

절단 방지용 방검소재의 가속수명시험

장갑식^{1*} · 정예리¹ · 전병대²

¹FITI시험연구원 연구개발본부, ²(주)아즈텍WB 부설연구소

Accelerated Life Test of Knife Protection Fabrics for Cut Resistance

Gap-Shik Chang¹ · Ye-Lee Jung¹ · Byong-Dae Jeon^{2*}

¹FITI Testing & Research Institute, ²AZTECH WB

Purpose : UHMWPE (Ultra-high-molecular-weight-polyethylene) is one of the most widely used material in knife protection clothes because of high strength, elasticity, and light weight. The purpose of this study is to develop the accelerated life test method and predict the lifetime for the knife protection fabric composed by UHMWPE.

Methods : In this study, degradation characteristics of UHMWPE fibers and knife protection fabric for cut resistance were evaluated under the hydrolysis and photo-degradation conditions. It was found out that the degradation rate of retained tensile strength was more significant in the photo-degradation than hydrolysis. Therefore, the failure time was determined as the time that the retained tensile strength in photo-degradation is less than 50%. Considering an acceleration factor for irradiance and exposure time, the lifetime was predicted from the calculated failure time.

Results : As a result of the accelerated life test, the B₁₀ lifetime of knife protection fabric composed by UHMWPE fibers is estimated as 2.8 years for a 90% statistical confidence level.

Conclusion: Since the lifetime is predicted by the view-point of radiant exposure in this study, there is a possibility that the estimated lifetime may differ from the actual lifetime. However, it is considered as an useful methodology to estimate the long-term lifetime of knife protection fabrics.

Keywords: Knife Protection Fabric, Cut Resistance, Accelerate Life Test, Photo-Degradation, Hydrolysis

1. 서론

방검소재 및 방검복은 칼에 의한 상해로부터 신체를 보호하기 위해 사용되는 제품으로 강력한 내구성을 요구하기 때문에 아라미드, 탄소섬유, 유리섬유, 초고분자폴리에틸렌(UHMWPE)과 같은 고강력사로 제작된다. 이중 UHMWPE 원사는 분자량이 높아 내마모성과 높은 인장강도, 내충격특성을 가지며, 방검복으로 제작시 우수한 착용감과 경량성으로 사용량이 증가하고 있는 실정이다(Li *et al.*, 2012).

방검복은 인장강도, 인열강도와 같은 기본 물성 외에, 사용 용도에 따른 칼날 관통저항(stab resistance) 및 칼날 베임저항(cut resistance)이 가장 중요한 물성이다 칼날에 대한 관통저항은 NIJ Standard-0115.00에 의해 주로 평가되고 있으며(정기수 외, 2008), 절단 방지용 방검원단은 ISO 13997, ASTM F 1790 및 EN

388에 따라 칼날 베임저항을 측정한다(Vu Thi *et al.*, 2009). 이중 ISO 13997 및 ASTM F 1790은 일정하중에서 straight blade로 20mm를 절단하는데 필요한 컷절단강도를 측정하며, EN 388은 circular blade에 의한 베임저항을 지수(표준 물질인 cotton canvas의 절단 횟수에 대한 시험편의 절단 횟수 비)로 측정한다.

영국의 경찰 방검복을 납품하는 PPSS사의 제품설명서에 따르면 UHMWPE로 제작된 방검복의 사용수명이 3년으로 명시되어 있지만, 수명예측을 위한 열화특성 자료는 미흡한 실정이다. 방검소재는 사용환경에서 열화에 의한 물성 저하가 예상되며, 이는 안전과 직결되기 때문에 방검소재의 사용수명 예측에 대한 연구는 매우 중요하다 따라서 본 연구에서는 UHMWPE 원사와 UHMWPE를 기반으로 제작한 절단 방지용 방검원단에 대해 내환경성평가를 수행하고, 이로부터 도출된 가속조건으로부터 방검소재에 대한 신뢰성 평가 및

* 교신저자 gschang@fitiglobal.com

2015년 10월 2일 접수; 2015년 10월 28일 수정본 접수; 2015년 11월 5일 게재 확정.

