

온열적 쾌적과 의복의 보온력

Thermal comfort and the insulation of clothing

최 혜 선*
Hei - Sun Choi

온열적 쾌적이라 함은 “온열환경에 대하여 만족을 표현하는 심적 상태”¹⁾로서 인체와 환경과의 사이에 열평형이 성립되어 “춥다” 라든지 “덥다”라는 느낌을 갖지 않는 편안한 상태를 말한다. 성, 연령, 피하지방 두께, 인종, 기후순응력, 식생활에 따라 쾌적한 온열조건에는 차이가 있을 것으로 예상되나 학자에 따라 의견 차이가 있어 이론으로 정립된 상태는 아니다.”

온열환경에 대한 인간의 반응은 기온, 기습, 기류속도, 복사열의 4개 환경변인과 개개인의 착용하고 있는 의복 및 운동량의 상호작용에 따라 좌우된다. 그중 기온은 한서감을 나타내는 가장 간편하고도 실제적인 지수로서 보통의 기습(40~60% rh)이나 저온환경에서의 쾌적감은 건구온도에 의해 크게 좌우된다. 그러나 고온 환경에서 인체는 체온을 조절하기 위해 발汗을 하게 되고 이때 분비된 땀이 증발하는 과정에서 체열이 빼앗긴다. 공기중의 습도가 높을 때 저온에서는 더 춥게, 고온에서는 더 덥게 느끼지만 온열적 쾌적함에 미치는 습도의 영향은 저온환경에 비하여 고온환경에서 훨씬 커지게 된다. 두 곳의 기압차에 의해 발생하는 기류는 신체를 둘러싸고 있는 한계층 공기(boundary air layer)를 훌뜨리고 발汗된 상태에서는 땀의 증발을 촉진시킴으로 쾌

적감에 영향을 미친다. 주변의 기온과 현저한 차이가 있는 물체 가까이 있는 경우, 즉 추운 거울질 창문 옆에 앉아 있다든지 난로 곁에 있다든지 할 때에는 쾌적감에 미치는 복사온의 영향은 클 것이나 넓은 실내 한 가운데 있는 경우에는 평균 복사온이 큰 문제가 되지 않는 다.

이와 같은 4개의 환경변인 외에도 운동량을 증가시키므로 신체로 하여금 많은 열량을 생산하도록 하여 한냉환경에서 환경과 인체사이의 열평형을 이루어 체온을 조절할 수 있다. 그러나 이는 단시간에는 가능하나 육체의 심한 피로를 수반하기 때문에 장시간 지속하는 것은 불가능하다.

일상 우리가 착용하는 의복은 인간의 피부 표면과 외부환경 사이에 위치하고 있으면서 외부환경의 온열조건과는 또 다른 기후를 의복 내에 조성하여 준다. 즉 의복은 직물의 구조 내 섬유와 섬유 사이와 실과 실 사이에, 직물과 직물 사이(칼라, 주머니 등)에, 그리고 의복과 의복 사이(내의와 셔츠, 자켓 등)에 정지공기(still air)를 함유하고 있음으로 전도에 의한 체열손실을 억제하고, 체표면에 직접적인 공기의 순환을 억제 혹은 차단시킴으로 대류에 의한 열교환을 변경시킨다. 또한 복사열을 반사, 흡수 혹은 통과시키는 정도는 소재의 특

* 정회원, 이화여자대학교 의류직물학과

성에 따라 좌우되며 증발에 의한 열손실도 의복에 의하여 억제된다. 따라서 의복의 보온적 특성을 이해하고 잘 활용한다면 겨울철의 난방온도를 다소 낮추거나 여름철의 냉방온도를 다소 높이고서도 쾌적감을 유지하는 것이 가능하다.

그러나 개개인이 착용하는 의복은 그 개인이 속한 사회의 물리적, 사회적 환경에 따라, 또 그 개인의 성별, 연령, 직업, 가치관, 경제수준에 따라 그 소재나 형태, 착용방식, 착량 등이 큰 차이가 있고 매우 다양하다.

이와 같이 다양하게 착용되는 의복의 보온력을 정량화하고자 하는 연구가 1941년 Gagge³⁾ 등에 의해 시도된 이래 주어진 온열환경 조건에서 개인이 착용하여야 하는 의복의 종류를 규정하거나, 반대로 특정환경에서 개인이 착용하고 있는 의복으로부터 단열력을 추정하고 이를 환경조건에 적용시키고자 하는 의도에서 의복의 열차단 성능에 대한 연구가 현재 활발히 이루어지고 있다.

