

복사열에 노출된 작업복의 열적특성에 관한 실험적 연구

방창훈[†] · 이진호^{*} · 예용택^{**}

경북전문대학 소방안전관리과 · *육군3사관학교 기계공학과 · **경일대학교 기계공학부
(2002. 6. 20. 접수 / 2002. 9. 3. 채택)

An Experimental Study on the Thermal Characteristics of the Working Uniform Exposed to the Radiation Heat

Chang-Hoon Bang[†] · Jin-Ho Lee^{*} · Yong-Taeg Yea^{**}

Department of Fire Protection Engineering, Gyungbuk College

^{*}Department of Mechanical Engineering, Korea Third Military Academy

^{**}Department of Mechanical Engineering, Gyungil University

(Received June 20, 2002 / Accepted September 3, 2002)

Abstract : The purpose of this study was to present the thermal characteristics of the working uniform exposed to the radiation heat. The effect of exposure time and exposure distance on the changes and the relationship between physical properties were investigated experimentally. Regardless of the kind of working uniform, the surface temperature of the working uniform with exposed time sharply increases as exposed distance is more close and the reaching time of steady state is shorter. The surface temperature of working uniform exponentially decreases as exposed distance become more distant. For the safety of the working man, it is necessary that he work far away at a fixed standard distance from the radiant heat source.

Key Words : working uniform, radiant heat

1. 서 론

작업자들이 작업시 착용하는 작업복은 기본적으로 안전성, 작업성, 기능성, 경제성 등을 구비하여야 한다. 또한 다양한 작업환경에서 노출된 작업복은 외부 영향으로부터 작업자의 신체를 보호하여야 한다. 특히 작업과정 중 고온의 제품을 생산하거나 취급하는 경우에는 고열이 작업자에게 방사되어 열중증(熱中症) 등의 직업병 또는 화상 발생가능성이 매우 높다. 우리나라의 경우 대부분 고온의 작업환경에서도 작업자는 일반 작업복으로 작업을 수행하며 이로 인하여 다수의 재해가 발생하고 있는 실정이다.

일반적으로 고열에 노출된 작업복은 형태변화가 일어나며 물리적 특성이 변화하여 작은 압력에 의해서도 강건성을 잃게 되어 더 이상 보호복의 기능

을 발휘하지 못 할 수도 있다¹⁾. 따라서 작업자의 안전을 확보하기 위하여 작업복의 열적특성에 관한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다.

Parker²⁾는 다양한 재질에 대하여 산소소모량을 이용하여 열발생량을 계산하는 여러가지 식을 제시하였다. Stroup 등³⁾은 실제 화재 실험에서 열발생량이 Parker가 제시한 식과 실측치의 차가 20% 이내에 있음을 보고하였다. Stroup 등⁴⁾은 신사복의 화재실험을 수행하여 최대 열발생량이 약 1MW~2MW임을 보고하였다. Lawson⁵⁾은 소방관들이 화재 진압시 발생하는 열적특성 및 열, 화염, 습기 등에 의하여 화상을 입는 과정을 분석하였다. 연구결과 방화복과 훈련방법의 개선점을 제시하였다. Mell 등⁶⁾은 소방관의 방화복에 대한 열전달 현상을 수치적 연구와 실험적 연구를 통해 방화복의 열적특성을 분석하였다. Yoo 등⁷⁾은 노출시간과 열강도에 따른 복사열 노출후의 소방보호복의 물리적 특성과 마모강도, 인장강도, 연신도를 실험적으로 조사하였다. 그 결과

[†]To whom correspondence should be addressed.
bch@mail.kbc.ac.kr

소방복의 보호성능의 종합적인 평가를 위해서는 방열성 수치뿐만 아니라 열에 노출 후 제거능성 유지 측면까지 고려해야 함을 밝혔다.

위와 같이 지금까지 연구들은 대부분 화염에 노출된 방화복에 대한 열적인 특성과 직물의 물리적인 특성변화를 조사하였다. 반면 일반 작업자들이 착용하는 작업복이 고열에 노출되는 경우 작업복의 열적특성에 관한 연구는 미흡하였다.

열에 노출되는 작업복의 변화들에 크게 영향을 미치는 요인은 열적 환경조건과 노출되는 직물의 특성이다. 열적인 환경조건으로는 열전달 방식, 노출시간, 열강도를 들 수 있다. 직물이 열에 노출되었거나 화재 현장에서와 같이 화염에 노출되었을 때에는 대류열전달에 의하여 인화 또는 착화되는 경우가 많았다. 그러나 실제 작업현장에서 작업자들에게 전달되는 열은 복사열전달이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 특히 복사열에 노출된 작업복의 노출표면온도와 후면온도와 상관계 그리고 열원에서의 노출거리 변화에 따른 작업복의 열적인 특성변화에 대한 실험적 연구는 그동안 거의 없었다.

