

스마트 의류의 사용환경 내구성 시험에 대한 국제 표준화 현황과 제품의 신뢰성 향상 및 품질 관리를 위한 향후 과제

김시연[†] · 임가영 · 김수경 · 이정현

(재)FITI시험연구원 소재부품신뢰성센터

Current Status of International Standardization for Durability Test Methods in Smart Clothing and Future Challenges in Enhancing Product Reliability and Quality Control

Siyeon Kim[†], Ga-Young Lim, Sukyung Kim, and Junghyun Lee

Reliability Assessment Center, FITI Testing and Research Institute, Seoul, Korea

Abstract: Smart clothing products can experience a decrease in performance and reliability due to various mechanical, biological, and chemical stress factors that occur throughout their life cycle. These issues can hinder consumer acceptance of the products. This study aims to enhance the reliability of smart clothing and facilitate quality control by analyzing and identifying the current status of international standardization for smart clothing and electronic textiles (e-textiles). The focus of this analysis was on the durability test methods in the use environment. Furthermore, similar standards published by different standardization organizations for durability tests were compared in depth. The study showed that a total of 27 international standards have been developed or are currently under development. The current standardization efforts mainly aim to develop functionality and durability test methods for smart clothing and e-textile products. A detailed comparison was made between two international standards (IEC 63023-204-1:2023 and AATCC TM210:2019) specifically in relation to the washing durability test method and the electrical resistance measurement standards (BS EN 16812:2016 vs AATCC EP13-2021), before and after the environmental exposure tests. Based on this comparison, several suggestions have been made and discussed for the future revision of these international standards.

Key words: smart clothing (스마트 의류), e-textile (전자섬유), smart textile products (스마트 텍스타일 제품), durability test (내구성 시험), international standard (국제표준)

1. 서 론

의류는 스마트 웨어러블 시스템의 플랫폼으로 적합한 몇 가지 특징을 갖는다. 첫 번째, 3차원의 형태로 24시간 인체를 둘러싸며 피부와 맞닿아 있으므로, 인체의 주변 환경과 피부 표면에서의 생체신호 수집을 위한 센서를 위치시키기에 적합하다. 심전도(Electrocardiogram; ECG), 근전도(Electromyogram; EMG), 뇌전도(electroencephalogram; EEG), 땀과 피부온, 피부전도도 등의 생체신호는 피부에서 수집되어야 하며, 인체 부위별로 신호 특성이 상이하어, 목적에 따라 센서의 위치가 달라

질 수 있는데, 의류는 대부분의 피부와 접촉할 수 있는 구조를 가지므로 다양한 부위에 센서 내장이 가능하다. 두 번째, EMS 전극과 같이 피부표면에 전류자극을 가하거나 발열과 냉각 등 인체의 쾌적성을 유지하기 위한 액추에이터, 발광, 진동, 소리 등 착용자와 직접 상호작용을 위한 피드백 발생 시 의류에 액추에이터가 삽입 시 착용자가 시각적, 청각적 자극을 수용하기에 용이하다. 이러한 의류의 형태적, 위치적, 구조적 특징은 다른 형태의 웨어러블 디바이스가 완전히 대체하기 어려운, 의류가 가지는 고유한 특징이라고 할 수 있다.

의류는 웨어러블 기술의 플랫폼으로서 최근 몇 년간 다양한 디자인과 기능으로 발전해왔으며 유연 전자섬유와 센서 기술의 발달로 전자모듈은 소형화, 경량화되고 있으며 신축성이 있고 유연한 형태로 개발되어 이미 시장에 출시되었다. Athos, Mbody 스포츠용 쇼츠(Myontec Ltd, Kuopio, Finland) 등 근전도 측정 센서가 내장된 피트니스용 의류와 SALTED 스마트 인솔 등 족저압(plantar pressure) 및 발의 움직임 분석을 기반으로 운동자세를 교정하고 보행 활동을 돕는 보행분석 트래커

[†]Corresponding author: Siyeon Kim

Tel. +82-2-3299-8145

E-mail: siyeonkim@fitiglobal.com

©2023 Fashion and Textile Research Journal (FTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Kim et al., 2021), 아웃도어 활동이나 야외작업자를 위한 보호복으로서 발광, 발열, 위급상황 분석 등의 기능을 수행하는 개인보호장비와 아웃도어웨어, 근육표면에 미세 전류를 부여하여 운동 보조 및 재활 기능을 갖는 EMS(electromyostimulation) 수트와 같은 제품들이 대표적이다. 보다 최근에는 휴먼증강 시스템에서 함께 활용되는 햅틱 글러브(haptic glove)가 활발히 개발되고 있으며 이때, 손의 미세 움직임과 피부온도 등의 생체신호를 감지하고 착용자에게 촉각 피드백(force-feedback)을 제공하는 등 다중모드(multimodal) 센싱과 피드백 기능이 활용되고 있다(Sun et al., 2022). 이러한 인간의 체성감각(somatosensory system)을 활용한 인간과 기계 간 상호작용(human machine interfaces)은 휴먼증강 기술에서 더욱 심층적으로 연구되고 활용될 것으로 보인다. 생체신호를 지속적으로 모니터링하여 건강 이상을 감지하고 진단하는 헬스케어 분야에서도 비침습적 전자 섬유 센서가 유용하게 활용되어 건강을 증진하고 질병을 관리하는 데 도움이 될 것으로 기대되고 있다(Meena et al., 2023).

그러나 이러한 웨어러블 기술과 제품의 개발에도 불구하고 전자섬유와 스마트 의류의 내구성 부족은 여전히 기술 상용화의 확대를 저해하는 장애물 중 하나이다(Meena et al., 2023). 일상생활에서 의류는 상당히 높은 수준의 복합적인 사용환경 스트레스에 노출되는데, 전자섬유와 스마트의류에서 이에 상응하는 내구성을 갖추는 것은 기술적으로 상당히 어려운 일이다(Jung & Lee, 2018; Lam et al., 2022; Ohiri et al., 2022; Zaman et al., 2019a). 예컨대, Zaman et al.(2019b)의 연구에서 은코팅 전도사 스티치를 마틴데일법으로 3,000회 마모시험을 했을 때, 전기저항은 1.10 Ω/cm에서 3.17 Ω/cm으로 증가하

였는데, 일상 의복에 대한 마모저항 최소 성능기준은 20,000회이다(Korea Consumer Agency [KCA], 2016). 마모저항 이외에도 의류제품은 세탁, 땀, 일광, 물 등 다양한 요인에 대한 내구성을 갖추어야 하며, 의외류와 스포츠의류 등의 품목은 더욱 높은 내구성이 필요하다(KCA, 2016).

의류제품에 이렇게 다양한 항목에 대한 높은 내구성이 요구되는 이유는 제품의 사용주기(착탈의, 착용, 세탁과 보관 등)에서 다양한 기계적, 화학적, 생물학적 스트레스에 노출되기 때문이다(Fig. 1) (Ohiri et al., 2022; Van Herreweghen et al., 2020). 전자섬유와 스마트의류의 사용환경 내구성의 부족 문제는 제품 품질의 신뢰성 저하를 야기하며, 소비자 수용을 방해하는 요인이 되고 있다(Ju & Lee, 2020; Zaman et al., 2019a). 스마트 의류 및 전자섬유 산업을 발전시키기 위해 소재 및 제품의 사용환경 내구성의 향상을 위한 기술적 접근과 함께, 제품의 품질 신뢰성을 담보하기 위한 시험법의 국제표준화와 개발된 표준화된 시험법의 활용이 요구된다.

