저열유속 조건의 복사열 노출에 따른 소방보호복의 열보호성능 측정에 관한 연구

이준경[†] · 방영준 · 방창훈* · 권정숙**

경남대학교 기계공학부, *소방방재공학과, **패션의류학과

Study on the Thermal Protective Performance Measurements of Fire Fighter's Protective Clothing for Low Level Radiant Heat Exposures

Jun-Kyoung Lee[†] · Young-Jun Bang · Chang-Hoon Bang* · Jung-Suk Kwon**

Dept. of Mechanical Engineering

*Fire & Disaster Prevention Engineering

**Fashion and Clothing, Kyungnam Univ.

(Received July 12, 2013; Revised April 14, 2014; Accepted April 17, 2014)

요 약

보호복 섬유 및 재료의 개발을 통해 나아진 단열 성능을 제공함에도 불구하고 보호복의 화상 방지는 아직도 중요한 사항이다. 화염으로부터의 보호성능을 보장받기 위해서 보호복의 정확한 성능검증이 필요하며, 열보호 특성을 정확히 파악하기 위해 ISO 등은 시험방법을 표준화하여 제시하고 있다. 하지만 대부분의 경우, 높은 열유속 조건에 대해 보호복의 열보호 성능을 시험하는 것으로 되어 있어, 고열유속에 의한 시편의 파괴가 일어나기 쉽다. 그러므로 낮은 열유속 조건에서 보호복의 열보호 성능을 측정하는 방법이 필요하며, 본 연구에서는 낮은 열유속에 대한 열보호 성능을 측정할 수 있는 화상 및 통증유발시간에 기초한 개선된 RPP(복사열 보호 성능) 지수와 그의 측정방법을 제안하였다. 또한 제안된 열보호성능 측정 방법을 실험을 통해 확인하고, 보호복의 비정상열전달특성을 파악하였다. 또한 기존의 여러 가지 열보호성능지표들과 제안지표와의 관계를 제시하였다.

ABSTRACT

Despite advancements in the development of synthetic fibers and materials that provide better insulation, fire burn injuries remain a significant issue. To ensure adequate protection, clothing and equipment must be selected on the basis of performance. There are different standards like ISO standards applicable to each of the various types of clothing used by fire fighters. But, in most cases, the tests are performed in the conditions of high heat flux exposure, the clothing material can be destroyed easily. Thus the effective way to investigate the protective performance for the low (radiant) heat flux conditions should be needed. Therefore improved RPP (Radiant Protective Performance) test method based on the onset of pain burn injury was suggested. Experiments were performed to verify the proposed method with current protective clothing for fire fighters and the transient heat transfer characteristics were identified, also. Moreover, several protective performance indices were acquired from experimental results to analyze their relations.

Keywords : Fire fighters, Protective clothing, RPP (Radiant Protective Performance), Onset of pain burn injury

1. 서 론

화재현장에서 소방공무원의 화상사고는 매년 지속적으로 발생하고 있다. 2008년 소방공무원 공사상 원인분석 자료에서 화염접촉에 의한 경우가 5.5%를 차지하고 있으나, 자가치료와 공사상미신청건을 고려하면 실제에는 이보다 많이 발생할 것으로 판단된다⁽¹⁾. 미국의 경우 2011년도

소방공무원 사망원인의 8% 정도가 화상으로 나타났으며 이를 예방하기 위한 다양한 연구가 진행중이다⁽²⁾. 화재현장에서 전달되는 열은 복사열이 가장 큰 비중을 차지하며, 연료연소로 인해 발생하는 화재의 경우 발생열의 80% 이상이 복사열이다. 특히 소방공무원은 불꽃 등의 직접적인 요인에 의한 피해보다는 복사열에 의한 화상 등의 간접피해가 더 크다고 알려져 있다⁽³⁾. 소방보호복은 이러한 복사

[†]Corresponding Author, E-Mail: jklee99@kyungnam.ac.kr
TEL: +82-55-249-2613, FAX: +82-505-999-2160

