

방한섬유소재와 관련된 이론 및 측정

박윤철, 남창우, 박영환

한국생산기술연구원 섬유소재본부 디지털가공팀

1. 서론

추위는 인체건강에 밀접한 요소이며, 추운 환경이 심리적인 기능, 활동성, well-being에 나쁜 영향을 미치는 것은 잘 알려진 사실이다. 국부적인 피부온도저하, 극한적인 체온저하 또는 신체의 전반적인 체온저하 등은 인체에 매우 위험하다. 온도저하를 방지하고 일정온도 이하로 떨어지지 않도록 열적균형(heat balance)을 유지하여 주는 것이 중요하다. 방한섬유소재는 방한기능성과 일정한 온도유지 성능이 있어야 하지만, 다른 한편으로는 과도한 발열로 인체에 해를 주는 것을 방지하기 위하여 주위환경으로 열을 잘 분산시켜야 한다. 아이스하키나 스키용의 스포츠웨어는 디자인, 성능이 모두 중요시되며, 특히 격렬하게 인체가 움직이는 것도 고려하여야 한다.

본 고에서는 추운 환경과 기후조건 등에 대하여 정의하고자 하며, 인체와 환경간의 열 교환(heat exchange)과 측정방법, 방한소재로서 필요한 단열(insulation) 성능평가, 섬유소재의 열적특성, 그리고 원사, 직물, 구조나 형태, 의복 디자인 등의 영향, 추위를 방지하기 위하여 섬유소재에 적용 가능한 물질 등을 고찰하고자 한다.

2. 추위 환경 (Cold environmental)

추위 환경은 보통 환경의 열손실(heat loss)보다

열손실이 훨씬 큰 경우로 정의된다. 열손실에 영향을 주는 기후요인은 대기온도, 복사열, 기류속도, 습도 등을 들 수 있다. 눈, 비 등의 요인은 섬유소재의 열전달 특성과의 상호작용에 의하여 기본적으로 열교환에 영향을 준다. 인체와 환경간의 열적 교환은 대류(convection), 복사(radiation), 전도(conduction), 증발, 호흡작용 등을 통하여 피부표면에서 일어난다.

공기는 따뜻한 표면과 접촉하면 기온이 상승하며 밀도가 낮아진다. 따뜻한 공기는 상승하게 되고 피부표면으로 chimney effect를 일으킨다(자연대류). 바람은 대류를 증가시키는 요인으로 작용한다. 식 (1) 이 대류 열교환에 적용된다.

$$C = hc \cdot (tsk - ta) \text{ ————— 식 (1)}$$

여기서, hc: 대류 열이동계수 (W/m²C), tsk: 평균 피부온도 (°C), ta: 기온 (°C)이다.

hc는 맨 피부에서는 바람의 영향을 가장 많이 받는다. 고요하고 온화한 기후조건에서 평균 hc는 3~4 W/m²C이다. 의류착용상태에서 열이동은 더 복잡해진다.

열은 고온부위에서 저온부위로 전자기파의 형태로 이동한다. 복사 열교환(R)은 식 (2)에 의하여 결정된다.

$$R = hr \cdot (tsk - \bar{t}_r) \text{ ————— 식 (2)}$$

여기서, hr : 복사 열이동계수 ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$), \bar{t} : 평균 복사열 ($^\circ\text{C}$)이다. hr 은 $4 W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ 의 값을 갖는 독립 상수이다. 의복차용은 복사열에 영향을 끼치게 된다.

접촉하고 있는 표면이 온도차이가 있다면 열은 전도하게 된다. 서있거나 움직이는 사람의 경우 인체피부중 발바닥 면만 다른 표면과 접촉하게 되므로 무시될 수 있다. 앉거나 기대고 있는 경우는 접촉면적이 커지며 복사 열교환값이 고려되어야 한다.