따라서 본 연구에서는 복사열에 노출된 작업복의 열적특성을 규명하여 작업자의 안전을 예측할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험장치

Fig. 1은 복사열에 노출된 작업복의 열적특성을 측정하기 위해 제작한 실험장치의 개략도이다. 실험

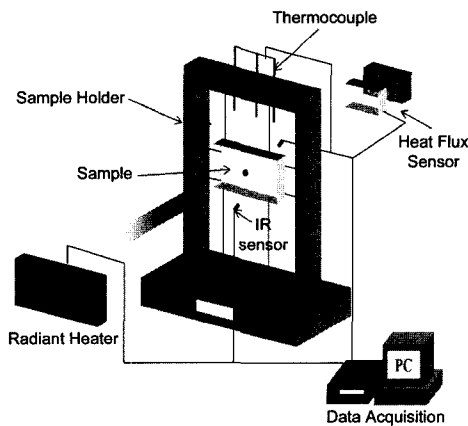


Fig. 1. Experimental setup

장치는 복사히터, 시료를 고정할 수 있는 시료고정대, 온도측정장치, 열유속 측정장치, 데이터처리장치(2640A, Fluke)로 구분할 수 있다. 실험에 사용한 복사히터는 석영관 히터를 사용하였다.

그리고 시료의 앞면과 뒷면의 표면온도를 측정할 수 있는 적외선 온도센서(K-type, IRc, OMEGA)를 시료(290mm by 120mm) 중앙의 표면으로부터 3cm 떨어진 곳에 설치하였다. 이때 시료의 방사율을 일정하게 하기 위하여 측정부위를 검은색으로 하였다. 또한 시료 주위의 온도를 측정하기 위하여 시료 상부에 열전대 3개를 설치하였다. 열유속을 측정할 수 있는 열유속센서(heat flux sensor)는 동판과 테프론판을 사용하여 제작하였다. 복사열에 노출된 동판면은 검게 도포하여 흑체(black body)와 거의 비슷하게 만들었으며 동판표면에서의 온도차를 고려하여 9개의 열전대를 설치하였다. 또한 동판측면으로의 열전도를 차단하기 위하여 두께 20mm의 테프론판으로 단열시킨 후 그 위에 두께 10mm의 스티로폼으로 다시 한번 단열시켰다. 그리고 최종적으로 알루미늄 호일로 복사에 의한 열전달을 차단시켜 동판에 수직인 방향으로만 열전달이 발생하도록 하였다.

한편 복사열전달이 되지 않는 열유속센서(heat flux sensor)의 후면에는 공기의 온도로 일정하게 유지하기 위해서 방열핀(cooling fin)과 냉각팬(cooling fan)을 설치하여 실내온도로 일치시켰다. 이렇게 제작된 열유속센서의 측정오차를 검증하기 위하여 식(1)과 같이 Fourier 열전도방정식을 적용하였다.

$$q'' = k \frac{\Delta T}{\Delta L} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

여기서 q'' 는 단위면적당 복사열량, k 는 전도체의 열전도율 [$W/m \cdot ^\circ C$], ΔL 은 온도측정점간 간격 [m]이다. 이때 열유속의 측정오차를 줄이기 위해 그립과 같이 9개 지점의 온도를 측정하여 식(1)을 적용한 값에 평균값으로 계산하였다.

히터의 온도와 주위온도 그리고 시료 상부의 온도를 측정하기 위하여 각각 K-type 열전대를 설치하였다.

2.2. 실험방법

시료는 하(夏)작업복 상·하의, 동(冬)작업복을 사용하였다. 모든 시료는 AATCC Test Method 135 procedure B에 준하여 세탁한 후, 온도가 $21 \pm 1^\circ C$ 에

서 상대습도 $65 \pm 5\%$ 조건에서 24시간 이상 방치한 후 사용하였다.

준비된 시료는 시료 고정대에 고정시킨 후 버어 니어캘리퍼스를 사용하여 히터에서 시료까지의 거리를 각각 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm 로 변화 시키면서 측정하였다. 이때 시료와 히터의 방열면 그리고 열유속센서의 면은 평행하게 하였다. 또한 히터와 시료의 대류에 의한 측정오차를 최소화하기 위하여 수평케이지를 사용하여 수평을 맞추었다.

