32	-39	-46	-53	-60	-68	-75
30	-4	-11	-18	-25	-33	-40	-47	-55	-62	-69	-77
35	-4	-12	-19	-26	-34	-41	-48	-56	-63	-71	-78
40	-5	-12	-20	-27	-35	-42	-49	-57	-64	-72	-79

risk of frostbite prolonged exposure
 frostbite possible in 10 minutes
 frostbite possible in 2 minutes

Table 3. Comparison of windchill equivalent temperature (°C) by different models (Maarouf and Bitzos, 2000).

wind speed (kmh ⁻¹)	50	40	30	15
air temperature (°C)	0	-10	-20	-35
Siple-Passel (1945)	-15	-27	-38	-45
Steadman (1984)	-13	-24	-32	-42
Osczevski (1995)	-10	-21	-31	-40
Quayle & Steadman (1998)	-12	-22	-30	-40
Bluestein & Zecher (1999)	-13	-25	-35	-43
JAG/TI (2001)	-8	-21	-33	-48

대한 개인적인 차이(성, 유전, 주거지역 등)는 고려하지 않았다.

체감온도 모델의 분석 및 비교

S-P 모델이후 동상, 저체온증, 참호족(trench foot) 등 추위와 관련된 위험을 경고하기 위하여 온도와 바람에 의한 체감온도 모델들이 다양하게 개발되었는데 Table 3과 같이 모델에 따라 체감온도가 차이가 있음을 알 수 있다.

S-P 모델은 겨울철 야외활동, 특히 군 작전과 훈련에 널리 활용되어 왔지만 많은 학자들(Steadman, 1971; Dixon and Prior, 1987; Kessler, 1993; Osczevski, 1995)에 의해 현실적이지 못하다는 비판을 받았는데 S-P 모델의 문제점을 분석하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, S-P 모델은 피부온도를 33°C로 가정하고 물이 들어있는 플라스틱 실린더를 통하여 인체의 열손실량을 계산하였다. 그러나 우리의 인체는 물이 들어있는 플라스틱 실린더와 달라서 열을 잃기도 하지만 열을 생산하여 인체의 열 평형을 유지한다. 또한 신체의 각 부분은 노출상태, 피복착용 여부 등에 따라서 열손실량이 차이가 있다. 즉 사람의 몸내부 온도는 37°C이고, 옷으로 보호받는 부분(몸 전체의 약 85%)의 온도는 33°C 정도이다(Gagge *et al.*, 1941). 또한 손과 발, 얼굴 등 피복으로 보호받지 못하는 부분의 피부온도는 30°C이다(Burton and Edholm, 1955). 따라서 최근의 체감온도 모델들은 인체의 열 평형이론을 기초로 몸 내부온도를 37°C로, 노출된 피부의 온도를 30°C로 가정하고 있다(Osczevski, 1995; Bluestein and Zecher, 1999; Steadman, 1971).

S-P 모델은 노출된 피부의 온도를 33°C로 높게 가

Table 4. Comparison of windchill equivalent temperature (°C) by S-P model using different skin temperature of 33°C and 30°C.

skin temp. (C)	dry bulb temp. (C)	wind speed (ms ⁻¹)			
		5	10	15	20
33		-21.3	-29.6	-33.7	-35.6
30	-10	-20.5	-28.2	-32.0	-33.8

Table 5. Comparison of windchill temperature (°C) by S-P model using different wind speed of 10m height and 67% of 10m height.

height	dry bulb temp. (C)	wind speed (ms ⁻¹)			
		5	10	15	20
10m		-21.3	-29.6	-33.7	-35.6
correction (67%)	-10	-14.8	-22.9	-27.8	-31.0

정함으로써 바람에 의한 인체의 열손실량을 크게 하여 바람냉각상당온도가 상대적으로 낮게 나타난다 (Table 4). 또한 S-P 모델은 인체의 열 평형을 고려하지 않고 열손실량만을 계산하여 바람에 의한 인체의 냉각효과를 크게 하였다.

둘째, S-P 모델은 실험 데이터에 근거한 최적의 포물선 형태의 방정식이기 때문에 풍속이 1.79~25m/s 구간에서만 적용되는 한계가 있다. 즉 Fig. 2와 같이 S-P 모델은 풍속이 25ms⁻¹에서 냉각효과가 최대가 되어 그 이상 풍속이 증가하여도 더 이상의 냉각효과가 나타나지 않기 때문에 풍속이 25m/s 이상에서는 계산하지 않으며 풍속 1.79m/s 이하에서는 주변대기의 온도를 체감온도로 간주한다. 이것은 S-P 모델의 가장 큰 결점이라고 할 수 있다. 반면에 Steadman 모델과 JAG/TI-모델은 풍속이 증가함에 따라 계속해서 추가적인 냉각효과가 나타남을 알 수 있다.