인체피부에서 증발하는 땀의 경우는 상당한 양의 열을 제거한다. 발한작용은 인체 내/외부에서 발생하는 열로부터 인체가 과열되는 것을 방지하는 중요한 작용을 하며, 증발 열교환 (E)는 식 (3)으로 정의된다.

$$E = h_e \cdot (psk - pa) = 16.6 \cdot hc \cdot (psk - pa) \quad \text{식 (3)}$$

여기서, h_e : 증발열 이동계수, psk : 피부에서의 수증기압 (kPa), pa : 대기 수증기압 (kPa). 식 (3)을 보면 대류와 증발간에는 상관관계 (lewis relation, $h_e = 16.6 \cdot hc$)가 있다. 추울 때는 피부와 외부환경간에 온도의 구배(gradient)가 커지며 대류와 복사에 의한 열적균형이 이루어진다. 신진대사나 물질대사에 의하여 극도로 높은 발열이 일어나면 추가적으로 발한작용이 일어난다. 효과적인 냉각을 위해서는 땀은 의복을 통하여, 그리고 대류작용에 의하여 피부와 접촉한 공기층을 통해서 수증기형태로 배출되어야 한다. 증발열 이동에 있어 소재의 영향은 다음 장에서 논하기로 한다.

추운 환경에서 숨을 쉬면 호흡기가 냉각되고 피부온도도 내려간다. 찬 공기는 점점 따뜻해지며 폐와 기도는 수증기로 포화된다. 폐와 차가운 외기간의 순환이 증가하면 기도는 더욱 차가워 진다. 그러나 다행히 신진대사에 의한 발열로 인하여 일정한 온도(체온)는 유지된다. 인체 발열에 대하여 호흡기를 통한 열손실은 약 15 ~ 20%정도이다. 호흡기를 통한 열손실은 생리학적으로 제어가 되지 않

지만, 입이나 코를 막거나 특수한 마스크를 이용하면 효율적이다. 기도가 냉각되는 것은 크로스컨트리 스키와 같은 동계 스포츠 종목에 있어 위험요소가 되므로 국제스키협회에서는 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 이하에서는 경기를 못하게 규정하고 있다. 다른 조건이 동일하다고 가정했을 때, 추위에 대한 스트레스는 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 와 비교하여 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 가 되면 2배 증가하고, $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 가 되면 3배 증가하고, $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 가 되면 4배 증가한다. $20\text{ }^\circ\text{C}$ 의 조건이 인체와 기온 사이에 열적 균형을 이루는데 적당하다. 더 저온에서는 인체는 열적 균형이 깨지며 세포조직은 열을 잃고 온도는 저하한다.

3. 신진대사, 열과 일

추위에 대한 보호기능의 성능평가는 각 개인의 에너지대사에 대한 정보를 필요로 한다. 대사속도 (metabolic rate)는 물리적인 일의 강도와 관련이 있으며, 산소소비량으로부터 쉽게 측정가능하다. 여러 가지 스포츠 또는 육체적인 활동을 하는 동안 대사속도를 Table 1에 나타내었다(ISO 8996, 2004). 몇 경우를 제외하고 대사속도는 신진대사 열발생의 수치로 나타낼 수도 있다. 동계스포츠는 신진대사에

Table 1. 스포츠 활동형태별 신진대사 평균속도(ISO 8996, 2004)

등급	평균 신진대사 속도 (W/m^2)	형태	
0 Resting	65	취침, 휴식	
1 Low	100	3.5 km/h 걷기, 사격, 썰빙, 낚시	
2 Moderate	165	하이킹, 3.5~5.5 km/h 걷기, 알파인 스키(일반인)	
3 High	230	하키, 아이스 하키, 5.5~7 km/h 속보, 하이킹 (숙련자)	
4	Very high	290	등산, 달리기, 7 km/h 이상의 속보, 알파인 스키(숙련자)
	Very, very high (2h)	400	크로스 컨트리 스키 (장거리 경기)
	Intensive work (15min)	475	크로스 컨트리 스키 (기록 경기)
	Exhaustive work (5 min)	600	스피드 스케이팅

· 인체피부면적: 1.8 m^2

의한 열발생이 극도로 높은 것부터 낮은 것까지를 포함한다. 예를 들면 몇분이내의 기록경기인 활강 스키같은 종목은 전체적인 열적 균형보다는 국부적인 체온저하를 방지하는 것이 더 중요하다.