다음으로 시료의 표면에서 적외선 온도센서가 수직한지를 확인한 후 히터에 전원을 공급하였다. 히터에서 나오는 복사 열전달량을 확인하기 위하여 열유속센서로 시료가 설치되기 전에 측정한 결과와 전력계로 측정한 전원공급량과 5% 이내로 일치함을 확인하였다.

2.3. 실험범위 및 측정오차

Table 1은 실험에 사용한 작업복의 물리적인 특성을 나타낸 표이다. 실험에 사용한 작업복은 각각 Uniform A[하(夏)작업복 상의], B[하(夏)작업복 하의], C[동(冬)작업복] 3종류이다. 제시된 물성치는 한국피복협동조합에서 제공한 자료이다.

본 실험의 실험조건은 Table 2와 같다. 이때 복사 히터에서 방사되는 열유속량은 일반적으로 사무실에서 사용하는 복사히터의 열유속을 고려해서 선정하였다.

한편 열유속의 측정오차는 총열유속의 10%이내이며, 적외선 온도계는 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 그리고 열전대의 온도계는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이다.

Table 1. Physical characteristics of experimental sample

Sample	Natural Disposition	Weight [g/m ²]	Thickness of thread [N/T _h]	Usage / Color
Uniform A	wool 50%, polyester 50%	160	2/48	Summer working uniform shirt/ Light green
Uniform B	wool 50%, polyester 50%	155	2/60	Summer working uniform trousers/ Light blue
Uniform C	wool 50%, polyester 50%	230	2/52	Winter working uniform / Light blue

Table 2. Experimental condition

Sample	Uniform A, B, C
Heat flux of Radiation Heater [W/cm ²]	3.5
Exposed Distance [cm]	10, 20, 30, 40, 50
Relative Temperature / Humidity	$21 \pm 1^\circ\text{C}$ / $65 \pm 5\%$ RH

3. 결과 및 고찰

3.1. 노출시간에 따른 작업복의 열적 특성

Fig. 2는 복사히터 표면의 열유속이 3.5 W/cm^2 일 때, 작업복의 종류에 따른 작업복 노출전면에서의 온도변화(T_f)를 노출시간(t)에 따라 나타낸 그림이다. 이때 복사히터의 방열면에서 작업복까지의 거리, 즉 노출거리 X는 각각 10cm와 30cm인 경우이다.

복사열에 노출된 작업복의 표면온도는 시간에 따라서 초기에는 급격히 상승하다가 일정시간이 경과한 후에는 거의 변화가 없이 최고온도를 유지하는 정상상태(steady state)에 도달한다. 정상상태 도달

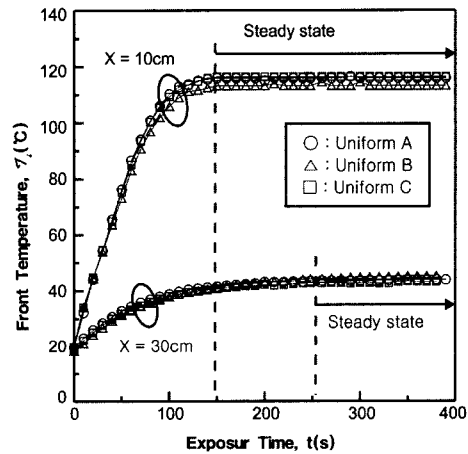


Fig. 2. Front temperature T_f variation with time for various texture, $q=3.5 \text{ W/cm}^2$, $X=10, 30 \text{ cm}$

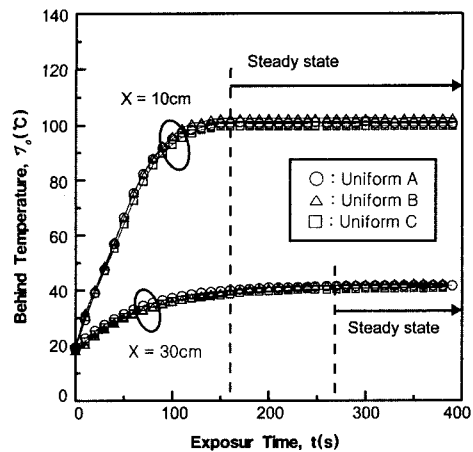


Fig. 3. Behind temperature T_b variation with time for various texture, $q=3.5 \text{ W/cm}^2$, $X=10, 30 \text{ cm}$