셋째, 일반적으로 대기 경계층에서 바람의 연직분포는 지수 함수적으로 증가하며 풍속은 풍속계로 지상 10m의 높이에서 측정한다. 겨울철 개활한 지형에서 지상 10m(y₁₀)에서의 풍속(v₁₀)과 어떤 높이(y)에서의 풍속(v)과의 관계는 식(9)와 같다(Buckler, 1969).

$$\frac{v}{v_{10}} = \left(\frac{y}{y_{10}}\right)^{0.21} \tag{9}$$

Steadman(1971)은 위 식(9)을 적용하여 고도 10m

Table 6. Comparison of windchill equivalent temperature (°C) by S-P model using different calm conditions.

calm condition (ms ⁻¹)	dry bulb temp. (C)	wind speed (ms ⁻¹)			
		5	10	15	20
1.79	-10	-21.3	-29.6	-33.7	-35.6
2.22	-10	-18.7	-26.6	-30.5	-32.4

에서의 풍속을 보통사람(키 1.7m)이 몸 전체에서 받는 평균풍속으로 보정하여 체감온도 모델을 제시하였는데 그 값은 고도 10m에서의 풍속의 57%에 해당된다. Osczevski(1995)도 위 식(9)를 이용하여 고도 10m에서의 풍속을 성인의 평균 얼굴 높이인 지상 1.5m에서의 풍속으로 보정하여 체감온도 모델을 제시하였는데 이때 1.5m에서의 풍속은 10m에서의 풍속의 67%에 해당된다.

또한 JAG/TI-모델도 고도 10m에서 풍속의 2/3 (67%)를 얼굴높이(1.5m)에서의 풍속으로 보정하여 체감온도로 계산하였다.

그러나 S-P 모델은 고도 10m에서 측정된 풍속을 사용함으로써 인체가 받는 바람에 의한 냉각효과를 크게 계산하였는데 고도 10m에서의 풍속을 67%로 보정하여 체감온도를 계산한 결과를 비교하면 Table 5와 같다.

이러한 보정은 대기가 안정할 때 지표면의 거칠기 길이(roughness length)에 따라서 차이가 있는데 숲이 무성한 지역과 도시지역 등은 고도 10m에서 측정된 풍속의 10~30% 정도이다(Osczevski, 1995). 이와 같이 대기의 조건과 지표면의 상태에 따라서 실제 풍속은 차이가 있으므로 정확한 체감온도계산을 위해서는 실제 인체가 받는 풍속을 적용해야 하는 어려운 문제가 있다.

넷째, S-P 모델은 사람이 움직이므로써 생기는 상대적인 풍속을 고려하지 않고 플라스틱 실린더의 열손실량을 기초로 바람냉각인자로 나타내었다. 후에 바람냉각상당온도는 기준풍속을 1.79~2.22ms⁻¹(4~5 mph)로 설정하고 체감온도계산에 널리 사용되어왔다(Dixon and Prior, 1987; Eagan, 1964). 이때 바람냉각상당온도는 기준풍속에 따라서 다르게 나타남을 알 수 있다(Table 6).

그런데 사람이 겨울철 야외활동에서 움직이지 않는다는 조건에서 인체의 열손실량을 계산하여 체감온도를 제시하는 것은 합리적이지 않으므로 Osczevski

(1995)와 Bluestein and Zecher(1999)는 사람이 움직이므로써 생기는 상대적인 풍속을 1.79ms⁻¹(4mph)로 가정하였다. 또한 Steadman 모델(1971)과 JAG/TI-모델도 기준풍속을 1.33ms⁻¹(3mph)로 가정하는 등 대부분의 체감온도 모델들은 풍속 1.33~2.22ms⁻¹를 기준풍속으로 가정하고 있으며 실제풍속이 기준풍속보다 낮을 경우에 체감온도는 대기온도보다 높게 계산되므로 이 때의 체감온도는 주변의 대기온도와 같다고 간주한다.

이와 같이 대부분의 체감온도 모델들은 사람이 움직이므로써 생기는 상대적인 풍속을 고려하고 있으나 S-P 모델은 이를 고려하지 않고 인체의 열손실량만을 계산하였다.

토의 및 결론

체감온도는 겨울철 바람에 의한 추위의 정도를 정량적으로 나타내는 유용한 방법이다. S-P 모델의 체감온도는 피부온도 설정, 방정식의 오류, 풍속보정, 기준풍속 등의 문제 때문에 실제로 우리가 느끼는 온도와 차이가 있다. 그러나 S-P 모델은 겨울철 동상의 위험을 경고하는 도구로서는 정확하지 못하지만 여러 가지 결점이 있음에도 불구하고 추위의 정도를 대략적으로 설명할 수 있다.

