

노출시간과 열강도에 따른 복사열 노출후의 소방보호복의 물리적 특성과 역학적 특성 변화

유 화 숙 · N. Pan* · G. Sun*

연세대학교 의류과학 연구소, California대학교 의류학과*

Changes of Physical and Mechanical Properties of Firefighter Protective Clothing After Radiant Heat Exposure

Yoo Hwa Sook · Ning Pan* · Gang Sun*

Research Institute of Clothing and Textiles, Yonsei University

*Devision of Textiles and Clothing, University of California at Davis

(1999. 3. 31 접수)

Abstract

The changes of physical properties(thickness, weight, air permeability) and mechanical properties(abrasion resistance, breaking load and displacement) of samples were determined after heat exposure by a RPP tester. The effect of exposure time and heat flux intensity on the changes and the relationship between physical properties and mechanical properties were investigated. FR treated cotton, Kevlar/PBI and Nomex with different structural characteristics were chosen for specimens. The changes of physical properties and mechanical properties were calculated based on their initial values before heat exposure. As exposure time and heat flux intensity increased, thickness, air permeability, abrasion resistance and breaking load of the fabrics increased and breaking displacement decreased after heat exposure. The longer exposure time and the higher heat flux intensity, the more changes of those properties. Heat flux intensity was more effective on the changes. They showed to be affected by an interplay of shrinkage and pyrolysis products loss. The changes of thickness and abrasion resistance showed to be higher for plain weave fabric and those of air permeability and breaking load and displacement for twill weave fabric. While FR treated cotton which have high RPP value experienced serious and detrimental changes after heat exposure, Kevlar/PBI which has low RPP value showed no high changes. In conclusion, it could be confirmed that when total performance of a protective clothing is estimated, retention capability of physical and mechanical properties after heat exposure as well as RPP value must be considered.

Key words: firefighter protective clothing, physical property, mechanical property, exposure time, radiant heat flux intensity; 소방보호복, 물리적특성, 역학적특성, 노출시간, 복사열강도

* 이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 박사후 연수과정 연수비 지원에 의하여 연구되었음.

I. 서 론

소방보호복에 사용되는 직물은 기본적으로 고온의 열에 대해 안정해야 한다. 더구나 소방복은 한번 입고 버리는 것이 아니라 큰 문제가 발견되지 않는 이상 계속해서 착용하게 된다. 소방복이 비록 고온의 열에 안정한 직물로 만들어졌다 하더라도 연속적으로 고온의 열에 노출되면 직물의 구조가 변형되어 무게, 두께, 공기투과도와 같은 보호성능과 관련된 물리적 특성들이 변할 수 있다. 그러나 방열직물들은 열에 안정하므로 극심한 조건이 아닌 이상 그 변화가 작아 이를 발견하기 쉽지 않으며, 소방복의 경우에는 작은 변화라 하더라도 소방수의 안전에 직접적인 영향을 끼칠수 있으므로 열에 노출된 후 이러한 직물 특성들이 어떻게 변화하고 이것이 다른 보호성능과 관련된 특성에 어떤 영향을 주는지를 알아보는 것은 매우 중요하다.

불 속에서 작업중인 소방수에게 가장 큰 피해를 입힐 수 있는 경우는 보호복에 구멍이 생긴다거나 직물이 찢기는 경우이다¹⁾. 왜냐하면 외부로부터의 열은 직물을 통해 전달되는데 직물에 구멍이 생기거나 찢기게 되면 열전달이 크게 변하기 때문이다. 따라서, 소방복직물의 마모강도와 인장강·신도특성은 보호복의 기능성 측면에서 고려되어야 할 중요한 특성이다. 특히 소방수의 작업강도는 대단히 높아 직물은 항상 과도한 압박과 신장을 받게 되며, 만약 이러한 직물이 열노출에 의해 형태변화가 일어나 물리적 특성들이 변하면, 작은 압력에 의해서도 강건성(integrity)을 잃게 되어 더 이상 보호복으로써의 기능을 발휘하지 못할 수도 있기 때문이다²⁾. 그러므로 열노출후에 이들의 구조변화를 나타내주는 물리적 특성과 강건성을 나타내주는 역학적 특성들의 제기능성 유지는 소방수의 안전과 직결되는 문제라고 할 수 있다.

고온의 열에 노출되는 직물의 변성에 크게 영향을 미치는 요인은 열적 환경조건과 노출되는 직물의 특성이다. 열적 환경조건으로는 열 전달방식, 노출시간과 열 강도를 들 수 있다. 소방복에 관한 이전의 연구들은 화재 현장에서의 불꽃에 대한 노출

때문에 대류에 관한 것들이 많았지만^{3~6)}, 실제 화재 현장에서 소방수들에게 전달되는 열은 복사열이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다. 불꽃노출에 관한 연구¹⁾에서 연료연소시에 발생되는 화재 경우에도 그 열의 80%가 복사열을 포함하므로 불꽃이 없다면 복사열만 고려해도 무방할 것이고 불꽃이 있는 경우라도 대류에 의한 열노출보다는 복사열노출을 일차적으로 고려해야 한다고 하였다. 또 다른 요인으로 노출시간과 열강도를 들 수 있는데, 이들은 의복의 외층표면에 의해 흡수되는 열에너지와 의복 외층에서 내층으로의 열 전달속도를 결정하기 때문에 직물의 변성에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 소방수들이 작업시 받게 되는 복사열 강도는 $0.3\sim0.7 \text{ cal/cm}^2/\text{sec}$ 로 알려져 있다⁷⁾. 그러나 동일한 시간동안 동일한 강도의 열에 노출된다 하더라도 직물의 구성섬유, 구조적 특성, 조직에 따라 직물의 특성 변화는 다르게 나타날 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 RPP(Radiant Protective Performance) Tester를 이용하여 소방보호복에 사용되는 6종류의 방열직물들을 일정시간과 열강도에서 노출시켜 열노출에 따른 무게, 두께, 공기투과도 등의 구조변화를 나타내는 물리적 특성변화를 살펴보고 마모강도, 인장강·신도와 같은 역학적 특성변화를 측정하여 이들간의 관계를 알아보며, 직물의 특성에 따라 그 변화가 어떻게 나타나는지를 알아보자 하였다.