이에 따라, 본 연구는 스마트 의류와 전자섬유에 대한 표준화 현황을 검토하고 다양한 표준화 협회에서 발표되고 있는 유사 표준의 상세 내용을 비교함으로써 제정된 국제표준의 활용을 촉진하고, 향후 국제표준의 개정 방안을 제안하고자 하였다. 이러한 과정을 통해 품질 신뢰성 향상과 품질관리 용이성 확보를 도모하고자 하였다.

현재까지 표준화 동향에 대한 선행 리뷰 논문이 국내외에서 다수 출판되었으나, 대부분 웨어러블 디바이스 관점에서의 국제표준화 현황을 다룬 것이었다(Choi & Park, 2021; Jeon et al., 2016; Shuvo et al., 2021). 본 연구에서 다루는 국제표준

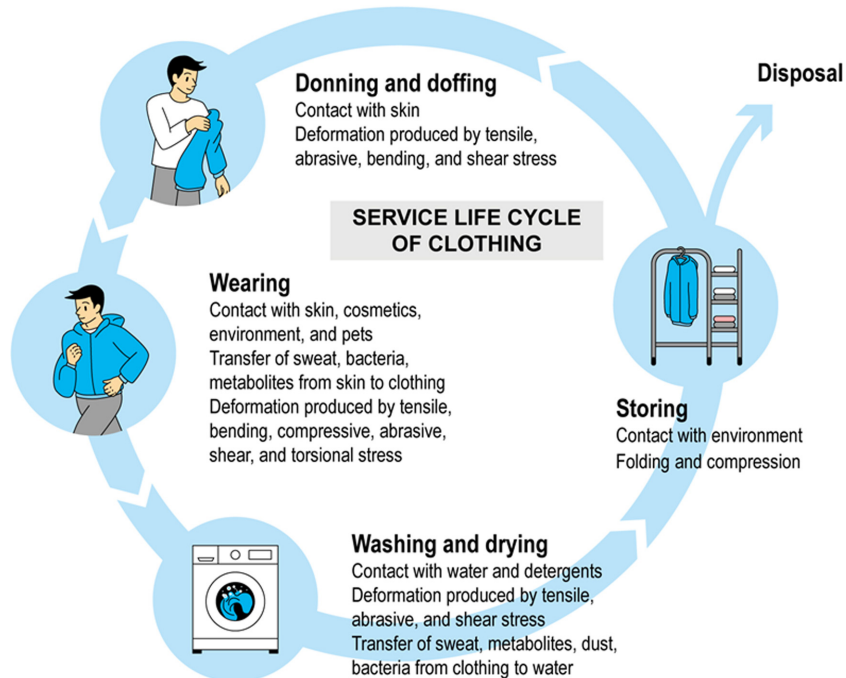


Fig. 1. Schematic diagram of mechanical, chemical, and biological exposures during a service life cycle of the everyday clothing.

은 국제 표준화 기구 또는 사실상 국제 표준화 기구에서 제정되었거나 준비 중인 표준 가운데, 적용 범위가 전자섬유 혹은 전자섬유를 활용한 제품(예: 스마트 의류)이거나, 스마트 의류를 포함하는 범위를 갖는 표준으로 한정하였다. 전기저항 측정법 중에서도 전자섬유를 대상으로 제정되지 않은 표준은 본 연구에서 다루지 않았다. Shuvo et al.(2021)은 웨어러블 기기의 국제 표준화 현황 리뷰 논문에서 상변이 물질(phase-change material)을 스마트 텍스타일의 범주에 포함시켰으나, 본 연구에서는 전자섬유(e-textile)를 제외한 스마트 텍스타일은 다루지 않았다. 또한 전자섬유와 스마트 의류관련 표준 가운데 사용환경 내구성 시험에 대해 보다 집중적으로 비교하였다. 유사 목적으로 제정된 내구성 시험표준을 심층적으로 비교분석함으로써 추후 스마트의류 및 전자섬유 개발, 사용, 수요-공급기업 간 품질 관리 및 스마트 의류의 표준화 제·개정에 도움이 되는 자료를 제공하고자 하였다.

2. 스마트 의류 국제표준화 현황

2.1. 스마트 의류 관련 국제표준화 기관

2.1.1. IEC [국제전기기술위원회]

현재 스마트 의류와 웨어러블 디바이스 품목으로 가장 활발하게 표준화가 추진되고 있는 기관은 IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기기술위원회)이다. 웨어러블 전자소자와 기술에 대한 IEC 표준화 작업은 IEC TC (technical committees) 124에서 추진되고 있는데, 이 기술위원회는 2018년 설립되어 총 4개의 Working Group(WG)을 운영하고 있으며, 각 WG은 용어 정의, 전자섬유, 재료, 기기와 시스템 단위의 표준화를 추진하고 있다. 해당 기술위원회에서 개발 중인 표준에 대한 의견 제시와 투표권 행사가 가능한 참가국은 총 13개국이며 우리나라가 간사국을 맡고 있다. 현재까지 총 12개의 표준이 개발되었거나 개발 예정이다(Korean Agency for Technology and Standards [KATS] and Institute of Convergence Science of Yonsei University, 2020).

2.1.2. ISO [국제표준화기구]

ISO(International Organization for Standardization) TC 38은 섬유에 대한 국제표준화를 담당하고 있는 기술위원회로 이중 WG 32에서 스마트 텍스타일 표준화를 추진하고 있다. 발표된 표준으로는 비접촉 방식의 면저항 측정법(ISO 24584, 2022)과 용어 정의 표준(ISO/TR 23383, 2020)이 있다. 전도성 원단의 터치스크린 작동 성능 시험법은 현재 개발 승인(AWI, approved work item) 단계로 아직 개발 진행 중이다(ISO/AWI 17971). ISO/TR 23383:2020은 스마트 텍스타일에 대한 용어 정의 표준으로 ISO/TC 38과 유럽표준화기구(CEN, European Committee for Standardization)의 CEN/TC 248 기술위원회의 협업으로 제작되었다.

2.1.3. CEN [유럽표준화위원회]

CEN(European Committee for Standardization)은 스마트 텍스타일과 스마트 의류 분야에서 선도적으로 표준화를 추진하는 경향을 보인다. 2011년에 스마트 텍스타일에 대한 용어 정의 표준을 가장 먼저 발표한 바 있으며, 2016년 전자섬유에 대한 선저항 측정법 표준(BS EN 16812, 2016)을 제정하였다. 또한, 2021년에는 스마트 소방복의 선택과 사용, 관리와 유지에 대한 가이드라인 표준을 일찍이 발표하였는데(CEN/TR 17620), 제품의 상용화 단계에 대비해 선제적으로 표준이 개발되었다는 점이 눈에 띈다. 이 표준의 제정은 보호복에 대한 표준을 주로 다루는 CEN/TC 162의 WG 2와의 협력으로 진행되었는데, 스마트 기능이 부가된 스마트 소방복이 적절하게 선택되고 관리되지 않을 경우 오히려 소방관의 건강과 안전 위험을 증가시킬 수 있다는 우려에서 표준화 작업이 시작된 것으로, 이 표준에서는 스마트 소방복이 적절하게 사용·관리될 수 있도록 선택, 구매, 사용, 관리 담당자가 각 단계마다 참고할 수 있는 의사결정 순서도(flow chart)와 고려사항을 상세하게 제시하고 있다. CEN 내에서 섬유 및 섬유제품에 대한 표준화를 담당하는 기술위원회는 CEN/TC 248이며, 이 가운데 WG 31이 스마트 텍스타일 표준화를 추진하고 있다.

