

작업복의 연소특성에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Burning Characteristics of Working Uniform

방창훈[†] · 이진호* · 김병하**

Chang-Hoon Bang[†] · Jin-Ho Lee* · Byung-Ha Kim**

경북전문대학 소방안전관리과, *육군3사관학교 기계공학과, **경일대학교 기계공학과
(2004. 11. 22. 접수/2005. 3. 7. 채택)

요 약

본 논문에서는 작업복의 연소특성을 실험적으로 연구하였으며, 초기 점화위치는 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분 및 하의무릎 부분으로 하였다. 실험결과는 다음과 같다. 미연소 질량비는 점화위치가 하의무릎 부분의 경우가 가장 빨리 감소하며 다음으로 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분의 경우 순으로 감소하였다. 최고평균표면온도는 점화위치가 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분, 하의무릎 부분의 경우 순으로 높게 나타났다. 연소 중 최고복사열유속은 점화위치가 상의소매 부분(0.5 W/cm²), 상의전면 중앙부분(0.45 W/cm²), 하의무릎 부분(0.44 W/cm²)의 경우 순으로 높게 나타났다.

ABSTRACT

Burning characteristics of working uniform was studied in this paper experimentally. Initial ignition point was classified in three cases that is midpoint of sleeve (Sleeve case), front side midpoint of coat (Center case) and midpoint of trousers (Leg case). The results are as follows; The remained mass ratio was decreased in order of Leg case, Sleeve case, Center case. And the highest average temperature of surface was appeared in order of Sleeve case, Center case, Leg case. Maximum radiant heat flux during burning was appeared high in order of Sleeve case (0.5 W/cm²), Center case (0.45 W/cm²), Leg case (0.44 W/cm²).

Keywords : Working uniform, Initial ignition point, Burning characteristics

1. 서 론

용접, 용광로 및 열처리 작업자 등 고열 작업환경 하에서 일하는 작업자는 보통 일반 작업복을 착용하고 작업을 수행하며 이때 작업복은 형태 및 물성의 변환 또는 연소할 가능성이 있다. 고열에 노출된 작업복은 형태변화가 일어나며 물리적 특성이 변화하여 작은 압력에 의해서도 강건성을 잃게 되어 더 이상 보호복의 기능을 발휘하지 못할 수도 있다.¹⁾

우리나라의 경우 대부분 고열 작업환경 하에서 작업자는 일반 작업복으로 작업을 수행하며 이로 인하여 화상 등의 재해가 다수 발생하고 있는 실정이다.

일반적으로 섬유류의 연소특징은 연소속도가 매우 빠

르며, 다량의 유독가스를 방출함으로써 인체에 치명적인 피해를 입히며 이에 따라 작업자의 안전을 확보하기 위하여 작업복의 연소특성에 관한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다.

Parker²⁾ 다양한 재질에 대하여 산소소모량을 이용하여 열발생량을 계산하는 여러 가지 식을 제시하였다.

Stroup 등^{3,4)}은 실제 화재 실험에서 열발생량이 Parker가 제시한 식과 실측치의 차가 20% 이내에 있음을 보고하였다. 또한 신사복의 화재실험을 수행하여 약 5분 동안 최대 열발생량이 약 1 MW~2 MW이 지속적으로 발생함을 보고하였다.

Torvi⁵⁾는 소방대원이 경험할 수 있는 높은 열유속에 노출되었을 경우 물질 및 열전달을 이론적으로 해석하였다. Lawson^{6,7)}은 소방대원들이 화재 진입시 발생하는 열적특성 및 열, 화염, 습기 등에 의하여 화상을 입