II. 실험방법

1. 시료

시료는 소방보호복에 사용되는 6가지 종류의 방열직물을 이용하였으며, 시료의 특성은 Table 1과 같다. 모든 직물은 AATCC Test Method 135 procedure B에 준하여 세탁하였으며, $21\pm1^\circ\text{C}$, $65\pm5\%$ RH조건에서 24시간 이상을 방치한 후 사용하였다.

2. 방열성

2-1. Radiant Protective Performance

Tester

복사열노출과 방열성 평가를 위해 RPP(Radiant

Table 1. Characteristics of samples

Sample	Fiber (Type)	Color	Structure	Fabric Count (W × F/in ²)	Thickness (mm)	Weight (kg/m ²)	Bulk Density (g/cm ³)
TFRC	FR Cotton*	White	Twill	96 × 43	0.711	0.256	0.360
TKPB	Kevlar/PBI 60/40	Yellow	Twill	65 × 55	0.434	0.153	0.316
TNOM	Nomex	Green	Twill	76 × 53	0.762	0.289	0.378
PNO1	Nomex	Blue	Plain	68 × 44	0.445	0.155	0.322
PNO2	Nomex	Blue	Plain	68 × 45	0.511	0.203	0.364
PNO3	Nomex	Blue	Plain	50 × 41	0.597	0.251	0.380

*: FYROL 76 chemical finish

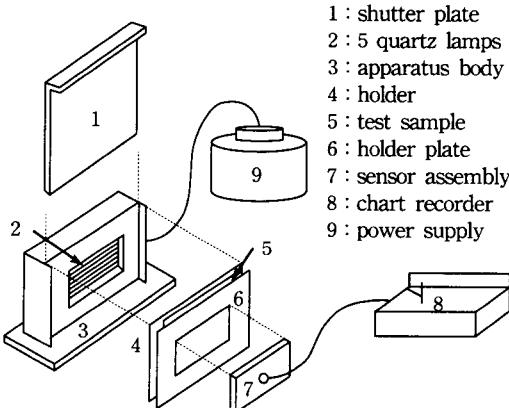


Fig. 1. Radiant Protective Performance Tester.

Protective Performance) Tester를 이용하였다 (Fig. 1). 이는 NFPA(National Fire Protection Association) 1993년의 기준에 준하여 제작된 것으로, 수직으로 놓여진 복사열원, 시료를 잡아주는 금속으로 제작된 시료홀더, 열차단판, 센서, 기록계로 구성되어 있다. 수직으로 놓여진 복사열원은 시험관형 500watt 적외선 투명 석영 램프(5 in.) 5개로 구성되어 있다. 시료는 시료홀더의 중앙에 오도록 장치한다. 이 때 센서는 시료홀더뒤에 접촉된 채 놓여 있게 되어 시료와 센서는 열원앞에 놓여지게 되며, 이 때 시료와 램프표면까지의 거리는 1 in.가 된다. 열원은 60초 동안의 예열(warm up)이 필요하며, 예열이 되는 동안 시료에 열이 닿는 것을 완전하게 차단하기 위해 열차단판(shutter)은 시료가 걸려있는

시료홀더와 램프사이에 놓이게 된다. 60초 동안의 예열이 끝난 후 열차단판을 제거하고 기록계를 작동시켜 시료를 통한 온도상승을 측정하게 된다. 소방보호복의 특성에 대한 열 노출시간의 효과는 0.25cal/cm²/sec에서 25초, 50초, 75초로 노출시켜 알아보았고 복사열강도효과는 25초 동안 0.25, 0.5, 0.75cal/cm²/sec에 노출시켜 살펴보았다.

2-2. Radiant Protective Performance Value(RPP value)

센서 반응에 의해 기록계에서 그려진 차트로부터 RPP value를 구하였다. ASTM D 4108-87 (Standard Test Method for Thermal Protective Performance of Materials for Clothing; Open Flame Method)에서 만들어진 chart overlay를 이용하여 기록계가 읽어낸 차트위에 겹쳐놓고 센서 반응 커브와 overlay 커브가 교차하는 지점의 시간을 읽고 다음식에 의해 RPP value를 계산하였다. 적어도 5개이상의 시료로 부터 얻은 값의 평균값을 취했다.

$$\text{RPP Value (cal/cm}^2\text{)}$$

$$= \text{Thermal Flux(cal/cm}^2/\text{sec}) \times \text{Time(sec)}$$

3. 물리적 특성

3-1. 무게

ASTM D 3776-85에 준하여, 노출전(a)과 노출직후(b)의 무게를 측정하였다. 열노출된 시료를 표준상태의 실험실에 24시간동안 방치한 후(c) 다시 무게를 측정하였다. 열노출전후의 무게변화(a-b)를 총 무게

손실로 하였다. 열노출시 무게손실은 수분손실과 산화물손실로 구성되므로⁴⁾, 열노출전의 무게와 24시간 방치후의 열 노출된 시료의 무게변화(a-c)는 산화물손실로 간주하였다. 열노출후의 무게(b)와 24시간 동안 방치된 열 노출된 시료의 무게(c)간의 차이(c-b)는 수분손실로 간주하였다. 변화량은 열노출이전의 무게를 기초로 하여 계산하였으며, 적어도 5개의 시료로 부터 얻은 값의 평균값을 보고하였다.