2.1.4. ASTM [미국재료시험협회]

ASTM(American Society for Testing and Materials)은 1898년 미국에서 설립된 다양한 재료와 제품을 다루는 사실상(de facto) 국제표준화 기구로서 국제 표준화기구는 아니지만 시장 영향력을 가지며 국제적으로 통용되고 있는 표준을 다수 보유하고 있다. 스마트 의류에 관련된 ASTM 표준으로는 2020년 제정된 용어 정의 표준(ASTM D8248, 2020b)이 있으며 D13 기술위원회 가운데 D13.50의 하위 위원회가 스마트 텍스타일에 대한 표준제정을 담당하고 있다. 땀과 세탁에 대한 내구성 표준이 개발 준비 중이다(Table 1).

2.1.5. AATCC [미국섬유화학염색자협회]

AATCC(American Association of Textile Chemists and Colorists)는 1921년 설립된 사실상 국제표준화 단체로, 3M, GAP, 나이키 등 수많은 미국 섬유·의류 업체가 AATCC 표준을 이용하고 표준화 작업에 참여하고 있다. 최근에는 스마트 텍스타일까지 영역을 확장하여, 2018년 전기저항(선저항) 측정법을 발표하였고(AATCC EP13), 2019년에는 의류제품의 다양한 사용환경 스트레스(세탁, 수분 노출, 땀 노출, 산 및 알칼리, 광노출, 미생물 등)를 반영한 스마트 텍스타일 제품의 내구성 평가 표준(AATCC TM210-2019)을 제정하였다.

2.1.6. IPC [국제전자산업표준협회]

IPC(Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits)는 전자장비 및 부품 분야에 특화된 사실상 국제표준 기관으로, 전자섬유의 표준화 작업은 D-70 기술위원회에서 담

Table 1. Publications of international/abroad organizations for standardization

Categories	Scope	Standard No.	Released year (revised year)*	Title
Terminology	Smart textiles	ISO/TR 23383	2012 (2020)	Textiles and textile products – smart textiles – definitions, categorisation, applications and standardization needs
	Smart textiles	ASTM D8248-20	2020	Standard terminology for smart textiles
	Wearable electronic devices	IEC 63203-101-1	2021	Wearable electronic devices and technologies – Part 101-1: Terminology
General requirements	E-textiles	IPC-8921	2019	Requirements for woven and knitted electronic textiles (e-textiles) integrated with conductive fibers, conductive yarns and/or wires
	E-textiles	IPC-WP-025	2019	IPC white paper on a framework for the engineering and design of e-textiles
	Smart garments protecting against heat and flame	CEN/TR 17620	2021	Guidelines for selection, use, care and maintenance of smart garments protecting against heat and flame
Basic properties	Snap fastener	IEC 63203–250-1	2021	Wearable electronic devices and technologies – Part 250-1: Electronic textile – Snap fastener connectors between e-textiles and detachable electronic devices
	Conductive yarns	IEC 63203–201-1	2022	Wearable electronic devices and technologies – Part 201-1: Electronic textile – Measurement methods for basic properties of conductive yarns
	Conductive fabrics	IEC 63203–201-2	2022	Wearable electronic devices and technologies – Part 201-2: Electronic textile – Measurement methods for basic properties of conductive fabrics and insulation materials
Electrical resistance	E-textiles	BS EN 16812:2016	2016	Electrical resistance of electronically integrated textile
	E-textile fabrics and products	AATCC EP13	2018 (2021)	Evaluation procedure for electrical resistance of electronically integrated textiles
	Conductive films	IEC 62899-202-3	2019	Printed electronics – Part 202-3: Materials – Conductive ink – Measurement of sheet resistance of conductive films – Contactless method
	Smart textiles	ISO 24584	2022	Textiles – Smart textiles – Test method for sheet resistance of conductive textiles using non-contact type
	Printed e-textiles	IPC-8971	2023	Requirements for electrical testing of printed electronics e-textiles
Functionality	Glove-type motion sensors	IEC 63203–402-1	2022	Wearable electronic devices and technologies – Part 402-1: Devices and Systems – Accessory – Test and evaluation methods of glove-type motion sensors for measuring finger movements
	Fitness wearables	IEC 63203–402-2	2023	Wearable electronic devices and technologies – Part 402-2: Performance measurement of fitness wearables – step counting
	Surface electromyography (sEMG) sensors	IEC 63203-403-1	2024†	Wearable electronic devices and technologies – Part 403-1: Test methods of surface electromyography sensors for wearable applications
	Electrochromic films	IEC 63023-301-1	2024†	Wearable electronic devices and technologies – Part 301-1: Test method of electrochromic films for wearable equipments
	Strain sensors	IEC 63203-401-1	Unknown†	Wearable electronic devices and technologies – Part 401-1: Devices and Systems – Functional elements – Evaluation method of the stretchable resistive strain sensor
	Smart textiles	ISO/AWI 17971	Unknown†	Textiles – Smart textiles – test method for fabric interface with capacitive touchscreens
Durability	E-textiles	AATCC TM210-2019	2019	Test method for electrical resistance before and after various exposure conditions
	E-textile products	IEC 63203-204-1	2021 (2023)	Wearable electronic devices and technologies – Part 204-1: Electronic textile – Test method for assessing washing durability of leisurewear and sportswear e-textile systems
	E-textiles	IEC 63203-201-4	2024†	Wearable electronic devices and technologies – Part 201-4: Electronic textile – Test method for determining sheet resistance of conductive fabrics after abrasion

Table 1. Continued

Categories	Scope	Standard No.	Released year (revised year)*	Title
Durability	E-textiles	IEC 63203-406-1	2024†	Wearable electronic devices and technologies – Part 204-2: Electronic textile – Test method to characterize electrical resistance change in knee and elbow bending test of e-textile system
	E-textiles	ASTM WK61479	Unknown†	New test method for durability of smart garment textile electrodes exposed to perspiration
	E-textiles	ASTM WK61480	Unknown†	New test method for durability of smart garment textile electrodes after laundering
Ecological validity	E-textiles	IEC 63203-201-3	2021	Wearable electronic devices and technologies – Part 201-3: Electronic textile – Determination of electrical resistance of conductive textiles under simulated microclimate

Abbreviation: ISO, International Organization for Standardization; AATCC, American Association of Textile Chemists and Colorists; ASTM, American Society for Testing and Materials; IEC, International Electrotechnical Commission; IPC, Institute of Printed Circuits. *Revised years were only noted for the published standards that have a revision history. †Forthcoming standards were included in case that their current development steps are officially noticed and the standard numbers are given.