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.2.001>

열에 대한 화상위험으로부터 보호하기 위해 기본적으로 작용하는 장비이다. 따라서 소방보호복의 열보호 특성을 정확히 파악하고 있어야 화재진압작업 시 위험요소를 적절히 판단하여 화상사고 예방 등 소방공무원의 안전을 도모할 수 있다. 열보호 특성을 객관적으로 평가하기 위해 시험평가방법이 필수적으로 요구되는 사항이며, 소방보호복을 포함한 보호복의 복사열에 대한 열보호성능 측정과 관련된 기존의 대표적 규격은 NFPA (National Fire Protection Association) 1971⁽⁴⁾로 ASTM (American Society for Testing and Materials)에서 제안하는 각종 열보호성능 측정법을 정리하고 있다. 그리고 대표적인 ISO (International Organization for Standardization) 규격으로 ISO 6942는 복사열, ISO 9151은 대류열, ISO 17492는 복사열과 대류열에 대한 열보호성능을 각각 측정하는 방법을 제시하며, 필수 평가시험으로 규정하고 있다. 국내에는 미비한 보호복 관련 규격을 보완하기 위해 2002년부터 ISO에 있는 보호복 관련 규격을 그대로 들여와 KS로 제정 고시하고 있는 실정이다⁽⁵⁾.

보호복의 열보호 성능을 측정하는 많은 규격에서 성능을 객관적으로 제시하기 위해 활용하는 지표는 크게 HTI, TF, RPP (또는 TPP) 3가지로 요약할 수 있으며, 열보호성능에 대한 국내의 대부분의 연구는 측정이 간단한 HTI와 TF 결과를 많이 제시하고 있으나⁽⁶⁻⁸⁾, 가장 활용성이 높지만 피부화상에 대해 정확한 측정이 가능한 RPP를 측정, 제시한 연구는 전무하다.

위의 지표를 활용한 국제 규격들은 소방보호복의 열보호성능을 잘 파악할 수 있도록 구성되어 있으나, 대개의 경우(특히 RPP 측정시) 비교적 고열유속 조건(40~84 kW/m²)에서 보호복 성능을 평가하도록 되어 있어, 보호복 구성재료의 평가시 장시간 열원에 노출 시킬 경우 조직과괴가 발생하여 평가가 불가능한 상황이 발생한다. 또한 소방 보호복 뿐만 아니라 다양한 열유속 조건(주로 저열유속 조건)에서 사용하는 산업용, 군사용 및 의료용의 방열복에서도 유용한 정보를 제공할 수 있는 열보호 성능평가의 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 저열유속 조건의 복사열 노출시 열보호성능을 효과적으로 제시할 수 있는 지표 및 측정 방법을 기존 RPP 측정방법(ASTM F 2702-08⁽⁹⁾)을 개선하여 제안하였다. 그리고 제안한 지표 및 시험방법을 적용할 수 있는 실험장비를 제작하고, 현재 사용되는 소방 보호복 각 구성재료에 적용하여 보호복의 열보호 성능특성을 잘 나타낼 수 있음을 확인하고자 한다. 나아가 기존의 여러 가지 열보호성능 지표와의 관계를 분석하여 기존의 연구결과를 활용할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 열보호 성능 및 측정방법

보호복의 열보호성능은 보호복을 통과하는 열유속의 양

을 최소화하여 보호복 안쪽의 온도상승을 지연시켜 피부 화상(skin burns)을 방지하는 능력이라고 할 수 있다. 이러한 열보호성능을 파악하기 위한 3가지의 객관적 지표가 존재하며, 그것을 간단하게 다음과 같이 정리하였다.

2.1 HTI (Heat Transfer Index)

보호복의 안쪽의 온도(정확히는 구리열량계 온도)가 12 °C, 24 °C 상승하는데 소요되는 시간을 중요하게 고려하고, 이를 각각 HTI₁₂, HTI₂₄ (열전달 지수)로 정의하였다. 이는 피부가 고통을 느끼며 화상을 입지 않도록 대피할 수 있는 대략적인 시간이며, 따라서 HTI 값이 클수록 보호복의 열보호 성능이 우수하다고 판단할 수 있다. 쉽게 측정이 가능하고, 시험편 간의 상대적인 비교가 쉬운 장점이 있으나, 고열유속 하에서는 매우 값이 작을 수 있다.