사용 수명을 추정하였다.

2. 평가시험

방검소재의 내환경성평가 및 가속수명시험을 위하여 UHMWPE 원사 3종(Y-1, Y-2, Y-3)과 국외에서 시판되고 있는 방검원단 1종(F-1)을 선정하였다. Y-1 및 Y-2는 100% UHMWPE 이며, 섬유의 굵기가 각각 30 denier 및 50 denier인 원사이다. Y-3은 방검복의 칼날 베임저항을 확보하면서 사용 중 쾌적성 및 활

동성을 향상시키기 위해 양모와 UHMWPE를 75% : 25%로 혼방(siro spun yarn)한 것이다. 방검원단인 F-1의 경우 UHMWPE, polyester 및 glass fiber가 혼방된 편직물(knit fabric)이다. 시험은 컨디셔닝을 위해 KS K ISO 139에서 제시한 온도 (20±2)℃, 상대습도 (65±4)%의 표준상태에서 24시간 동안 방치하였다. 평가에 사용한 원사 및 원단의 물리적 특성은 각각 <표 1> 및 <표 2>와 같다. <그림 1>은 사용된 원사의 단면 및 측면에 대한 SEM 사진을 나타낸 것으로, F-1 원단의 경우 polyester 및 glass fiber를 제외하고 UHMWPE 원사만 선별하여 관찰하였다.

