

보호용 섬유소재의 신뢰성 평가

윤혜신, 김도식, 김규로*

한국의류시험연구원, *산업자원부 기술표준원 기술정보신뢰성과

1. 서 론

신뢰성이란 “아이템이 주어진 조건에서 규정된 기간 중 요구된 기능을 발휘할 수 있는 성질”로서, 오늘날 우리 주변에 복잡한 시스템이 많이 있고 우리들이 이런 시스템의 혜택을 받는 일이 커짐에 따라 신뢰성의 역할이 점차 증가하게 되었다. 이와 같이 중요성이 한층 증가되고 있는 신뢰성은 전기, 전자, 자동차, 기계, 화학, 금속, 섬유 등의 여러 분야와 관련이 깊어, 이제는 관리기술로서 Figure 1[18]에서 보는 바와 같이 기계, 전기, 전자, 화학 등 여러 분야와 횡단적으로 관계가 있는 학문적 체계를 확립하게 되었다.

의류·섬유소재에 대한 시험 평가 방법들을 자세히 살펴보면, 세련된 신뢰성 이론은 아닐지라도 제품이나 시스템, 소재의 내구성을 평가하고 향상시키는데 필요한 어느 정도의 신뢰성 개념이 오랜 역사를 가지고 시험 규격이나 방법에 내포되어 왔음

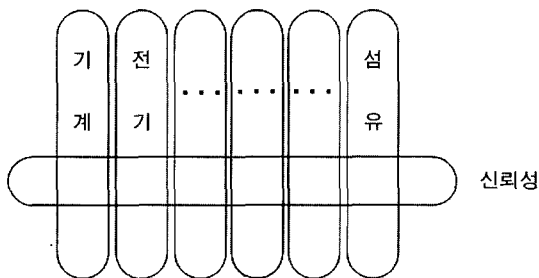


Figure 1. 신뢰성의 학문 체계.

을 확인할 수 있다.

본 고에서는 신뢰성이 무엇이고, 신뢰성이 섬유소재에 어떻게 활용되어 제품의 품질 향상, 제품 개발과 평가, 연구에 도움이 될 수 있는지를 살펴보기 위해 보호용 섬유소재 중 소방용 보호복 소재에 대한 신뢰성 평가 방법에 대하여 알아보고, 향후에 섬유소재에 대한 신뢰성을 향상시키고, 국제 경쟁력을 강화시키는데 조금이나마 도움이 되고자 하였다.

2. 섬유소재의 신뢰성

2.1. 섬유소재의 신뢰성

소비자가 제품을 구매할 때 기대하는 것은 제품의 초기 성능의 발휘 뿐만 아니라 제품을 사용하는 기간 동안에 규정된 조건하에서 일정한 기능을 수행해 내는 것이므로, 섬유소재의 품질은 소비자가 상품을 결정하고 구매할 단계 뿐만 아니라, 지속적으로 사용하는 동안에도 매우 중요하다. 이러한 특성의 평가는 섬유소재의 경우 보통 내구성이라는 개념으로 표현되는데, 내구성은 섬유소재 품질 평가의 중요한 한 항목을 차지해 왔다.

신뢰성은 내구성과 혼동될 수 있는데, 내구성은 목표 수명 시간동안의 성능의 발휘 여부를 확인하지 않고 특정 조건이나, 시간, 회수 등을 만족하는가를 판단함으로써 일정 수준 이상의 제품 성능이 유지될 수 있을 것으로 생각하는 것에 비하여, 신뢰성은 명확한 수명에 대한 예측을 통하여 경제적

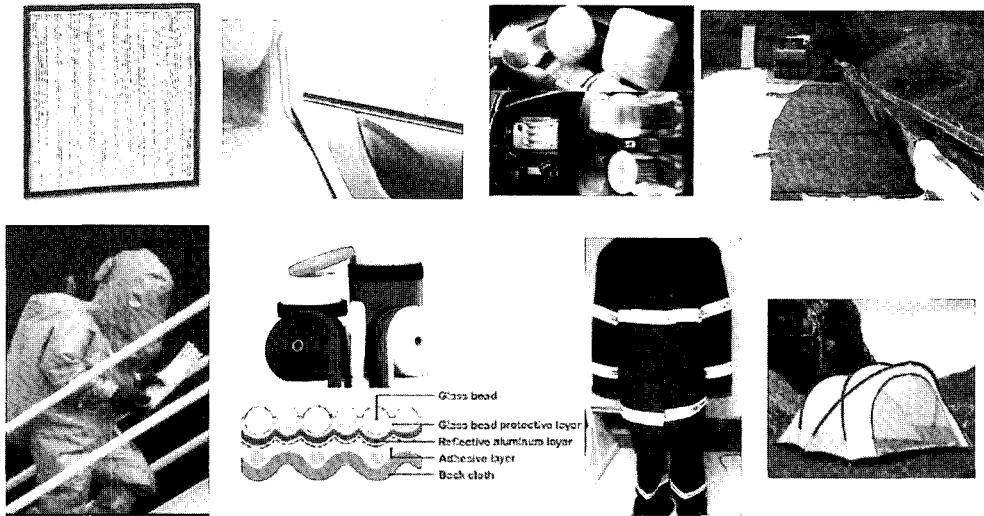


Figure 2. 섬유소재 신뢰성 평가 품목의 예.

인 제품의 설계와 생산, 그리고 소비가 이루어질 수 있도록 하는 척도가 될 수 있다. 신뢰성 개념이 전자·기기 분야를 중심으로 발전되어왔기 때문에 해당 용어부터 조금 생소할지 모르나, 고도로 발달된 신뢰성 기법 및 이론을 섬유소재 내구성의 연구, 평가, 기획 및 설계 등에 응용한다면 섬유소재 발전에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

2.2. 섬유소재에 대한 신뢰성의 적용

2000-2005년까지 섬유소재분야 신뢰성 향상사업의 일환에서 평가 기준이 제정된 품목들은 주로 산업용 섬유를 중심으로 한 섬유소재로서 소비자의 안전이나 보호를 위한 기능을 발휘하거나 또는 단일 부품 소재로서 기능적 역할을 일정 기간 수행하는 제품들을 대상으로 평가 기준이 개발되었고, 이를 토대로 신뢰성 인증이 부여되었다. 즉, 해당 품목의 수명을 정량적으로 평가하지 않으면 경제적으로 큰 손해가 발생하거나, 소비자 안전에 큰 영향을 미치는 품목을 중심으로 신뢰성 연구가 이루어져왔다.

따라서 섬유소재의 신뢰성은 지금까지 초기 품질 기준에서 다소 정성적으로 평가되던 내구성을 신뢰성 수법을 사용하여 보다 정량적으로 평가하여 시

스템이나 제품이 사용기간 중에 그것이 기대한 만큼 만족하게 기능을 수행하도록 하는 것이다. 다시 말하면 시스템이나 제품의 기능이 시간 경과에 대해 충분히 안정을 유지하도록 수명을 평가하고 설계하는데, 현실적으로 이와 같이 추상적인 표현이 아니라 시간적 품질특성으로써 구체적인 확률로 정량화 한다.