4. 인체의 열적 균형에 관한 이론

추위에 대한 방어는 인체가 열적 균형에 있을 때 가능해진다. 이것은 열손실과 신진대사에 의한 열발생이 같음을 의미한다 (식 4).

$$S = M - C - R - E - RES \text{ ————— 식 (4)}$$

여기서, S: 인체 열량의 변화속도, M: 신진대사 열발생량, C: 대류 열교환량, R: 복사 열교환량, RES: 호흡기를 통한 열손실량이며 단위는 모두 W/m²이다. 이식에서 피복의 영향이 고려되어야 한다. 대류, 복사, 증발에 의한 열교환에 있어 피복의 영향에 대해 기본적인 두 가지 원칙으로 단열(thermal insulation), 증발에 대한 저항성능(evaporative resistance) 등을 들 수 있다.

단열 (I)는 피복층에 의하여 생긴 복사와 대류에 의한 열이동에 대한 저항으로 정의된다. 이것은 전체 인체피부와 모든 방향으로의 열교환에 대한 저항을 설명한다. 피복부위와 그렇지 않은 부위의 평균값이다. 이 독특한 정의는 열균형 방정식에서 피복의 영향을 고려하였다. 피복과 공기층의 단열은 총단열치(I_T)로 정의되고 식 (5)와 같다.

$$I_T = (tsk - ta) / (R + C) \text{ ————— 식 (5)}$$

여기서, I는 m²C/w 또는 clo 단위로 주어진다 (1 clo = 0.155 m²C/w). 이 정의와 clo 단위는 인체균형에 대한 이해를 위하여 만들어졌다.

증발에 대한 저항성능(Re)은 피복층에서의 증발과 증기에 의한 열이동에 대한 저항으로 정의된다. 단열에 있어서도 전체 신체피부로 적용되며, 실제

특성은 증기이동에 대한 저항이다. 열이동은 피부에서 땀이 나고 확산이나 대류에 의해 주변환경으로 증발될 때 발생한다. 피복층과 인접공기층의 증발에 대한 저항 (R_{eT})은 식 (6)으로 정의된다. 단위는 Pam²/w이다.

$$R_{eT} = (Psk - Pa) / E \text{ ————— 식 (6)}$$

수증기이동에 대한 피복의 저항을 나타내는 방법에는 수분투과도 지수(im)를 이용하는 것이 있다. 이 지수는 피복 시스템에 있어 증발과 건열에 대한 저항 사이의 관계에 대한 정보를 제공한다(식 7).

$$R_{eT} = I_T / im \cdot L = \frac{0.66}{im} \cdot \left(\frac{Ia}{fcl} \right) + Icl \text{ 식 (7)}$$

여기서, L은 Lewis number로서 16.7 °C/kPa 이다.

im의 값은 수분이 전혀 침투하지 못하는 경우는 0이며, 바람이 부는 환경에서 습윤상태의 표면은 1의 값을 갖는다. im의 값은 공기층 두께와 직물층의 수에 따라 감소한다. 따라서 층(layer)이 많은 방한복은 증발하는 열의 이동에 대하여 높은 저항을 갖는다.

인체의 열균형은 식 (8)과 같이 정의되며, 피복이 열교환에 끼치는 영향을 수치화하여 준다.

$$S = M - \frac{tsk-ta}{I_T} - \frac{Psk-Pa}{ReT} - RES \text{ 식 (8)}$$

열균형은 S값이 0(zero)이 되면 이루어진다. 식 (8)에서 여러 변수에 따라 S값은 0이 될 수도 있으나, 생리학적인 변수들 (M, tsk, Psk)이 적합한 값을 갖는 경우에만 성립한다. 활동성, 기후, 피복 등 여러 조건들이 고려되어야 한다.