의복 보온력에 영향을 미치는 요인

단일 품목으로서의 의복(garment: 스커트나 바지 등)에 의해 제공되는 보온력은 의복소재의 물리적 특성과 의복의 구성적 디자인 특성에 의해 좌우된다.

보온적 측면에서 의복의 가장 중요한 특성은 움직이지 않는 정지공기를 피부외층에 유지시키는 일이다. 의복 소재로 사용되는 대부분의 직물 혹은 편물들은 60~90%의 공기⁴⁾를 함유하고 있기 때문에 섬유 자체의 열전도성도 보온성에 다소 영향을 미치는 것은 하겠으나 섬유에 비해 열전도성이 훨씬 낮은 공기를 얼마나 많이 효과적으로 함유하는가 하는 것이 중요시된다. 따라서 두께를 증가시킨다든가 충진밀도를 어느 수준까지 감소시킴으로써 부동의 공기층을 보다 많이 확보하는 것이 소재의 보온성을 높여줄 수 있는 방법이 된다.

또한 의복의 구성적 측면에서는 의복의 피복면적(amount of body surface area covered by the garment), 신체적합도(looseness or tightness of fit), 의복의 유효방열 면적

(clothing area factor, f_{cl}) 및 직물의 중첩(fabric overlap) 등에 의해 garment의 보온성은 영향을 받는다.^{5~7)}

한 벌의 의복(ensemble: 내의, 팬티, 셔츠, 자켓, 바지, 양말등 일습)에 의해 제공되는 보온성은 garment의 보온력과 관련되며 그외에도 ensemble의 피복면적, 인체 각 부위에 중첩되는 의복수, 의복의 신체 적합도, 의복의 유효 방열면적, 의복의 중량 등에 의해 영향을 받으며 이는 의복의 착용순서라든지 착용 방식에 의하여도 좌우된다.^{5~7)}

이상에서 서술한 바와 같이 의복의 보온성에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하며 이 복잡한 모든 인자가 총합해서 이루어진 의복의 보온성을 측정하는 것도 여러가지 어려움이 따른다.

의복의 보온력 측정

의복의 보온력은 clo치로 나타낸다. 1 clo란 기온 21°C, 기습 50% rh 이하, 기류속도 0.1 m/sec이하의 실내에서 성인 남자가 착석한 상태에서 안정을 취할 때(50 kcal/m² hr) 쾌적하게 느끼며 평균 피부온을 33°C 유지시킬 수 있는 의복의 보온력으로 0.18°C m² hr/kcal의 열저항에 해당된다.

의복의 보온성 측정방법은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 그 하나는 인체착용 실험이고 다른 하나는 동체 인체모형(copper manikin)을 이용하는 방법이다.

1. 인체 착용 실험^{3,8~10)}

인체를 피험체로 하여 측정하고자 하는 의복을 착용시키고 필요에 따라 일정한 온·습도를 유지할 수 있는 항온항습실에서 안정시킨 후 피부온, 의복표면온도, 의복내 온습도, 직장온, 발한량, 증설량 등을 측정하여 산출해낸다. 다음 식은 그 중 Gagge 등에 의하여 제안된 공식이다.¹¹⁾

$$I_{cle} = \frac{5.55(\bar{T}_s - T_A)A}{M - 0.58E + 0.83W \frac{(2A_{Tr} + A_{Ts})}{3}} - I_a$$

- I_{de} : 의복의 유효보온력(clo)
- I_a : 공기의 보온력(clo)
- \bar{T}_s : 평균 피부온(°C)
- T_A : 신체 주위의 기온(°C)
- A : 체표면적(m^2)
- M : 신진대사량(kcal/hr)
- 0.58E : 증발에 의한 열 방산(kcal/hr)
- W : 체중(kg)
- ΔT_r : 직장은 하강도(°C/hr)
- $\Delta \bar{T}_s$: 평균 피부온 하강도(°C/hr)

이 방법은 의복 착용의 실제에 맞추어 종합적으로 실험할 수 있다는 장점이 있으나 대상이 인체인 점에서 개인차가 크고, 동일인이라도 생리적 조건에 따라 여러 측정 변인이 변화할 수 있기 때문에 결정적인 결론을 얻기 어렵다는 단점도 있다.