3. 보호용 섬유소재의 신뢰성

3.1. 기존 보호용 섬유소재 평가 규격의 내구성 평가 예

보호용 섬유소재 중 소방관용 보호복에 대한 규격 “KS K ISO 11613 보호복-소방관용 보호복의 시험방법 및 요구성능”을 살펴보고, 규격내에 소방관용 보호복의 내구성을 평가하기 위한 시험 방법만을 정리한 것은 Table 1과 같다.

Table 1에 나타난 소방용 보호복의 내구성 평가 방법은 사용 중 소방용 보호복의 신뢰성에 영향을 미치는 고장 요인을 단순히 세탁과 건조, 10 kW/m²의 복사열만으로 규정하고, 스트레스를 주는 기간도 각각 세탁 건조 5회, 3분간의 복사열 조사로 하여, 제

Table 1. KS K ISO11613 소방용 보호복의 내구성 평가 방법

전처리	평가항목	단위	평가기준
ISO 6330 2 A 세탁과 건조 5회 또는 ISO 3175-2 드라이클리닝 5회 - 취급표시가 있으면 취급 표시를 따름	방화도	-	a) 시편의 윗부분 또는 가장자리에 불꽃이 남아 있지 않음
		-	b) 시편에 구멍이 생기지 않음
		sec	c) 잔여물이 남아 있는 재나 용융된 재를 만들지 않음
		sec	d) 잔염 시간 ≤ 2초
			e) 잔진 시간 ≤ 2초
	불꽃열	sec	$I_{Q,24} \geq 13$
	통과량	sec	$I_{Q,24}^{(2)} - I_{Q,12}^{(1)} \geq 4$
	복사열	sec	40 kW/m ² : $t_2 \geq 22s$
	통과량	sec	40 kW/m ² : $(t_2^{(4)} - t_1^{(3)}) \geq 6s,$
		%	TF(Qo) ⁽⁵⁾ ≤ 60 %
	내수축성	%	3 이하
KS K ISO 6942:2002 방법 A 열 플럭스 밀도 10 kW/m ² 3분간 조사	인장 강도	N	450 이상

주⁽¹⁾ I_{Q,12}: (25 ± 5) °C에서 시작하여 온도가 (12 ± 2) °C 올라가는 평균 시간으로부터 계산된 지수.

주⁽²⁾ I_{Q,24}: (25 ± 5) °C에서 시작하여 온도가 (24 ± 2) °C 올라가는 평균 시간으로부터 계산된 지수.

주⁽³⁾ t₁: 1 수준에 도달할 때 까지 걸리는 시간 (ISO 6942 참조).

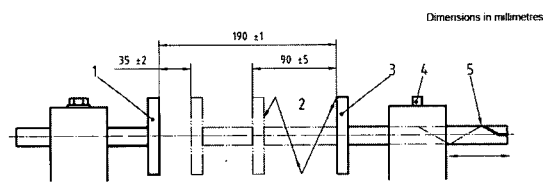
주⁽⁴⁾ t₂: 2 수준에 도달할 때 까지 걸리는 시간 (ISO 6942 참조).

주⁽⁵⁾ TF(Q_o) 열전달계수(heat transmission factor): 입사한 열밀도와 투과한 열밀도의 비 (ISO 6942 참조).

품의 내구성을 정성적으로 평가하고자 한 것이다.

Table 2는 “KS K ISO 15538 보호복-소방관용 반사표면 보호복의 시험방법 및 요구 성능”의 내구성 평가 방법만을 정리한 것으로, 내구성 평가를 위해 제품에 부가하는 스트레스는 세탁과 건조만을 고려하였으며, 복사열 통과량 평가전에만 Figure 3의 굴곡 시험기(ISO 15538 부록 A)로 2500회의 기계적 스트레스를 부과한다.

3.2. 보호용 섬유소재 신뢰성 평가의 필요성



1. 고정 디스크 2. 450° 회전 3. 이동 디스크 4. 못 5. 흡이파인 샤프트

Figure 3. ISO 15538 부록 A의 기계적 굴곡 처리 장치.

현재 보호복 관련 국제 규격은 보호복이 사용되는 환경과 사용시간, 사용하는 동안 보호복이 수행

해야 할 기능을 충분히 고려한 것이 아니라, 단순히 내구성에 영향을 미치는 스트레스를 세탁, 건조만으로 보거나 때에 따라 복사열, 기계적 처리를 부과하여 정성적인 내구성을 확인하는 수준이다.

그러나 화재 진압 활동 시 소방대원이 착용하는 보호복은 일정 기간동안 반복해서 착용하게 된다. 보호복이 비록 고온의 열에 안정한 소재로 만들어 졌다 하더라도 연속적으로 고온의 열에 노출되면 직물의 구조가 변형되어 무게, 두께, 인장강도, 인열강도와 같은 보호 성능과 관련된 물리적 특성이 변할 수 있다. 소방용 보호복의 경우에는 작은 변화라 하더라도 소방대원의 안전에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으므로 열에 노출된 후 방열 원단이 어떻게 변화하여 다른 보호성능과 관련된 특성에 영향을 미치는지 파악하여 보호복의 수명을 정량적으로 평가하는 시스템을 개발하는 것이 무엇보다 중요하다.

소방용 보호복 뿐 아니라 화학 보호복도 규정된 재사용 회수까지 사용 기간 동안 충분히 기능을 발휘하면서 안전하게 착용자를 보호할 수 있어야 한다. 예를 들어 화학 보호복의 사용 기간이 10년이

Table 2. KS KISO15538의 소방관용 반사표면 보호복의 내구성 평가 방법

전처리	평가항목	단위	평가기준
ISO 6330 2 A 세탁과 건조 5회 또는 ISO 3175-2 드라이클리닝 5회 - 최급표시가 있으면 최급 표시를 따름	방화도	- - - sec sec	a) 시편의 윗부분 또는 가장자리에 불꽃이 남아 있지 않음 b) 시편에 구멍이 생기지 않음 c) 잔염이 남아 있는 재나 용융된 재를 만들지 않음 d) 잔염 시간 ≤ 2초 e) 잔진 시간 ≤ 2초
	불꽃열 통과량	HTI HTI	수준 1: HTI ⁽¹⁾ ≥ 13 수준 2: HTI ≥ 21
	복사열 통과량	sec sec	ISO 15538 부록 A의 기계적 처리후 40 kW/m ² 복사열 조사시 수준 1: t ₂ ⁽²⁾ ≥ 60 s 수준 2: t ₂ ≥ 120 s
	접촉열	sec sec	접촉온도 300 °C 수준 1: Threshold time ≥ 10 s 수준 2: Threshold time ≥ 15 s
	내열성		255 ± 10 °C 노출 후 - 녹거나 발화하지 않아야 함 - 수축률이 5% 이하여야 함
	내수축성	%	3 이하

주⁽¹⁾ HTI: 열통과 지수, (25 ± 5)°C에서 시작하여 온도가 (24 ± 2) °C 올라가는 평균 시간으로 부터 계산된 지수.
주⁽²⁾ t₂: 2 수준에 도달할 때 까지 걸리는 시간 (ISO 6942 참조).

라면, 정확히 10년 동안 무사고로, 그리고 10년이 지난 후에는 폐기하도록 규정된 것을 말한다.