[†] E-mail: bangch@hanmir.com

는 과정을 연구 분석하여 방화복과 훈련방법의 개선점을 제시하였다. Yoo 등⁸⁾은 노출시간과 열강도에 따른 복사열 노출후의 소방관 보호복의 물리적 특성과 마모 강도, 인장강도, 연신도를 실험적으로 조사한 결과 소방복 보호성능의 종합적인 평가를 위해서는 방열성 수치뿐만 아니라 열 노출후 제거능성 유지측면까지 고려해야 함을 밝혔다. Bang 등⁹⁾은 산업현장에서 작업자가 높은 복사열에 노출되었을 경우 작업복의 열적특성을 실험적으로 연구하였으며, 그 결과 작업복의 종류에 관계없이 노출시간에 따른 작업복 표면의 온도상승은 노출거리가 가까울수록 급격히 일어나며, 정상상태 도달 시간이 짧아진다는 것을 밝혔다. 또한 작업복의 종류에 관계없이 노출거리가 멀어질수록 작업복 표면의 온도는 지수 함수적으로 감소함을 실험적으로 구명하였다.

지금까지 대부분의 연구들은 화염에 노출된 작업복에 대한 열적 특성변화를 조사하였다. 그러나 고열환경에서 작업복은 화염에 의하여 착화연소될 가능성이 상당히 높으며 이 경우 작업자는 매우 위험해 질수 있다. 따라서 작업복의 연소특성에 관한 연구가 매우 필요하다.

본 연구에서는 작업복에 대한 연소특성을 실험적으로 연구하여 작업자의 안전을 예측할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 작업복의 연소특성을 측정하기 위해 고안한 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치는 옷걸이(높이 1.5 m, 폭 55 cm)와 연소받침대(1 m×1 m), 전자저울(1 m×1 m)(CAS사, 모델60A-C), 열유속 측정장치(Heat Flux Microsensor 모델HFM-6 D/H, Vatell사), 데이터처리장치(FLUKE, 모델2640A), 열화상카메라(FLIR 모델

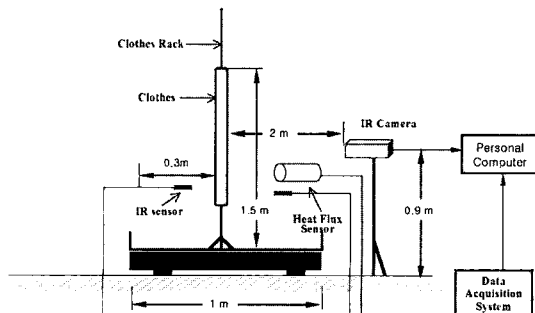


Fig. 1. Experimental setup.

S60, -50°C~2000°C) 그리고 퍼스널 컴퓨터로 구성되어 있다.

시료는 장치에 고정시킨 후 프로판토치 화염을 접촉시켜 시간에 따른 연소율을 측정할 수 있도록 하였고, 실시간으로 시료의 연소 온도분포를 측정하기 위해 열화상카메라를 사용하였다.

연소시 복사열을 측정하기 위해서 열유속 측정장치를 사용하였으며, 실시간으로 연소율을 측정하기 위하여 전자저울을 퍼스널컴퓨터에 연결하여 작업복의 연소율을 측정하였다.

2.2 실험방법

실험은 실제 사람이 작업복을 착용한 것과 같은 상태로 실시하였으며, 프로판토치의 화염길이는 2.5 cm로 유지시킨 상태에서 화염을 작업복에 3초 동안 접촉하여 연소시켰다. 점화위치는 상의소매부분(Sleeve), 상의 전면 중앙부분(Center), 하의무릎부분(Leg)으로 나누어 실험하였다.

실험은 동일한 실험조건하에서 3회 실시하여 평균값을 사용하였으며, 최초 작업복의 무게는 평균 13.6 kg이다.

시료는 작업자들이 주로 착용하는 작업복을 사용하였으며, Table 1에 실험에 사용한 작업복의 물리적인 특성을 나타내었다. 모든 시료는 AATCC Test Method 135 procedure B에 준하여 세탁한 후, 온도 21±1°C, 상대습도 65±5% 조건에서 24시간 이상 방치한 후 사용하였다.

측정오차는 열화상카메라의 온도계는 ±0.06°C 그리고 열전대의 온도계는 ±0.3°C, 그리고 열유속계는 ±0.0002 W/cm²이다.