당하고 있으며 스마트 텍스타일 제품에 대한 기술보고서와 표준을 2018년부터 발표하고 있다. 이 중 IPC-8921(2019)는 전도성 직물과 편물을 전도성 섬유나 전도사, 전선과 연결하는 방법에 대한 요구사항에 관한 것으로, 이미 제정된 ISO, AATCC, ASTM, EN 등 타표준을 인용하여 성능 평가 방법을 제시한다. 예를 들면, 표면 및 체적 저항 평가법으로 IPC-TM-650(test method 2.5.17)와 함께 AATCC EP13, EN 16812, ASTM B193(2020a), ASTM D257(2021a), ASTM D4496(2021b)을 함께 제시하였으며, 내구성 시험에 대해서는 총 14가지(세부 항목까지 포함할 경우 총 17가지)의 실제 사용환경에서 발생하는 스트레스를 다루면서 AATCC EP13(2021)와 EN 16812(2016)에 따라 스트레스 노출 전후 전기저항을 측정하도록 하였다. 14가지 스트레스 요인 중에서 마모, 굽힘, 파열, 온도와 습도, 열 충격은 AATCC TM210(2019)에서는 언급되지 않았으나 IPC-8921에서 추가적으로 다루었다.

2.2. 표준 제정 현황

국제 표준화 기구 또는 사실상 국제 표준 협회에서 제정되었거나 준비 중인 표준 가운데, 적용 범위가 전자섬유 혹은 전자섬유를 활용한 제품(예: 스마트 의류)이거나, 스마트 의류를 포함하는 범위를 갖는 표준은 총 27개로, 용어 정의 표준 3개, 요구사항 표준 3개, 기본 성능평가 표준 3개, 전기적 성능평가 표준 5개, 기능성 표준 6개, 내구성 표준 6개, 외적 타당도 표준 1개이다(Table 1).

연도별 제정된 국제표준 수를 정리하면 Fig. 2와 같이 나타난다. 국제표준화 초반인 2018년까지는 용어 정의 표준과 전기 저항 측정 표준이 소수 발표되었고, 이후 2019년부터 2022년까지 제품 관점에서의 기본 요구성능과 전도사, 전도성 원단, 스냅 단추 등 핵심 소재 및 부품에 대한 기본 성능 평가법 표준이 주로 제정된 것을 알 수 있다. 반면 2022년부터 제품의 기능성에 대한 표준화가 활발하게 진행되고 있는 점이 눈에 띈다. 장갑을 통한 손가락 움직임 측정법(IEC 63203-402-1,

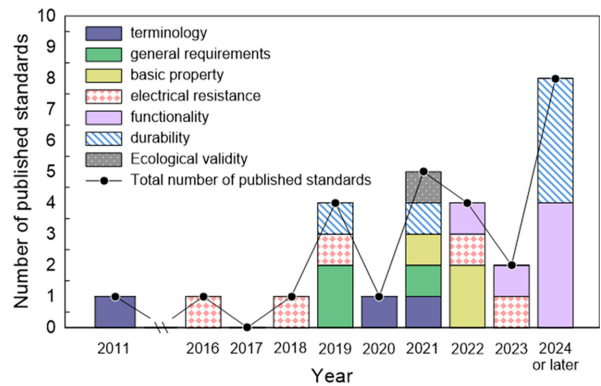


Fig. 2. Schematic diagram of mechanical, chemical, and biological exposures during a service life cycle of the everyday clothing.

2022c)과 웨어러블 디바이스에서 걸음 수 측정에 대한 성능평가법(IEC 63203-402-2, 2023b)이 제정되었다. 2024년과 그 이후에는 다양한 표준화 단체에서 주로 기능성과 내구성에 대한 표준이 발표될 것으로 예상된다(Fig. 2).

3. 주요 용어의 정의와 개념

전자섬유 및 스마트 의류의 용어 정의에 대한 첫 국제표준은 2011년 CEN에서 발표한 CEN/TR 16298이다(이 표준은 2020년 CEN ISO/TR 23383으로 대체되었다). CEN/TR 16298(2011) 서문에는 ‘스마트(smart)’ 또는 ‘지능적인(intelligent)’이라는 용어를 표준에 사용하는 것이 적합인지에 대한 많은 고민과 논의가 있었음을 짐작케 하는 구절이 있다. “이 두 용어는 비록 마케팅의 목적으로 제안되어 사용되고 있으나, 우리가 정의하고자 하는 제품이 보통의 전통적인 섬유 또는 섬유제품과는 다른 기능적인 내재적 속성을 지닌 제품을 의미한다는 것에 공통적인 합의가 있다(CEN/TR 16298, 2011).” 이 표준은 2020년 CEN ISO/TR 23383으로 대체되면서 대부분 수정사항

없이 그대로 반영하였는데, 다만, ‘스마트’와 ‘지능적인’이라는 수식어의 동의어로서 ‘인터랙티브(interactive)’가 추가되었다. 인터랙티브하거나 스마트하거나 지능적인 텍스타일은 “환경과 양방향으로 상호작용하거나 반응하거나 환경변화에 적응하는 기능”을 갖는 것으로 정의되었다(CEN ISO/TR 23383). 이러한 스마트 텍스타일 정의는 ASTM D8248(2020b), IEC 63203-101-1(2021a)에서도 거의 동일하게 나타난다.

스마트 텍스타일은 스마트함의 수준에 따라 수동적인(passive), 능동적인(active), 매우 스마트한(ultra-smart)으로 분류되기도 한다(Scataglini et al., 2020; Syduzzaman et al., 2015). 이와 유사하게 Jang and Cho(2019)는 스마트 텍스타일 센서에 대해서도 수동센서(passive sensor), 능동센서(active sensor), 초스마트센서(very smart sensor)로 분류하였다. 이러한 분류에서 수동의 의미는 환경이나 자극을 감지하는 등 데이터를 일방적으로 수집하는 기능을 의미하며, 능동의 의미는 센서와 액추에이터를 함께 지니고 있어 자극에 따른 반응이 가능한 기술과 제품을 의미한다. 매우 스마트한 스마트 의류 또는 초스마트센서는 한 단계 더 나아가 수집된 정보를 통합하여 환경을 예측하고 행동양식을 변경하여 적응하는 기능을 가지는 것을 뜻한다(Jang & Cho, 2019; Scataglini et al., 2020).

IEC 63203-101-1(2021a)는 웨어러블 전자기기(wearable electronic device)를 중심으로 관련 용어를 잘 정리하고 있는데, 스마트의 단계를 세분화하기보다는 인체를 중심으로 제품의 위치에 따라, 인체 근접형(near-body), 인체 접촉형(on-body), 체내형(in-body, implantable or eatable)으로 분류한다. 제품의 물리·화학적 특징을 중심으로 신축성(stretchable) 전자기기, 형태변형(conformable) 웨어러블 전자기기, 생분해성(biodegradable) 전자기기 등의 용어가 있음을 함께 기록해두었다.

