

한국섬유개발연구원 작전환경적용 실증센터 구축현황

1. 서 론

한국섬유개발연구원 작전환경적용 실증센터는 군 작전복을 시작으로 소방 등 특수 산업 근로자의 생명과 안전을 지키는 특수 의복 개발을 목표로, 화재 안정성과 착용 쾌적성 간 상호관계 규명을 위한 장비를 구축하고 있다. 본 센터에서는 특히 방화복이 단순히 화염으로부터의 보호 기능을 넘어서 장시간 착용하더라도 최상의 편안함을 제공할 수 있어야 한다는 점에 착안하여, 보호 기능성을 유지하면서 작업 활동성도 우수한 특수 의복 개발이 가능하도록 지원에 중점을 두고 있다.

화재 안전성은 방화복이 화재 상황에서 사용자를 보호하는 능력을 말하며, 이는 소재의 내열성, 불꽃 저항성, 그리고 열 전도율 등 다양한 요소에 의해 결정된다. 착용 쾌적성은 의복의 통기성, 가벼움, 그리고 유연성을 포함하며, 사용자가 임무를 수행하면서 경험하는 신체적 편안함과 직결된다.

다만 지금까지 보편화된 모든 특수 의류의 타당성 검증 및 평가기준은 완제품이 아닌, 부품이나 소재, 즉 의복으로 말하면 직물의 온열특성(예를 들면 보온성, Ret, Rct 등)의 평가 등이다. 그러나, 특수 의복을 구성하는 직물의 온열특성이 적합하여도, 제작한 특수 의복의 실제 착용자가 생각하는 온열특성은 만족하지 못하는 경우가 있는데, 이는 2차원인 직물의 온열특성을 평가하는 방법과 3차원인 의복의 온열특성을 평가하는 방법이 다르기 때문이다.

본 원고에서는 한국섬유개발연구원 작전환경적용 실증센터에서 도입하는 장비를 통하여 방화복의 화재 안정성과 착용쾌적성 간의 상호작용에 대한 연구를 통해 얻은 결과들을 상호 연계 분석함으로써, 보호 의류의 향후 발전 방향에 대한 토대를 마련하고자 한다.

2. 작전환경적용 실증센터

2.1. 설립 배경

착용쾌적성을 논할 때는 온열쾌적성을 가장 우선으로 생각해야 하는데, 우리나라의 지형이나 사계절에 따른 온도 변화 등 변화무쌍한 자연환경에 쾌적한 피복생활을 영위하기 위하여 레이어드링 체계 등 다양한 방법의 연구가 필요한 실정이다. 지금까지 보급된 모든 피복류의 타당성 검증 및 평가기준은 완제품 이전 단계의 평가만 연구되었으며, 침낭의 물성평가 기준은 침낭 완제품의 보온성 평가가 아니라, 침낭을 구성하고 있는 부분적인 소재의 보온성 평가가 전부였다. 한국섬유개발연구원에서는 국방섬유소재의 완제품에 대한 평가를 위하여 작전환경적용 실증센터를 구축하고 있으며, 국방섬유소재 관련 업체 및 진출을 희망하는 업체를 대상으로 정보 공유, 연구개발, 시험분석 등을 지원하면서 국방분야 관계자, 관련 업체, 연구기관 등과의 연계를 지원하는 HUB 역할의 기반조성을 목표로 설립되었다.

2.2. 센터 역할

작전환경적용 실증센터는 완제품의 3대 핵심 요구 성능인 보호(화염) 성능, 쾌적 성능, 착용 성능의 객관적 평가를 목적으로 하며, 이에 따라 소방환경적용실증실험실, 온열특성 평가실험실, 전투환경적용실증실험실로 구성하여 섬유 관련 기업들을 지원하고 있다(Table 1). 특히 전투환경적용실증실험실의 경우, 혹서·혹한과 같은 기후 모사가 가능하여 기존 국방섬유 완제품을 군의 운용평가(OT)와 유사한 환경하에서 평가할 수 있기 때문에 운용평가의 객관성 강화에 기여할 것으로 기대된다.