2.2 TF (Heat Transfer Factor)

TF (열전달 요인)는 노출열유속에 대해 시험편을 투과한 열유속 비율을 의미하며 다음 식과 같다.

$$TF(\%) = \frac{\dot{q}_c}{\dot{q}_0} \times 100 \quad (1)$$

이 식에서 $\dot{q}_c$ 는 통과열유속(kW/m²), $\dot{q}_0$ 는 입사열유속(kW/m²)을 각각 의미한다. 통과 열유속은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}_c = \frac{M \cdot C \cdot 12}{A \cdot (HTI_{24} - HTI_{12})} \quad (2)$$

이 식에서 M은 구리열량계 질량(kg), C는 구리비열(kJ/kg °C), A는 구리열량계 면적(m²), 12는 온도차(°C)를 각각 나타낸다.

TF는 노출열유속이 일정하다면 통과열유속의 값을 그대로 표현하는 것으로, 앞에서 소개한 HTI와는 반대로 TF 값이 작을수록 열보호성능이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 노출열유속이 다른 경우 의미가 없으며, HTI와 유사한 장점을 가지고 있으나, 물리적으로 큰 의미가 없다.

2.3 RPP (Radiant Protective Performance)

RPP (복사열 보호 성능)는 피부화상의 발생 시간을 의미하는 것으로 앞서 기술한 HTI와 관계가 있으나 RPP의 측정방법은 화상 예측(Burn prediction)과 매우 밀접한 관련이 있으므로, 이에 대해 간략히 정리하면 다음과 같다.

화상의 종류는 대개의 경우 1~3도 화상으로 분류하며, 1도 화상은 표피(Epidermis) 내에서만 발생하며, 자연적으로 치유된다. 2도 화상은 표피 및 진피(Dermis) 일부분에 발생하며, 물집이 잡히게 되고 극도로 고통스럽다. 3도 화상은 표피, 진피의 손상 모두 포함하고, 그 아래의 피하조직(Subcutaneous tissue)에 까지 일부 손상이 되며, 피부의 변성이 발생한다⁽¹⁰⁾. 그 외 열화상으로 인해 통증을 느끼는

Figure 1. Human skin heat tolerance⁽¹¹⁾.

시작점(onset of pain)이 존재하는데, 이는 통증 수용체 깊이(pain receptor depth) 지점의 온도가 45 °C에 이르게 될 때 발생한다.

그러한 화상과 관련된 연구에서 많이 인용되는 기존 연구 중 Stoll and Chianta⁽¹¹⁾는 일정한 열유속 환경에의 노출시간과 화상과의 관계를 인체를 대상으로 한 실험으로 밝혀내었다. 특히 2도 화상에 대해 피부에 대한 열유속이 높아짐에 따라 화상발생시간(t)은 다음과 같이 대수적으로(logarithmically) 감소함을 보고하였다(Figure 1).

$$t_{2nd} = 247.46(\dot{q})^{-1.4052} \quad (3)$$

마찬가지로, 통증 시작점의 경우도 유사한 형태로 다음의 식으로 제안하였다(Figure 1).

$$t_{op} = 85(\dot{q})^{-1.35} \quad (4)$$

위의 식에 누적이 되는 단위면적당의 열량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q = \int_0^t \dot{q} dt \quad [kJ/m^2] \quad (5)$$

식(3)에 대해 (5)와 같이 적분하여 구한 값이 TTI (Thermal Threshold Index, 열임계지수)로 정의되고, 이 값이 시험편의 통과 열유속을 시간에 대해 적분하거나 구리 열량계에 누적되는 열량과 같은 값을 나타내는 시간이 RPP가 된다. 따라서 RPP는 단순히 온도 상승의 지연 정도(HTI)나 열유속의 차단효과(TF)만을 나타내는 것 보다는 화상의 발생 가능시간을 정량적으로 나타내주어 열보호성능의 우수성을 직접적으로 표현하고, 화상을 방지하기 위한 회피시간을 정확하게 알려줄 수 있다는 측면에서도 매우 유용한 지표라고 할 수 있다.