4. 소방용 보호복의 신뢰성 평가 기준 개발 과정

한국리튬시험연구원에서는 2003년도 신뢰성 향상사업의 일환으로 안전유해 보호용 섬유소재 중, 화재 진압 활동 시 소방대원이 착용하는 보호복에 사용되는 방화·내열용 섬유원단의 신뢰성 시험방법에 대한 기준안을 마련하였었다. 본 장에서는 보호용 섬유소재에 대한 신뢰성 평가의 이해를 돕기 위해 “RS K 0013 방화·내열용 섬유 원단” 신뢰성 기준안 개발 과정을 소개하고자 한다.

4.1. 소방용 보호복의 신뢰성 평가 기준 개발 배경

1996년에 캐나다의 ULC 위원회(Underwriters' Laboratories of Canada Committee)에서 수행한 연구 조사에서는 보호복의 폐기 시기가 캐나다 내 소

방서의 주요 관심사라는 것을 확인하였다. 이 조사에 대한 대응으로, 캐나다에서는 소방관들의 안전 향상을 도모하고, 고가 소방복의 효용성을 향상시키려는 목적으로 소방용 보호복의 유효 사용 수명을 평가하기 위한 향상된 방법을 개발하려는 프로젝트를 진행시켰다[13].

소방용 보호복은 소방관의 안전, 쾌적성, 가동성에 영향을 주는 중요한 요소이며, 현재 소방용 보호복은 과거 수십 년 동안, 새로운 소재, 디자인, 시험 방법에 대한 수많은 연구의 결과물이다. 그러나 소방용 보호복의 유효 사용 수명을 추정하고, 이 보호복 각각을 언제 폐기할 것인가를 결정하는 것은 어려운 일이다. 보호복 걸감이 찢어지는 것과 같은 특정 손상은 눈으로 쉽게 감지될 수 있는 반면, 다른 형태의 퇴화는 눈으로 검사했을 때 시각적으로 감지될 수 없기 때문이다.

물론 같은 소방서 내에서도 개개인의 소방관들이 착용하는 보호복은 각 보호복의 사용 기간 동안 다른 조건에 노출될 수 있다. 그러나 시각적으로 감

지 되지 않는 개개인 보호복의 퇴화 정도를 확인 시 험하기 위해서는 보호복을 파기해야 하므로, 보호 복의 노출 환경과 사용 시간 등을 감안한 전체 보 호복을 대표할 수 있는 보호복의 유효 수명과 보호 복의 폐기 시기에 대한 지침이 있어야 한다. 현재 까지도 소방용 보호복의 폐기에 대한 대부분의 가 이드라인은 단순한 외관 검사와 경제적인 효용성 분석에 근거하고 있다. 소방관들의 보호를 위해서 는 이 가이드 라인의 향상이 필요하다.

예를 들어, 수명이 3년인 소방복을 5년 사용 한 다면 소방관들을 위험에 빠뜨릴 수 있고, 수명이 5 년인 소방복을 3년만 사용한다면 경제적인 손실이 므로, 목적하는 사용 수명의 소방복을 설계하고, 사 용기간이 지나면 폐기하도록 하여야 한다.

4.2. 소방용 보호복의 신뢰성 평가 방법 개발 과정

소방용 보호복의 신뢰성 평가 방법 개발은 다음 과 같은 순서로 진행하였다.

- 1) 문헌 조사
- 2) 보호복 고장의 정의
- 3) 보호복을 사용하는 사용 환경 및 보관 환경 조 사 (현장 조사)
- 4) 보호복의 고장에 영향을 미치는 요인 추출
- 5) 사용환경 및 고장 요인을 모사한 시험실에서 재현 시험
- 6) 신뢰성의 통계적 기법 이용
- 7) 신뢰성 평가

4.3. 소방용 보호복의 신뢰성 평가를 위한 문헌 조사

소방용 보호복의 내구성에 대한 문헌자료는 다음 의 4가지로 분류된다.

- 1) 사용자 지침서
- 2) 소방용 보호복의 내구성에 영향을 미치는 요 인에 대한 연구
- 3) 소방용 보호복의 신뢰성에 대한 시험실 규모 의 시험
- 4) 국내외 규격

4.3.1. 사용자 지침서

국외의 FIERO (Fire Industry Equipment Research Organization group), SAFER (Southern Area Fire Equipment Research group), NAFER (Northern Area Fire Equipment Research group), CAFER (Central Area Fire Equipment Research group), FEMSA (Fire and Emergency Manufacturers and Services Association)와 같은 소방용 보호복 제조업자 또는 기관들이 개발한 사용자 지침서에는 권장되는 검사 방법, 세탁·보관·수리 방법, 폐기 시기, 폐기 과 정 등의 내용이 포함되어 있다. 이들 사용자 지침 서에서 보호복의 폐기 시기에 대한 대부분의 지침 은 단순한 외관 검사와 경제성만을 고려한다. 예를 들어서 한 지침서에서는 수리 비용이 대체 비용의 50%가 넘거나, 최 외층 또는 안쪽 층이 파손되기 쉽고, 약해졌을 때 대체하도록 하였으며, FIERO 지 침서에서는 보호복 각각의 사용 회수가 다르더라도, 담당 부서가 사용 수명과 저장 수명을 정하도록 제 안하였고, 이 한 예로 영국의 소방 단체와 보호복 제조 업체들은 5년 또는 15회의 유지보수 싸이클을 소방용 보호복의 수명으로 동의하였다.

4.3.2. 소방용 보호복의 현장 연구

몇몇 연구자들은 소방복이 현장에서 사용된 후의 의류 성능을 연구했다. 가장 광범위한 연구는 Vogelwohl[16]의 연구로, 그는 1년에서 6년 이상 까 지의 서비스 기간동안 실제 소방과 훈련 프로그램 에 된 20벌의 소방복에 대해 물리적인 시험을 행하 였다. 시험한 특성은 열적인 보호성능(TPP), 방염 성, 내수도, 인장강도, 심 인장강도, 인열강도, 마모 강도, 자외선 퇴화, 지퍼 작동 내구성, 재귀반사성 능을 포함한다. 사용 후 보호복에 대한 시험 결과 는 서비스 기간, 사용 형태, 사용한 세탁 과정 등에 대해 연구되었다.

사용된 의류의 대부분은 TPP 시험을 통과했지만 방염 성능은 모두 통과하지는 못했다. 착용과 세탁 의 결과로 샘플의 두께가 증가했기 때문에 TPP 시

험 결과는 실제로 새 옷 보다 사용하던 의류에서 더 높았다. 사용하던 의류의 내수도는 사용 기간동안 저하되었고 사용하던 의류의 인장강도와 심 인장강도도 심각하게 저하되었다.

4.3.3. 소방용 보호복의 내구성에 영향을 미치는 요인에 대한 연구

소방용 보호복의 유효 사용 수명에 영향을 미치는 요소는 무게와 조직, 사용 빈도, 수리 형태와 수리 회수, 세탁 과정, 사용자가 행하는 작업의 종류, 극단적인 열에 대한 노출, 위험 물질, 자외선 등으로, 이러한 소방용 보호복의 내구성에 영향을 미치는 요인에 대한 연구는 현장 사용 조건을 시험실에서 모사하여 시험한 후, 노출 전과 후의 시료를 비교하는 것으로 구성된다.