2.3. 주요 구축장비

작전환경적용 실증센터는 완제품 소재의 신뢰성 확보에 필요한 14종의 첨단 장비를 구축 중에 있으며 '25년까지 지속적으로 신규 장비를 구축하여 관련 업체를 지원할 예정이다(Table 2). 구축되는 장비는 공동활용장비로 운영될 예정이며, 한국섬유개발연구원에서 기존에 보유한 기초 물성 분석과 연계하여 시험 가능함에 따라 민·관·군 뿐만 아니라 섬유 소재 기업부터 완제품 기업까지 복합적인 연계 지원을 목표로 하고 있다.

2.3.1. 이동식 화염 마네킨

이동식 화염 마네킨 시스템은 보호복의 화염 저항과 인체 피해 정도를 측정하는 화재 시뮬레이션 측정 장비로, 134개의 구리열량계 노출 센서, 내부 냉각 시스템 및 맞춤형 데이터수집 하드웨어와 내열 방화실, 12개의 토치 스탠드, 변압기/제어/휴대용 calibration 인클로저로 구성되어 있다. 의복의 화염 평가를 위해 설계된 고정밀 기기로서 보호복을 통한 열전달과 화상 발생 가능성을 체계적으로 분석할 수 있는 독립형 시스템이다.

이 시스템은 마네킨 표면에 분포된 134개의 구리 열량계 센서를 통해 화재 시 보호복을 통한 총 열에너지를 기록하고 기록된 데이터는 인체 조직의 화상 예측에 사용되며, 예상되는 화상 발생 시간과 화상 면적 등을 계산하는데, Table 3의



Figure 1. 화염 마네킨 테스트 전후 및 테스트 결과.

모식도로 플래시 화재(순식간에 화염에 휩싸이는 현상) 상황에서 보호복이 얼마나 효과적으로 열을 차단하고, 피부에 전달된 열이 어떻게 화상으로 계산하고 있는지의 과정을 설명할 수 있다. 본 장비는 ASTM F1930-13 및 ISO 13506-2017 표준을 준수하며, 시스템은 보호복을 통해 전달되는 총 열 에너지를 측정하여 신체 조직의 화상 정도를 예측할 수 있다(Table 4).

2.3.2. 발한 썬드 마네킨

인체의 열 반응을 다양한 환경 조건에서 정확하게 예측하

Table 1. 작전환경적용 실증센터 실험실 구성

구분	핵심 요구 성능	실험실 역할	지원항목
소방환경적용실증실험실	보호 성능	화염에 대한 화상 정도 data화	① 실증 데이터 확보 · 분석을 통한 제품 인증 지원 ② 개발제품의 사업화를 위한 실증 및 표준화 지원 ③ R&D 결과를 실증지원을 통한 사업화 연계 지원
온열특성평가실험실	쾌적 성능	완제품의 온열 쾌적 성능 clo값 data화	
전투환경적용실증실험실	착용 성능	인체 대상, 피복 착용 시 신체 변화 data화	

