

[Research Paper]

## 대류와 복사 열원에 대한 특수방화복의 열보호 성능시험 비교

김해형 · 유승준\* · 박평규\*\* · 김영수\*\* · 홍승태\*\*\*†

단국대학교 파이버시스템공학과, \*서남대학교 환경화학공학과, \*\*㈜산청 기술연구소, \*\*\*한국소방산업기술원 소방기술연구소

### Comparison of Thermal Protective Performance Test of Firefighter's Protective Clothing against Convection and radiation heat sources

Hae-Hyoung Kim · Seung-Joon Yoo\* · Pyoung-Kyu Park\*\* ·  
Young-Soo Kim\*\* · Seung-Tae Hong\*\*\*†

Dept. of Fiber System Engineering, Dankook Univ., \*Dept. of Environmental and Chemical Engineering, Sonam Univ.,  
\*\*R&D Lab., SanCheong Co. Ltd., \*\*\*R&D Lab., Korea Fire Institute

(Received January 11, 2017; Revised March 16, 2017; Accepted April 4, 2017)

#### 요 약

소방용 특수방화복의 열보호 성능 평가를 위해 대류와 복사 열원을 이용한 시험방법을 비교하였다. 특히 특수방화복을 구성하는 겉감, 중간층, 안감이 각각 열보호 성능에 미치는 영향을 대류와 복사 열원에 대해 비교하였다. 대류 열원에 대한 열보호 성능시험은 KS K ISO 9151, 복사 열원에 대한 시험은 KS K ISO 6942 그리고 대류와 복사 열원을 함께 사용하는 시험은 KS K ISO 17492의 방법에 따라 수행하였다. 같은 입사 열유속 조건(80 kW/m<sup>2</sup>)에서 시험했을 때 대류 열원에 비해 복사 열원에 대한 열전달지수(t<sub>12</sub>, t<sub>24</sub>) 값이 보다 크게 나왔다. 이는 대류에 비해 복사에 의한 영향이 느리게 나타났음을 의미한다. 대류 열원에 대해서는 안감이 열보호 성능에 가장 크게 영향을 미쳤고 이어서 중간층, 겉감 순서였다. 그러나 복사 열원에 대해서는 안감, 겉감, 중간층 순서로 열보호 성능에 미치는 영향이 컸다. 대류와 복사는 열전달 메커니즘이 근본적으로 다르며, 열원이 달라지면 재질 구성에 따라 열보호 성능 결과가 다르게 나올 수 있다. 따라서 특수방화복의 열보호 성능을 평가하기 위해서는 대류 열원 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 시험도 중요함을 확인하였다.

#### ABSTRACT

The test methods using convection (flame) and radiation heat sources were compared to evaluate the thermal protective performance of the firefighter's protective clothing. In particular, the influence of the outer shell, mid-layer, and lining constituting the firefighter's protective clothing on the thermal protective performance was compared for convection and radiation heat sources. Tests for the thermal protective performance were carried out according to KS K ISO 9151 (convection), KS K ISO 6942 (radiation), and KS K ISO 17492 (convection and radiation). When tested under the same incident heat flux conditions (80 kW/m<sup>2</sup>), the heat transfer index (t<sub>12</sub> and t<sub>24</sub>) for the radiation heat source was higher than that for the convection heat source. This means that radiation has a lesser effect than convection. For the convection heat source, the lining had the greatest effect on the thermal protective performance, followed by the mid-layer and the outer shell. On the other hand, for the radiation heat source, the effect on the thermal protective performance was great in the order of lining, outer shell, and mid-layer. Convection and radiation have fundamentally different mechanisms of heat transfer, and different heat sources can lead to different thermal protective performance results depending on the material composition. Therefore, to evaluate the thermal protective performance of the firefighter's protective clothing, it is important to test not only the convection heat source, but also the radiation heat source.

**Keywords** : Convection, Firefighter's Protective Clothing, Radiation, Thermal Protective Performance

#### 1. 서 론

화재 현장에서 불을 끄고 구조 활동을 하는 소방관들은

화염으로부터 신체를 보호하기 위해 소방용 특수방화복을 착용하고 작업한다. 특수방화복은 소방관의 생명을 보호해 줄 뿐만 아니라 작업 수행 능력에도 영향을 미치기 때문에

† Corresponding Author, E-Mail: blue5to7@kfi.or.kr, TEL: +82-31-289-2956, FAX: +82-31-287-1067