기존의 시험 방법은 식(3)을 활용한 2도 화상에 대한 RPP를 구하는 측정 방법만을 사용하고 있으나, 낮은 열유속일 경우 기준값인 2도 화상에 대한 예측이 잘 맞지 않는

Figure 2. Comparison of injury time.

단점(이유는 낮은 열유속인 경우, 화상발생 시간이 매우 길고, 따라서 혈류유동과 신진대사 등에 의해 2도 화상에 대한 예측이 벗어남)이 존재하고, 통과 열유속의 누적값이 TTI에 미치지 못하여 정확한 측정이 어려우므로 이에 대한 보강이 필요하다. 따라서 1도 화상이나, 통증 시작점을 기준으로 보완된 RPP를 이용하면 낮은 열유속에서도 효과적으로 화상과 연관된 지표를 정확하게 제시할 수 있다는 장점이 존재하게 된다. 1도 화상의 경우는 Lee and Bang⁽¹²⁾의 화상예측 방법을 활용하여 2도 화상 발생 시간과 같이 나타내어 보면(Figure 2), 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로 통증 시작점을 나타낸 식(4)를 이용하여 TTI_{OP}를 설정하고, RPP_{OP}를 RPP 구하는 방법과 동일하게 이용하면 저열유속 조건에서도 좋은 지표로서 활용가능하게 된다. 따라서 열보호성능 측정 실험시에는 2도 화상 시작시간인 RPP와 통증 시작 시간인 RPP_{OP}를 모두 구하여 분석하였고, 동일 실험에서 각각을 구하는 방법을 Figure 3에 나타내었다.

Figure 3. Rating method of RPP and RPP_{OP} values from copper calorimeter temperature measurements.

3. 열보호측정실험

3.1 실험장비

보호복의 열보호성능을 측정하기 위해 열유속 및 시간당 저장 에너지를 동시에 측정 가능한 구리열량계(Copper calorimeter)를 ASTM F 2702-08⁽⁹⁾을 참고하여 제작하였다. 지름 0.04 m, 질량 0.018 kg인 구리($C = 385 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)의 원판 중앙에 구멍을 뚫고, 그 구멍에 열전대(J Type)를 넣고 고정해주었다. 열원이 접하는 면에는 검은색 도료를

(a) Picture

(b) Structure of copper calorimeter

Figure 4. Heat flux sensor (Copper calorimeter).

Figure 5. Temperature response of copper calorimeter.

발라 흡수율(0.95)을 높여주었다. 이 구리원판을 단열재와 조립하여(Figure 4) 열원에 노출해 시간에 따른 온도의 변화를 측정하였고 다음 식을 활용하여 열유속을 계산하였다.

$$\dot{q} = \frac{m \times C}{\alpha \times A} \times \frac{dT}{dt} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

여기서 $\dot{q}$ 은 열유속(W/m^2), m 은 구리 블록의 질량(kg), C_p 는 구리의 비열($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$), α 는 흡수율, A 는 구리판의 면적(m^2), dT 는 온도 변화량($^\circ\text{C}$), dt 는 시간 변화량(s)을

Figure 6. Heat flux measurements with copper calorimeter.

(a) Test equipments

(b) Schematic Diagram

Figure 7. Experimental setup.

Figure 8. Heat flux conditions related with the range of thermal conditions faced by fire fighters.

각각 의미한다.

제작된 열량계를 여러 입사 열유속 조건에 노출하여 시간에 따른 열량계의 온도변화를 측정하였고, 온도의 기울기가 일정한 것을 확인할 수 있다(Figure 5). 교정이 완료된 열유속계(Vatell, TG 1000-1)로 측정이 완료된 열유속 조건에 대해 전체적으로 2% 미만의 측정오차를 확인하였다(Figure 6).