Table 2. 작전환경적응 실증센터 구축(예정)장비

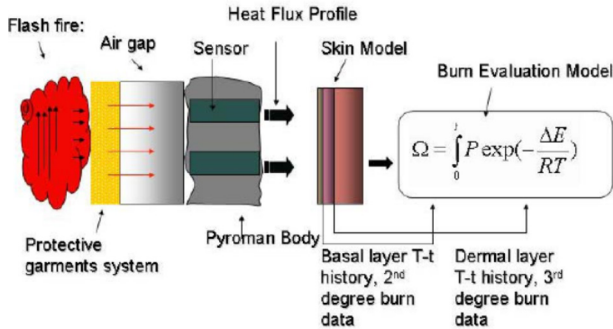
국문 장비명 (영문 장비명)	모델명 및 제작사	주요 용도
이동식 화염 마네킨 (Mobile Flame Manikin)	TRFT (Thermetrics, 미국)	• 화염에 대처하는 피복류의 측정
발한 써멀 마네킨 (Sweating Thermal manikin)	Newton (Thermetrics, 미국)	• 완제품 착용 시 쾌적성 등 온열 특성 평가 지원.
발한 써멀 마네킨 전용 챔버 (Sweating Thermal manikin chamber)	아성무풍 (국내)	• 온열특성 객관화 시험을 위한 써멀마네킨의 시험환경 제어
부분 써멀 손 마네킨 (Partial Thermal hand manikin)	Thermal Hand manikin (PT Teknik, 덴마크) 구축중 ('24)	• 장갑류의 보온성, 흡습성 평가
부분 써멀 발 마네킨 (Partial Thermal foot manikin)	Thermal Foot manikin (PT Teknik, 덴마크) 구축중 ('24)	• 신발류의 보온성, 쾌적성, 흡습성 평가
부분 써멀 머리 마네킨 (Partial Thermal head manikin)	구축예정 ('25)	• 모자류의 보온성, 쾌적성, 흡습성 평가
써멀 발/머리/손 마네킨 공동 챔버 (Thermal foot/head/hand manikin joint chamber)	구축예정 ('25)	• 온열특성 객관화 시험을 위한 부분 마네킨의 시험환경 제어 • 대형 챔버 대비 에너지 소모, 시험 대폭 감소
실증실험인공기후실 (Demonstration Experiment Environmental Chamber)	구축예정 ('25)	• 온습도 제어 및 다양한 외부 환경인자 제어가 가능한 인공 기후실 내에서 피험자의 생리적인 인자를 측정
피부 온습도 측정기 (Skin temperature and humidity meter)	구축예정 ('25)	• 피부표면온도, 피복내온도, 직장온도, 피복내 습도 측정
의복압 측정기 (Clothing Pressure Measuring Device)	구축예정 ('25)	• 의복의 온열생리 반응 평가, 의복의 압력변화 평가
발한량 측정기 (Breathalyzer)	구축예정 ('25)	• 전투복의 온열생리 반응 평가, 발한량의 변화와 의복의 평가
에너지대사량 측정기 (Energy metabolism meter)	구축예정 ('25)	• 피험자의 에너지 대사량 측정
혈류량 측정기 (Blood flow meter)	구축예정 ('25)	• 의복이 피검자의 혈류량 변화에 미치는 영향 평가
뇌파 분석기 (Brain waves meter)	구축예정 ('25)	• 의복의 변화가 피검자의 뇌파, 근전도, 심전도 등에 미치는 영향 측정

는 것은 스포츠 과학, 군사, 자동차 산업, 건축 및 섬유 산업 등 여러 분야에서 사용자 데이터로 중요하게 사용될 수 있다. 혹은 상황에서 체온의 열 손실을 최소화하여 혹한을 견딜 수 있는 의복을 개발하거나, 반대로 혹서 상황에서 체온의 열 방출을 위한 의복을 개발할 때, 발한 써멀 마네킨은 복합적인 열전달 모드를 고려하여 비균일한 환경에서 인체의 열 조절 반응을 시뮬레이션으로 평가하는 데 매우 유용한 고정밀 측정장비

이다. 이 장비는 의복의 성질, 의복의 형태, 피복 중량, 공기층 두께, 의복 두께, 의복 매개변수를 종합적으로 계산하여 보온력과 쾌적성을 계산한다.

시험자의 요구에 따라 -40~60 °C, 0~100% RH로 조절가능한 인공기후 실험 환경 내에서 발한 마네킨을 이용한 정적인 상태의 열적 특성을 상대적 열적 파라메타인 Clo 값으로 나타낼 수 있다. 바람이 없고, 기온이 섭씨 21 °C, 시간당 1평방

Table 3. 화염 마네킨의 화염 열전달 모식도



1. Flash fire(플래시 화재)가 보호복 시스템에 화염열 전달
2. Protective garments system(보호복)이 열을 어느 정도 차단하지만, 잔류 열은 의류를 통해 전달
3. 보호 의류와 피부 사이에 있는 air gap(공기층)은 열 전달 감소
4. Pyroman Body(인간의 피부를 모사한 장치)에서 실제 열이 피부 표면에 도달한 열이 피부에 미치는 영향측정
5. Skin Model(피부 모델)에서 시뮬레이션 한 값은 Burn Evaluation Model(화상 평가 모델)로 피부에 가해진 열 에너지와 그에 따른 화상 발생 확률을 계산하여 화상 정도 표기