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

화재 진압과 구조 활동에 있어서 매우 중요한 장비라 할 수 있다. 소방용 특수방화복은 일반적으로 겹감, 중간층, 안감 3개의 층으로 구성되어 있으며, 각 층마다 고유의 기능이 있다. 겹감의 주기능은 외부의 열 및 화염으로부터 내부를 보호해주는 것이다. 중간층은 외부로부터의 물을 차단하고 내부의 증기(땀)를 배출하는 기능을 가지고 있다. 안감은 외부로부터 침투한 열로부터 피부를 보호할 뿐 아니라 착용감을 향상시키는 기능을 한다. 이러한 특수방화복을 착용함에도 불구하고 소방관들의 화상 피해는 매년 발생하고 있다. 국민안전처에서 발행한 최근 5년간 소방관 공사상자 현황 통계자료에 의하면 화재 진압 중 발생하는 공사상자 비율이 전체의 약 22%를 차지하고 있다<sup>(1)</sup>.

화재 현장에서 소방관에게 화상 피해를 주는 열적 환경 조건으로는 열전달 방식, 노출시간, 열 강도 등이 있다. 만약 노출시간과 열 강도가 같은 조건이라면 열전달 방식에 따라 인체 피해가 달라질 수 있다. 그러나 한국소방산업기술원에서 운영하고 있는 「소방용 특수방화복의 KFI 인정 기준」<sup>(2)</sup>에서는 대류(불꽃) 열원에 대한 열보호 성능시험만 규정되어 있어서 개선이 요구되고 있다. 소방관의 화상 피해를 줄이기 위해서는 특수방화복의 열보호 성능이 강화되어야 한다. 그러기 위해서는 각 열전달 방식에 대응할 수 있도록 열보호 성능 평가기준의 개선이 필요하다.

소방관이 착용한 특수방화복에 미치는 화재 열전달 모형을 Figure 1에 나타내었다. 열전달 현상은 전도, 대류, 복사 3가지가 복합적으로 작용하여 일어나지만 화재로부터의 열에너지 전달은 주로 대류와 복사에 의해서 이루어진다<sup>(3)</sup>. 실제 화재 현장에서 소방관에게 전달되는 열은 복사열이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있으며<sup>(4-6)</sup>, 일반적으로 소방관들이 화재 진압시 받게 되는 복사열 강도는 12.6~29.3 kW/m<sup>2</sup> 범위이다<sup>(7)</sup>. 거대한 화염이 발생했을 때 사람은 본능적으로 신속하게 대피를 하게 되지만, 원거리에서 오는 복사열은 신속하게 감지되지 않기 때문에 방심하다가 화상 피해를 입을 수 있다<sup>(8)</sup>. 따라서 특수방화복의 열보호 성능을 평가하기 위해서는 대류 열원 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 시험 평가도 중요하다. 이번 연구에서는 특수방화복의 성능 평가시험에 복사 열원을 이용한 열보호 성능시험을 도입하기 위해 대류와 복사 열원을 이용한 시험 결과들을 비교하였다.

## 2. 화재 열전달 이론

건물 내부에서 화재가 발생했을 때 가열된 실내 공기는 대류작용에 의해 천장으로 올라가서 천장을 따라 수평이동하게 된다. 복사는 화염과 가열된 천장 및 벽면으로부터 방출된다. 그 밖에 전도는 벽면, 천장, 기타 구조물 등을 통해서 일어난다. 대류는 매질인 유체의 이동에 의해 열이 전달되는 현상이지만, 복사는 전자기파에 의한 에너지 전달이며 매질이 없어도 열전달이 일어나므로 대류와는 에너지

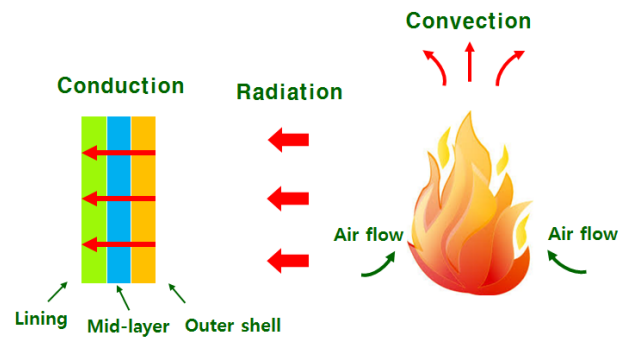


Figure 1. Three mechanisms of heat transfer in fire.

전달 메커니즘이 근본적으로 다르다.