3-2. 두께

ASTM D 1777-75에 준하여 열노출전후에 측정하였다. 적어도 5개 시료의 평균값을 보고하였는데, 각 시료당 미리 정해진 5군데의 두께를 측정하여 평균값을 구하여 그 시료의 대표값으로 하였다.

3-3. 공기투과도

ASTM D 737-75에 준하여 열노출 전후에서의 변화를 측정하였다. 열노출된 시료는 표준상태의 실험실에서 24시간 방치한 후에 측정하였으며, 열노출 이전의 공기투과도를 기준으로 공기투과도 변화율을 계산하였으며, 5개 시료의 평균값을 보고하였다.

4. 역학적 특성

4-1. 마모강도

ASTM D 3884-80의 Rotary Platform Method에 준하여 Rotary Platform Double Head Abraser(Taber 5150 Abraser, Taber Industries, NY, U.S.A.)를 이용하여 열노출전후의 마모강도를 측정하였다. 열노출에 따른 직물의 마모강도변화를 알아보기 위해 표준상태의 실험실에서 24시간 방치한 후에 다시 마모강도를 측정하였으며, 5개 시료의 평균값을 보고하였다.

4-2. 인장강도 및 신도

ASTM D 1682의 시험방법에 준하여 인스트롱테스터(Instron 4400, Instron Corp., U.S.A.)를 이용하여 측정하였으며, 절단시 최대 강도와 신도를 이용하여 비교하였다. 열노출된 시료는 표준상태의 실험실에서 24시간 방치한 후에 측정하였으며, 5개 시료의 평균값을 보고하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 노출시간의 영향

1-1. 무게, 두께, 공기투과도 변화

노출시간 증가에 따른 무게변화를 살펴보면(Table 2), 시간이 증가할수록 무게손실은 증가하였으나 그 변화율은 점차 감소하였다. 케블라/PBI혼방직물(TKPB) > 방염면직물(TFRC) > 능직노멕스(TNOM) > 평직노멕스, PNO3 > 평직노멕스 PNO2 > 가장 가벼운 평직노멕스, PNO1 순이었다. 열로 인한 직물의 무게손실은 수분손실과 산화물손실에 의해 발생되는데, 본 실험조건에서의 무게손실은 주로 수분손실에 의한 것으로 수분함유량이 높을수록 큰 무게손실을 나타내었고, 산화물손실은 상당히 적어 대체로 표면섬유가 손실된 것으로 추정된다⁴⁾. 직물이 열에 노출되면 먼저 수분과 휘발성물질이 손실되고 직물이 산화되면서 분해가 발생하여 무게손실이 일어나게 된다⁸⁾. 수분이 직물로부터 증발될 때 기화열이 손실되어 열전달속도를 감소시키므로, 결과적으로 수분함유량이 높은 직물에서 온도상승이 늦추어져 산화물손실이 적게 생긴 것이다.

구조가 다른 4종류의 노멕스의 경우, 수분손실은 4.63~4.79%로 비슷하였으나 산화물손실은 시간이 증가할수록 시료간의 차이가 증가하였으며, 두껍고 무거운 시료일수록 커서 TNOM > PNO3 > PNO2 > PNO1 순으로 나타났다. 이를 직물의 방열성을 비교해 보기 위해 RPP값을 측정한 결과(Table 3), 무겁고 두꺼울수록 RPP값이 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 두껍고 무거운 시료일수록 방열성이 우수하므로 열에 의한 영향도 상대적으로 적을 것으로 추측할 수 있으나 산화물손실결과는 다르게 나타났다. 이는 얇고 가벼운 시료의 경우 열에 노출되면 시료를 통해 바로 열이 전달되지만, 두껍고 무거운 시료의 경우에는 열통과를 지연시켜 직물내에 열을 오랫동안 갖고 있게 되어 직물이 더 크게 손상되었기 때문으로 추측된다.

시료의 물리적 형태 변화를 나타내는 또 한가지 특성으로 두께변화를 들 수 있는데, 50초까지는 큰 변화가 나타나지 않았으나 75초에서는 노멕스 4종류

Table 2. Total weight loss, water loss and pyrolysis products loss by exposure time and heat flux intensity
(unit : %)

Sample		Exposure Time (sec)				Heat Flux Intensity (cal/cm ² /sec)			
		0	25	50	75	0	0.25	0.50	0.75
TFRC	TWL*	0.00	6.68	7.76	8.04	0.00	6.68	7.79	22.12
	WL**	0.00	6.46	7.37	7.47	0.00	6.46	7.11	7.43
	PPL***	0.00	0.22	0.39	0.57	0.00	0.22	0.68	14.59
TKPB	TWL	0.00	7.55	8.55	8.71	0.00	7.55	9.25	9.93
	WL	0.00	6.99	7.68	7.81	0.00	6.99	8.15	8.45
	PPL	0.00	0.56	0.87	0.90	0.00	0.56	1.10	1.48
TNOM	TWL	0.00	5.14	6.17	6.46	0.00	5.14	6.61	8.05
	WL	0.00	4.36	4.65	4.72	0.00	4.36	4.48	4.66
	PPL	0.00	0.78	1.52	1.74	0.00	0.78	2.13	3.39
PNO1	TWL	0.00	4.95	5.51	5.68	0.00	4.95	6.88	7.57
	WL	0.00	4.16	4.62	4.79	0.00	4.16	5.12	4.71
	PPL	0.00	0.79	0.89	0.89	0.00	0.79	1.76	2.86
PNO2	TWL	0.00	5.04	5.84	5.98	0.00	5.04	6.61	8.34
	WL	0.00	4.49	4.62	4.71	0.00	4.49	4.69	4.85
	PPL	0.00	0.55	1.22	1.27	0.00	0.55	1.92	3.49
PNO3	TWL	0.00	4.91	5.80	6.19	0.00	4.91	6.56	8.29
	WL	0.00	4.27	4.61	4.63	0.00	4.27	4.60	4.74
	PPL	0.00	0.64	1.19	1.56	0.00	0.64	1.96	3.55