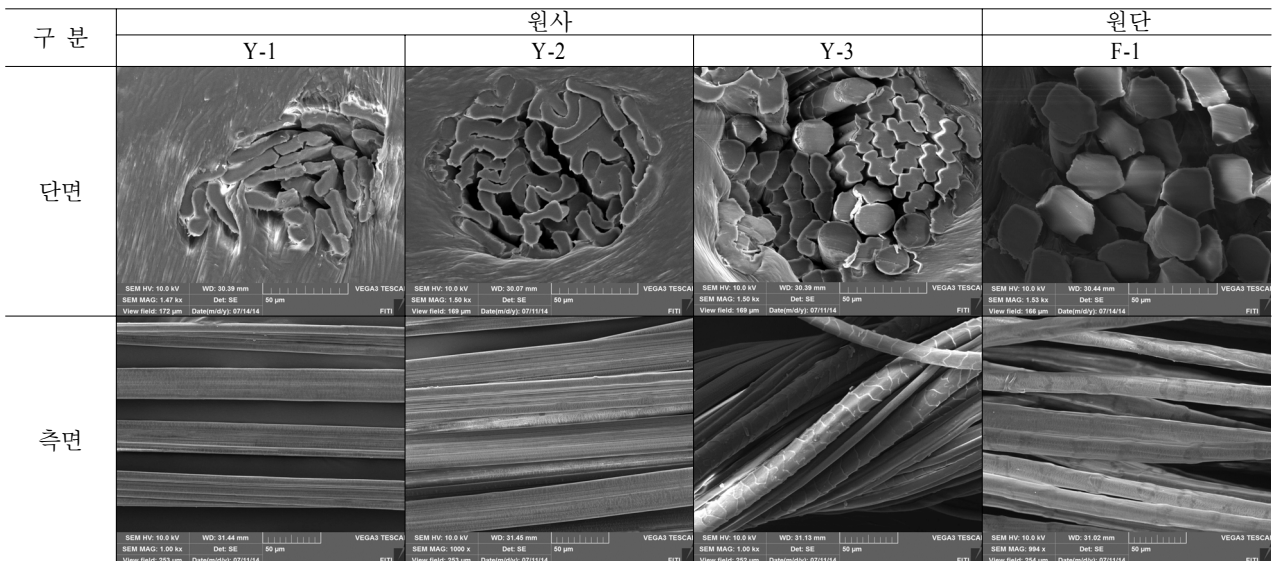
<표 1> UHMWPE 원사 3종의 물리적 특성

평가항목	시험방법	단위	시료(원사)		
			Y-1	Y-2	Y-3
조성비	-	-	100% UHMWPE	100% UHMWPE	75% wool 60's/ 25% UHMWPE 30d
섬도	KS K ISO 2060	denier	30	50	30 ^{주)}
인장강도	KS K 0412	N	7.7	13.0	7.1
인장신도	KS K 0412	%	3.1	3.0	6.4
용융온도	DSC	℃	144.8	144.9	143.1 ^{주)}

주) Y-3 원사의 섬도 및 용융온도는 wool을 제외한 UHMWPE 만의 측정 결과임.

<표 2> 방검 원단의 물리적 특성

평가항목	시험방법	단위	시료(편직물, F-1)
조성비	-	-	68% UHMWPE/21% Polyester/11% glass fiber
중량	KS K 0514	g/m ²	505.0
두께	KS K ISO 5084	mm	1.38
인장강도	KS K 0642	N/50mm	2,985
인열강도	EN 388	N	386
컷절단강도	KS K ISO 13997	N	23.3
깨물림강도	KS K ISO 13996	N	27.8



<그림 1> 시료 SEM 사진

3. 내환경성평가(가속인자 도출)

3.1 내환경성 시험방법

절단 방지용 방검원단의 경우, 그 특성상 주로 의복 위에 착용되기 때문에 가수분해 또는 광열화에 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 UHMWPE로 제작된 원사와 원단의 내환경성을 평가하기 위하여 가수분해 및 광열화에 의한 물성저하를 측정하였다.

가수분해 및 열산화에 의한 열화현상을 가속시키기 위하여 일반적으로 100℃ 이하의 온도조건에서 온습도 처리하는 가속시험법이 사용되고 있다. 그러나 소재에 따라 100℃ 이하의 온습도 조건에서 가수분해 및 열산화에 의한 열화현상을 가속하기 위해서 장시간(100일 이상) 동안 처리해야 하는 문제점이 발생할 수도 있다. UHMWPE 소재의 용점은 140℃ 전후인 것으로 나타나지만 열안정성을 고려한 상용 사용온도는 (80~100)℃이므로, 본 논문에서는 가수분해 조건을 온도 95℃, 습도 95%로 설정하였다.

광열화를 가속하기 위한 인공광원에는 크세논아크(Xenon arc) 및 UV 램프(UV-A, UV-B)가 있으며, 이중 크세논 아크는 적절한 광필터를 사용하면 어떤 광원보다 자외선 및 가시광 영역의 자연광을 잘 모사할 수 있기 때문에 가장 많이 사용되는 인공광원이다. 따라서 광열화 시험 시 인공광원은 크세논 아크를 사용하였으며, 필터조합(inner/outer)은 S-borosilicate/sodalime 필터(유리 뒤쪽에서 시행하는 내광성 시험에 가장 일반적인 조합으로, 의류용에서 많이 사용)를 사용하였다. 광열화 시험장비는 ATLAS사의 Ci5000 Weather-Ometer를 사용하였으며, 인공광원과 시험편 사이의 거리는 45.72cm이다.

현재 방검소재의 내환경성(가수분해, 광열화) 평가에 대한 시험표준은 없는 상태이며(한설아, 남윤자(2008)), UHMWPE 소재 특성 및 사용환경을 고려하여 가수분해 및 광열화에 대한 시험조건을 각각 <표 3> 및 <표 4>와 같이 선정하였다. 그

외 시험방법은 각각 KS K 0936 및 KS K 0746에 따라 수행하였다. 방검소재의 열화특성을 평가하기 위하여 처리시간에 따른 인장강도(원사, 원단) 및 컷절단강도(원단)를 측정하였다. 원사의 인장강도는 KS K 0412, 원단의 인장강도는 KS K 0642 A법(스트립법), 컷절단강도는 KS K ISO 13997에 따라 평가하였다. 모든 조건에서 원사는 5회 반복, 원단은 3회 반복 측정하여 평균을 구하였다.