Table 1. Physical characteristics of working uniform sample

Textile composition	Weight [g/m ²]
polyester 65%, cotton 35%	235

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 작업복 상하의를 옷걸이에 걸어놓은 상태에서 각각 상의전면 중앙부분, 상의소매 부분 및 하의 무릎 부분에 프로판토치의 화염으로 3초간 연소시켰을 때, 연소시간에 따른 질량 감소율의 변화를 나타낸 그림이다. 질량 감소율 $[(m_a - m_0)/(t_i - t_0)]$ 은 단위 시간당 작업복이 연소되는 질량으로 정의하였다.

Fig. 2에서 연소가 진행됨에 따라서 질량 감소율은 초기 점화 위치와 관계없이 일정시간 동안 불규칙하게

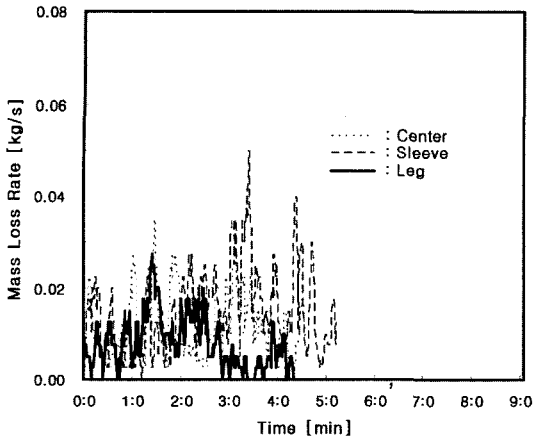


Fig. 2. Mass loss rate versus combustion time according to ignition point of uniform.

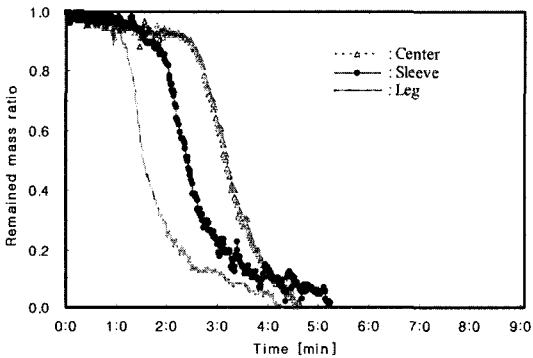


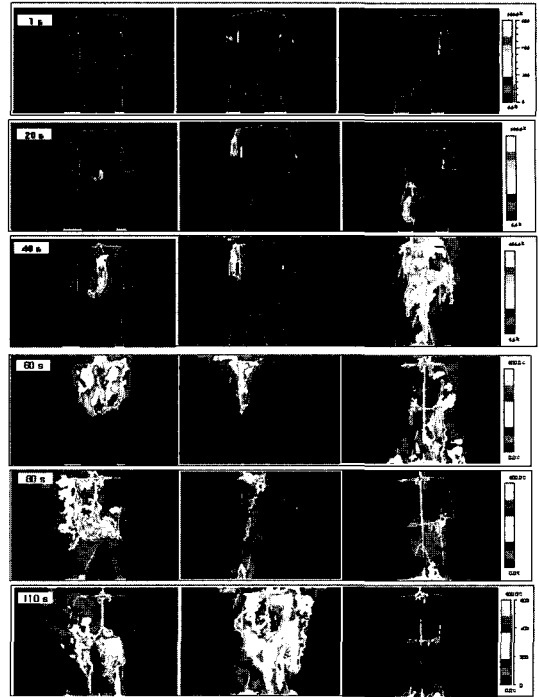
Fig. 3. Remained mass ratio versus combustion time according to ignition point of uniform.

증가와 감소를 반복하였다. 이때 질량 감소율은 상의 전면 중앙부분(1분 28초, 0.035 kg/s), 하의무릎 부분(2분 10초, 0.03 kg/s), 상의소매 부분(3분 29초, 0.051 kg/s)순으로 최대값을 나타내었다.