5. 방한에 대한 필요조건

인체 열균형식에서 총단열치와 증발에 대한 저항

은 인체활동과 기후변수의 조합으로 계산되어 진다. 앞에서 설명했듯이 효과적인 방한은 피복단열을 최적화하는 것이며 증발열손실을 최소화하는 것이다. 피부에서의 수증기압(psk)은 대기 수증기압(pa)보다 약간 높게 되며, 증발열손실은 작아질 것이다. 따라서 t_a 는 피복단열에 의하여 초기에 정해진 값이 유지되어 진다. 기후와 인체활동간의 함수로 정의되는 피복단열에 대한 국제규격 (IREQ, required clothing insulation)은 ISO/DIS 11079로서 2004년에 제안되었다. 인체열균형은 정상적인 체온, 피부 표면 온도로부터 가정되며, 열손실은 초기에는 복사, 대류에 의하여 일어나며 반면에 발한은 최소이다. 단열의 충족조건을 결정하는 것은 피복이 마지막 단열층이 되는 경우이며, 공기층에 의한 단열은 따로 계산된다. 추운 환경에서 인체활동이 별로 없는 경우에 단열의 충족조건은 급격히 증가한다. 신진대사의 열발생이 낮은 경우도 열균형을 맞추기 위하여 높은 열저항성을 필요로 하게 된다. 반면에 인체활동이 증가하면 인체과열을 방지하기 위하여 주위환경으로 전달되는 열을 많이 발생하게 된다. 이것은 단열층을 감소시키는 최적방법이며, 피부온도저하나 추위를 느끼는 것을 방지하는 피복단열의 최소 수준이기는 하지만 인체활동이 격렬하여야 성립된다. 최소의 단열로서 열균형을 유지하고 인체과열을 방지하려면 발한이나 땀 증발 등에 의한 열손실을 보충하여야 한다.

바람은 따뜻한 표면으로부터 열손실을 촉진시킨다. 여러 스포츠에서 이동속도는 인체피부 주변에서 상대적으로 공기속도가 빨라지는 것을 야기한다. 따라서, 인체피부층은 냉각을 최소화하기 위하여 공기침투에 대한 저항성이 크다. 방한복 외피는 공기침투성이 낮은 물질로 구성되는 것이 바람직하다. 젖은 직물과 외피층은 단열효과를 감소시키고 열손실을 증가시키므로 외피류는 방수, 발수성이 우수하여야 한다.

6. 방한성능의 측정

6.1. 피복 단열

보통 섬유소재의 열적성질은 ISO 5085-1(1989), ISO 11092(1993)으로 측정된다. 피복을 통한 열이동(heat flow)은 3차원적이며, 직물과 공기층을 통하여 일어난다. 단열의 주요변수로는 층의 두께, 형태, 피복의 이음새, 디자인, 인체의 모양새 등이 있다. 열흐름에 대한 저항성은 인체피부의 전체면적에 대하여 측정되어야 하며, 이때 thermal manikin이 이용된다. 현재 100여 종류의 마네킨이 이용되며 ISO 9920(1993), ISO 15831(2003)에 이를 이용한 측정방법이 나와 있다. 원칙적으로 full scale의 인체모형은 전신으로 촘촘하게 덮여 있으며 해부학적으로 여러 부분으로 나뉘어져 있다. 각 부분의 온도측정이 가능하고 일정한 피부표면온도(보통 34 °C)가 유지되도록 프로그래밍 되어져 있다. 이 마네킨을 기후실(climatic chamber)내에 놓고 마네킨 표면 온도, 주위온도 등을 측정한다. 마네킨에 대한 피복 단열에 대하여 식 (9)가 사용된다.

- Total thermal insulation of clothing (I_T): 주위 공기층을 포함하는 body 주변의 모든 층의 단열
- Basic thermal insulation of clothing (I_{cl}): Body 표면에서 피복표면으로의 단열
- Air layer insulation (I_a): 피복을 입지 않은 상태의 body 표면상에서 공기층의 단열

위 3가지 값들의 관계는 식 (9)로 나타낸다.

$$I_T = I_{cl} + I_a/f_{cl} \quad \text{--- 식 (9)}$$

여기서, f_{cl} 는 clothing area factor이며, 방한복의 경우는 보통 1.0에서 1.5사이의 값을 나타낸다.

6.2. 증발 저항성

증발저항성은 ISO 5085-1(1989), ISO 11092(1993)을 이용하여 측정하며, 이 때 발한마네킨(sweating manikin)을 이용하지만, 실질적인 증발저

항성 측정이라기보다는 열교환시 발한의 상대적인 영향을 측정하기 위한 것이다.