시간은 노출거리가 10cm인 경우에는 약 2분 30초 그리고 30cm인 경우에는 3분 20초가 소요되었다. 노출거리가 10cm인 경우가 30cm일 때 보다 작업복 표면에서의 온도상승이 크게 나타나며, 이는 복사히터의 표면에서 방사되는 복사열이 작업복의 표면까지 도달하는 복사열이 노출거리가 가까울수록 크기 때문이다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건하에서 작업복의 노출후면에서의 표면온도(T_b)의 변화를 나타낸 그림이다. 전반적인 경향은 Fig. 2와 유사하며, 후면에서의 온도는 전면에서보다 낮게 나타났다. 또한 정상상태까지의 도달시간은 전면에서보다 조금 더 걸린다. 이는 작업복의 후면온도는 복사열에 직접 노출된 작업복의 전면으로부터 작업복을 통한 전도열전달에 영향을 받으며, 작업복 상하방향으로의 열손실로 인하여 전면온도보다 온도가 낮게 나타난다. 작업복 후면은 작업자의 피부와 접촉 또는 아주 근접하여 위치하게 된다. 일반적으로 피부의 온도가 45°C로 되면 통증을 느끼며, 54°C에 이르면 화상이 발생한다⁸⁾. 따라서 작업자의 안전에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.2. 노출거리에 따른 작업복의 열적특성

Fig. 4는 복사히터 표면의 열유속이 3.5 W/cm²일 때, 작업복의 종류에 따른 작업복 전면에서의 온도 변화(T_f)를 복사히터로부터 작업복의 전면까지의 노출거리(X)에 따라 나타낸 그림이다.

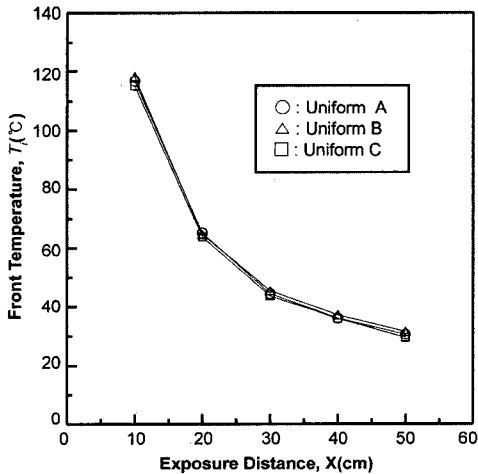


Fig. 4. Front temperature T_f variation with time for various texture, $q=3.5W/cm^2$, $X=10, 30cm$

복사히터로부터의 노출거리가 멀어질수록 작업복의 전면온도는 작업복의 종류와 관계없이 급격히 낮아진다. 이는 노출거리가 멀어짐에 따라 복사강도가 작아지기 때문이다. 따라서 작업자의 안전을 위해서는 고열원으로부터 일정거리 이상 떨어져 작업하여야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건하에서 작업복후면에서의 표면온도(T_b)의 변화를 나타낸 그림이다.

전반적인 경향은 Fig. 4와 비슷하며, 후면의 온도는 전면보다 조금 작게 나타난다. 또한 하작업복 하의(B)의 온도가 조금 높게 나타났다.

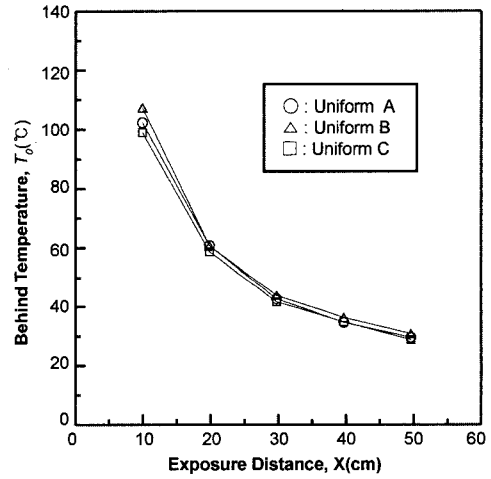


Fig. 5. Behind temperature T_b variation with time for various texture, $q=3.5W/cm^2$, $X=10, 30cm$

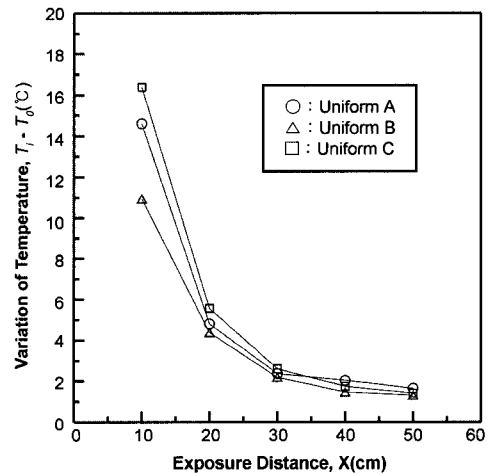


Fig. 6. Variation of temperature with time for various texture, $q=3.5W/cm^2$, $X=10, 30cm$