WL* : total weight loss WL** : water loss

PPL*** : pyrolysis products loss

Table 3. RPP values of samples

	TFRC	TKPB	TNOM	PNO1	PNO2	PNO3
RPP Value (cal/cm ²)	9.01	7.56	10.37	6.60	8.13	9.13

Table 4. Thickness retention by exposure time and heat flux intensity

(unit : %)

Sample	Exposure Time (sec)				Heat Flux Intensity (cal/cm ² /sec)			
	0	25	50	75	0	0.25	0.50	0.75
TFRC	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	103.09	77.54
TKPB	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	101.25	106.07
TNOM	100.00	100.00	100.00	101.61	100.00	100.00	107.87	109.55
PNO1	100.00	100.00	101.32	103.07	100.00	100.00	111.53	117.54
PNO2	100.00	100.00	100.00	101.72	100.00	100.00	109.47	115.30
PNO3	100.00	100.00	100.00	103.57	100.00	100.00	108.94	113.46

가 모두 증가하는 경향을 띠는 것으로 나타났다 (Table 4). 그러나 PNO1과 구조적 특성이 비슷한

케블라/PBI혼방직물인 TKB는 변화를 나타내지 않아 상당히 우수한 형태적 안정성을 갖는 것으로

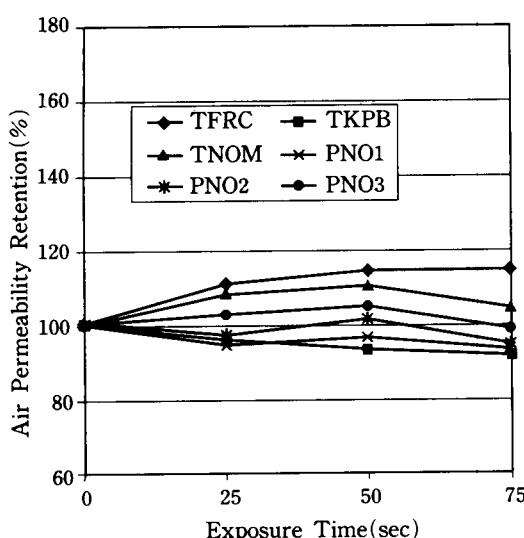


Fig. 2. Air permeability changes by exposure time at $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$.

생각된다. TPP tester에 의한 열노출시 특성변화를 측정한 연구⁴⁾에서도 노멕스가 lateral shrinkage가 발생하여 두께가 많이 증가하였고 케블라의 경우에도 약간 증가하였으나 PBI의 경우에는 거의 두께변화가 나타나지 않은 것으로 보고하였다. 이러한 결과를 통해서 볼 때, 케블라/PBI혼방직물의 형태안정성은 PBI에 의한 것으로 생각된다.

무게와 두께변화는 열노출후 형태변화를 나타내 줄 수 있는 중요변수이나 큰 형태변화가 없을 때 공기투과도는 직물의 구조가 변화되었다는 것을 나타내 줄 수 있는 또 다른 구조적 특성이므로 공기투과도 변화를 측정해 보았다(Fig. 2). 방염면직물 TFRC, 능직노멕스 TNOM, 평직노멕스인 PNO3과 같이 무겁고 두꺼운 시료는 열노출 후 증가되었고 상대적으로 가볍고 얇은 케블라/PBI혼방직물과 다른 두 노멕스에서는 비교적 적은 변화지만 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 앞의 무게손실과 두께변화에서 본 것처럼 직물의 표면섬유손실과 수축현상에 의한 것으로 추측된다. 방염면직물의 경우에는 열노출시 직물내외부에 있는 합인가공제의 저온 휘발성 물질이 먼저 휘발되고 남아있는 가공제의 일부가 열에 의해 분해되어 비록 산화물손실이 적음에도 불구하고

고 열노출이전에 비해 공기투과도가 증가한 것이다. 상대적으로 산화물 손실이 큰 PNO3, TNOM의 경우에도 공기투과도 증가를 나타내었다. 그러나 케블라/PBI혼방직물과 얇고 가벼운 PNO1, PNO2 노멕스에서는 공기투과도가 약간 감소하는 것으로 나타났다. 두께변화에서 보면(Table 4), 25초, 50초 동안 노출시킨 경우 이들 직물에서 두께변화를 나타내지 않았으나 공기투과도가 감소된 것으로 보아 두께에 영향을 미칠 정도는 아니지만 수축이 발생한 것으로 생각된다.

1-2. 마모강도, 인장강·신도변화

보호복의 경우 어떤 경우에서도 그 직물이 처음의 형태를 유지하는 것은 착용자의 생명과 바로 직결되기 때문에 착용중 구멍이 난다거나 뜯어지거나 파손되는 일이 없어야 한다. 따라서 소방복은 열노출이후에도 우수한 역학적 특성을 유지하여야 한다. 특히, 소방수들은 진화작업시 무거운 소화기구나 장비들을 이용하고 과도한 육체노동을 하므로 다른 보호복에 비해 소방보호복은 우수한 마모강도와 인장강·신도특성이 요구된다. 따라서 고온의 복사열노출후 마모강도, 인장 강도와 신도변화를 측정하여 보았다.