최초 점화 후 연소점이 방사형으로 확대되어 연소표면적이 가장 빨리 증가하는 상의전면 중앙부분인 경우에 가장 빠른 시간에 최대 질량 감소율에 도달하였으며, 다음으로 연소열이 하의 상단을 연소시켜 화염이 위쪽으로 전파되는 하의무릎 부분 그리고 화염이 주로 상의중앙부분으로 진행되는 상의소매 부분 순으로 최대 질량 감소율에 도달되었다.

Fig. 3은 연소시간에 따른 미연소질량비의 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 미연소질량비는 최초 작업복 질량과 미연소 작업복 질량의 비로 정의하였다.

Fig. 3에서 연소과정은 크게 3단계로 진행되고 있음



(a) Center (b) Sleeve (c) Leg

Fig. 4. Infrared photographs of uniform according to ignition point when combustion time is 1s, 20s, 40s, 60s, 80s, 110s.

을 알 수 있다. 연소 초기에는 서서히 연소하다가 화염 전파 속도가 증가하면서 미연소질량비가 감소하며 이후 연소가 성장기에 도달되어, 미연소질량비는 급격히 감소하였다. 즉 이때가 연소의 최고 성장기라 할 수 있다. 다시 가연물의 감소로 연소는 느려지며 미연소질량비는 완만하게 감소하였다.

하의무릎 부분의 경우가 가장 빠른 시간에 미연소질량비가 감소하며 다음으로 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분 순으로 나타났다. 즉 하의무릎 부분의 경우 직상방향으로 연소가 진행됨에 따라 연소가 매우 빠르게 진행되며, 상의소매 부분의 경우는 소매에서 상의쪽으로 진행된 후 연소가 작업복의 상부와 하부로 전파되어 다소 늦게 연소의 최고성장기에 도달되었다. 상의 전면 중앙부분의 경우는 상의 윗부분이 연소 후 아래로 연소가 진행되어 가장 늦게 나타났다.

Fig. 4는 작업복의 초기 연소점 위치변화에 따른 화염의 확산형태와 온도분포를 촬영한 열화상사진이다. 이때 사진에서 흰색 실선은 최초 작업복의 외형을 나타낸 것이며, 연소 후 1초에서 110초까지 경과되었을

때까지 촬영하였다.

최초 점화 20초 후 하의무릎 부분과 상의소매 부분의 경우 최초 연소점으로 부터 위쪽으로 약 20~35 cm, 아래쪽과 측면으로 약 10~20 cm으로 화염이 크게 확산되며 상의전면 중앙부분의 경우에는 거의 위쪽으로만 10 cm 정도 화염이 전파되는 현상이 나타났다. 이는 상하의 중앙부근은 직물과 단추 그리고 두께가 두꺼운 재봉부분이 있어서 화염전파가 느리기 때문으로 사료된다.

40초가 경과하면 하의무릎 부분의 경우는 작업복 상하의 전부에서 연소가 활발히 진행되며 상의소매 부분의 경우에는 팔의 전체 부분만 국부적으로 연소 최성기에 도달되었다. 특히 상의전면 중앙부분의 경우에는 상의소매 부분인 경우 보다 화염이 약 3배 정도 더 넓은 면적으로 확산되었다.

60초인 경우, 상의전면 중앙부분의 경우에는 작업복 상의 전체에서 매우 활발하게 연소가 진행되나 하의 부분은 아직까지 미연소 상태이다. 상의소매 부분의 경우에는 소매의 전체에서 연소가 진행되고 있으며 이때 발생한 연소열로 의해 측면방향으로 화염이 전파되었다. 연소 표면적은 무릎 부분, 상의전면 부분의 경우보다 훨씬 더 작음을 알 수 있다.