3.2 시험 결과

방검소재(원사, 원단)의 가수분해에 의한 열화도는 <그림 2>와 같다. Y-1 및 Y-2 원사의 경우 720시간 가수분해 처리시 인장강도유지율이 약 (80~85)% 정도로 감소하였지만, 다른 시료(Y-3, F-1)의 경우 통계적으로 유의한 차이가 발생하지 않았다. 특히 방검복 원단의 컷절단강도에 대한 가수분해 영향은 거의 발생되지 않았다. UHMWPE는 완전한 소수성으로 수분흡수가 거의 없기 때문에 가수분해에 의한 물성저하가 크게 발생하지 않는 것으로 판단된다.

방검소재의 광열화에 의한 열화도는 <그림 3>과 같다. 인장강도유지율의 경우, 가수분해 거동과 달리 광열화에 의한 물성저하가 크게 발생함을 알 수 있다. 특히 원사의 굵기가 30 denier인 Y-1 및 Y-3 시료는 500시간에서 인장강도유지율이 약 40%로 급격한 물성 저하를 보이고 있는데, 이는 Y-2 및 F-1에 비해 원사의 굵기가 가늘어 인공광원에 노출된 표면적이 넓기 때문인 것으로 보인다. 컷절단강도는 광열화 처리시간에 따른 물성저하가 발생하지 않았다.

<그림 2> 및 <그림 3>으로부터, UHMWPE를 사용한 절단 방지용 방검소재는 가수분해에 비해 광열화에 의한 인장강도유지율이 크게 감소함을 확인하였다. 따라서 수명예측을 위한 가속수명시험 시 가속인자로 광열화를 선택하였으며, 처리시간에 따른 인장강도유지율을 측정하였다.

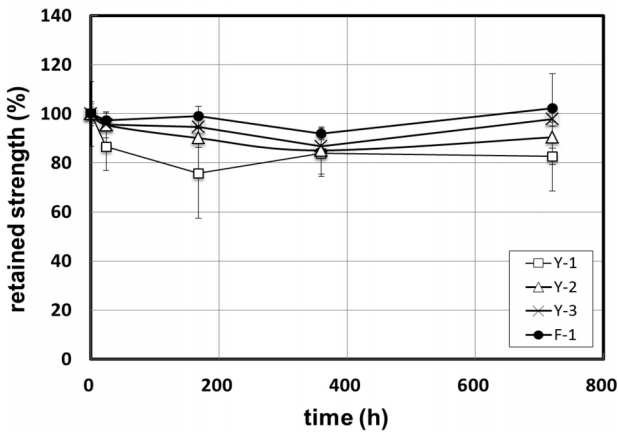
<표 3> 가수분해 조건

시험조건			평가 항목
온도 (°C)	습도 (%RH)	처리시간 (h)	
95	95	1, 24, 168, 360, 720	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인장강도(원사, 원단) → 인장강도유지율 ○ 컷절단강도(원단)