대류에 의한 열전달은 표면의 형상이나 온도, 유체의 온도와 속도, 유체의 열적 물성 값 등에 의해 변화하는 함수이다. 대류에 의한 열전달량은 고온의 벽 온도( $T_w$ )와 벽으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 유체온도( $T_\infty$ )와의 온도차( $\Delta T = T_w - T_\infty$ )에 비례하게 된다. 이 온도차와 열전달률 사이의 비례계수를 대류 열전달계수( $h$ )라 한다. 대류 열전달에 의한 효과를 수학적으로 나타내기 위해 뉴턴의 냉각법칙을 이용하면 식(1)과 같다.

$$q_{conv} = hA(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

여기서  $q_{conv}$ 는 대류에 의한 열전달률,  $h$ 는 대류 열전달계수,  $A$ 는 대류 열전달이 발생하는 단면적,  $T_w$ 는 고온 벽의 온도,  $T_\infty$ 는 벽에서 멀리 떨어진 곳의 유체 온도를 의미한다.

열역학 이론<sup>(9)</sup>에 의하면 이상적인 복사체 또는 흑체(black body)는 절대온도의 4제곱과 표면적에 비례하여 에너지를 복사하며 식(2)와 같이 나타낸다.

$$q_{rad} = \sigma AT^4 \quad (2)$$

여기서  $q_{rad}$ 는 복사에 의한 열전달률,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수로서  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 의 값을 가진다.  $A$ 는 복사 열전달이 발생하는 단면적,  $T$ 는 흑체 표면온도를 의미한다.

식(2)를 Stefan-Boltzmann의 열복사법칙이라 부르며 이상적 복사체인 흑체의 경우에만 적용될 수 있다. 이 식은 열복사에 한해서 유효하고 다른 형태의 전자기복사 현상에는 적용할 수 없다. 두 표면 사이의 순 복사열량은 절대온도의 4제곱의 차이에 비례하는데 식(3)과 같다. 실제 복사에서는 방사율(emissivity)이라고 하는 인자를 식(3)에 고려해야 한다.

$$\frac{q_{rad}}{A} \propto \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

여기서  $T_1$ 은 표면 1의 온도,  $T_2$ 는 표면 2의 온도를 의미한다.

복사열 강도에 대하여 사람이 통증을 느끼기 시작하는

**Table 1.** Threshold Time to Pain for Thermal Radiation Intensity

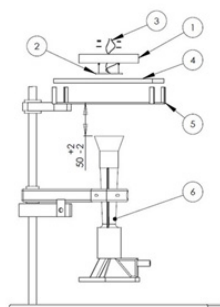
Thermal Radiation Intensity (kW/m <sup>2</sup> )	Threshold Time to Pain (sec)
1.6	60
2.3	40
2.9	30
4.7	16
6.9	9
9.5	6
11.7	4
19.9	2

**Table 2.** Materials of Firefighter's Protective Clothing

Layer	Material
Outer Shell	Aramid 60%+PBI <sup>1</sup> 40%
Mid-layer	Aramid/PTFE <sup>2</sup>
Lining (felt)	Aramid 100%

<sup>1</sup>PBI=polybenzimidazoles, <sup>2</sup>PTFE=polytetrafluoroethylene

시간을 Table 1에 나타내었다<sup>(8)</sup>. Table 1에서 보는 바와 같이 복사열의 강도가 약할 경우 바로 통증을 느끼는 것이 아니라 어느 정도 시간이 흐른 뒤에 통증을 느끼게 된다. 통증을 느끼기 시작하는 한계시간이 지나면 화상을 입게 되는데, 이 과정은 빠르게 진행된다. 특수방화복을 착용할 경우 보다 높은 열유속에도 견딜 수 있기 때문에 화재 진압을 지속적으로 하다가는 본인도 모르게 화상을 입을 위험이 있다.



1. Sensor mounting block
2. Copper calorimeter
3. Thermocouple wires
4. Sensor locating plate
5. Support stand
6. Meker burner

**Figure 2.** KS K ISO 9151 test apparatus (dimensions in millimeters).

**Table 3.** Standards and Experimental Conditions for Thermal Protective Performance

Standard	Heat Source	Incident Heat Flux	Measurement
KS K ISO 9151	Flame	80±2 kW/m <sup>2</sup>	HTI <sup>1</sup> : t <sub>12</sub> (sec) and t <sub>24</sub> (sec)
KS K ISO 17492	Combined flame (50%) and radiant heat (50%)	80±2 kW/m <sup>2</sup>	HTI : t <sub>12</sub> (sec) and t <sub>24</sub> (sec)
KS K ISO 6942	Radiant heat	40±2 kW/m <sup>2</sup>	RHTI <sup>2</sup> : t <sub>12</sub> (sec) and t <sub>24</sub> (sec)