Table 4. 화염마네킨 표준 인증 규격

인증 규격	ISO 13506	ASTM F1930
열유속	84 ± 5 kW/m ²	84 ± 5 kW/m ²
화염 시간	3 - 12 sec(표준 8 sec)	3 sec
데이터 기록시간	60 sec(1 layer) 120 sec(2 layer 이상)	60 sec 이상
노즐 토치 버너	8개 이상	12개
전처리	1회 세탁 주기 (수요업체에서 요청하는 경우를 제외)	1회 세탁 주기

미터의 발열량이 50 kcal일 때, 보온력 1 Clo를 기준으로 하며 Clo 값이 높을수록 보온 효과가 높음을 의미한다.

본 장비의 수치 모델은 이러한 문제를 해결하고, 궤적성의 효과성을 평가하는 데 중요한 역할을 하며, 인간의 체온 분포와 발한 속도를 측정하며, 마네킨의 피부 온도와 발한 속도를 예측하여 실제 환경에서 인간의 인체 반응을 모사한다. 이 시스템은 실험적 데이터와 비교했을 때, 평균 피부 온도, 국부 피

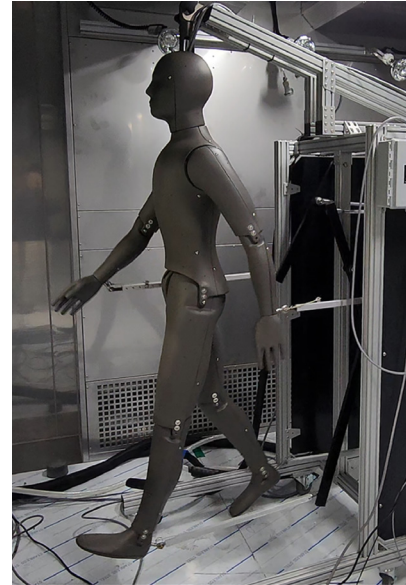


Figure 3. 발한 써멀 마네킨

부 온도, 중심 체온에서 매우 높은 정확성을 보이며, 변화하는 열 조건에서 인체의 국부적 및 전체적인 열 반응을 신뢰성 있게 예측할 수 있다. 이 시스템은 군복, 보호복, 그리고 다른 종류의 방호복과 같은 복잡한 의류 시스템에서의 열 성능을 평가하는 데 유용하며, 향후 연구에서는 더욱 다양한 조건에서의 평가가 이루어질 것으로 기대하고 있다.

2.4. 추진현황

현재 작전환경적용 실증센터는 산업부와 대구시의 지원을 받아 '25년 12월 모든 장비를 구축하고자 추진 중이며, 유기적인 실증서비스 지원을 목표로 한국섬유개발연구원-제조기업-수요처 간 실질적인 협력체계를 구축하고자 노력하고 있다. 다양한 소재부터 완제 의류 분야와의 시너지 창출을 위한 협업을 추진하고 있으며, 센터 실증설비 및 분석장비의 성능개선을 위하여 매년 자문위원회를 개최하여 최적의 설비 도입을 진행하고 있다. 또한 해당 분야의 전문가를 초빙하여 전문가 세미나를 개최하고 있다.

향후 도입된 장비를 바탕으로 국방섬유소재 관련 업체 및 진출을 희망하는 업체를 대상으로 정보 공유, 연구개발, 시험 분석 등을 지원하여 국내 군 시장은 물론 글로벌 시장에 진출할 수 있는 제품을 만들 수 있도록 맞춤형 지원이 가능하도록 노력할 예정이다.