Steadman 모델은 인체가 열을 얻은 것과 잃은 것이 같다는 열 평형이론을 적용하여 열손실 요소(피복, 신진대사, 증발량, 태양복사 등)들을 보다 현실적으로 고려하여 체감온도를 계산하였으나 체감온도가 의미하는 추위의 정도를 설명하지 못하는 한계가 있다.

또한 캐나다와 미국에서 개발한 JAG/TI-모델은 과학적 이론과 인체실험을 통하여 개발되었기 때문에 보다 정확하며 체감온도에 따른 추위의 정도를 동상에 걸리는 시간으로 표현함으로써 이해하기 쉽다. 그러나 풍속이 3ms⁻¹ 이하 일 때는 오히려 S-P 모델보다 체감온도가 더 낮고 태양복사의 정도와 습도의 영향, 추위에 대한 개인적인 차이는 여전히 고려하지 않았다는데 그 한계는 있다.

겨울철이면 체감온도에 관한 논의와 요구가 있어왔고 앞으로도 계속 될 것이다. 사람의 나이, 건강, 신진대사, 심리적 요인, 추위에 적응정도, 사람의 활동에 따른 기준풍속의 변화 등의 차이 때문에 사람마다 느끼는 체감온도는 같지 않으며 S-P 모델, Steadman 모델, 그리고 JAG/TI-모델 등 여러 가지

연구가 수행되었지만 어느 것이 가장 적합한 결과인지 증명할 수 있는 객관적인 증거는 미비하다. 따라서 본 연구는 선행된 체감온도 관련 연구의 제시, 비교 및 분석을 통하여 한·미 연합작전차원에서 JAG/TI-모델을 채택하여 교리의 통일과 우리 군에 적합한 체감온도 모델의 개발을 제안 하고자 한다.

참고문헌

- Bluestein, M. and Zecher, J., 1999, A new approach to an accurate windchill factor, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(9), 1893-1899.
- Buckler, S. J., 1969, The vertical wind profile of monthly mean winds over the Prairies, *Canada Department of Transport Technical Memorandum TEC 718*, 16 p.
- Burton, A. C., and Edholm, O. G., 1955, *Man in a cold environment*, London, Edwin Arnold Ltd. 82 p.
- Court, A., 1948, Windchill, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 29, 487 p.
- Dixon, J. C., and Prior, M. J., 1987, Windchill indices-a review, *The Meteorological Magazine*, 116(1374), 1-16.
- Eagan, C., 1964, The effect of air movement on atmospheric cooling power, In: Kolb, C. and Holstrom, F., eds., *Review of research on military problems in cold regions*, Ft. Wainwright, Alaska: Arctic Aeromedical Laboratory, TDR-64-28, 147-156.
- Gagge, A. P., Burton, A. C., and Bazett, H. C. 1941, A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment, *Science*, 94, 428-430.
- Kessler, E., 1993, Windchill errors, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 1743-1744.
- Maarouf, A. and Bitzos, M., 2000, Windchill indices: A review of science, current application and future directions for Canada, *Environment Canada Meteorological Service of Canada Technical Report*, En56-152/2000, 8-18.
- Nelson, C. A., Tew, M., Phetteplace, G., Schwerdt, R., Maarouf, A., Osczevski, R., Bluestein, M., Shaykewich, J., Smarsh, D., Derby, J. C., Petty, R. C., Berger, M., Quayle, R. G., Santee, W. R., Olenic, E., Lupo, A. R., and Browne, K., 2002, Review of the federal inter-agency process used to select the new windchill temperature (WCT) index, *Preprints, Proceedings of the 18th Conference on Interactive Information Processing System(IIPS)*, Orlando, Florida, American Meteorological Society.
- Osczevski, R. J., 1995, The basis of windchill, *Arctic*, 48(4), 372-382.
- Quayle, R. G. and Steadman, R. G., 1998, The Steadman windchill: An improvement over present scales, *Weather and Forecasting*, 13, 1187-1193.
- Siple, P. A. and Passel, C. F., 1945, Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), 177-199.
- Steadman, R. G., 1971, Indices of windchill of clothed persons, *Journal of Applied Meteorology*, 10, 674-683.
- Steadman, R. G., 1979, The assessment of sultriness, *Journal of Applied Meteorology*, 18, 861-885.
- Steadman, R. G., 1984, A universal scale of apparent temperature, *Journal of Applied Meteorology*, 23(12), 1674-1687.
- Steadman, R. G., 1994, Norms of apparent temperature in Australia, *Australian Meteorology Magazine*, 43, 1-16.
- Terjung, W. H., 1966, Physiological climates of the conterminous United States; A bioclimatic classification based on man, *Amateur Association of American Geographers*, 56, 141-179.
- U. S. Army, 2001, Sustaining health & performance in cold weather operations, *U. S. Army Research Institute of Environmental Medicine*, 43 p.

2002년 6월 12일 원고 접수
2002년 10월 21일 수정원고 접수
2002년 11월 23일 원고 채택