<sup>1</sup>HTI=Heat Transfer Index, <sup>2</sup>RHTI=Radiant Heat Transfer Index,

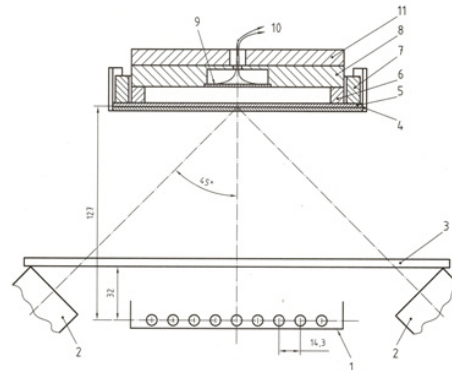
### 3. 실험

S사에서 제조한 특수방화복에 대해 대류와 복사열원에 대한 보호성능 실험을 하였다. 특수방화복의 재질 구성을 Table 2에 나타내었다. 특수방화복의 겉감은 60% 아라미드와 40% PBI(polybenzimidazoles)로 구성되어 있으며, 중간층은 아라미드와 PTFE(polytetrafluoroethylene) 필름, 그리고 안감은 100% 아라미드 재질로 구성되어 있다. 모든 시료는 실험하기 전에 온도 20±2℃, 상대습도 65±2%에서 24시간 이상 컨디셔닝을 하였다. 열보호 성능 실험들은 D대학교 보호복연구소의 ISO 규격 장비들을 이용하였으며 실험조건들을 Table 3에 나타내었다.

대류 열원 노출에 대한 열보호 성능실험은 KS K ISO 9151<sup>(10)</sup> 기준에서 정한 방법에 따라 수행하였으며, 실험 장치를 Figure 2에 나타내었다. ISO 기준에서는 버너를 이용한 불꽃을 대류 열원으로 사용한다. 140 mm×140 mm 크기의 시료를 버너 상부로부터 50 mm 떨어진 위치에 고정시킨 후, 80±2 kW/m<sup>2</sup>의 입사 열유속에 대해 열전달지수를 측정하였다.

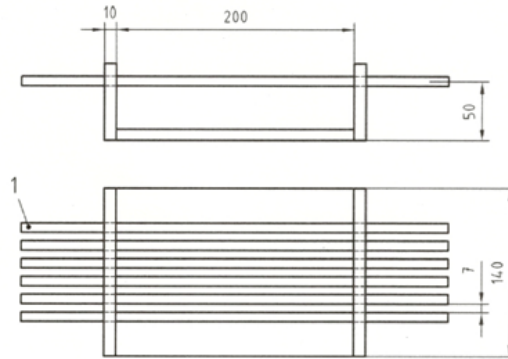
대류 및 복사 열원 동시 노출에 대한 열보호 성능실험은 KS K ISO 17492<sup>(11)</sup> 기준에서 정한 방법에 따라 수행하였으며, 실험장치를 Figure 3에 나타내었다. ISO 기준에서는 복사열원으로 탄화실리콘(SiC) 발열박대를 사용한다. 시료는 150 mm×150 mm 크기이며 복사 열원으로부터 127 mm 떨어진 거리에 위치한다. 전체 입사 열유속은 80 ± 2 kW/m<sup>2</sup>이며, 대류와 복사에너지의 양이 각각 50%인 조건에서 열전달지수를 측정하였다.

복사 열원 노출에 대한 열보호 성능실험은 KS K ISO 6942<sup>(12)</sup> 기준에서 정한 방법에 따라 수행하였으며, 실험 장



- 1. Radiant thermal flux source
- 2. Meker burner
- 3. Water-cooled protective shutter
- 4. Specimen mounting plate
- 5. Test fabric
- 6. Spacer(if used)
- 7. Specimen holding plate
- 8. Sensor assembly
- 9. Copper calorimeter
- 10. Thermocouple wires to recorder
- 11. Weight

Figure 3. KS K ISO 17492 test apparatus (dimensions in millimeters).



1. Silicon carbide rod

Figure 4. KS K ISO 6942 test apparatus and source of radiation (dimensions in millimeters).