스마트 의류(smart clothing, smart garment)는 스마트 텍스타일 또는 웨어러블 전자소자를 포함하는 제품 중에서 의류 형태의 완제품을 지칭하는 것으로, 스마트 소방복에 대한 표준인 CEN/TR 17620 (2021)에서 사용되고 있다. 본 연구에서도 스마트 텍스타일이 의류제품에 적용되었을 때 노출되는 사용 환경 스트레스와 이에 대한 성능 및 내구성 평가를 위해 제정된 국제표준을 다루고 있으므로, 디바이스 형태의 제품과 차이를 분명히 하기 위해 스마트 의류라는 용어를 주로 활용하였다. 또한 스마트 텍스타일은 기계적, 열적, 화학적, 전기적, 광학적 방식의 자극과 반응 기전을 갖는 소재를 모두 포함하는 것으로서(CEN ISO/TR 23383, 2020), 또한 소재 단위에서 본 연구에서는 전기전자 회로를 구성하는 요소를 포함하는 섬유, 실, 원단을 의미하는 전자섬유(e-textile, electronic textile)로 대상을 제한하였다.

4. 국제 표준 시험법 비교

4.1. 전기적 성능 평가

전기적 성능 평가 표준은 시험편의 형태적 특성에 따라 선

저항, 면저항, 그리고 비접촉 면저항 측정방법으로 제안되고 있다. 선저항(linear resistance)은 단위 길이당 전기저항이며, EN 16812(2016)은 길이방향이 너비방향보다 10배 이상 큰 샘플에 대해 선저항 측정을 권장한다. 선저항 측정이 적합한 샘플은 평판형 원단보다는 전도성 회로를 갖는 전도성 원단, 리본, 웨빙, 바늘, 전도사와 같이 길이방향으로 긴 형태의 샘플이다. EN 16812(2016)는 선저항 측정 표준으로서 신뢰성 있는 선저항 측정을 위해 필요한 시험 요구사항을 자세히 설명하고 있다. 그 중에서도 다른 시험표준과 확연하게 구분이 되는 부분은 전도사와 원단에 시료 무게와 신축성 여부에 따라 서로 다른 장력(pre-tensioning)을 부여한 뒤에 전기저항을 측정하도록 한다는 것이다. 예컨대, 전도사는 0.5 cN/tex의 장력을, 신축성이 있는 전도사 외 시료는 폭 5 cm 당 0.5 N의 장력을 가하도록 되어 있다. 신축성이 없는 시료는 무게에 따라 적합한 장력이 제시되어 있다. 이러한 시험편 장력의 표준화는 시험 결과의 불확도(uncertainty)를 개선하기 위해 반드시 필요한 요인으로 보인다. 신장 상태에 따라 전도사와 전도성 원단의 전기저항 측정값은 크게 변동하기 때문이다(Ryu et al., 2011).

이 표준에서 신뢰성 확보를 위해 요구하는 최소 시료 수는 5개이며, 4전극 4와이어 측정법과 2전극 4와이어 측정법을 제시하고 있다. 또한 2전극 4와이어 측정법의 경우, 서로 다른 전극거리 4군데에서 측정된 4개의 측정값에 대하여 상관분석을 실시하여 상관계수(r)가 0.9 미만인 경우 해당 시료가 선저항 측정에 적합하지 않은 것으로 간주하고 폐기하도록 하는 등, 결과값의 유효성 판단 기준을 함께 명시하였다. EN 16812(2016)의 상세한 시험절차 덕분에 국내에서는 해당 시험에 대하여 FITI시험연구원이 한국인정기구(KOLAS, Korea Laboratory Accreditation Scheme)의 국제공인시험 인정을 획득하여 KOLAS 시험을 진행하고 있다.

한 가지 추가적인 논의와 검토가 필요한 부분은 IEC 표준 간 시험법의 통일성에 대한 것이다. IEC 63203-201-1(2022a)는 전도사의 기본 성능 표준으로 전도사의 평가 시 세 가지 필수 시험항목(전기저항, 땀 내구성, 세제 내구성)을 고려하도록 권장하고 있는데, 이 중 전기저항 평가방법으로 EN 16812(2016)가 아닌 IEC 60468(1974)를 인용하고 있다. 다음 장에서 서술할 IEC의 세탁내구성 표준(IEC 63203-204-1, 2023a)에서 BS EN 16812를 인용하고 있는 것을 고려할 때, 전도사의 기본 성능 평가 표준에서도 일반적인 전선 샘플과 신축성과 유연성을 갖는 전도사 시료의 특이성을 고려하여 장력, 전처리 등 시험절차를 반영한 EN 16812(2016)로 인용표준을 변경하는 것을 고려할 필요가 있다.

또 다른 전기저항 표준인 AATCC EP13(2021)에도 장력 등 전자섬유와 스마트 의류의 특성을 반영한 시험절차가 누락되어 있는 점은 아쉬운 부분이다. BS EN 16812(2016)과 AATCC EP13(2021)의 세부 절차의 비교는 Table 2에 정리하였다.

반면, IPC-8921(2019)에는 전자섬유의 전기저항 측정 시 프로브의 크기와 모양(뾰족한지, 뿔뿔한지 등), 측정점의 위치, 전

Table 2. Comparison of standardized test methods of electrical resistance measurements

Contents	BS EN 16812:2016	AATCC EP13-2021
Scope	Conductive tracks for textile structures (e.g. yarns, printed or coated tracks)	E-textile fabrics or end products with incorporated conductive path/traces
Number of specimens	5	3
Specimen requirements	Distance between the voltage electrodes is at least 10 times the width of the conductive tracks; a recommended distance is 50 cm	Straight specimens, 150-300 mm in length; no specific requirement for end products.
Conditioning	20 °C, 65 %RH, 24 h	ASTM D1776, Table 1 for textiles, general.
Pre-tensioning	EN ISO 13934-1: Non-stretchable fabric 2~10 N per 5 cm of width, stretchable fabric 0.5 N per 5 cm of width, yarn 0.5 cN/tex	Eliminate any folds and wrinkles as possible, but do not stretch.
Procedure	<i>Four electrode - four wire method:</i> Values are agreed for the stability when two significant digits are not changed. <i>Two electrode - four wire method:</i> Measure at four different distances between voltage electrodes, carry out a linear regression on the measurement data. If a correlation factor is below 0.9, discard the specimen.	<i>4-point measurement:</i> Ensure consistent pressure throughout test, and record values after 3 seconds stabilization <i>2-point measurement:</i> Ensure consistent pressure throughout test, and record values after 3 seconds stabilization
Calculation	Linear resistance in ohm per metre	Percent of resistance (Ohm) change after treatment

극사이 간격, 접촉방법, 압력, 전극과 시료 간 접촉 면적이 일정하게 유지되어야 일관된 측정값을 도출할 수 있다고 작성되어 있다. 지금까지 개발된 표준은 다양한 시험편의 형태와 특성을 반영하여 시험절차를 세분화하여 제시하지 못하였으나, 이러한 문제는 동일 시험표준, 다른 측정결과를 유발한다. 이는 제품의 품질관리 문제와도 직결되는 것으로서, 동일 시험표준, 동일한 측정값을 도출하기 위해서 상용화되어 있는 스마트 의류 및 전자섬유 소재를 유형화하여 시험편의 유형에 따라 시험 방법을 세분화되도록 국제표준의 제·개정 작업이 추진될 필요가 있다. AATCC EP13(2021)에서는 장력과 같이 시험결과와 불확도 증가 요인을 통제하고 결과값의 적합성 판단을 위한 기준을 추가적으로 명시하는 것이 필요해 보인다.