2.5. 연구인력

성명	이메일	연구분야
홍성학 수석연구원	shhong@textile.or.kr	작전환경적용실증센터 총괄 책임
김민재 팀장	mjkim@textile.or.kr	방산 물자 성능 개선 및 국산화 개발
이준희 선임연구원	leejh@textile.or.kr	토목 건축 섬유 개발
이상현 선임연구원	shlee@textile.or.kr	작전환경적용실증센터 시험장비 분석
심상웅 선임연구원	swsim@textile.or.kr	군 피복류 및 전력지원체계 개발
이민규 연구원	lwh6087@textile.or.kr	바이오매스 기반 섬유 소재 개발
김성연 선임기술원	kso9671@textile.or.kr	시험분석 및 시제품 생산

3. 결 론

근래에 들어 인구 감소로 인한 병력 감소와 전투원 개개인의 생명에 대한 보호, 그리고 국산화로 인한 국내 보급 가능성에 대한 관심이 증가하고 있으며, 전력지원체계에서도 관련 연구개발이 확대되고 있다. 최근에는 전투복의 국산화가 시범사업으로 이뤄지고 있으며, 이러한 동향은 경찰, 소방 등의 공공분야와 민수생활 분야로도 연계되면서, 국내섬유산업의 매출 증대와 성장에도 도움이 될 것으로 보인다. 이러한 트렌드에 발 맞춰, 한국군 섬유 성장을 이끌어 가기 위해 작전환경적용 실증센터에서는 군 피복류(완제품)의 3대 핵심 요구 성능인 보호 성능, 쾌적 성능, 착용 성능의 객관적 평가를 목적으로 하며, 이에 따라 소방환경적용실증시험실, 온열 특성평가시험실, 전투환경적용실증시험실로 구성하여 국방 분야 진출 기업들을 적극 지원하고자 한다. 특히 방화복과 같은 특수 의복의 기능적 측면과 사용자의 경험을 동시에 고려하여, 군뿐만 아니라 산업 현장과 일상생활에서도 사용할 수 있는 고성능 방화복 개발을 목표로 하고 있다. 이러한 방화복은 극한의 상황에서도 사용자를 안전하게 보호하면서, 동시에 쾌적한 착용감을 제공하여 임무 수행 능력을 극대화할 수 있도록 지원하고자 한다. 향후 한국섬유개발연구원에서 추진 중인 작전환경적용 실증사업을 통해 확보된 track record를 활용하여 가속화 시험을 포함한 제품 인증 기준을 마련한다면

완제품까지의 성능개선을 통한 관련 업계의 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. <https://www.docdroid.net/d6se/global-thermal-protective-clothing-market>, "Global Thermal Protective Clothing Market Research Report-Forecast", (Accessed, 2019).
2. 김익수, "고성능 산업용 소재-슈퍼섬유소재", *섬유기술과 산업*, 2014, **18**(1), 1-13.
3. <https://www.westex.com/blog/article-flash-fire-duration-and-heat-flux>, MARGORIN, "Flash Fire", (Accessed April 17, 2013)
4. Wang, Faming, "A Comparative Introduction on Sweating Thermal Manikins 'Newton' and 'Walter'." 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting, University of Coimbra, 2008.
5. Farrington, Robert B., Rugh, John P., Bharathan, Desikan, and Burke Rick., "Use of a Thermal Manikin to Evaluate Human Thermoregulatory Responses in Transient, Non-Uniform, Thermal Environments." SAE International, 2004.
6. Yang, Jie, Weng, Wenguo, and Fu, Ming, "Coupling of a Thermal Sweating Manikin and a Thermal Model for Simulating Human Thermal Response." *Procedia Engineering*, 2014, **84**, 893-897.
7. Gagge, A. P., Stolwijk, J. A., and Hardy, J. D., "Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures", *Environmental Research*, 1967, **1**(1), 1-20.
8. Lee, J. S., Jim, H. E., and Song, M. K., "Physiological responses of cold protective clothing with different clo value", *Fashion & Textile Research Journal*, 2008, **10**(5), 683-689.
9. Song, M. K., and Kwon, M. S. "A study on the thermal characteristics of comfortable heat-retaining winter clothing", *Journal of the Korea Society of Costume*, 2008, **58**(6), 24-34.
10. Hyun Ah Kim., "Thermal Comfort and Tactile Wearing Performance of Wool/nylon Fabrics for Tra-biz Garment", *한국의류산업학회지*, 2016, **18**(6).