Day[4] 등은 직물을 일광견뢰도 시험기의 자외선과 오븐의 열에 노출 시킨 후, 태양광과 열이 시료의 내구성에 미치는 영향을 결정하기 위해 노출 전과 후의 시료 성질을 비교하였다. 태양광과 열은 천의 물리적 강도를 감소시켰지만, 방염성과 열적 보호성능에는 영향을 미치지 않았다.

또 Stull의 연구에서, 그는 일반적으로 소방용 보호복의 오염을 제거하는데 사용되는 세탁 방법의 유효성과 반복 세탁의 영향을 연구했다.

4.3.4. 국내와 국외의 평가 기준

4.3.1-4.3.3의 문헌 조사 후, 보호복의 관리, 사용과 유지에 대한 규격 검토를 하였다. 많은 규격에서 소방용 보호복의 폐기 기준은 사용하던 의류의 외관 검사에 근거한다. 예를 들면 ASTM F1449는 외관 검사 동안 다음의 질문을 제안한다.

- 의류가 닳았는가?
- 의류가 물리적으로 손상되었는가?
- 의류가 여전히 잘 맞는가?
- 의류가 심각하게 변형되었는가?
- 의류가 적절하게 수리될 수 있는가?

- 사용자에게 위험한 부분이 오염되었는가?

대부분의 내구성 시험은 파괴 시험이어서, 시험 결과에 상관없이 시험한 의류를 폐기해야 한다는 것이 어려움이다. 그러므로 내구성 시험은 대량의 의류를 폐기시킬 것인지 말 것인지를 결정하기 위한 근거로서 전체를 대표할 수 있는 의류를 시험하는데 적절하다. ASTM F 1449[22]는 사용하던 의류에 대한 두 개의 내구성 기준을 구체화시켜 놓았다.

- **인장강도 유지율:** 만약 용접이나 또는 그와 관련한 열적인 위험들(ASTM F 1002[23])에 노출되는 작업자들이 입는 보호복의 인장강도와 인열강도가 ASTM 규격에서 구체화 해 놓은 값의 50% 이하인 경우 의류를 폐기해야 한다.
- **방염성:** 원단이 ASTM F 1002에 명시해 놓은 기준을 만족시키지 못하면 의류를 폐기해야 한다. 이 외에도 CAN/CGSB 155.23[24]은 새 보호복에 대한 지침으로, 의류를 선택해서 주기적으로 시험할 것을 권장하고 있다.

5. 소방용 보호복의 신뢰성 평가 방법

화재 진압 활동 시 소방대원이 착용하는 보호복에 사용되는 방화·내열용 섬유원단의 신뢰성 평가 방법은 다음과 같다.

5.1. 적용 범위

안전유해 보호용 섬유소재 중, 화재 진압 활동 시 소방대원이 착용하는 보호복에 사용되는 방화·내열용 섬유원단의 신뢰성 시험방법에 대하여 규정한다.

5.2. 고장범위 및 기준

소방용 보호복용 방화·내열 섬유 원단의 고장은 방화·내열용 섬유 원단이 제 기능을 수행하지 못하여 불에 근접하여 작업하는 소방 대원이 큰 피해를 입힐 수 있는 경우로서 소방용 보호복에 구멍이 생기거나 직물이 찢기는 경우이다[5]. 왜냐 하면 외

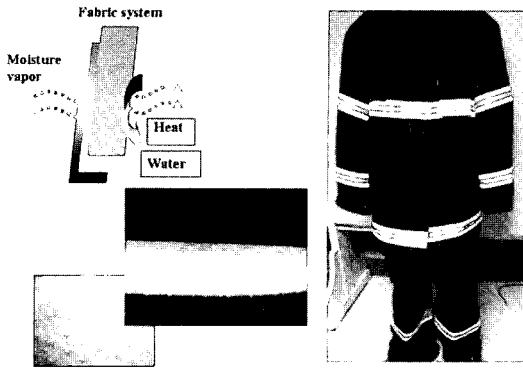


Figure 4. 소방용 보호복의 구성.

부로부터의 열은 원단을 통해 전달되는데 원단에 구멍이 생기거나 찢기게 되면 열전달이 크게 변화하기 때문이다.

그러므로 소방용 보호복 직물의 인장강도, 인열강도 등은 보호복 원단의 방염성, 열통과성과 함께 보호복의 기능성 측면에서도 고려되어야 할 중요한 특성이다. 특히 소방대원의 작업강도는 대단히 높아 원단은 항상 과도한 압박과 신장을 받게 되며, 만약 이러한 원단이 열노출에 의해 형태변화가 일어나 물리적 특성이 변하면 작은 압력에 의해서도 강건성(integrity)을 잃게 되어 더 이상 소방용 보호복으로서의 기능을 발휘하지 못한다[7]. 그러므로 열 노출 후에 이들의 구조 변화를 나타내주는 물리적 특성과 강건성을 나타내주는 역학적 특성들의 제 기능성 유지는 소방대원의 안전과 직결되는 문제이며, 소방용 보호복의 수명을 결정하는 중요한 인자이다.

그러므로 본 신뢰성 평가기준에서는 일광, 세탁, 열, 굴곡, 마모와 같은 사용에 의해 소방용 보호복용 방화·내열 섬유 원단의 물성 및 열통과성이 저하하는 것을 고장의 범위로 한다. 본 규격에서는 방화·내열용 섬유원단의 인열강도가 100 N 이하가 되는 것을 고장이라고 규정한다.

5.3. 신뢰성 기준의 제정 근거

문헌 조사와 현장 연구에 따르면, 고온의 열에 노출되는 소방용 보호복 원단의 변성에 크게 영향을

미치는 요인은 열적 환경 조건과 노출되는 원단의 특성이다. 열적 환경 조건으로는 열 전달방식, 노출 시간과 열 강도를 들 수 있다. 소방용 보호복에 관한 이전의 연구들은 화재 현장에서의 불꽃에 대한 노출 때문에 대류에 관한 것들이 많았지만[1,3,6,8], 실제 화재 현장에서 소방관들에게 전달되는 열은 복사열이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다. 불꽃 노출에 관한 연구에서 연료 연소 시에 발생하는 화재의 경우에도 그 열의 80%가 복사열을 포함하므로 대류에 의한 열노출보다는 복사열 노출을 일차적으로 고려해야 한다고 하였다. 또 다른 요인으로 노출 시간과 열강도 등을 들 수 있는데, 이들은 의복의 외층 표면에 의해 흡수되는 열에너지와 의복 외층에서 내층으로의 열 전달 속도를 결정하기 때문에 원단의 변성에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 소방대원들이 작업 시에 받게 되는 복사열 강도는 0.3~0.7 cal/cm²/sec로 알려져 있다[2]. 그러나 동일한 시간동안 동일한 강도의 열에 노출된다 하더라도 직물의 구성섬유, 구조적 특성, 조직에 따라 직물의 특성 변화는 다르게 나타날 수 있다.

인체의 피부는 매우 민감하여 0.64 cal/cm²(26.8 kJ/m²) 정도의 열에너지만 있어도 고통을 느끼게 되며, 1.2 cal/cm²(50.2 kJ/m²) 정도의 열에너지는 2도 화상을 입게 되며 45 °C 정도가 되면 피부가 고통을 느끼게 되고 72 °C 정도의 온도에서는 피부가 완전히 타버린다. 그러므로 방화내열용 섬유 원단의 목적은 의복이 시간이 지나면서 어떤 작용을 하



Figure 5. 방화내열용 섬유 원단의 사용 환경.