80초인 경우, 상의전면 중앙부분의 경우에는 화염은 작업복 상의 위쪽으로 전파되어 점차 상의 전체가 연소된 후 하의 쪽으로 화염이 전파된다. 그리고 점화초기에는 상의소매 부분인 경우보다 화염확산이 느리지만 점차 빨라진다. 한편 상의소매 부분은 화염전면(flame front)이 거의 수직하게 형성되어 화염이 측면 방향으로 전파되기 때문에 연소 최성기 후반에 급속히 연소속도가 가속화 되었다.

착화 후 110초에서는 상의전면 중앙의 경우 하의부분에서 연소가 활발히 일어나고 있으며, 상의소매 부분의 경우는 전부분에서 연소가 진행되어 최성기를 나타내고 있다. 하의무릎 부분에서는 연소가 거의 완료되었다.

Fig. 5는 연소 시간에 따른 작업복 표면온도의 분포를 나타낸 그림이다.

상의전면 중앙부분의 경우 40초에서 50°C 이하의 온도분포가 72%를 차지하였으나 60초에서 37%, 80초에서 27.5%로 감소하였으며 높은 온도의 분포는 연소가 진행됨에 따라 증가하였다. 상의소매 부분의 경우 40초에서 50°C 이하의 온도분포는 90%이며, 60초에서 81%, 80초에서 74%로 나타났다. 이는 소매에서 시작한 연소가 전체 작업복으로 확대되는 데 시간이 걸리기 때문이다. 하의무릎 부분의 경우는 연소가 진행됨

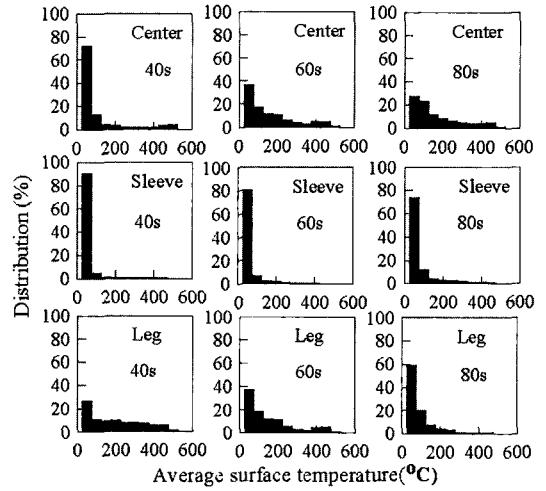


Fig. 5. The distribution of surface temperature of uniform in the case of variable initial ignition point of uniform.

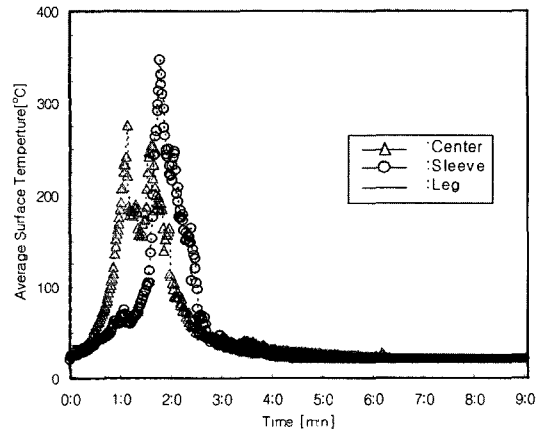


Fig. 6. The average surface temperature of uniform versus combustion time according ignition point of uniform.

에 따라 50°C 이하의 온도분포가 오히려 증가하였다. 이는 40초 부근에서 연소가 활발히 일어났으며 이후 감소하기 때문에 나타나는 현상이다.

초기 연소 위치에 관계없이 연소가 진행됨에 따라 연소가 최성기가 되면 작업복 면적의 약 20% 정도가 400°C 이상의 온도를 나타내었다.

Fig. 6은 연소시간에 따른 작업복 표면에서의 평균 온도 변화를 나타낸 그림이다. 평균온도는 연소 시 전체 작업복 표면의 온도를 평균하여 나타낸 온도이다.

연소 시 작업복의 평균 표면온도는 화재정보용 센서의 작동 유무, 적외선 감시 장비의 관측 여부, 화염에 노출된 장비 또는 온도상승 예측 등의 기초데이터가 된다.