열량계를 이용한 보호복 열보호성능 시험장치는 히터, 전원 스위치, 전원 공급 장치, 열량계 이송장치 및 고정장치, 셔터(shutter), 그리고 DAQ로 구성하였다(Figure 7). 히터는 텅스텐램프(220 V/1,200 W) 8개로 구성되어있으며, 전원 공급장치(10 KVA)의 전압 조절을 통해 발열량을 제어가능하며, 일정한 열유속이 공급될 수 있도록 만들었다. 셔터는 실험시작 전 히터의 열유속 안정화 과정 중 발생하는 열을 센서에 도달하지 못하도록 차단하는 역할을 한다.

3.2 실험방법

히터를 켜고 정상 상태까지의 안정화 작업을 거친 후 셔터를 열어 히터로부터 43 mm 거리에 위치시킨 소방보호복 시편을 Figure 8에 표시한 열유속 범위에 대해 1분간 노출시켰다. 열유속 조건은 시편의 파괴가 발생하지 않는 저열유속 범위에서 범위를 설정하였다(대부분의 건물화재

(a) $\dot{q} = 3.8 \text{ kW/m}^2$

(b) $\dot{q} = 15.6 \text{ kW/m}^2$

Figure 9. Temperature and heat flux measurements for out-shell with different input heat flux conditions.

는 8~25 kW/m²에서 많이 나타난다.)⁽¹³⁾. 시편 전, 후면의 온도와 시편을 통과하는 열유속 데이터를 획득한 후 히터를 끄고 실험 장비를 상온으로 냉각시켰다. 동일 열유속 조건에 대해 3회의 반복실험을 수행하였다.

실험에 사용한 소방보호복은 겉감, 중간감, 안감의 3겹으로 구성된 S사 제품이며, 각 물성치는 Table 1과 같다. 실험 시 사용한 시편은 125 mm × 110 mm 크기의 시험편을 20 ± 2 °C 온도, 65 ± 2% 상대습도에서 24시간 이상 컨디셔닝하였다.

Table 1. Thermophysical Properties of Fire Fighter's Protective Cloth (S Company)

		Outshell	Absorption fabric	Lining
Material		Aramid/Rayon	Aramid	Aramid
Fiber mixture rate (%)		Aramid: 65.2 Rayon: 34.8	Aramid: 100	Aramid: 100
Density (strand/2.54 cm)	Warp	63		59
	Weft	44		56
Thickness (mm)		0.56	0.85	0.30
Thermal conductivity (W/m°C)		0.049	0.045	0.036

(a) $\dot{q} = 3.8 \text{ kW/m}^2$ (a) $\dot{q} = 3.8 \text{ kW/m}^2$ (b) $\dot{q} = 15.6 \text{ kW/m}^2$ (b) $\dot{q} = 15.6 \text{ kW/m}^2$

Figure 10. Temperature and heat flux measurements for absorption fabric with different input heat flux conditions.

Figure 11. Temperature and heat flux measurements for lining with different input heat flux conditions.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 입사 열유속에 따른 온도 및 통과열유속 변화

각 시험편에 대해 일정 열유속 조건 하에서의 시험편 전 후면 중앙부 온도와 후면 통과 열유속을 측정하여 나타내었다(Figure 9, 10, 11).

입사열유속 크기에 관계없이 시간이 지날수록 통과 열유속이 증가하는 경향을 가진다. 이는 시험편이 가지고 있는 수분으로 인해 시험편의 열용량이 크게 되고, 그에 의해 초반에는 통과 열유속이 적다. 그러나 노출시간이 증가할수록 함유 수분이 증발되어, 열용량이 감소하고, 시험편이 흡수할 수 있는 열이 일정하므로 통과 열유속이 증가되는 것으로 사료된다.

시험 전후면 온도는 노출시간이 지날수록 점진적으로 증가하고, 온도차가 커짐을 볼 수 있다. 이는 노출시간 증가에 따라 통과 열유속이 증가하는데 대해, 시험편에 대한 전도 열유속이 증가함을 의미하고, 따라서 시험 전후면 온도차가 커지게 된다.

위의 시험결과에 대해 각각의 입사열유속에 따른 식(1)의 TF를 구하여 Figure 12에 나타내었다. 입사열유속이

Figure 12. TF (Heat Transfer Factor) values of fire resistant fabrics for different heat flux conditions.