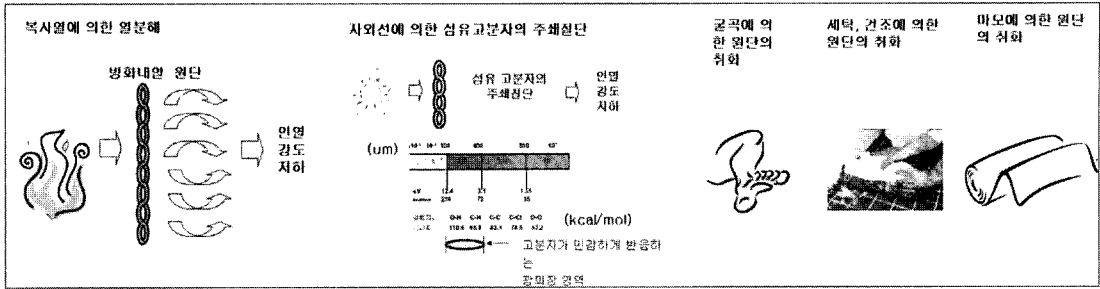


Figure 6. 방화내열용 섬유 원단의 주 고장 메카니즘.

거나 화상을 최소로 막아 인체의 피부가 가열되는 것을 막아주는 데 있다.

방화 내열용 섬유 원단으로 만드는 보호복은 사용 용도에 따라 소방관들이 화재 진압 시 착용하는 소방복과 제철소 등 고열의 작업환경이나, 유류 취급소 등 위험 화학 물질과 폭발 물질을 취급하는 작업장에서 착용하는 산업용 소방복, 공군, 해군 등에서 사용하는 소방복, 우주 비행 시에 열전달을 막기 위해 착용하는 방열복 등 다양한 보호복이 있으며, 그 외에도 119 구조대원같이 일선 소방관들의 구조 활동을 돕기 위한 구조복 등도 있다.

소방관들이 화재 진압 시 착용하는 소방복은 작업 위치에 따라 3가지 정도로 나눌 수 있는데, 소방관들이 화재물로부터 어느 정도의 거리를 두고 호스나 다른 장비를 조작하는 등의 일반적인 진화 작업을 할 때 사용하는 방수복(turnout gear)과 화염에 근접해서 작업을 할 때 착용하는 근접복(proximity suits), 그리고 유류 탱크나 화학약품 공장의 화재와 같이 고온의 화염폭발을 동반하는 화재 현장에서 착용하는 진입복(entry suits) 등이다.

본 기준안에서는 소방대원이 화염에 근접해서 작업할 때 착용하는 근접복에 사용되는 방화·내열용 섬유원단에 대한 신뢰성 평가 방법을 개발하며, 방화내열용 섬유 원단에 사용되는 섬유소재의 열화 메카니즘은 일광에 의한 고분자 주쇄의 절단, 복사열에 의한 원단의 열분해, 사용 시 굴곡, 마모, 세탁에 의한 원단의 열화에 의한 인열 강도의 저하 등이다.

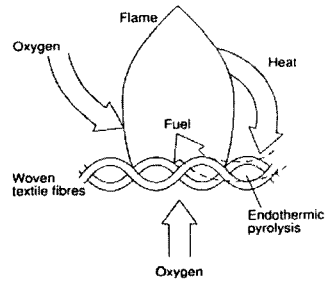


Figure 7. 섬유의 연소 메카니즘.

방화내열용 섬유 원단에 사용되는 섬유소재의 연소 메카니즘은 Figure 7과 같고 사용되는 섬유의 열적 특성은 Table 3과 같다.

섬유의 연소는 Figure 7에서 보는 것과 같이 가열과 기체로 변화되기 전에 생기는 환원, 발화(ignition), 그리고 불꽃의 전파(flame propagation) 등에 의한 복합적인 현상이다. 불꽃이 스스로 타려면 발화물질인 연료가 필요하며, 이 연료는 기체화되어 산소와 열과 혼합된다. 섬유가 열을 받게 되면, 열분해 온도(Tp)에서 열분해 되고, 만약 휘발성 액체와 가스가 연소 가능하다면, 그들은 연소 메카니즘에서의 연료의 성질과 같은 발화물질이 된다.

섬유가 열분해 온도 Tp 이상에서 노출되면 열분해에 의해 무게가 감소하고 인열 강도가 저하하여, 인체가 외부 위험에 노출될 확률이 커진다. 주 고장 모드인 복사열 노출에 대한 방화내열 섬유원단의 열통과량 증가는 TPP 시험결과에 근거하여, 복사열 노출 전 후에 거의 변화가 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 기준안은 열에 대한 노출 등의

Table 3. 방화내열용 섬유 원단에 사용되는 섬유의 열적 특성

섬유	Tg (°C) (유리전이 온도)	Tm (°C) (용융온도)	Tp (°C) (열분해 온도)	Tc(°C) (연소온도)	Δ H (KJ/g)	LOI
양모			245	600	27	25
면			350	350	19	18.4
비스코스			350	420	19	18.9
트리아세테이트	172	290	305	540	-	18.4
나일론 6	50	215	431	450	39	20-21.5
나일론 6·6	50	265	403	530	32	20-21
폴리에스터	80-90	255	420-477	480	24	20-21.5
아크릴	100	>220	290	>250	32	18.2
폴리프로필렌	-20	165	469	550	44	18.6
모다크릴	<80	>245	273	690	-	29-30
PVC	<80	>180	>180	450	21	37-39
PVDC	-17	180-210	>220	532	11	60
PTFE	126	>327	400	560	4	95
Oxidized acrylic	>640	-	55			
노멕스	275	375	310	500	30	28.5-30
케블라	340	560	590	>550	-	29
PBI	>400		>500	>500	-	40-42

각 스트레스를 인가한 후 인열 강도를 평가하여 신뢰성을 평가하였다.

5.4. 신뢰성 평가시험

5.4.1. 품질 인증시험

품질 인증시험은 규격시험, 일반 물성시험으로 구분하였다. 본 규격에서 규정한 품질 인증시험의 주된 인용규격은 국제 규격인 ISO(세계표준화기구)를 인용하였으며 추가적인 기준 및 시험법은 EN(유럽 연합시험법), ASTM(미국재료시험규격협회)과 NFPA(미국방화협회), 우리나라 행정자치부의 소방용 방화복 규격서와 소방용 방화복의 인정기준을 참고하였다.

5.4.2. 신뢰성 평가시험

신뢰성 평가에서 보증하는 수명의 결정: 소방용 보호복용 방화·내열용 섬유원단은 보호복의 교체와 함께 수명이 완료되는 것으로 보아 완제품의 수명이 원단의 수명인 것으로 판단된다. 현재 국내의 소방복은 약 5년을 주기로 교체하는 것으로 조사되었다. 따라서 본 규격에서는 보증수명을 5년으로 정

하였다.

시험방법: 소방용 보호복용 방화·내열용 섬유 원단의 수명에는 보관 수명과 사용 수명이 포함되어 있지만 보호복의 성격상 고장은 주로 사용 시에 일어나므로 본 규격의 수명시험은 소방용 보호복용 방화·내열용 섬유 원단의 고장에 영향을 미칠 수 있는 사용 시의 환경을 재현하였다. 그리고 보증하고자 하는 수명인 5년에 해당하는 사용 회수를 빈도 가속하여 시험함으로써 짧은 기간 동안 5년의 사용 시간을 재현할 수 있도록 설계하였다.