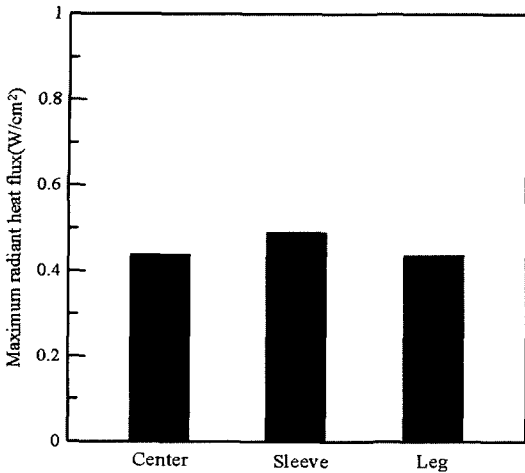


Fig. 7. Maximum radiant heat flux for the variable initial ignition point of uniform.

전체적으로 연소가 시작된 이후 평균 표면온도는 급격히 증가하여 최고평균 표면온도를 나타낸 후 빠르게 감소하였다.

하의무릎 부분의 경우에 최고평균 표면온도가 가장 빠르게 나타났으며, 상의소매 부분의 경우 온도는 일차 상승한 후 감소하다가 다시 상승하고 감소한다. 이는 팔부분이 연소한 후에 상의 전체로 화염이 전파되어 나타나는 현상이다. 상의전면 부분의 경우는 상대적으로 최고평균 표면온도의 상승이 완만하게 나타나 가장 높은 온도를 나타내었다.

Fig. 7은 연소최정기에 연소열에 의한 최대 복사열 유속을 측정된 결과를 나타낸 그림이다.

최대 복사열유속은 점화위치가 상의소매 부분(0.5 W/cm^2), 상의전면 중앙부분(0.45 W/cm^2), 하의무릎 부분(0.44 W/cm^2)의 경우 순으로 크게 나타났다.

4. 결 론

작업복의 연소특성에 관한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미연소질량비는 점화위치가 하의무릎 부분의 경우가 가장 빠른 시간에 감소하며 다음으로 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분의 경우 순으로 감소하였다.

2. 최고평균 표면온도는 점화위치가 상의소매 부분, 상의전면 중앙부분, 하의무릎 부분의 경우 순으로 높

게 나타났다.

3. 최대 복사열유속은 점화위치가 상의소매 부분(0.5 W/cm^2), 상의전면 중앙부분(0.45 W/cm^2), 하의무릎 부분(0.44 W/cm^2)의 경우 순으로 크게 나타났다.

참고문헌

1. B.V. Holcombe and B.N. Hoshcke, "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, pp.327-339(1986).
2. W. Parker, "Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications", NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD(March 1982).
3. D.W. Stroup *et al.*, "Large Fire Research Facility Heat Release Rate Measurement System", NISTIR 6509, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(July 1982).
4. D.W. Stroup, L. Delauter, J. Lee, and G. Roadarmel, "Fire Tests of Men's Suits on Racks", Report of Test FR 4013, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(December 2001).
5. D.A. Torvi, "Heat Transfer in Thin Fibrous Materials Under High Heat Flux Conditions", PhD thesis Mechanical Eng. Dept., University of Alberta, Calgary, Alberta(1997).
6. J. Lawson, "Fire Fighter's Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting", NISTIR 5804, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (August 1996).
7. 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).
8. Yoo Hwa Sook, Ning Pan, and Gang Sun, "Change of Physical and Mechanical Properties of Firefighter Protective Clothing after Radiant Heat Exposure", J. of the Korean Society of Clothing and Textiles, Vol. 23, No. 6, pp.853-863(1999).
9. 방창훈, 이진호, 예용택, "복사열에 노출된 작업복의 열적특성에 관한 실험적 연구", 산업안전학회 논문집 Vol. 17, No. 3, pp.56-60(2002. 9).