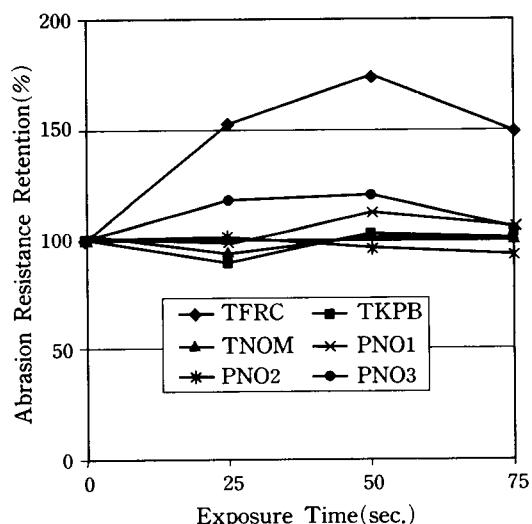


Fig. 3. Abrasion resistance changes by exposure time at $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$.

마모강도는(Fig. 3) 열노출후 시간에 따른 차이는 없었으나 대체로 증가하는 경향을 나타내었다. 방염면직물이 가장 크게 증가하였는데, 가공에 의해 직물표면이 빨리 탄화가 시작되어 표면이 경화되어 이 같은 결과가 나온 것으로 추측된다.

인장강도변화를 측정한 결과(Fig. 4.) 열노출후 대체로 증가하는 경향을 나타내었지만 큰 변화를 나타내지는 않았다. 그러나 가장 큰 산화물손실을 나타내었던 두껍고 무거운 능직의 노렉스, TNOM에서는 시간증가에 따라 뚜렷한 강도 증가를 나타내었다.

신도변화에서는(Fig. 5) 대체로 감소하는 경향을 나타내었으나 시간에 따른 일관된 경향이 나타나지는 않았으며, 마모강도나 인장강도변화에 비해 그 변화량이 적었다. 산화물손실이 적고 표면경화현상이 발생한 방염면직물의 감소가 가장 컸다.

위의 결과를 종합해볼 때, 이같은 조건에서의 열노출은 산화물손실과 수축을 적게 발생하여 무게와 두께, 공기투과도와 같은 물리적 특성을 크게 변화시키지는 않았으나 이러한 작은 변화에도 마모강도, 인장강·신도가 변화하여 같은 성분의 직물에서는 두껍고 무거울수록, 방열성이 클수록, 큰 변화를 경험하는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 가볍고 얇을수록 열투과가 수월하여 시료자체가 큰 영향을 안 받지만, 두껍고 무거운 시료에서는 열 투과속도를 저연시켜 직물내부에 열을 간직하므로 열에 의한 영향을 더 받기 때문으로 추측된다.

2. 열강도의 영향

2-1. 무게, 두께, 공기투과도 변화

열강도가 증가할수록 노출시간에서의 결과와 마찬가지로 무게손실은 증가하였고 특히, 방염면직물의 경우 $0.75\text{cal/cm}^2/\text{sec}$ 에서 상당히 큰 무게손실을 나타내었다(Table 2). 방염면직물을 제외하고 무게손실은 앞의 결과와 마찬가지로 수분손실에 의한 것이었으나, 방염면직물의 경우에는 산화물손실에 의한 것으로 심각한 열분해가 발생한 것을 알 수 있다.

이러한 무게변화를 노출시간에서의 결과(Table 2)와 비교해보면 수분손실은 두조건에서 비슷하게

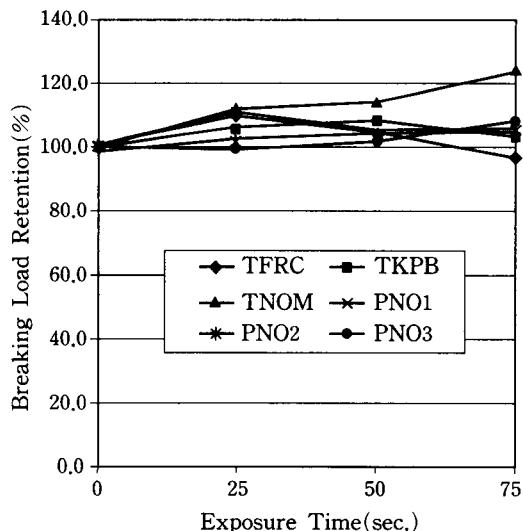


Fig. 4. Breaking load changes by exposure time at $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$.

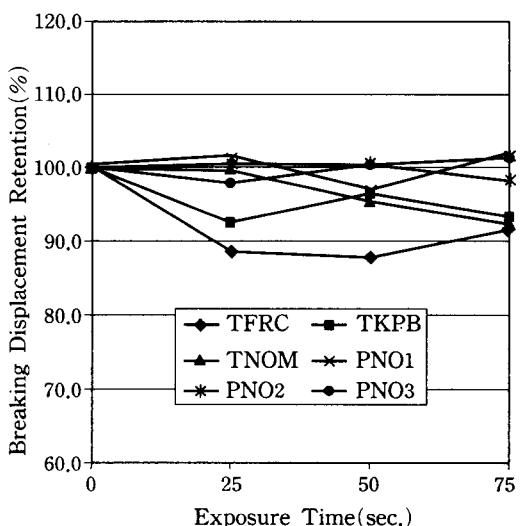


Fig. 5. Breaking displacement changes by exposure time at $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$.

나타난 반면, 산화물손실에서는 열강도를 증가시킨 경우 훨씬 크게 일어난 것을 볼 수 있다. 따라서, 열노출에 따른 무게변화는 노출시간보다 열강도의 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

두께는 열노출후 증가되었으며, 시간변화에 따른

변화보다 그 양이 큰 것을 볼 수 있었다. 그러나 방염면직물은 심각한 열분해를 경험하여 $0.75\text{cal/cm}^2/\text{sec}$ 에서 오히려 두께가 감소되었다(Table 4).