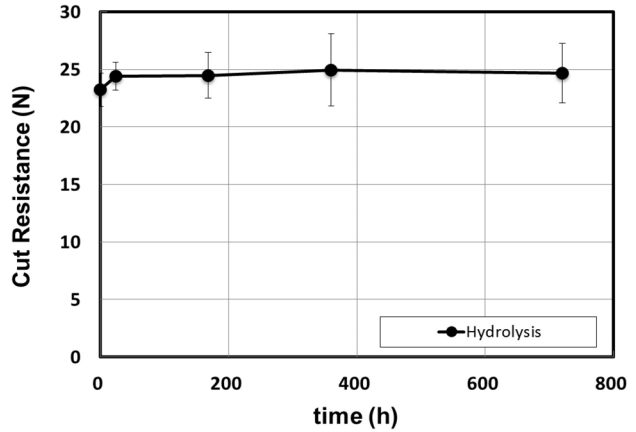
<표 4> 광열화 조건

시험조건					평가 항목
인공광원 (inner/outer)	복사조도 (W/m ²)	BPT주)온도 (°C)	습도 (%RH)	처리시간 (h)	
Xenon arc (S-borosilicate/sodalime)	1.1 W/m ² @ 420nm	63	30	20, 140, 500, 1,000	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인장강도(원사, 원단) → 인장강도유지율 ○ 컷절단강도(원단)

주) BPT: Black Panel Temperature.

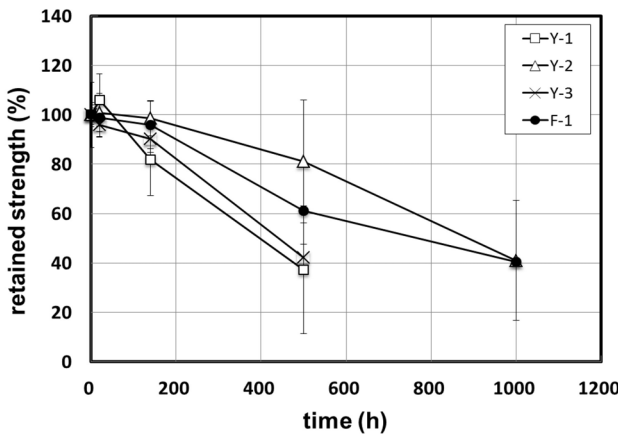


(a) 인장강도유지율

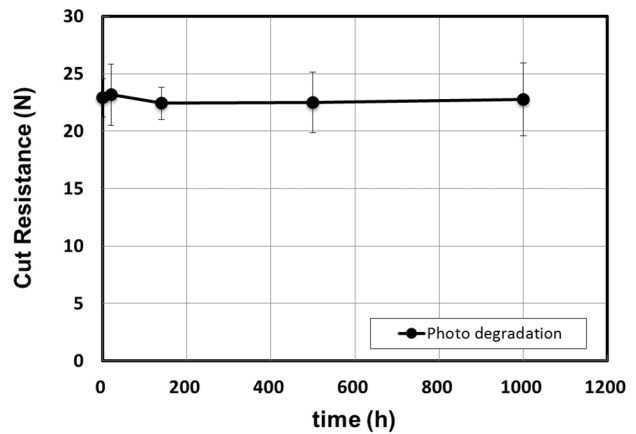


(b) 컷절단강도 (F-1)

<그림 2> 가수분해에 의한 방검소재 열화도



(a) 인장강도유지율

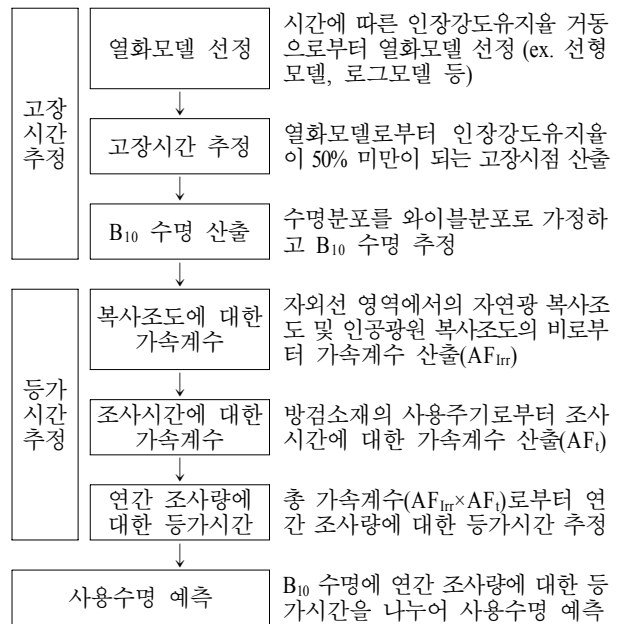


(b) 컷절단강도 (F-1)