2. 인체 모형 (manikin) 실험^{5,7,10,12,13)}

근래에는 구미에서 의복에 의해 제공되는 보온성을 측정하는데 실제 표준 인체치수로 만들어진 마네킨을 사용하고 있다. 마네킨의 표면은 열 전도력이 높은 검은 칠된 구리로 입혀졌고 인체의 피부온 분포와 동일하게 유지하도록 전기로 가열된다. 평균 피부온이 적합한 수준(33°C)을 유지하는데 소모되는 전력량이 기록되며 소모되는 전력수준은 마네킨이 착용하고 있는 의복의 보온성에 따라 달라지게 된다.

마네킨 기술은 새로운 것이 아니며 Goldman (1983)¹⁴⁾에 의하면 1940년대에 이미 동체 마네킨이 사용되기 시작하여 이후 15년간 군복에 관한 보온성 측정이 군 연구기관에서 행하여졌다고 한다. 그후 세계 여러 곳에서 여러 종류의 마네킨이 제작되어 실험되었으며 그중에는 폴리에스터 강화 유리섬유로 제작된 진열용 마네킨을 개조하거나 플라스틱으로 제작된 것도 있으며 그 대부분은 열전도력이 우수한 구리로 도포되었다. 실제적이고 타당한 결과를 얻기 위해서는 인체의 형상, 모습 및 크기를 그대로 모사하는 것이 중요하다. 어떤 마

네킨은 부동 직립형이지만 어떤 것은 다양한 자세^{10,12)}를 취하거나 동작이 가능한 것도 있어서 동작에 따른 환경과의 열교환의 변화를 연구할 수 있다. 평균 피부온을 산출하기 위하여 마네킨의 여러 부위에는 그 부위의 표면에 비례하여 센서가 부착되어 있다.

오늘날 사용하는 마네킨은 주로 피부표면이 건조상태에서의 열전달에 대한 저항을 측정하기 위하여 설계되었다. 따라서 발한시의 열전달을 현재까지는 땀에 의해 포화된 피부를 모방하기 위하여 얇은 면 니트로 된 밀착의를 마네킨 표면에 씌우고 증발에 의한 저항을 알아내고 있다.^{15,16)} 현재 발한이 가능한 마네킨 (sweating manikin)과, 컴퓨터 제어 마네킨의 개발이 Nordforsk project에 참가한 학자들에 의해 연구되고 있다. 현재 세계적으로 마네킨의 수가 증가하고 있긴 하지만 아직은 마네킨의 사용이 극히 제한된 실정이다.

의복의 보온력 추정

인체 모형이나 실제 인체 착용실험을 통하여 의복의 보온성을 측정하는 것은 이와 같이 복잡하고도 고가의 설비가 필요하고 또 많은 시간이 소요되는 작업이다. 따라서 보다 측정하기 쉬운 변인들을 사용하여 의복의 보온력을 추정하는 방법들이 학자들에 의하여 연구되어 왔다. 예를 들어 의복을 착용함에 따른 신체 각 부위의 둘레의 증가량으로부터 의복의 보온성을 추정하거나 착용하는 의복의 중첩수나 피복면적, 의복의 증량^{1,6)}, 체표면적⁷⁾, 의복 (garment)의 보온력의 합¹⁷⁾¹²⁾으로부터, 혹은 의복의 소재 직물의 물리적 특성¹⁸⁾으로부터 보온성을 측정하는 방법들이 제시되었다. 그 중 McCullough⁷⁾ 등이 제안한 공식은 다음과 같다.

$$I_{cl}(\text{garment}) = (0.00790 \times \text{BSAC}) + (0.00131 \times \text{Fab thick} \times \text{BSAC}) - 0.0745$$

BSAC : 피복면적 (%)

Fab thick : 직물의 두께 (mm)

$$I_{c1}(\text{ensemble}) = (0.255 \times \text{AWT}) + (-0.00874 \times \text{BSAC O}) + (-0.00510 \times \text{BSAC I}) + 0.919$$

AWT : 의복 중량 (kg)

BSAC O : 의복에 의해 피복되지 않는 체표 면적 (%)

BSAC I : 1 겹의 의복에 의해 피복된 체표 면적 (%)

Garment의 보온력 추정에는 피복면적과 소재의 두께 등 2개의 변인을 사용하였고 ensemble의 경우는 총중량과 의복에 의해 피복되지 않는 체표면적과 1겹의 의복에 의해 피복된 체표면적이 사용되었다.