케블라/PBI혼방직물이 가장 적은 무게와 두께변화를 나타냈는데 시료중 가장 얇고 가볍다는 구조적 특성을 고려한다면 열에 대해 상당히 우수한 형태안정성을 갖는 것을 알 수 있다. 일반적으로 방염가공면직물은 대략 300°C 에서 분해되고⁸⁾, 아라미드계 직물의 경우에는 595°C , PBI직물의 경우에는 640°C 에서 분해된다⁹⁾. 따라서 케블라/PBI혼방직물의 우수한 형태안정성은 PBI 때문으로 생각된다.

방염면직물의 경우에는 $0.5\text{cal/cm}^2/\text{sec}$ 까지는 타직물과 큰 차이를 보이지 않았으나 $0.75\text{cal/cm}^2/\text{sec}$ 에서는 큰 무게와 두께변화를 나타내면서 방열직물로써의 역할을 거의 상실하는 것을 볼 수 있다. 앞의 RPP값을 고려해보면(Table 3), 방염면직물은 상당히 우수한 방열성을 갖지만, 열노출후 무게와 두께변화를 보면, 열노출후에는 심한 형태변화가 일어나 더 이상의 보호성은 기대할 수 없을 것이다. 방열성이 우수하여 내부로의 열전달은 늦지만 열전달 과정중 구조가 와해되어 약화된다면, 높은 방열성 수치는 더 이상 의미가 없기 때문이다. 그러므로 직물의 보호성능은 방열성 수치뿐만 아니라 열노출후의 특성변화도 함께 측정해야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 앞의 노출시간 결과와 비교해보면, 노출시간조건과 같이 비교적 저온에서 장시간 노출의 경우에서는 직물의 구조적 특성에 의한 차이를 나타내어 구조적 특성이 형태안정성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났으나, 열강도조건처럼 단시간의 노출이라도 고온에서의 노출은 시료의 구성성분에 따라 뚜렷한 차이를 나타내어 직물의 구조적 특성보다는 구성성분의 영향이 더 큰 것을 알 수 있었다.

열강도를 증가시켜 가면서 열노출후 공기투과도의 변화를 살펴본 결과(Fig. 6) 대체로 열강도가 증가할수록 수축에 의해 직물구조가 더 춤촘해져 공기투과도는 감소하였다. 그러나 방염면직물의 경우에는 $0.75\text{cal/cm}^2/\text{sec}$ 에서 큰 공기투과도를 나타내어 앞의 무게변화에서 본 것처럼 시료가 완전히 탄화되면서 구조가 와해된 것을 알 수 있다.

직물의 조직에 따른 노출시간과 열강도의 영향을

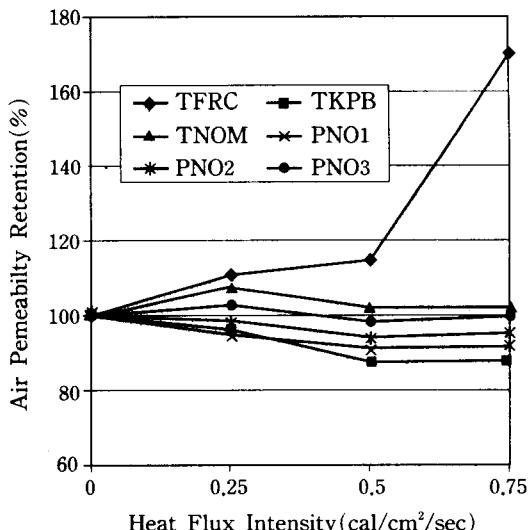


Fig. 6. Air permeability changes by heat flux intensity for 25sec exposure.

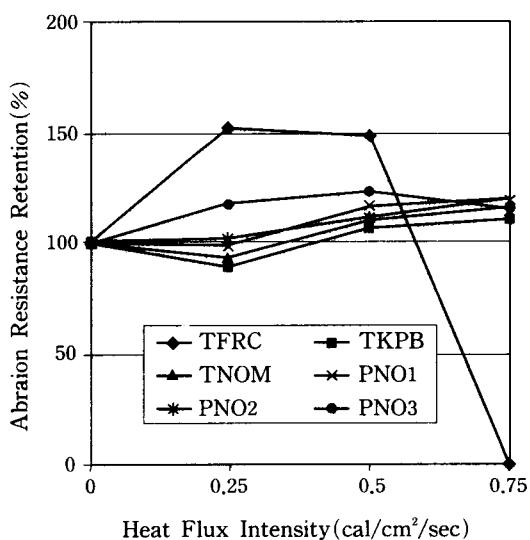


Fig. 7. Abrasion resistance changes by heat flux intensity for 25sec exposure.

알아보기 위해 두께, 무게, 별기성 등의 구조적 특성이 유사한 노엑스, TNOM과 PNO3의 변화를 비교해보면, 무게 감소와 공기투과도에서는 큰 차이를 나타내지 않았으나, 두께에서는 평직이 수축이 용이하여 그 증가율이 더 큰 것으로 나타났다.

2-2. 마모강도, 인장강·신도변화

마모강도에서는 방염면직물과 평직노넥스 PNO3을 제외한 다른 직물들은 $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 약간 감소하였으나(Fig. 7), 열강도가 증가하면서 수축이 발생하여 직물표면구조를 치밀하게 하여 마모강도가 다시 증가하였다. 특히, $0.5\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 방염면직물을 제외한 모든 직물들이 마모강도가 증가하는 것으로 나타나 이 조건에서 직물표면의 경화가 두드러지게 발생하는 것으로 추정된다.