4.2. 사용환경 스트레스 노출 시험

내구성 시험표준 6개 중 현재 제정된 표준은 2개로, AATCC TM210(2019)와 IEC 63203-204-1(2023a)가 이에 해당한다. 이 중, AATCC TM210(2019)은 스마트 의류의 사용 환경 스트레스를 전반적으로 고려하여 총 아홉 가지 노출 시험(가정 세탁, 드라이클리닝, 분무 시험, 내수도, 해수, 땀, 산과 알칼리, UV, 미생물)으로 구성하였다. 각 시험방법은 기존에 전통적인 의류 제품에서 활용되어 오던 AATCC 시험표준을 인용하였으며, 내구성 평가를 위해 필요한 노출 시험 전후 전기적 성능평가는 AATCC EP13(2021)를 따르도록 하였다.

반면, IEC 63203-204-1(2023a)은 세탁 내구성에 대한 표준으로, 세탁시험은 ISO 6330, 세탁 전후 전기저항 평가는 EN 16812(2016)를 인용하였다. IEC 63203-204-1(2023a)는 2021년 제정된 이후에 2023년 개정하면서, 전기저항 평가를 필수가 아닌 선택 사항으로 변경하였으며, 이에 따라, 필요하지 않은 경

우에는 제품의 작동 여부만 평가하는 것도 허용된다. 전기저항 측정법도 개정 전에는 필수적으로 EN 16812(2016)을 요구하였으나 개정 후에는 시험편 형태에 따라 적절한 것을 선택하는 것으로 변경되었다.

AATCC TM210와 IEC 63203-204-1(2023a)의 공통 항목인 세탁 내구성 시험 세부 절차를 비교하면 Table 3과 같다. 무엇보다 가장 눈에 띄는 두 표준의 차이점은 시험편의 조건이다. 현재 IEC 63203-204-1(2023a)는 완제품만을 평가대상으로 간주하고 있으나(개정 전에는 스포츠웨어와 레저웨어로 제한하였으나, 2023년 개정 후 품목 제한은 삭제됨), AATCC TM210(2019)는 전기전도성 원단 또는 전도성 회로가 삽입된 완제품으로 범위가 더 넓다. 세탁 횟수에도 차이가 있는데, AATCC TM210(2019)는 구매자와 판매자 간 협의가 없는 경우 최소 세탁 및 건조 횟수를 3회로 제시하고 있으며, IEC 63203-204-1(2023a)에는 별도로 세탁 횟수를 규정하지 않는다.

AATCC TM210(2019)는 세탁 외에도 다양한 내구성 시험절차를 다루고 있으며, 각 시험별 요구되는 시험편의 크기, 그리고 전기저항을 측정하기 위한 전도성 회로의 최소 길이가 구체적으로 규정하고 있어(Table 4), 시험자 입장에서 활용이 매우 용이하다.

그러나 이러한 표준에서 언급되지 않은 시험절차 중에 신뢰성 확보를 위해 추가적으로 고려해야 할 부분이 있다. 첫 번째, 전기저항을 측정하기 위해 프로브와 접촉하게 되는 연결점은 내구성 시험으로 인해 손상되지 않도록 노출 시험시 보호하거나, 사전에 안정적으로 전기저항을 측정할 수 있도록 내구성이 강한 소재로 보강하도록 명시할 필요가 있다. 프로브와의 접촉점이 손상되면 안정적인 측정값을 획득하기 어렵기 때문이다. 두 번째, 실제 완제품 상태에서의 내구성을 파악하기 위해 완

Table 3. Comparison of standardized test methods of laundering durability

Contents		IEC 63203-204-1:2023a	AATCC TM210-2019
Scope		E-textile products	E-textile fabrics or end products with incorporated conductive path/traces
Referenced documents	Electrical Resistance	Optional; BS EN 16812 or other appropriate methods	AATCC EP13
	Laundering	ISO 6330 (2012)	AATCC LP1, LP2
Test Specimen		Products; no specific size required	Textile (N = 3), 400 × 400 mm
Conditioning		ISO 139 (20°C, 65 %RH, 24 h)	ASTM D1776, Table 1
Procedure	Initial resistance meas.	Check and confirm the proper operation. Mark the measurement point, and measure conductive track resistance, which is optional.	Mark the measurement point on the flat textile. Record data after 3 seconds stabilization (see <Table 3> for the detailed procedures).
	Home Laundering	Comply with manufacturer’s designated care label. If not specified, Type A machine, 4H(hand-wash) procedure, and line dry method of ISO 6330.	Select laundering condition as expected care instructions for the end products, and perform 3 laundering cycles without agreement between buyer and seller.
	Evaluation	Check and confirm again the proper operation, and measure conductive track resistance at the marked points	Measure conductive track resistance at the marked points
Calculation		electrical resistance	Percent of resistance change after treatment

Table 4. AATCC TM210-2019: Shape and dimension of specimens for each exposure

Exposure	Shape and Dimension of specimens	Minimum length of conductive tracks
Home laundering	Square, 400 × 400 mm	150 ~ 300 mm
2. Drycleaning	Square, 500 × 500 mm	150 ~ 300 mm
3. Water: Spray	Square, 180 × 180 mm	~ 150 mm
4. Water: Hydrostatic pressure	Square, 200 × 200 mm	~ 90 mm
5. Water: Salt (sea)	Rectangular, 120 × 60 mm	~ 125 mm
6. Perspiration	Rectangular, 120 × 70 mm	~ 130 mm
7. Acids and alkalis	Circle, 48 mm of diameter	40 mm
8. UV radiation and moisture	Rectangular, 120 × 70 mm	~ 130 mm
9. Microbes	Circle, 48 mm of diameter	40 mm

제품 상태에서의 레이어를 고려하여 시험환경에 노출시키는 것을 고려할 필요가 있다. 예컨대, 발열 패딩자켓에서 발열체는 대부분 패딩 내측에 삽입되며, EMS 수트의 EMS 전극은 피부에 직접 접촉되어야 하므로 표면에 노출되므로 발열체는 패딩 자켓 레이어에 삽입하여 세탁하고, EMS 전극은 표면에 드러나도록 세탁해야만, 실제 사용환경에서의 세탁 내구성을 정확하게 확인할 수 있을 것이다. 마지막으로, 전통적인 의류소재의 내구성 평가 기준과는 다른, 전자섬유와 스마트 의류의 내구성 평가 기준이 요구된다. 예를 들면, 일반적으로 마모저항 평가 시 한 가닥 또는 두 가닥 실의 끊어짐(적물, 편물) 또는 구멍 발생(부직포)을 성능평가 기준으로 하나, 전자섬유의 경우 실이 끊어지지 않고 구멍이 발생하지 않아도 유의미한 기능 저하가 발생할 수 있다. 보다 구체적으로, 현재 안전화 시험 표준(KS M ISO 20345:2011)에서는 앞날개 안감에 대해 마모저항을 건조 상태일 때 25,600회, 습식 조건에서 12,800회 시험했을 때 어떠한 구멍도 발생하지 않아야 한다고 규정한다. 그러나 앞날개 안감에 전자섬유가 배치된다면, 전기저항의 변화가 구멍 발생에 선행하므로, 구멍의 발생만으로는 내구성을 충분히 검증

하기 어렵다. 이러한 스마트 보호복에서 전기저항을 평가 기준으로 반영한다면, 유의미한 전기저항의 변화를 판단하는 기준에 대해서도 함께 논의가 필요할 것이다.