<그림 3> 광열화에 의한 방검소재 열화도

4. 가속수명시험

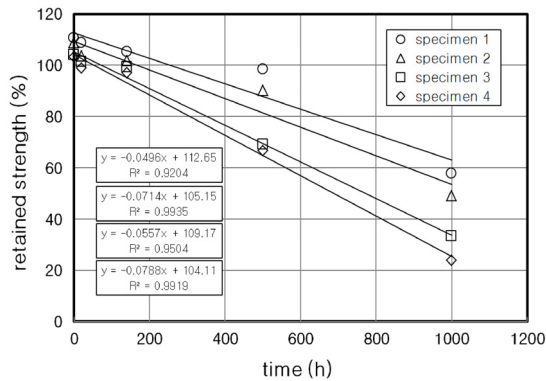
UHMWPE를 사용한 절단 방지용 방검소재의 가속수명시험을 위해 <표 4>에서 제시한 시험조건으로 광열화에 따른 인장강도유지율을 측정하였다. 광 조사시간(exposure time)에 대한 인장강도유지율의 관계식으로부터 인장강도유지율 50%에서의 고장시간을 구하였다. 동일한 조사량= 복사조도 × 조사시간이 부여될 경우 광열화에 의한 물성변화는 동일하게 발생된다는 레시프로서티 법칙(reciprocity rule)이 성립한다는 가정하에(Martin et al., 2008), 광열화 가속수명시험으로 추정된 고장시간으로부터 실제 사용 조건에서의 수명을 예측하기 위해 연간 조사량에 대한 등가시간(equivalent time)을 구하였다. 이러한 등가시간은 사용 조건에서의 연간 조사량과 동일한 조사량을 부여하기 위해 광열화 가속수명시험시 필요한 조사시간으로, 복사조도에 대한 가속계수 및 방검소재의 사용주기를 고려한 조사시간에 대한 가속계수로부터 추정하였다. <그림 4>는 광열화 가속수명시험으로부터 수명 예측을 위한 절차를 나타낸 것이다.



<그림 4> 광열화 가속수명시험으로부터 수명 예측을 위한 절차

4.1 고장시간 추정

방검소재의 광열화 특성으로부터, 처리 시간별로 시험편의 인장강도를 측정하여 열화도를 구하였다. 시간 경과에 따른 인장강도유지율이 선형 형태로 나타나기 때문에 <그림 5>와 같이 조사시간-인장강도유지율의 관계를 선형모델로 가정하고 인장강도유지율 50%에서의 고장시간을 구하였다. 추정된 고장시간을 와이블분포로 가정하고 90% 신뢰수준에서 B₁₀수명을 산출하였다. 각 시료에 대해 산출된 고장시간 및 B₁₀수명은 <표 5>와 같다.



<그림 5> 조사시간과 인장강도유지율 관계(Y-2)