이에 비해 방염면직물은 $0.25\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서는 탄화시작으로 표면이 경화되어 마모강도를 증가시켰으나 열강도가 증가함에 따라 탄화가 심하게 발생하여 $0.75\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 마모강도를 상실하였다. 능직의 케블라/PBI혼방직물과 TNOM의 경우 거의 변화가 발생하지 않아 평직에 비해 마모강도유지가 우수한 것을 알 수 있으며, 특히 케블라/PBI혼방직물은 가장 적은 마모강도변화를 나타내었다.

인장강·신도변화를 보면, 인장강도에서는 방염면직물을 제외하고는 열강도가 증가할수록 대체로 증가하는 것으로 나타났으며 특히 무겁고 두꺼운 TNOM이 가장 큰 증가를 나타낸 것을 볼 수 있다 (Fig. 8). 열에 의한 수축현상이 인장강도를 증가시

켰을 것으로 추측되는데, 수축현상은 직물을 경화시키기도 하지만 이는 직물의 손상정도를 나타내기도 한다. 따라서, 직물이 지나치게 수축되면 오히려 인장강도를 떨어뜨릴 수 있으므로 직물자체가 단단하여 직물손상을 충분히 견뎌낼 수 있을 때 그 효과가 충분히 나타날 것으로 생각되며, 이러한 이유로 인해 무겁고 두꺼운 TNOM의 강도증가가 크게 나타난 것으로 생각된다. $0.75\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 방염면직물의 경우는 거의 강도를 상실하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 앞의 노출시간결과(Fig. 4)와 연관시켜 볼 때 방염면직물의 경우 낮은 온도에서 장시간 사용은 큰 문제가 되지 않으나 고온에서는 단시간이라도 착용자에게 큰 손상을 입힐 수 있을 것으로 생각되었다. 또한, 방열성의 결과에서 보면 (Table 3) 방염면직물의 방열성은 우수한 것으로 나타나 방염면직물의 경우에는 열에 직접 닿는 외층에 사용하기보다는 내층에 사용하여 방열보강재로 사용하는 것이 좋을 것으로 생각되었다. 신도변화에서는(Fig. 9) 열노출후 감소하였고 열강도가 증가할수록 그 감소량이 증가하였으며 강도변화에 비해 그 변화량은 적은 것으로 나타났다.

마모강도와 인장강·신도에 대한 직물조직의 효

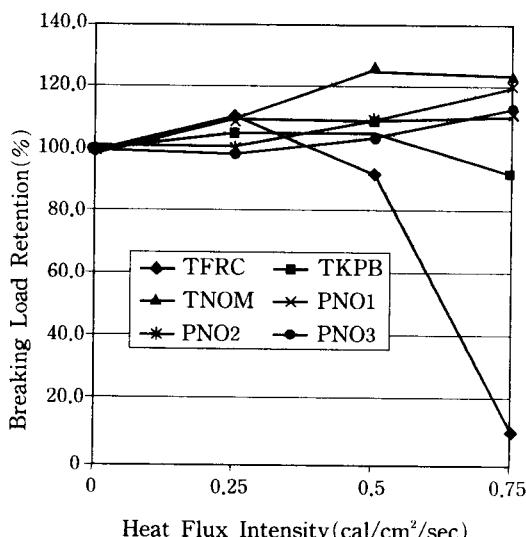


Fig. 8. Breaking load changes by heat flux intensity for 25sec exposure.

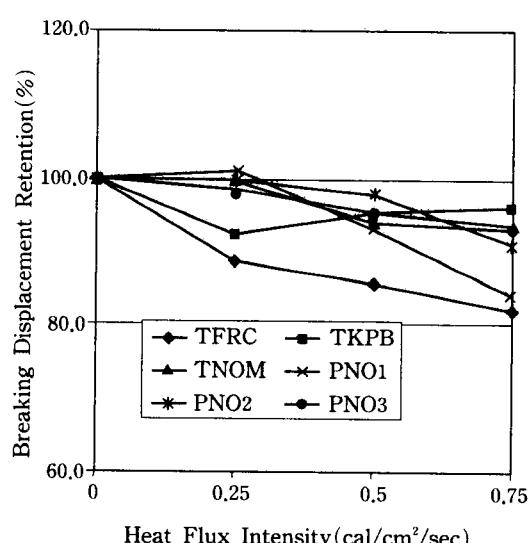


Fig. 9. Breaking displacement changes by heat flux intensity for 25sec exposure.

과를 알아보기 위하여 PNO₃과 TNOM을 비교해보면, 수축등에 의해 직물구조가 촘촘해진 평직물이 마모강도에서 크게 증가하였고 인장강·신도에서는 적절한 수축과 산화물손실을 갖는 능직물의 변화량이 더 큰 것을 알 수 있었다.

위의 결과로 부터, 열강도변화는 직물의 역학적 특성을 크게 변화시키므로, 고온에서 착용자 보호를 위해서는 우수한 방열성뿐만 아니라 열노출시에도 적절한 강도유지를 할 수 있는 소재선택이 우선시되어야 하는 것을 알 수 있었다.

IV. 결론 및 요약

소방보호복에 사용되는 방열직물을 노출시간과 열강도를 변화시켜 열에 노출시킨 후 무게, 두께, 공기투과도와 같은 물리적 특성과 마모강도, 인장강·신도와 같은 역학적 특성의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노출시간을 변화시켜 열노출전후의 특성변화를 살펴본 결과, 노출시간이 증가할수록 산화물손실과 수축에 의해 직물의 무게손실, 공기투과성, 마모강도, 인장강도가 증가하였으며 신도는 감소하였고, 두께는 대체로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

2. 0.25cal/cm²/sec에서 노출시간을 조절하여 평직노ックス를 노출시킨 결과, 무겁고 두꺼울수록 RPP값이 높아 방열성은 우수하였으나 열노출후 산화물손실이 더 크게 나타나 무겁고 두꺼울수록 직물내에 많은 열을 오랫동안 보유하므로 열에 의한 영향을 더 크게 받을 수도 있다는 것을 알 수 있었다.