증가함에 따라 TF도 증가함을 알 수 있다. 이는 각 시험편의 열용량 한계가 존재하고, 이로 인해 입사 열유속이 커질수록 통과되는 열유속이 커지는 것으로 판단할 수 있다.

4.2 RPP 측정 결과

위의 실험에 대해 시험편 후면에서의 구리열량계 온도

를 측정하여 통증 시작 및 2도 화상발생까지의 시간을 측정 및 예측한 것이 각각 RPP_{op} 및 RPP 가 되며, 이것을 실제 시험 결과로부터 구하는 예를 Figure 13에 나타내었다. 입사 열유속이 큰 경우, 측정 시간 내(60초)에 2도 화상 발생 예측 시간인 Stoll 곡선에 도달하며 RPP 의 측정이 가능

Figure 13. RPP and RPP_{op} rating examples for different heat flux conditions.

하지만, 입사 열유속이 낮은 경우(Figure 13의 3.8 kW/m^2 인 경우) Stoll 곡선에 다다르지 못하고, 따라서 이때는 곡선 맞춤(curve fitting)에 의해 RPP 값을 추정하였다.

각 열유속 및 시험편에 대해 기술한 방법을 이용하여 RPP_{op} 및 RPP 를 모두 구하였고, 그 결과를 Figure 14에 나타내었다. 2도 화상(Figure 14(a))과 통증 시작점(Figure 14(b))에 대해 각 시험편의 발생 시간을 log 단위로 각각 나타내었다. 같은 입사 열유속(x축 값)에 대해 발생시간(y축 값)이 클수록(2도 화상과 통증시작 발생시간으로부터 멀리 떨어질수록) 좋은 열보호 성능을 가진다. 열유속이 높을수록 RPP 및 RPP_{op} 지수가 감소하게 되며, 각 소재에 대해 최대 30% 정도 차이가 발생하였다. 그리고 TF 지수가 높은 Lining의 경우, RPP 및 RPP_{op} 지수가 가장 낮음을 확인할 수 있다. 그것은 TF 지수가 높은 경우, 통과하는 열유속이 높고 따라서 화상의 발생 시간은 짧아지는 결과를 나타내기 때문이다.

따라서 Figure 13과 같은 과정을 통하여 각 소재에 대해 RPP_{op} 및 RPP 의 관계를 입사 열유속에 대해 제안할 수 있으며, 다양한 열유속 조건에서 각 소재의 화상발생시간을 간단한 형태의 식으로 제안할 수 있어, 소재의 열보호

(a) RPP

(b) RPP_{op}

Figure 14. Protective performance results of fire resistant fabrics.

(a) HTI_{12} vs RPP_{op}

(b) HTI_{24} vs RPP

Figure 15. Relations between HTI and RPP values.

성능 특성을 잘 나타낼 수 있다.

위의 결과와 더불어, HTI₂₄와 RPP 지수와의 관계 및 HTI₁₂와 RPP_{op} 지수와의 관계를 각각 Figure 15에 나타내었다. 대략 선형의 관계를 가짐을 확인할 수 있고, 각각의 관계를 식의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$RPP_{op} = 0.78 \times HTI_{12} + 6.20 \quad (7)$$

$$RPP = 0.80 \times HTI_{24} + 5.25 \quad (8)$$

위와 같은 관계의 이유는 HTI가 구리열량계의 온도를 12 °C나 24 °C까지 상승시키는데 걸리는 시간이고, RPP는 고통 시작점 또는 2도 화상 발생 시간으로 HTI의 연장선에 놓여 있기 때문이다. 그러나 노출 시간에 따른 통과 열유속이 일정하지 않기 때문에(Figure 9, 10, 11), 정확한 선형관계는 아니다. 그러나 위의 식을 활용하면, HTI 지수로부터 대략적인 RPP 값을 간단히 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 기존의 HTI 측정 연구 결과를 활용할 수 있으므로 유용하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 저열유속 조건의 복사열 노출에 따른 소방보호복의 열보호성능 측정방법을 기존의 연구를 바탕으로 제안하고, 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 저열유속에 대해 화상에 의한 고통 시작점을 이용하여 기존 고탐열유속에서의 RPP를 개선한 RPP_{op} 지표를 제안하였으며, 이를 실험을 통하여 측정하였다. 동일 조건에 대한 3회의 실험결과 반복성을 확인하였으며, RPP보다 빠르게 구할 수 있다. 또한 기존 지표들에 비해 화상발생시간이라는 물리적 특징을 가지고 있기 때문에 값 자체를 활용하여 보호복을 개발하고, 화상방지에 대한 지침을 제공할 수 있다.