CEN에서 제정한 스마트 소방복 표준(CEN/TR 17620, 2021)은 스마트 소방복의 필수 요구성능의 구현과 신뢰성, 안전성 및 위험성에 대한 검증과 제품의 사용, 관리, 유지에 대한 명확한 설명 제공 의무를 제조업체에 부여하고 있다. 또한, 추가된 스마트 기능으로 인하여 발생하는 단점을 쾌적성, 맞음새, 무게, 내구성, 관리용이성 측면에서 검토하도록 제한한다. 내구성은 사용 및 보관 조건을 모두 고려되되, 인장강도, 인열강도, 마모저항, 굴곡 저항, 봉합강도, 견뢰도 평가와 함께 소재의 노화(material aging)와 스마트 기능의 기능성 시험을 평가하도록 제안한다. 또한 세탁 후 보호성능의 유지는 물론이거니와 스마트 기능의 저하가 발생하지 않아야 한다. 이와 함께 Annex A에는 소방복을 포함한 다양한 내열 및 방염 보호복의 요구성능을 함께 정리해두었다. Fig. 3은 이 표준에 삽입된 스마트 소방복의 선택, 사용, 관리와 유지에 대한 순서도를 다시 그려본 것이다. 이 순서도에서 스마트 보호복은 선택되기 전 환경내구성과

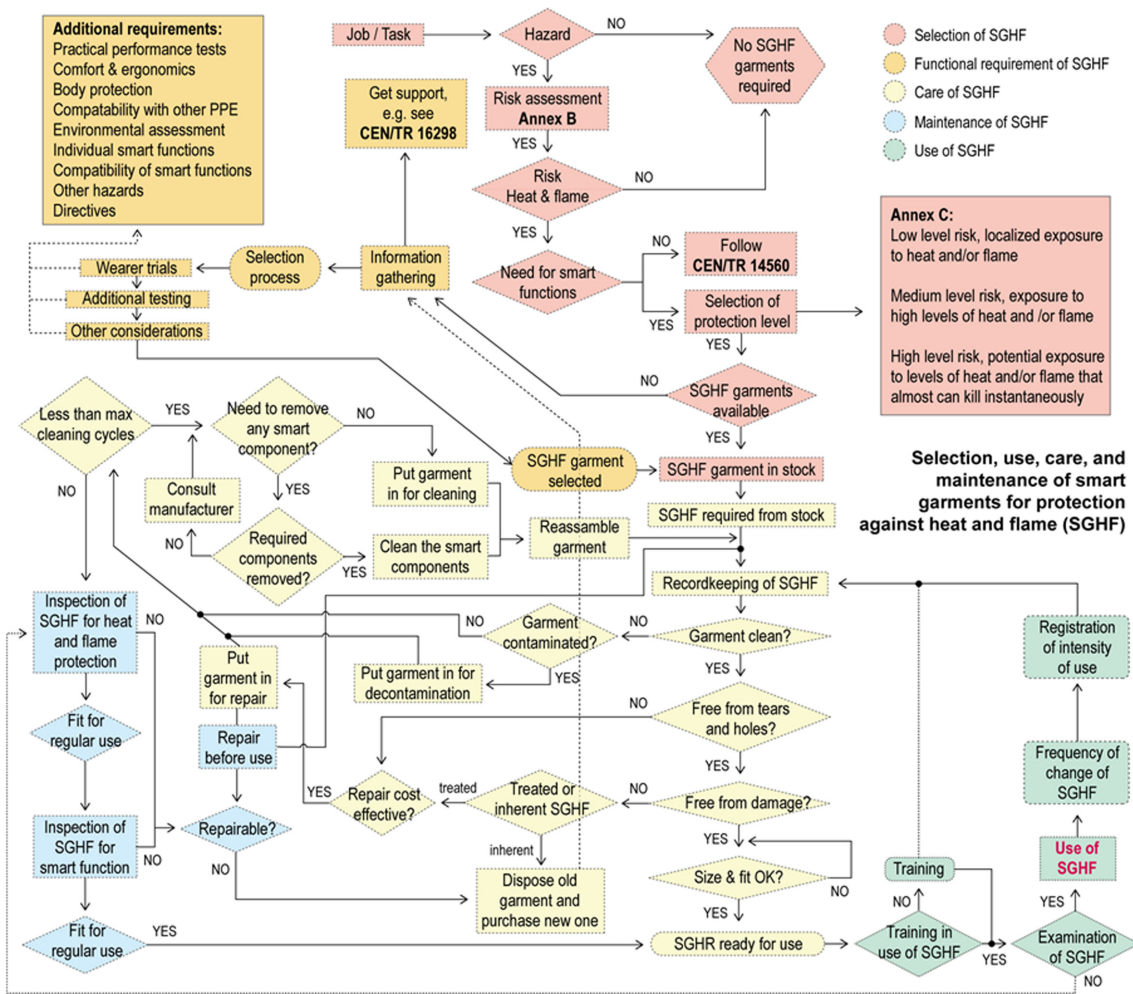


Fig. 3. Schematic diagram of mechanical, chemical, and biological exposures during a service life cycle of the everyday clothing (redrawn from CEN/TR 17620:2021, p.14).

착용평가를 포함하여 다양한 시험평가를 거친다. 또한 관리 단계에서 최소 세탁 횟수에 도달한 이후에 스마트 기능의 재검사를 통해 사용 적합성을 평가한다. 스마트 의류 및 스마트 보호복의 다양한 형태와 기능을 만족하는 세분화된 시험표준의 개발이 여전히 진행 중인 상황에서, 이 표준은 앞으로 스마트 보호복 표준 개발의 방향을 보여준다. 다양한 표준화 기관에서 동시다발적으로 마련되고 있는 시험표준은 활용 기업과 사용자에게 혼란과 불편함을 제공하는 것이 아니라, 실질적으로 제품의 신뢰성 향상과 기업의 품질관리에 도움이 될 수 있도록 명확한 시험절차를 제시하며 시험 측정 시 불확도 또는 측정값과 성능에 영향을 미치는 요인들에 대한 검토사항과 정보를 제시할 수 있어야 할 것이다.

5. 결 론

의류제품의 사용 전주기에서 특징적으로 발생하는 다양한 기계적, 생물학적, 화학적 스트레스 요인은 전자섬유와 스마트의

류의 신뢰성 저하 및 소비자 수용 지연의 원인이 되고 있다. 본 연구는 스마트 의류제품의 신뢰성 향상과 품질 관리 용이성 확보를 도모하고자 스마트 의류와 전자섬유에 대한 사용환경 내구성 표준화 현황을 파악하고 사용환경 내구성에 대한 유사 표준을 비교분석하였다. 총 27개의 개발완료 및 개발 중인 표준을 목록화하였고, 이에 대한 카테고리 분석과 연도별 분석을 통해 앞으로의 표준화 작업이 주로 기능성과 내구성에 집중되어 있음을 확인하였다. 또한 사용환경 내구성, 그 중에서도 세탁 내구성 시험법에 대한 두 국제표준(IEC와 AATCC)과 환경 노출시험 전후 전기저항 측정법 표준(EN과 AATCC)의 상세 내용을 비교해봄으로써, 시험의 신뢰성 향상을 위해 개정이 필요한 부분에 대하여 논의하였다. 그 결과 본 연구는 다음과 같은 개정 방향을 제시하였다. 첫 번째, 전기저항을 측정하기 위해 프роб와 접촉하게 되는 연결점은 내구성 시험으로 인해 손상되지 않도록 노출 시험 시 보호하거나, 사전에 안정적으로 전기저항을 측정할 수 있도록 내구성이 강한 소재로 보강하도록 명시할 필요가 있다. 두 번째, 실제 완제품 상태에서의 내구성