치를 Figure 4에 나타내었다. 시료의 크기는 230 mm×80 mm이며, 복사 열원으로부터 시료까지의 거리는 입사 열유속이  $40 \pm 2 \text{ kW/m}^2$ 가 되는 위치로 정하였다. 복사 열원 노출시험에서는 열전달 요인(heat transmission factor, TF)을 계산하였다. 열전달 요인이란 입사 열유속( $Q_0$ )에 대해 투과된 열유속( $Q_c$ )의 비율로서 시험편을 통해 투과되는 열에너지의 비율을 의미하며 식(4)와 같이 나타낸다.

$$TF = \frac{Q_c}{Q_0} \tag{4}$$

여기서  $Q_0$ 는 입사 열유속이고  $Q_c$ 는 투과된 열유속이다.  $Q_c$ 는 식(5)와 같이 표현된다.

$$Q_c = \frac{12MC_p}{A(t_{24} - t_{12})} \tag{5}$$

여기서 M은 열량계 동판의 질량(kg),  $C_p$ 는 구리의 비열 ( $0.385 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ )이며, A는 동판의 면적( $\text{m}^2$ )이다.

모든 실험에서 열전달지수(온도가  $12^\circ\text{C}$  상승하는데 걸리는 시간  $t_{12}$ 와  $24^\circ\text{C}$  상승하는데 걸리는 시간  $t_{24}$ )를 측정하였으며, 같은 조건에서 3회 실험하여 평균값을 데이터로 사용하였다. 미국과 유럽의 방화복 관련 규격은 방화복의 안쪽 온도가  $12^\circ\text{C}$ 와  $24^\circ\text{C}$  상승하는데 소요되는 시간을 중요하게 고려하는데 이는 사람이 화상을 입지 않기 위해 대피할 수 있는 시간이다<sup>(13)</sup>.

#### 4. 실험 결과

특수방화복의 열전달지수( $t_{12}$ ,  $t_{24}$ )를 대류(불꽃) 열원만 사용하였을 때와 대류와 복사 열원을 같은 비율로 함께 사용하였을 때를 비교하여 Figure 5에 나타내었다. 입사 열유속은 모두  $80 \text{ kW/m}^2$ 로 같게 하였다. Figure 5를 보면 대류 열원만 사용하였을 때 열전달 지수  $t_{12}$ 는 13.9초,  $t_{24}$ 는 20.7초였으나, 대류와 복사 열원을 함께 사용했을 때 열전달지수  $t_{12}$ 는 16.9초,  $t_{24}$ 는 25.9초로 증가하였다. 열전달지수가



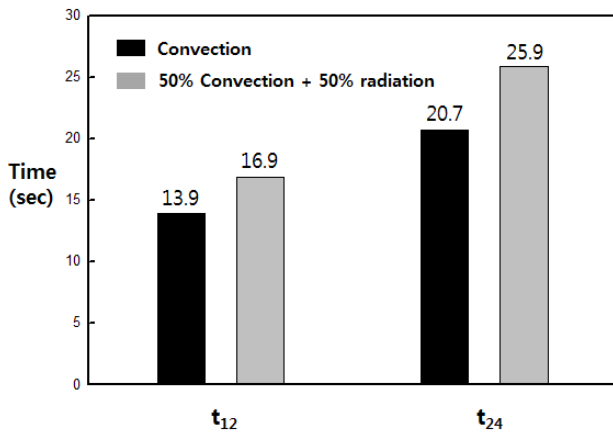


Figure 5. Comparison of heat transfer index against convection heat source and combined convection (50%) and radiation (50%) heat source.

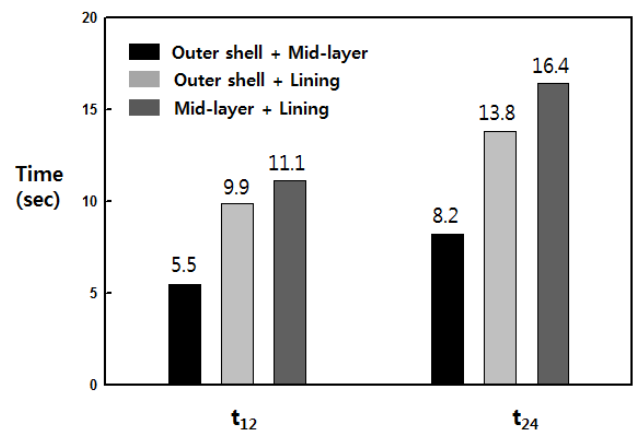
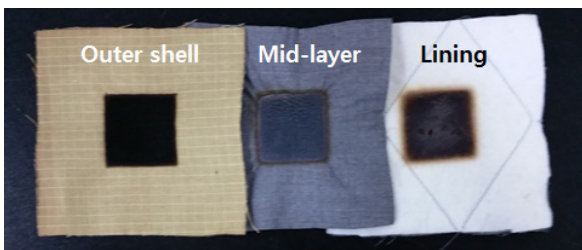
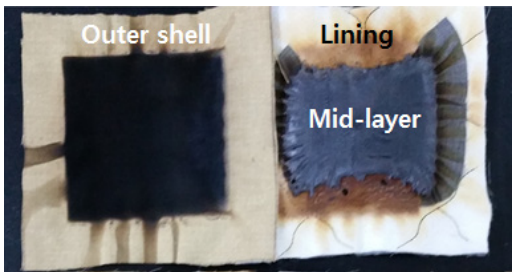


Figure 7. Layer effect on the heat transfer index against convection heat source.