- ENV 14058 (2002): 추위환경에 대한 방한복
- EN 511 (2004): 방한장갑

6.3. 비람에 대한 저항성

섬유소재의 공기투과성은 ISO-EN 9237로 측정한다.

6.4. 수분 저항성

직물의 수분저항성은 ISO 20811을 이용하여 측정하며, 2004년 ENV 14360으로 제정되었다.

- 약천후, 추위에 대한 방한복 성능평가 관련 규격
 - ENV 342 (2003): 방한복 내외피, 의류
 - ENV 343 (1998): 약천후에 대한 보호복

7. 방한을 위한 섬유소재 및 물질

7.1. 다층구조

방한은 인체피부를 둘러싸는 공기층의 수, 두께에 좌우되므로 방한복은 몇 개의 층으로 구성된다. 각 층들은 보온 및 단열에 기여하게 되며 특수한 목적으로 이용된다. 내부층은 피부표면위에서 직접적으로 접촉하게 되며, 피복과 인체피부사이의 온도, 습도를 조절하는 역할을 한다. 활동이 격렬하지 않

으면 공기의 유동이 적어야 하며, 격렬한 경우에는 피부로부터 피복층으로 열과 수분의 이동이 원활하여야 한다. 수분량은 흡착, 다음 층으로 이동, 배기 등에 의하여 조절된다. 수분흡착은 피부표면에 습기를 제거하므로 상대적으로 쾌적감을 준다. 그러나 전체 피복시스템에는 수분이 남게 되며 열균형 조절에는 불리하게 작용한다. 소수성섬유를 이용하면 피부근처의 습도가 빠르게 증가하며 수분은 더 외부층으로 이동하게 된다. 피부층이 증기층으로 덮이면 땀을 발생하게 되며 피복내 수증기는 외곽층으로 빠져나가지 못하게 된다. 단열에 있어 피복의 중간층의 역할이 크며, 몇 개의 두터운 소재로 구성된다. 최외곽 피복층은 열, 눈, 비, 마찰, 마모 등에 내구성이 있어야 한다.

Table 2. Thermal manikin을 이용하여 측정된 여러 형태의 피복조합에 따른 Basic insulation value (Icl) (ISO/DIS 11079, 2004)

피복조합	m ² C/W	clo
Briefs, short-sleeve shirt, fitted trousers, calf length socks, shoes	0.08	0.5
Underpants, shirt, fitted trousers, socks, shoes	0.10	0.6
Underpants, coverall, socks, shoes	0.11	0.7
Underpants, shirt, coverall, socks, shoes	0.13	0.8
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0.14	0.9
Briefs, undershirt, underpants, shirt, overalls, calf length socks, shoes	0.16	1.0
Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, vest, socks, shoes	0.17	1.1
Underpants, shirt, trousers, jacket, coverall, socks, shoes	0.19	1.3
Undershirt, underpants, insulated trousers, insulated jacket, socks, shoes	0.22	1.4
Briefs, T-shirts, shirt, fitted trousers, insulated coverall, calf length socks, shoes	0.23	1.5
Undershirt, underpants, shirt, trousers, jacket, overjacket, hat, gloves, socks, shoes	0.25	1.6
Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, verjacket, overtrouser, socks, shoes	0.29	1.9
Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, overjacket, socks, shoes, hat, gloves	0.31	2.0
Underpants, undershirt, insulated trousers, insulated jacket, overtrouser, overjacket, socks, shoes	0.34	2.2
Underpants, undershirt, insulated trousers, insulated jacket, overtrouser, socks, shoes	0.40	2.6
극지방용 피복의류	0.46-0.70	3-4.5
침낭	0.46-1.4	3-9