<표 5> 고장시간(인장강도유지율 50%) 및 B₁₀ 수명 산출 결과

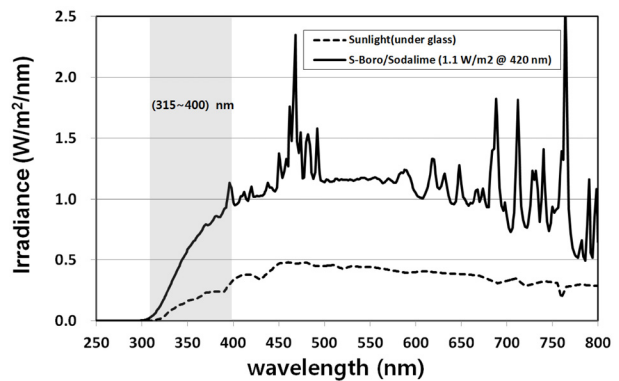
구 분	시험편	원사			원단
		Y-1	Y-2	Y-3	F-1
고장 시간 (h)	1	571.0	1,263.3	496.3	803.3
	2	425.8	1,061.4	463.2	796.7
	3	368.1	772.4	431.6	787.0
	4	300.6	686.9	418.4	-
	5	-	-	403.5	-
B ₁₀ 수명 (h)	-	198.7	459.7	354.0	776.9

4.2 조사량에 대한 등가시간 추정

사용 환경에서 받는 조사량에 대한 등가시간은 복사조도에 대한 가속계수 및 제품의 사용주기를 고려한 조사시간에 대한 가속계수로부터 추정하였다. 복사조도에 대한 가속계수는 기상청 기후자료(태양기상자원지도) 및 국내 옥외폭로 시험장(서산)에서 제공한 기후자료로부터 산출한 자외선 영역의 자연광 복사조도와 내광성 시험시 조사한 복사조도의 비로부터 계산하였다. 조사시간에 대한 가속계수는 제품의 사용주기(1일 사용시 평균 조사시간, 주 사용 일수, 년 사용 개월)를 고려한 연간 조사시간으로부터 계산하였다.

기상청에서 제공하는 국내 22개 지역의 20년(1991~2010) 간 기후자료(태양기상자원지도)에 따르면 국내 연간 총 조사량은 4,753MJ/m², 국내 연간 총 일조시간은 2,110h이다. 국내 옥외폭로시험장에서 제공한 2014년도 일사량 자료에 따라

면, 유리 뒷면에서의 연간 자외선(315~400nm) 총 조사량은 110 MJ/m²이다. 가속수명시험시 인공광원은 유리 뒤쪽에서 시행하는 내광성 시험조건(S-borosilicate/sodalime)으로 수행하였기 때문에, 복사조도에 대한 가속계수는 유리 뒷면에서의 자연광 및 인공광원의 복사조도 비로부터 산출하였다. <그림 6>은 국내 기후자료 및 가속수명시험조건에 따라 구한 유리 뒷면에서의 자연광 및 인공광원의 스펙트럼 분포를 나타낸 것이다. 315~400 nm 범위의 자외선 영역에서 자연광 복사조도는 14.4 W/m², 인공광원의 복사조도는 51.9 W/m²으로 복사조도에 대한 가속계수는 3.6이다.



<그림 6> 자연광과 인공광원의 스펙트럼분포

조사시간에 대한 가속계수를 구하기 위해 제품의 사용주기를 1년에 주 5일, 8개월 동안 사용하고, 1일 사용 시 조사시간을 1일 평균 일조시간인 5.78 h(= 2,110h/365)으로 가정하였다. 이 경우 사용조건을 고려한 연간 조사시간은 1,004 h [= (365/12/7)×5×8×5.78]으로 추정되며, 조사시간에 대한 가속계수는 8.7(= 24h×365/1,004h)이다. 따라서 사용 환경 조건에서 연간 조사량에 대한 총 가속계수는 31.3(= 3.6×8.7)으로, 연간 조사량에 대한 등가시간은 279.5 h(= 365×24/31.3)이다.