(a) KS K ISO 9151  
(convection heat source)



(b) KS K ISO 17492  
(combined convection and radiation heat source)

Figure 6. Test specimen after thermal protective performance test.

증가하였다는 것은 온도가 상승하는데 시간이 더 많이 걸린다는 뜻이므로 대류 열원보다 복사 열원에 의한 영향이 더 느리게 나타남을 알 수 있다.

Figure 5의 실험에 사용했던 시험편을 Figure 6에 나타내었다. 대류 열원만 사용했을 때와 대류와 복사 열원을 함께 사용했을 때의 입사 열유속을 똑같이 80 kW/m<sup>2</sup>로 하였으나, Figure 6을 보면 중간층과 안감의 상태에 차이를 알 수 있다. 대류와 복사 열원을 함께 사용했을 경우 중간층과 안감의 탄화가 대류 열원만 사용했을 때보다 적게 일어났으나, 중간층은 용융과 수축이 일어나면서 형상을 유지 못하고 있다. 그러나 대류 열원만 사용했을 경우 중간층 표면에 탄화가 많이 생겼으나 형상은 유지되고 있다. 이

결과로부터 아라미드와 PTFE 필름으로 구성된 재질이 겹감 안쪽에 위치할 경우 대류열에 잘 견디기는 하지만 복사열에 대한 내구성이 약함을 알 수 있다. 따라서 특수방화복의 열보호 성능을 평가하기 위해서는 대류 열원 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 평가도 필요하다고 사료된다.

대류 열원에 대해 특수방화복을 구성하는 겹감, 중간층 및 안감이 열보호 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 대류 열원에 대한 열보호 성능 실험은 KS K ISO 9151 기준을 적용하여 수행하였으며, 입사 열유속은 80 kW/m<sup>2</sup>였다. 3겹으로 구성된 특수방화복에서 각 층의 영향을 알아보기 위해 각각 한 층씩 제거하고 테스트를 하였으며 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. Figure 7에서 안감을 제거하였을 때 열전달지수  $t_{12}$ 는 5.5초,  $t_{24}$ 는 8.2초로 가장 낮았고 이어서 중간층, 겹감 순으로 열전달지수가 낮았다. 즉, 대류 열원에 대해 열보호 성능에 영향을 미치는 정도는 안감이 가장 크며, 이어서 중간층, 겹감 순서임을 알 수 있다.

복사 열원에 대해 특수방화복을 구성하는 겹감, 중간층 및 안감이 열보호 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 복사 열원에 대한 열보호 성능 실험은 KS K ISO 6942 기준을 적용하여 수행하였으며 입사 열유속은 40 kW/m<sup>2</sup>였다. Figure 7에서와 마찬가지로 각 층의 영향을 알아보기 위해 각각 한 층씩 제거하고 테스트를 하였으며 그 결과를 Figure 8에 나타내었다. Figure 8의 복사 열원에 대한 열전달지수에서도 안감을 제거하였을 때  $t_{12}$ 가 6.2초,  $t_{24}$ 가 9.8초로 가장 낮았다. 그러나 대류 열원의 경우와 달리 복사 열원에 대해서는 겹감을 제거하였을 때  $t_{12}$ 가 12.5초,  $t_{24}$ 가 18.4초로 중간층을 제거하였을 때( $t_{12}$ =14.1초,  $t_{24}$ =21.9초)보다 열전달지수가 더 낮았다. 따라서 복사 열원에 대해 열보호 성능에 영향을 미치는 순서는 안감이 가장 크고 이어서 겹감, 중간층 순서임을 알 수 있다.