시험시간의 산출: 5년 동안 소방용 보호복의 사용 시간은 다음과 같이 산출하였다.

Table 4-5에 따르면 조사기간 3년간 연평균 출동 횟수는 46회이며, 지역별로는 울산 지역이 최다 출

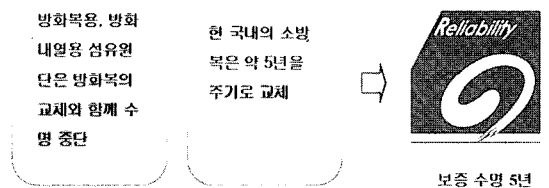


Figure 8. 소방용 보호복의 수명 결정.

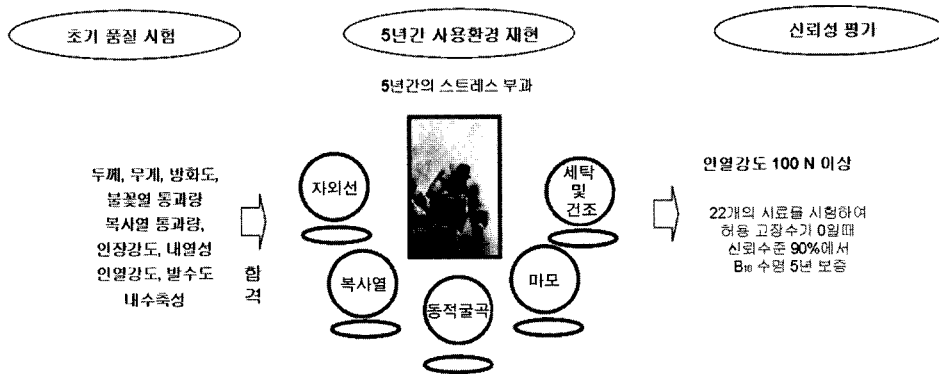


Figure 9. 신뢰성 평가시험 절차.

동한 지역으로 2002년 동안 68회 출동하였다. 따라서 본 신뢰성 평가에서는 연간 출동 시 소방용 보호복을 사용하는 회수를 결정하기 위해, 가혹한 조건으로 최다 출동한 경우인 울산의 연 68회를 각 소방관서에서 1년 동안 출동하는 회수로 하고, 각 소방관서에서 소방대원들이 2교대 하므로 소방대원 한 사람이 연간 출동하여 소방용 보호복을 착용하는 회수는 평균 34회 (68회/2)로 하였다. 또한 발생하는 화재의 종류에 따라 활동량과 착용 시간에 차이가 있을 수 있지만 평균적인 범위에서 판단하여 1회 착용 시간을 1회 4시간으로 하였다.

본 규격에서는 활동 행위의 가혹도 및 활동량의 정도를 표준화하기 위하여 ASTM F 1154 a(standard practices for qualitatively evaluating the comfort, fit, function, and integrity of chemical-protective suit ensembles)에 규정되어 있는 표준 활동 행위를 훈련의 가혹도 및 활동량의 기준으로 삼았다. 즉 훈련 가혹도는 표준활동 행위를 훈련시간에 계속 반복하는 것으로 하며 착용시간은 680시간(4시간/1회 × 34회/1년 × 5년), 세척은 30회(5년 × 6회/1년) 히는

Table 4. 2000-2002년 연간 시험조건 및 환경

년도	지역	소방파출소	화재 발생 현황	연간 출동 건수
2000	전국	739	34,844	47
2001	전국	747	36,169	48
2002	전국	766	32,966	43
3년간 출동 회수의 평균				46

것으로 보았다.

시험항목별 시험방법: (1) **일사처리** 실제 착용시의 조건을 고려해서 1회 착용시간 4시간 중 약 1.5시간을 일사를 받는 것으로 하여 5년동안 총 255시간 (1.5시간/1회 × 34회/1년 × 5년) 일사를 받는 것으로 하였다. ISO 105-B04(colour fastness to artificial weathering: xenon arc fading lamp test)의 조건을 적용하였으며, 제논 아크형(xenon-arc type) 광원에 CIRA(inner filter)/Soda lime(outer filter) 필터를 사용하고 광 조사량은 0.35 w/m² @340 nm로 하였다. 시험 시간의 결정은 Florida의 연간 광 조사량

Table 5. 2002년 지역별 화재 발생 현황과 연간 출동 건수

지역	소방파출소	화재발생 현황	연간 출동 건수
서울	108	6,017	56
부산	50	2,057	41
대구	43	977	23
인천	38	1,679	44
광주	19	777	41
대전	23	978	43
울산	16	1,083	68
경기	133	7,037	53
강원	50	1,455	29
충북	27	1,097	41
충남	32	1,333	42
전북	38	1,493	39
전남	47	1,391	30
경북	65	1,873	29
경남	58	3,276	56
제주	19	443	23

Table 6. 표준활동의 내용

순서	행 동 질 차	소용시간(분)
1	- 왼쪽 무릎으로 구부리고 앉기 - 양쪽 무릎으로 구부리고 앉기 - 오른쪽 무릎으로 구부리고 앉기	4회 반복 15초×4회=1.0
2	- 쪼그리고 앉기 - 오른발에 무게중심을 두기 - 왼발에 무게중심을 두기	4회 반복 10초×4회=0.7
3	- 똑바로 서기 - 손을 이용해서 몸을 왼쪽으로 굽히고 복귀하기 - 몸을 앞쪽으로 굽히고 복귀하기 - 몸을 오른쪽으로 굽히고 복귀하기	4회 반복 18초×4회=1.2
4	- 똑바로 서기 - 팔을 머리위로 올려서 측면으로 뺀고 팔꿈치를 굽히기 - 팔을 머리위로 올려서 앞쪽으로 뺀고 팔꿈치를 굽히기	4회 반복 13초×4회=0.9
5	- 똑바로 서기 - 팔을 몸통과 수직으로 옆으로 펴기 - 몸통을 왼쪽으로 비튼 후 복귀하기 - 몸통을 오른쪽으로 비튼 후 복귀하기	4회 반복 13초×4회=0.9
6	- 똑바로 서기 - 양팔을 가슴에서 교차시켜 반대쪽 옆구리에 닿게 하기	4회 반복 6초×4회=0.4
7	- 91 m를 걷기 또는 3분 동안 걷기	1회 반복 3.0
8	- 손과 무릎을 이용해서 6 m를 기기 또는 최소한 1분 동안 기기	1회 반복 1.0
9	전 체	9.1분 소요됨