3. 열강도가 증가할수록 대체로 열노출후 시료에서의 무게손실과 두께, 공기투과도, 인장강도가 증가하고 신도는 감소하였으나, 탄화가 쉽게 발생하는 방염면직물의 경우 0.75cal/cm²/sec에서는 대략 23%의 무게와 두께 감소를 나타내었고, 큰 손상으로 인해 공기투과도는 큰 값을 나타내었으며, 마모강도, 인장강·신도는 크게 감소하였다.

4. 열강도에 따른 직물의 특성변화가 노출시간에 따른 변화보다 더 뚜렷하게 나타나 직물특성 변화에 대한 영향은 노출시간보다는 열강도가 더 큰 것으로 나타났다.

5. 열노출후 물리적 특성변화는 역학적 특성변화를 유발시키며, 노출시간조건과 같은 저온의 장시간 열노출에서는 상당히 적은 물리적 특성변화가 발생하였음에도 불구하고 역학적 특성변화가 뚜렷이 나타나 소방복에서 나타나는 작은 구조적 특성변화에도 주의를 기울여야 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

6. 조직에 따른 변화율을 비교해보면, 두께와 마모강도는 수축이 더 크게 발생한 평직물에서의 변화율이 커졌고 공기투과도, 인장강·신도등의 특성에서는 능직물의 변화율이 더 큰 것으로 나타났다

7. RPP값이 높았던 방염면직물이 상당히 큰 특성변화를 나타낸데 반해, RPP값이 가장 작고 얇고 가벼운 케블라/PBI혼방직물은 대체로 가장 작은 변화를 나타내어 열노출후 기능성유지 측면에서 볼 때, 상당히 안전한 소재인 것을 알 수 있었다.

위의 결과를 종합해 볼 때, 열노출후 직물 특성들이 변할수 있으며, 이 변화량이 언제나 방열성 수치의 대소에 따라 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 일반적인 예측과는 달리 높은 방열성수치를 갖는 직물들이 오히려 큰 특성변화를 나타내어, 소방복의 보호성능의 종합적인 평가를 위해서는 방열성 수치뿐만 아니라 열노출후 제 기능성 유지측면까지 고려해 주는 것이 필요하다고 본다.

V. 제언

화재나 불꽃에 대해 완전한 보호를 제공할 수 있는 소방보호복은 없으며, 단지 인명피해나 상해의 위험을 줄일 수 있을 뿐이다. 또한 보호성능은 수많은 변수들에 의해 달라지고 같은 의복이라 하더라도 실험자에 따라 그 정도가 다르게 나타날 수 있다. 본 결과는 일련의 노출시간과 온도변화에 대한 소방보호복의 반응을 측정함으로써 연속적인 고온 사용시 주의해야 할 형태변화와 이에 따른 역학적 특성 변화에 대한 정보를 주고자 한 것이다. 우리는 특정용도를 위해 어떤 특정상품이 적당하다거나 추천을 한다거나 배제하려는 의도가 아니었음을 강조해두고 싶다. 실험방법과 실험결과는 소방보호복의

performance의 순서를 매기는 수단으로 유사한 상황하에서 직물들의 열전달능력을 비교하고 그러한 조건에서 얻게 되는 손상정도의 척도이므로, 이를 실제 화재현장의 결과와 일치시켜 고려하지는 말아야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Holcombe, B. V. and Hoschke, B. N., "Do Test Methods Yield Meaningful Performance Specifications?", *Performance of Protective Clothing*, ASTM STP 900, R. L. Barker and G. C. Coletta, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 327–339, 1986.
- Schoppee, M. M., Welsford, J. M. and Abbott, N. J., "Protection Offered by Lightweight Clothing Materials to the Heat of a Fire", *Performance of Protective Clothing*, ASTM STP 900 , R. L. Barker and G. C. Coletta, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 340–357, 1986.
- Ross, J., "Thermal Conductivity of Fabrics as Related to Skin Burn Damage", *J of Applied Polymer Science : Applied Polymer Symposium*, 31, 293–312, 1977.
- Barker, R. L. and Lee, Y. M., "Analyzing the Transient Thermophysical Properties of Heat-Resistant Fabrics in TPP Exposures", *Textile Research Journal*, 57(6), 331–338, 1987.
- Shalev, I. and Barker, R. L., "Analysis of Heat Transfer Characteristics of Fabrics in an Open Flame Exposure", *Textile Research Journal*, 53(8), 475–482, 1983.
- Benis D. L., and Phillips, W. A., "Protective Clothing Fabrics Part II. Against Convective Heat(Open-Flame) Hazards", *Textile Research Journal*, 51(3), 191–202, 1981.
- Behnke, W. P. and Seaman, R. E., "Laboratory Tests Which Predict End-Use Performance Under High Temperature Conditions", *Journal Applied Polymer Science : Applied Polymer Symposia*, 9, 49–62, 1969.
- Hobart, S. R. and Mack, C. H., "Thermal Stability of the THPOH-NH₃ Flame Retardant on Cotton", *Textile Research Journal*, 45(9), 667–672, 1975.
- Bouchillon, R. E., "Protective Performance of Polybenzimidazole-Blend Fabrics", *Performance of Protective Clothing*, ASTM STP 900 , R. L. Barker and G. C. Coletta, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 389–404, 1986.