Figure 7과 Figure 8의 결과로부터 특수방화복의 안감은 대류와 복사 열원 상관없이 열보호 성능을 유지하는데 가장 중요한 역할을 함을 알 수 있었다. 그리고 열전달 방식

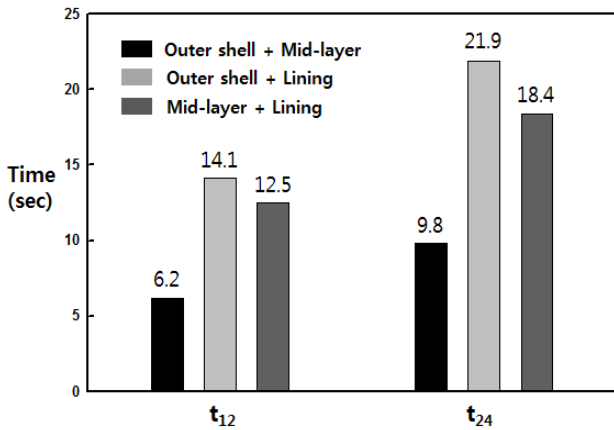


Figure 8. Layer effect on the heat transfer index against radiation heat source.

이 달라지면 재질 구성에 따라 열보호 성능에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이번 실험에서는 대표적인 한 개의 특수방화복 재질 구성에 대해 실험하였으나, 향후 신소재를 적용하거나 층의 배열을 다르게 한 특수방화복 제품이 출시될 경우, 열원의 종류에 따라 열보호 성능이 다르게 나올 수 있다. 따라서 특수방화복의 열보호 성능을 평가하기 위해서는 대류 열원에 대한 시험 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 시험도 반드시 필요하다.

Figure 8의 데이터를 이용하여 열전달 요인(heat transmission factor, TF)을 계산하여 Table 4와 Figure 9에 나타내었다. Table 4를 보면 입사 열유속 40 kW/m<sup>2</sup>에 대해 투과된 열유속의 비는 안감을 제거하였을 때 0.462로 가장 컸으며, 이어서 겹감을 제거하였을 때 0.282, 중간층을 제거하였을 0.213순이었다. 이와 같이 복사열에 대한 열전달 요인 값의 비교에 의해서도 안감이 열보호 성능에 가장 큰 영향을 미치며 이어서 겹감, 중간층 순서임을 확인할 수 있었다.

특수방화복의 총무게에서 안감이 차지하는 비율이 가장 크기 때문에 경량화를 하거나 성능을 강화하기 위해서는 안감의 재질 개선이 가장 중요하다. 제조업체에서는 특수방화복의 경량화를 위해 다양한 시도를 하고 있는데, 안감의 재질을 개선하여 경량화할 경우 열보호 성능이 약화될 우려가 있으므로 열보호 성능시험을 통해 성능을 반드시 확인해야 한다. 이 때 대류 열원 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 열보호 성능시험까지 확인한다면 안전도를 더 높일 수 있다.

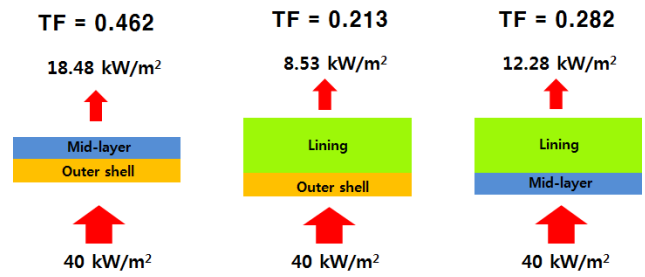


Figure 9. Layer effect on the heat transmission factor against radiation heat source.

또한 안감의 열보호 성능이 우수하므로 열보호 성능을 더 강화하기 위해서는 겹감과 중간층의 재질을 개선하는 것이 더 효과적일 수도 있다. 특히 복사 열원에 대한 보호 성능을 강화하기 위해서는 복사열에 대해 내구성이 약한 중간층의 재질 개선이 필요함을 앞의 결과에서 확인하였다. 복사 열원에 대한 열보호 성능시험이 도입된다면 제조업체에서는 특수방화복의 재질 개선을 위해 더 노력할 것이며 이는 특수방화복의 품질 향상으로 이어져 소방관의 안전도 향상에 기여할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

화재가 발생했을 때 화염으로부터 소방관에게 가장 크게 영향을 미치는 열전달 요인은 복사이며 이어서 대류이다. 그러나 한국소방산업기술원에서 운영하고 있는 「소방용 특수방화복의 KFI 인정기준」에서는 대류(불꽃) 열원에 대한 열보호 성능시험만 규정되어 있어서 개선이 요구되고 있다. 따라서 특수방화복의 성능 평가시험에 복사 열원을 이용한 열보호 성능시험을 도입하기 위해 대류와 복사 열원에 대해 시험하고 비교하였다.