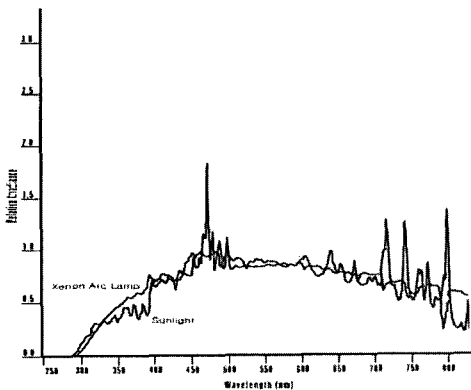


Figure 10. 태양광과 CIRA/Soda lime filter를 사용한 제논 광의 스펙트럼 비교

3080 kJ/m² @340 nm를 기준으로 실제 광 조사량과 Atlas 일광 시험기의 조사량을 비교하여 실제 시험 시간을 산출한 데이터(출처: Atlas)를 근거로 하여 68시간으로 산출되었다. (2) 복사열 처리 ISO 11613에 근거하여 1회 출동 시마다 위험한(hazardous) 상황에서 1.75 kW/m²의 복사열을 5분, 돌발(emergency)

상황에서 40 kW/m² 복사열을 10초 동안 받는 것으로 하였다. 따라서 5년 동안의 사용 상황을 재현하여 1.75 kW/m²의 복사열을 총 14시간 (0.083(5 min /60 min)시간/1회×34회/1년×5년), 40 kW/m²의 복사열을 총 28분 (0.17 (10 s/60 s) 분/1회×34회/1년×5년) 조사한다. (3) 동적굴곡 및 마모처리, 또한 본 규격에서는 훈련행위의 가혹도 및 활동량의 정도를 표준화하기 위하여 ASTM F 1154(standard practices for qualitatively evaluating the comfort, fit, function, and integrity of chemical-protective suit ensembles)에 규정되어 있는 표준활동행위를 훈련의 가혹도 및 활동량의 기준으로 삼았다. 본 규격에서 활동의 기준으로 삼는 ASTM F 1154의 내용 및 처리 회수는 Table 6과 같다.

Table 6의 표준 활동 행위에서 제품 중 가장 많은 굴곡 및 마모작용을 받는 부분은 무릎부분으로 나타났다. 본 규격에서는 무릎을 1회 굽히는 현상을 1회 굴곡으로 보았으며 무릎으로 1회 기어가는

동작을 1회 마모로 설정하였다. 그리고 굴곡과 마모행위는 전체 훈련시간에 계속 유지되는 것이 아니라 훈련시간의 1/2시간이 실제 마모 및 굴곡이 계속되는 시간으로 본다.

- 무릎의 굴곡횟수: 순서1-8회, 순서2-8회, 순서7-165회, 순서8-30회, 전체: 211회 / 9.1분 착용시간은 680시간/5년에 해당되므로 위의 조작을 4484번(40,800분/9.1분) 반복하는 수치에 해당된다. 여기서 실제 굴곡현상은 전체 착용시간의 1/2시간 발생되는 것으로 보아 470,000회(475,304 = 106회(106≐211/2)×4484) 굴곡 처리 한다.
- 무릎의 마모횟수: 순서8-30회, 전체: 30회/9.1분, 착용시간은 680시간/5년에 해당되므로 위의 조작을 4,484번(40,800분/9.1분) 반복하는 수치에 해당된다. 여기서 실제 굴곡현상은 전체 착용시간의 1/2시간 발생되므로 67,000회(67,260= 15회(=30/2)×4,484번) 마모 처리한다. (4) 세척 및 건조시험 세척 및 건조는 1년 6회 하는 것으로 하여 30회(5년×6회/1년) 세척한다.

5.5. 통계적인 신뢰성 기법 이용

보호용 섬유원단은 시간에 따라서 열화되어 고장률이 증가하는 형태의 고장형태를 보이므로 와이블 분포를 이용하였고, 허용 고장수는 0으로 결정하였다. 시료수는 다음식에 의해 결정하였다.

$$n \geq (\tau^*/T)^{\beta} \times \chi_{0.1}^2(2)/2 \times \{1/\ln(1-0.1)\}^{-1} \quad (1)$$

단, n은 시료수, τ*는 보증하고자 하는 B₁₀수명, T는 시험시간, β는 와이블분포의 형상모수이다

이 때, 본 신뢰성 평가에서 보증하고자 하는 B₁₀수명은 5년이고, 5년에 해당하는 보관 및 사용시간을 시험시간으로 정하였으므로 형상모수는 시료수에 영향을 주지 않는다.

따라서 (1)식에 의해 결정된 시료수로 5년간의 사용 환경을 재현하여 시험한 후 하나도 고장 나지 않았을 경우, 현재 사용하고 있는 소방용 보호복은 신뢰수준 90%에서 B₁₀수명이 5년임을 보증할 수 있다.

5.6. 소방용 보호복 소재 신뢰성 평가의 향후 진행 방향

소방용 보호복 소재의 신뢰성 평가는 신뢰성 적합 시험으로, 보증하고자 하는 수명을 설정하고, 실제 수명이 그 이상 됨을 신뢰수준 100(1-β)%로 보증하는 방식이다. 그러나 향후에는 신뢰성 적합 시험에서 축적된 데이터를 바탕으로 소방관들의 안전을 더욱 확실히 보장하고, 보호복의 경제적 효용성을 더욱 높이기 위해 제품의 수명을 정량적으로 예측할 수 있는 신뢰도 결정 방식의 신뢰성 평가 방법을 추가 개발할 예정이다.

이러한 소방용 보호복의 신뢰도 결정 시험 개발의 일환으로, 5.1.-5.5. 에서 보호복의 성능을 저하시

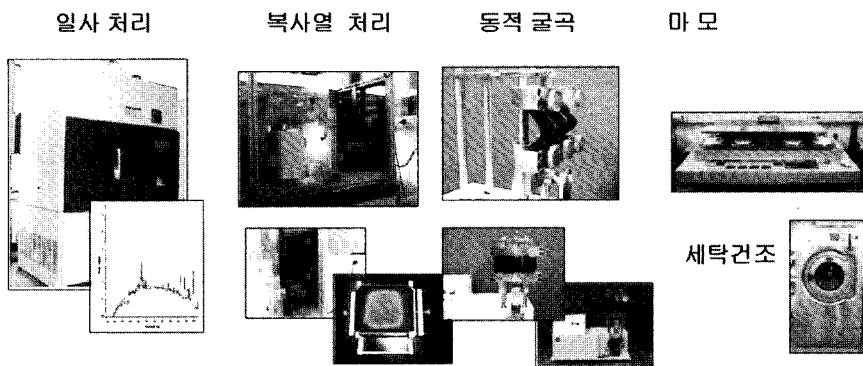


Figure 11. 사용환경 재현을 위해 사용한 신뢰성 평가 시험기기.

킬 수 있는 스트레스 요인으로 설정된 일광, 복사, 굴곡, 마모, 세탁 건조요인이 실제로 소방용 보호복의 고장에 미치는 영향을 조사하기 위해, $L_{16}(2^{15})$ 직교배열표를 이용한 요인실험을 하여, 실제 영향을 미치는 고장 요인을 추출하는 연구를 진행 중이다.

6. 결 론

신뢰성은 단순히 결함을 방지하고 안전을 확보하는 기술이 아니라, 비용을 절감시키기 위해서도 이용된다. 또한 에너지 절약이나 경량화를 추진할 때에도 이용된다. 이와 같이 좀 더 거시적인 역할까지 신뢰성이 감당하게 되었다. 또한 시스템이나 기기의 사용법 또는 사용 목적이 다양해지고, 신제품 개발 속도가 빨라지면서 짧은 기간 안에 합리적인 신뢰성 관리가 더욱 필요하게 되었다. 따라서 앞으로 신뢰성은 개발지원을 위한 적극적인 도구가 될 것이다.