또한 ASHRAE Standard 55-1981¹⁾와 ASHRAE Handbook-1981 Fundamentals¹⁹⁾에는 다양한 의복(garment)의 보온력과 다양한 활동을 하는 대다수의 사람들이 온열적으로 쾌적감을 느낄 수 있는 환경조건을 규정해 놓고 있다. 즉 주어진 환경에서 쾌적감을 얻기 위해 착용해야 할 의복의 보온성을 이와 같은 공식을 이용하여 추정하므로 의복의 종류를 규정할 수 있고, 반대로 착용하고 있는 의복의 종류와 활동량으로부터 온열적 쾌감을 얻기 위해 필요한 특정 환경조건을 결정할 수도 있다.

따라서 의복의 보온력에 관한 연구는 보다 많은 사람들에게 쾌적한 온열조건을 제공하고 자 하는 온열적 쾌적성 측면에서도 중요하며, 또한 적절한 의복의 착용으로 막대한 에너지의 절약이 가능하므로 온열 환경조건과 착용량과의 관계는 앞으로도 많이 연구되어야 할 과제이다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE, 1981, *ANSI/ASHRAE Standard 55-1981*, "Thermal environmental conditions for human occupancy," Atlanta
2. Okukubo, A., "Relationship between ambient temperature and the amount of clothes to be cut on," *Journal of the Japan research association for textile end-uses*, Vol. 22, 1981, pp. 13-19.
3. Gagge, A.P.; Burton, A.C.; and Bazett, H.D., 1941, "A practical system of units for the description of heat exchange of man with his environment," *Science*, Vol. 94, pp. 428-430.
4. Fourt, L. and Hollies, N.R.S., 1970, *Clothing - Comfort and function*, Marcel Dekker, Inc.
5. McCullough, E.A.; Jones, B.W.; and Zbikowski, P.J. 1983. "The effect of garment design on the thermal insulation of clothing," *ASHRAE Transactions*, Vol. 89, Part 2, pp. 327-352.
6. McCullough, E.A.; and Rohles, F.H. 1983. "Quantifying the thermal protection characteristics of outdoor clothing systems," *Human Factors*, Vol. 25, pp. 191-198.
7. McCullough, E.A.; Jones, B.W. and Huck, J. 1985 "A comprehensive data base for estimating clothing insulation," *ASHRAE Transactions*, Vol. 91, Part 2, pp. 29-47.
8. Nishi, Y.; Gonzalez, R.R.; and Gagge, A.P. 1975. "Direct measurement of clothing heat exchange with the thermal environment," *ASHRAE Transactions*, Vol. 81, Part 2, pp. 183-199.
9. Nishi, Y.; Gonzalez, R.R.; Nevins, R.G.; and Gagge, A.P. 1976. "Field measurement of clothing thermal insulation," *ASHRAE Transactions*, Vol. 82, Part 2, pp. 248-259.
10. Olesen, B.W. and Nielsen, R. 1983. *Thermal insulation of clothing measured on a movable thermal manikin and on human subjects*, Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.
11. Winslow, C.E.A. and Herrington, L.P. 1949. *Temperature and Human Life*,

Princeton University Press.

12. Olesen, B.W.; Slinska, E.; Madsen, T.L.; and Fanger, P.O. 1982, "Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing, measurements by a movable thermal manikin," *ASHRAE Transactions*, Vol. 88, Part 2, pp. 791-805.
13. H.S. Choi, McCullough, E.A. and Rohles, F.H., 1985, "A cross-cultural study of clothing and thermal comfort," *ASHRAE Transactions*, Vol. 91, Part 1, pp. 469-477.
14. Goldman, R.F., 1983, "Historical review of development in evaluating protective clothing with respect to physiological tolerance," *Proceedings of the International Conference on Medical and Biophysical Aspects of Protective clothing*, Lyon, France.
15. McCullough, E.A., Arpin, E.J., Jones, B., Konz S.A. and Rohles, F.H. 1982, "Heat transfer characteristics of clothing worn in hot industrial environments," *ASHRAE Transactions*, Vol. 88, Part 1, pp. 1077-1094.
16. McCullough, E.A., Rohles, F.H., and Konz, S.A. 1983, "Measuring the thermal insulation and permeability of protective clothing using a copper manikin," *Proceedings 1983: Int. Conf. on Protective Clothing Systems*, Stockholm, Sweden.
17. Sprague, C.H., and Munson, D.M. 1974. "A composite ensemble method for estimating thermal insulating values of clothing," *ASHRAE Transactions*, Vol. 80, Part 1, pp. 120-129.
18. Azer, N.J. 1976, "The prediction of thermal insulation values of garments from the physical data of their fabrics," *ASHRAE Transactions*, Vol. 82, Part 1, pp. 87-106.
19. ASHRAE, 1981, *ASHRAE handbook-1981 fundamentals*, Chapter 8, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.