Fig. 6은 노출거리에 따른 작업복의 전면과 후면 사이의 온도차 ($T-T_0$)를 나타낸 그림이다. 작업복은 노출거리가 가까울수록 복사전면과 후면의 온도차는 커진다. 이러한 경향은 동작업복(C), 하작업복 상의(A), 하작업복 하의(B) 순으로 크다. 이는 Table 1에 표시한 것처럼 작업복의 물리적 특성으로 인하여 나타나는 현상으로 생각된다. 즉 동작업복 ($230g/m^2$)의 경우는 단위면적당 무게가 가장 크며 따라서 전도열저항이 가장 크다.

3.3. 노출거리에 따른 작업복의 열투과성

Fig. 7은 노출거리에 따른 복사열의 투과율을 나타낸 그림이다.

이때 투과율은 복사히터 표면에서 방사되는 열유속에 대한 작업복후면에서 방사되는 열유속의 비로 계산하였다. 복사히터로부터 작업복까지의 노출거리가 멀어질수록 작업복 후면에서 방사되는 투과율은 하작업복 상의(A)와 하의(B)의 경우 40cm까지는 조금씩 감소하다가 40cm이상에서 급격히 감소하며, 동작업복(C)의 경우 노출거리가 20cm이후 급격히 감소한다.

동작업복의 열투과율은 하작업복 상·하의에 비해 노출거리 10cm에서는 약 15~20%, 노출거리 50cm에서는 41~44%정도 작다. 이는 동작업복이 외부로부터의 열을 차단하는 능력이 우수함을 나타낸다.

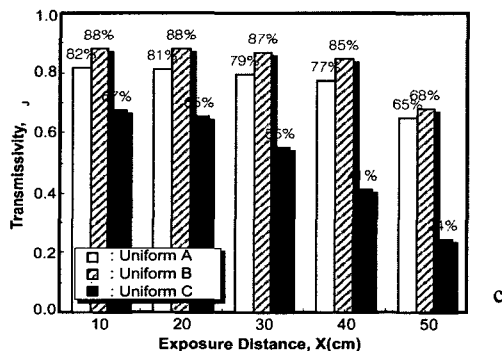


Fig. 7. Transmissivity of uniform A, B, C by exposure distance for steady state heat transfer

4. 결론

복사열에 노출된 작업복의 열적특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 작업복의 종류에 관계없이 노출시간에 따른 작업복 표면의 온도상승은 노출거리가 가까울수록 급격히 일어나며, 정상상태 도달시간은 짧다.
- 2) 작업복의 종류에 관계없이 노출거리가 멀어질수록 작업복 표면의 온도는 급격히 감소한다. 따라서 작업자의 안전을 위해서는 복사열원으로부터 일정거리이상 떨어져 작업하여야 할 것으로 사료된다.
- 3) 동작업복의 열투과율은 하작업복 상·하의에 비해 노출거리 10cm에서는 약 15~20%, 노출거리 50cm에서는 41~44%정도 작다.

참고문헌

- 1) Holcombe, B. V. and Hoschke, B. N., "Do Test Methods Yield Meaningful Performance Specifications," Performance of Protective Clothing, ASTM STP 900, R. L. Baker and G. C. Coletta, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 327-339, 1986.
- 2) Parker, W., "Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications," NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, March 1982.
- 3) Stroup, D.W., et. al., "Large Fire Research Facility Heat Release Rate Measurement System," NISTIR 6509, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, July 1982.
- 4) Stroup, D.W., Delauter, L., Lee, J., Roaddarmel, G., "Fire Tests of Men's Suits on Racks," Report of Test FR 4013, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, December 2001.
- 5) Lawson, J., "Fire Fighter's Pclothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting," NISTIR 5804, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, August 1996.
- 6) M, W.E, Lawson, J., "A Heat Transfer Model for Fighter's Protective Clothing," NISTIR 6299, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, January 1999.
- 7) Yoo Hwa Sook, Ning Pan, Gang Sun., "Change of Physical and Mechanical Properties of Fire Fighter Protective Clothing after Radiant Heat Exposure," J. of the Korean society of Clothing and Textiles Vol. 23. No. 6, pp. 853-863, 1999.
- 8) 김홍, 목연수, 이근오, 정국삼, "방화공학," 동화기술, 1997.