4.3 사용수명 예측

가속수명시험으로부터 추정된 B₁₀수명을 사용조건을 고려한 연간조사량에 대한 등가시간으로 나누어 사용수명을 추정하였다. <표 6>은 각 시료에 대한 사용수명(신뢰수준 90%, B₁₀수명) 추정 결과를 나타낸 것이다. 원사의 굵기가 50 denier 인 Y-2의 수명이 1.6년으로, 상대적으로 굵기가 가는 30 denier 인 Y-1 및 Y-3에 비해 수명이 길게 추정되었다. 이는 원사의 굵기에 의한 영행원사 굵기가 가늘수록 광원에 노출되는 표면적이 넓어 광열화가 더 크게 발생)으로 판단된다. Y-3 원사의 경우는 Y-1 원사와 굵기는 동일하지만 쾌적성 향상을 위해 혼방한 양모가 UHMWPE 원사를 덮고 있는 형태이기 때문에, Y-1 원사에 비해 상대적으로 UHMWPE 원사의 광열화가 적게 발생하여 수명이 더 길게 추정된 것으로 보인다. 원

단(F-1)의 경우는 유리섬유(glass fiber)가 11% 함유되어 있으며 원사의 굵기도 380 denier로 높기 때문에, 수명이 2.8년으로 가장 길게 추정되었다.

〈표 6〉 절단 방지용 방검소재의 사용수명 추정 결과

구 분	원사			원단
	Y-1	Y-2	Y-3	F-1
사용수명 (년) (신뢰수준 90%, B ₁₀ 수명)	0.7	1.6	1.3	2.8

5. 결 론

본 연구에서는 방검소재의 수명예측을 위해, 방검소재의 물성저하에 영향을 미치는 스트레스 요인을 분석하고 광열화에 의한 가속수명시험조건을 설계하였다. 또한 복사조도에 대한 가속계수 및 사용주기를 고려한 조사시간에 대한 가속계수로부터 연간 조사량에 대한 등가시간을 구하였으며, 이로부터 사용수명을 추정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 통해 방검소재의 사용조건에서 B₁₀ 수명은 90% 신뢰수준에서 UHMWPE 원사는 (0.7~1.6)년, 절단방지용 방검원단은 2.8년으로 각각 추정되었다. 본 연구에서 제시한 방법은 조사량에 대한 관점으로 수명을 추정한 것이기 때문에 실제 수명과 차이가 발생할 수 있지만, 방검소재의 신뢰성 비교를 위한 하나의 방법으로 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 광열화에 의한 가속성을 향상시키기 위한 초가속시험을 통해 절단 방지용 방검원단의 주요 물성인 컷절단강도의 물성저하로부터 사용수명을 추정하여 본 연구결과와 비교하고자 한다.

참고문헌

1. 정기수 · 김연상 · 박중호 · 홍지은 (2008), 방검복 특성 및 성능평가 기술, 섬유기술과산업, 제4권, 제12호, pp. 247-252.
2. 한철아 · 남윤자 (2008), 보호복 관련 국내 · 외 표준에 대한 탐색적 조사, 한국의류산업학회지, 제10권, 제1호, pp. 92-100.
3. Li, C. S., Zhan, M. S., Huang, X. C., and Zhou, H. (2012), Degradation behavior of ultra-high molecular weight polyethylene fibers under artificial accelerated weathering, *Polymer Testing*, Vol. 31, pp. 938-943.
4. Martin, J. W. Ryntz, R. A., Chin, J., and Dickie, R. A. (2008), *Service Life Prediction of Polymeric Materials: Global Perspectives*, Springer, pp. 71-82.
5. Vu Thi, B. N., Vu-Khanh, T., and Lara, J. (2009), Mechanics and Mechanism of Cut Resistance of Protective Materials, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 52, pp 7-13.
6. ASTM F 1790 (2014), *Standard Test Method for Measuring Cut Resistance of Materials Used in Protective Clothing with CPP Test Equipment*.
7. EN 388 (2003), *Protective gloves against mechanical risks*.
8. ISO 13997 (1999), *Protective clothing - Mechanical properties - Determination of resistance to cutting by sharp objects*.
9. KS K 0746 (2009), 지오텍스타일의 내후성 시험방법: 크세논 아크법.
10. KS K 0936 (2007), 지오텍스타일 및 관련제품-물에 대한 가수분해 저항성 측정을 위한 스크리닝 시험방법.