섬유소재 분야에서 보다 정량적인 신뢰성 평가를 하고, 신뢰성 있는 제품을 만들어 내기 위해서는 신뢰성의 개념이 먼저 확실히 서야하며, 신뢰성 관리를 통일적으로 실행해 나가지 않으면 안된다. 우선 섬유소재의 신뢰성은 기계의 성능 시험과 같이 간단히 또는 짧은 시간에 정량적으로 파악될 수 있는 것이 아니다. 일반적으로 섬유소재 시스템의 양·불량은 장기간의 사용 실적에 의해 비로소 파악된다고 할 수 있다. 그러나 장기적인 사용 실적에 의해 내구성에 대한 시비가 판명된다면, 그 때는 이미 제품은 시장에 유통된 이후이므로, 사후 대책 마련에 급급하게 된다. 그러므로 되도록 개발이나 설계단계에서 시스템의 양·불량을 확인해야 하며, 신뢰성을 확보하기 위해서 어떤 특정한 품질보증 체계 또는 신뢰성 프로그램에 의해 언제까지, 누가, 어떤 방법으로 신뢰성을 결정짓는 여러 가지 특성을 확인 및 점검할 것인지를 결정해야 한다.

신뢰성에는 이론과 실제라는 양면성이 있다. 즉, 복잡한 시스템에 대한 신뢰성 모델을 만든다든지 고장발생 패턴을 수량화해서 연구하는 이론적 측면

과 구체적인 현실 문제를 해결하는 실제적인 측면이다. 다행히 의류·섬유소재를 비롯한 보호용 섬유소재는 그 수명이 1회용에서부터 장기적으로는 10년까지로 그 이상 사용하는 다른 부품이나 소재에 비해 실제 상황을 재현하는 것이 어렵지 않다. 여기서 중요한 것은, 신뢰성 실무에서는 고도로 발달한 난해한 이론 보다도 제품이나 시스템의 신뢰성을 향상시키는데 필요한 어느 정도의 이론을 숙지하고, 현실과 가장 가까운 신뢰성 시험을 설계하여, 실제 제품의 신뢰성 관리와 품질 향상에 도움이 되어야 한다는 것이다.

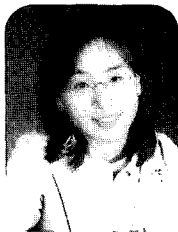
앞으로 보호용 섬유소재의 신뢰성은 지금까지 품질관리가 다루지는 않았지만 현 상태에서 중요시되고 있는 보호용 섬유소재의 내구성 및 안정성을 향상시키기 위한 관리 기술로서 매우 유용하게 이용될 것이다.

참고문헌

1. 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(1987).
2. Behnke, W. P. and Seaman, R. E., "Laboratory tests which predict end-use performance under high temperature conditions", *Applied Polymer Symposia*, **9**, 49(1969).
3. Benis D. L., and Phillips, W. A., "Analysis of heat transfer characteristics of fabrics in an open flame exposure", *Textile Research Journal*, **53**(8), 475(1983).
4. Day, M. Cooney, J. D. and Suprunchuk, T., "Durability of firefighters' protective clothing to heat and light", *Textile Research Journal*, **58**(3), 141(1988).
5. Holcombe, B. V. and Hschke, 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 (1986).
6. Ross, J., "Thermal conductivity of fabrics as related to skin burn damage", *J of Applied Polymer Science : Applied Polymer Symposium*, **31**, 293(1977).
7. Schoppee, M. M., Welsford, J. M. and Abbott, N. J., "Protection offered by light weight 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(1986).

8. Shalev, I. and Barker, R. L., "Analysis of heat transfer characteristics of fabrics in an open flame exposure", *Textile Research Journal*, **57**(6), 331(1987).
9. "Protecting firefighters into the millenium", *Fire Prevention, Issue 3/2*, September, 6(1998).
10. Fire and emergency manufacturers and services association, "FEMSA Official user information guide on protective clothing", Washington, DC, 1996.
11. Lounis, Z., Vanier, D. J., Lacasses, M.A., and Kyle, B., "Effective decision making tools for roofing maintenance management", *Proceedings, First International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Construction, Montreal*, 425(1998).
12. Stull, J. O., Dodgen, C. R., Conner, M. B. and McCarthy, R. T., "Evaluating the effectiveness of different laundering approaches on decontaminating structural fire fighting protective clothing", *Performance of Protective Clothing : Fifth Volume, ASTM STP 1237*, J. S. Johnson and S. Z. Mansdorf, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 447(1996).
13. Torvi, D. A. and Hadjisophocleous, G. V., "Development of methods to evaluate the useful lifetime of firefighters' protective clothing", *Performance of Protective Clothing: Issues and Priorities for the 21st Century: Seventh Volume, ASTM STP 1386*, C. N. Nelson and N. W. Henry, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 117(2000).
14. Torvi, D. A. and Hadjisophocleous, G. V., "Research in protective clothing for fire fighters-state of the art and future directions." *Fire Technology*, **35**, p.111, 1999.
15. Tutterow, R., Vamer, B., Sorci, A., Soros, C. Brehm, D, Harms, T. and Jilg, T., "PPE Care and use guidelines", Fire Industry Equipment Research Organization(FIERO), Acworth, GA, 1994.
16. Vogelpohl, T. L., Post-use evaluation of fire fighter's turnout coats, "M.Sc. Thesis, University of Kentucky, Lexington, KY, 1996.
17. 김명수, "신뢰성평가를 위한 기본 개념과 시험조건 결정", 제 2회 부품·소재 신뢰성워크샵, 2001.
18. 김재주, 백재욱, "신뢰성 공학", 한국방송대학교출판부, 2003.
19. 김진규, "신뢰성 공학", 한울출판사, 2003.
20. ISO 11613:1999 "Protective clothing for firefighters - Laboratory test methods and performance requirements".
21. ISO 15538:2001 "Protective clothing for firefighters - Laboratory test methods and performance requirements for protective clothing with a reflective outer surface".
22. ASTM F 1449 : 2001 "Standard Guide for Care and Maintenance of Flame, Thermally and Arc Resistant Clothing".
23. ASTM F 1002 : 2005 "Standard Performance Specification for Protective Clothing for Use by Workers Exposed to Specific Molten Substances and Related Thermal Hazards".
24. CAN/CGSB 155.23 "Recommended Practices for the Provision and Use of Fireline".

저자 프로필



윤혜신

1995. 인하대학교 의류학과 졸업
 1997. 인하대학교 의류학과(석사)
 2003. 인하대학교 섬유공학과(박사)
 1999-2003. (주)웅천텍스텍 근무
 2003-현재. 한국의류시험연구원 제직 중



김도식

1991. 숭실대학교 섬유공학과 졸업
 1994. 단국대학교 섬유공학과(석사)
 2003. 숭실대학교 섬유공학과(박사수료)
 1991-현재. 한국의류시험연구원 제직 중



김규로

1986. 경희대학교 기계공학과 졸업
 1988. 경희대학교 기계공학과(석사)
 2004. 경희대학교 기계공학과(박사)
 1995-현재. 산업자원부 기술표준원 기술
 정보신뢰성과 근무