7.2. 섬유소재의 사용 및 인체의 영향

양모나 양모혼방소재 등은 흡수성 능이 우수하며 열적 특성을 잃지 않으면서 적은 양의 수분을 조절할 수

있다. 양모는 인체피부와 직접 접촉하여 이용가능하며 피부를 상대적으로 건조하게 유지시킨다. 다만 직물이 포화되면 수분조절은 용이하지 않게 된다. 면직물 역시 흡수성은 우수하지만 젖으면 피부에 달라붙게 되는 단점이 있다. 대부분의 합섬은 소수성이고, 피부로부터 발생하는 습기는 피부인접 직물층을 투과하여 다음 층으로 이동하게 된다. 일단 땀이 나게 되면 인체와 피부사이의 공간은 상당히 습하게 되며 습기는 불쾌감을 주게 된다. 의류자체에 흡수된 수분은 무게를 증가시키고, 착용 시 불쾌감을 더하게 되며 단열효과를 저하시키는 원인이 된다. 활동을 멈추어 발한이 중지되면 젖은 직물의 건조가 시작되는데 인체로부터 신진대사에 의한 것보다 더 많은 열량을 빼앗아 간다. 이 경우 인체는 심한 추위를 느끼게 되며 저체온증이 발생하여 생명이 위태롭게 될 수도 있다. 보온성이 우수한 양모나 동물성 섬유, 폴리에스터 중공사 솜이나 폴리올레핀 극세사 등도 충전재로 자주 사용되며 알루미늄 코팅된 직물이나 원사로 만든 제품도 사용된다. 강하고 가볍고 보온성/발수성이 우수한 섬유소재로 새로운 방한복을 설계하고자 하는 시도가 계속되고 있다.

7.3. 적용되는 물질의 예

악천후에서 비나 눈으로부터 보호는 필수적이지만 방수직물은 열이나 수분의 이동이 어렵기 때문

에 그런 소재를 착용하게 되면 착용자의 인체는 땀으로 젖게 된다. 이런 단점을 개선하기 위하여 미세다공구조의 물질을 비교적 오래 전부터 방한복에 적용하여 왔으며 최근 PCM(phase change materials) 적용에 관한 연구가 활발한 편이다. PCM 함유직물은 섬유내 부착된 왁스물질(고상에서 액상으로 변함)의 작용에 의하여 온도에 반응하여 피복온도를 조절한다. 현재 PCM은 시장전망이 매우 좋은 편이다. 두께를 조절하는 것이 가능한 팽창가능한 섬유 소재를 사용하는 것도 연구되고 있으며, 전지를 부착한 의류를 사용하는 경우도 최근에 상용화된 예가 있다.

8. 결론

위에서 방한에 관련된 이론을 살펴본 바와 같이 섬유소재별로 열, 수분 등의 이동에 관한 측정 등이 중요하며, 이론적인 모델링을 제품설계에 반영할 수 있도록 하는 연구의 필요성도 새로이 인식해야 한다. 극한환경에서 특히 추위에서 인체를 보호하여 주는 방한소재는 스포츠, 레저 활동 이외에도 군사적인 목적으로도 중요하며, 우리나라의 경우는 체감온도가 최저 -42°C (-25°C 에 풍속 6 m/s)를 기록할 정도로 추우므로 방한소재에 대한 수요도 있으며 연구개발의 필요성이 있을 것으로 생각된다.

저자 프로필



박 윤 철

1989. 한양대학교 섬유공학과 졸업
 1997. 한양대학교 섬유공학과(박사)
 2001-2003. NCSU 섬유대학 방문연구
 2003-현재. 한국생산기술연구원 섬유소재
 본부 선임연구원
 (425-836)경기 안산시 단원구 성곡동
 시화공단 4마 203호
 전화: 031-496-6726, Fax: 031-496-6710
 e-mail: ycpark@kitech.re.kr



박 영 환

1981. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1983. 서울대학교 섬유공학과(석사)
 1991. 서울대학교 섬유공학과(박사)
 1984-1988, 1991-1994 (주)효성 중앙연구소
 1994-현재. 한국생산기술연구원 섬유
 청정센터 수석연구원



남 창 우

1987. 서울대학교 섬유공학과(학사)
 1989. 서울대학교 섬유공학과(석사)
 2000. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 1989-1994. (주)효성 중앙연구소 근무
 2000-현재. 한국생산기술연구원 섬유화
 학소재본부 예코섬유팀 선임연구원