2) 노출 시간 및 입사 열유속이 증가할수록 통과 열유속이 증가함을 알 수 있었다. 이는 시편의 열용량과 연관을 가지게 되는데, 시편의 열용량은 거의 일정한 반면 노출 시간이 길어지거나 열유속이 증가하면 시편의 열용량 한계를 넘어가 통과 열유속이 증가되는 것으로 판단할 수 있다.

3) HTI₁₂와 RPP_{op} 지수 그리고 HTI₂₄와 RPP 지수와의 관계가 대략 선형임을 확인할 수 있었고, 이들 관계에 대한 식을 제안하였다. 따라서 기존 HTI 지수 연구 결과를 RPP와 연계하여 활용할 수 있도록 하였다.

4) 본 연구에서 제작한 구리 열량계는 RPP 지수와 HTI 지수를 제공할 수 있으며, 열역학 관계식을 활용하면 열유속까지도 측정할 수 있다. 또한 제작비용도 저렴하고 제작이 간단하며, 화염접촉조건의 매우 큰 열유속에서도 사용이 가능하다. 다만 크기가 비교적 크다는 단점이 존재해 향후 소형화를 위한 연구를 수행할 계획이며, 3 layer 복합체에 대해 공기간극이 열보호성능에 미치는 영향을 살펴

볼 계획이다.

향후 연구에서는 소방보호복 관련 열보호성능에 대한 국내 기준의 수립을 위하여 다양한 조건에서의 실험을 수행하고 결과를 정리하여 국내 실정에 적합한 기준설정에 기여할 예정이다.

References

1. NEMA, "An Analysis on Current Conditions of Occupational Casualties of Fire Fighters 2008" (2008).
2. NFPA, "Fire Fighter Fatalities in the United States" (2011).
3. B. V. Holcombe and B. N. Hoschke, "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).
4. NFPA 1971, Standard on Protective Ensemble for Structural Firefighting (2013).
5. S. A. Han and Y. J. Nam, "An Exploratory Study on Domestic and International Protective Clothing Standard", J. Kor. Soc. Cloth. Ind., Vol. 10, No. 1, pp. 92-100 (2008).
6. D. S. Shin, Y. H. Jeon, S. M. Han, S. K. An and E. S. Lee, "Evaluation for Thermal Protective Performance of Protective Clothing", Textile Science and Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 16-23 (2006).
7. J. E. Ha, Y. H. Jeon and S. K. An, "Thermal and Moisture Transfer Properties of Fabrics Used in Protective Clothing for Welders", Textile Science and Engineering, Vol. 46, No. 2, pp. 106-112 (2009).
8. K. J. Yoon and K. A. Hong, "Effect of Spacer in Multi Layer Thermal Barrier of Firefighting Clothing on Thermal Property and Comfort", Textile Science and Engineering, Vol. 47, No. 6, pp. 420-425 (2010).
9. ASTM F2702-08, "Standard Test Method for Radiant Heat Performance of Flame Resistant Clothing Materials with Burn Injury Prediction" ASTM (2013).
10. J. M. Black, J. H. Hawks and A. M. Keene, "Medical-Surgical Nursing", 6th Edi., Elsevier (2001).
11. A. M. Stoll and M. A. Chianta, "Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection", Aerospace Medicine, Vol. 40, No. 11, pp. 1232-1238 (1969).
12. J. K. Lee and C. H. Bang, "Numerical Study on Skin Burn Injury due to Flash Flame Exposure", Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 13-20 (2012).
13. J. H. Veghte, "Functional Integration of Fire Fighters' Protective Clothing", Performance of Protective Clothing, ASTM STP 900, R. L. Barker and G. C. Coletta, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 487-496 (1986).