입사 열유속이 같은 조건(80 kW/m<sup>2</sup>)일 경우, 대류와 복사열을 같은 비율로 혼합한 열원에 대한 열전달지수(t<sub>12</sub>, t<sub>24</sub>)가 대류 열원만 사용했을 때보다 높게 나왔다. 이는 대류에 비해 복사에 의한 열전달 영향이 느리게 나타났음을 의미한다. 또한 아라미드와 PTFE 필름으로 구성된 중간층이 대류 열원에 잘 견디기는 하지만 복사열에 대한 내구성이 약함을 확인하였다. 대류와 복사 열원에 대해 특수방화복의 열보호 성능 결과가 다르게 나오는 것은 대류와 복사의 열전달 메커니즘이 근본적으로 다르기 때문이다.

Table 4. Layer Effect on the Heat Transmission Factor Against Radiation Heat Source

Layer Set up	Outer Shell+Mid-layer	Outer Shell+Lining	Mid-layer+Lining
Incident Heat Flux Density (Q <sub>0</sub> )	40 kW/m <sup>2</sup>		
T <sub>24</sub> - T <sub>12</sub>	3.6 sec	7.8 sec	5.9 sec
Transmitted Heat Flux Density (Q <sub>c</sub> )	18.48 kW/m <sup>2</sup>	8.53 kW/m <sup>2</sup>	11.28 kW/m <sup>2</sup>
TF	0.462	0.213	0.282

대류와 복사 열원에 대해 특수방화복을 구성하는 겹감, 중간층 및 안감이 열보호 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 3겹으로 구성된 특수방화복에서 각 층의 영향을 알아보기 위해 각각 한 층씩 제거하고 테스트를 하였다. 대류 열원에 대한 열보호 성능의 경우 안감, 중간층, 겹감 순서로 보호 성능에 미치는 영향이 컸으며, 복사 열원에 대해서는 안감, 겹감, 중간층 순서로 보호 성능에 미치는 영향이 컸다. 특수방화복의 안감은 대류와 복사 열원 상관없이 열보호 성능을 유지하는데 가장 중요한 역할을 하였다. 그리고 열전달 방식이 달라지면 재질 구성에 따라 열보호 성능에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 확인하였다.

향후 다양한 소재를 적용한 새로운 제품이 출시될 경우, 열보호 성능이 열원의 종류에 따라서 다르게 나올 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 특수방화복의 열보호 성능을 평가하기 위해서는 대류 열원에 대한 시험 뿐만 아니라 복사 열원에 대한 시험도 반드시 필요하다. 이는 특수방화복의 품질 향상을 유도함으로써 소방대원의 화상을 줄이는데 기여할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국민안전처 차세대핵심소방안전기술개발사업 (NEMA-차세대-2014-45)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. "Ministry of Public Safety and Security's Statistical Data" (2015).
2. KFI Standard, "KFI Certification for Firefighting Protective clothing", Korea Fire Institute (2014).
3. R. E. Scott, "Textile for Protection", Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK (2005).
4. J. K. Lee, Y. J. Bang, C. H. Bang and J. S. Kwon, "Study on the Thermal Protective Performance Measurements of Fire Fighter's Protective Clothing for Low Level Radiant Heat Exposures", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 1-8 (2014).
5. J. K. Lee and J. S. Kwon, "Effect of Fire Fighter's Turnout Gear Materials Air Gap on Thermal Protective Performance", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 97-103 (2014).
6. H. S. Yoo, N. Pan and G. Sun, "Changes of Physical and Mechanical Properties of Firefighter Protective Clothing after Radiant Heat Exposure", Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, Vol. 23, No. 6, pp. 853-863 (1999).
7. W. P. Behnke and R. E. Seaman, "Laboratory Tests Which Predict End-use Performance under High Temperature Conditions", Journal Applied Polymer Science : Applied Polymer Symposia, 9, pp. 49-62 (1969).
8. KOSHA CODE P-31-2001, "The Prediction Technique accident damage", Korea Occupational Safety & Health Agency (2001).
9. J. P. Holman, "Thermodynamics", 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, USA (1988).
10. KS K ISO 9151, "Protective Clothing against Heat and Flame-Determination of Heat Transmission on Exposure to Flame", Korean Agency for Technology and Standards (2007).
11. KS K ISO 17492, "Clothing for Protection against Heat and Flame - Determination of Heat Transmission on Exposure to both Flame and Radiant Heat", Korean Agency for Technology and Standards (2007).
12. KS K ISO 6942, "Protective Clothing-Protection against Heat and Fire-Method of Test: Evaluation of Materials and Material Assemblies When Exposed to a Source of Radiant Heat", Korean Agency for Technology and Standards (2011).
13. 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).