을 파악하기 위해 완제품 상태에서의 레이어를 고려하여 시험 환경에 노출시키는 것을 고려할 필요가 있다. 마지막으로, 전통적인 의류소재의 내구성 평가 기준과는 다른, 전자섬유와 스마트 의류의 내구성 평가 기준이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 국가기술표준원 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(텍스타일 기반 인체 착용형 IoT 융합 소재 및 제품의 사용 환경 내구성 시험 서비스 개발, 20021879) 및 2022년 중소기업창업부 및 중소기업기술정보진흥원 연구비 지원(CE안전화 성능기준을 만족하는 복합발열(전도+대류) 안전화 개발, RS-2022-00142915)을 받아 수행되었습니다.

References

- American Association of Textile Chemists and Colorists. (2021). AATCC EP13-2021 *Evaluation procedure for electrical resistance of electronically integrated textiles*. Durham: American Association of Textile Chemists and Colorists.
- American Association of Textile Chemists and Colorists. (2019). AATCC TM210-2019 *Test method for electrical resistance before and after various exposure conditions*. Durham: American Association of Textile Chemists and Colorists.
- American Society for Testing and Materials International. (2020a). ASTM B193-20 *Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials International. (2020b). ASTM D8248-20 *Standard terminology for smart textiles*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials International. (2021a). ASTM D257-14(2021)e1 *Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International.
- American Society for Testing and Materials International. (2021b). ASTM D4496-21 *Standard Test Method for D-C Resistance or Conductance of Moderately Conductive Materials*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International.
- Choi, J. S., & Park, J. O. (2021) International standardization trend for reliability testing of wearable devices. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 7, 35-47.
- European Committee for Standardization. (2016). BS EN 16812:2016 *Textiles and textile products. Electrically conductive textiles. Determination of the linear electrical resistance of conductive tracks*. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2011). CEN/TR 16298: 2011 *Textiles and textile products - Smart textiles - Definitions, categorisation, applications and standardization needs*. Brussels: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. (2021). CEN/TR 17620: 2021 *Guidelines for selection, use, care and maintenance of smart garments protecting against heat and flame*. Brussels: European Committee for Standardization.
- International Electrotechnical Commission. (1974). IEC 60468:1974 *Method of measurement of resistivity of metallic materials*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2019). IEC 62899-202-3:2019 *Printed electronics - Part 202-3: Materials - Conductive ink - Measurement of sheet resistance of conductive films - Contactless method*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2021a). IEC 63203-101-1:2021 *Wearable electronic devices and technologies - Part 101-1: Terminology*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2021b). IEC 63203-201-3:2021 *Wearable electronic devices and technologies - Part 201-3: Electronic textile - Determination of electrical resistance of conductive textiles under simulated microclimate*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2021c). IEC 63203-250-1:2021. *Wearable electronic devices and technologies - Part 250-1: Electronic textile - Snap fastener connectors between e-textiles and detachable electronic devices* Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2022a). IEC 63203-201-1:2022 *Wearable electronic devices and technologies - Part 201-1: Electronic textile - Measurement methods for basic properties of conductive yarns* Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2022b). IEC 63203-201-2:2022 *Wearable electronic devices and technologies - Part 201-2: Electronic textile - Measurement methods for basic properties of conductive fabrics and insulation materials*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2022c). IEC 63203-402-1:2022 *Wearable electronic devices and technologies - Part 402-1: Devices and Systems - Accessory - Test and evaluation methods of glove-type motion sensors for measuring finger movements*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2023a). IEC 63203-204-1:2023 *Wearable electronic devices and technologies - Part 204-1: Electronic textile - Test method for assessing washing durability of leisurewear and sportswear e-textile systems* Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2023b). IEC 63203-402-2 ED1 *Wearable electronic devices and technologies - Part 402-2: Performance measurement of fitness wearables - step counting*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- International Organization for Standardization (2020). ISO/TR 23383:2020 *Textiles and textile products - Smart (Intelligent) textiles - Definitions, Categorisation, applications and standardization needs*. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (2022). ISO 24584:2022 *Textiles - Smart textiles - Test method for sheet resistance of conductive textiles using non-contact type*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Institute of Printed Circuits. (2021). *IPC-TM-650 Measuring high frequency signal loss and propagation on printed boards with*

- frequency domain methods*.
- Institute of Printed Circuits. (2019). *IPC-8921 Requirements for woven and knitted electronic textiles (e-textiles) integrated with conductive fibers, conductive yarns and/or wires*. Chicago: IPC International, Inc.
- Institute of Printed Circuits. (2023). *IPC-8971 Requirements for electrical testing of printed electronics e-textiles*. Chicago: IPC International, Inc.
- Jang, E., & Cho, G. (2019). The classification and investigation of smart textile sensors for wearable vital signs monitoring. *Fashion & Textile Research Journal*, 21(6), 697-707. doi:10.5805/SFTI.2019.21.6.697
- Jeon, J. H., Lee, W. S., Lee, J. C., Cha, H. K., & Lee, S. Y. (2016). Trends on standardization for smart wearable technology. *Electronics and Telecommunications Trends*, 31(2), 73-83. doi:10.22648/ETRI.2016.J.310208
- Ju, N., & Lee, K.-H. (2020). Consumer resistance to innovation - Smart clothing. *Fashion and Textiles*, 7, 1-19. doi:10.1186/s40691-020-00210-z
- Jung, I., & Lee, S. (2018). Durability evaluation of stainless steel conductive yarn under various sewing method by repeated strain and abrasion test. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 42(3), 474-485. doi:10.5850/JKSC.T.2018.42.3.474
- Korean Agency for Technology and Institute of Convergence Science of Yonsei University (2020). ANNEX D of Issue Paper on the Korea-ASEAN 4th Industrial Revolution Standards Cooperation. Seoul: Korean Agency for Technology and Standards.
- Kim, S., Jung, D., Lee, J. Y., Kwon, J., Lim, D., & Jeong, W. (2021). User experience analysis of shoe-mounted gait analysis tracker. *Fashion & Textile Research Journal*, 23(3), 390-405. doi:10.5805/SFTI.2021.23.3.390
- Korea Consumer Agency. (2016) *Textile product quality recommendation standard*. Seoul: Korea Consumer Agency.
- Lam, N. Y. K., Tan, J., Toomey, A., & Cheuk, K. C. J. (2022). Washability and abrasion resistance of illuminative knitted e-textiles with POFs and silver-coated conductive yarns. *Fashion and Textiles*, 9(1), 39. doi:10.1186/s40691-022-00313-9
- Meena, J. S., Cho, S. B., Jung, S. B., & Kim, J. W. (2023). Electronic textiles - New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions. *Materials Today Bio*, 100565. doi:10.1016/j.mtbio.2023.100565
- Ohiri, K. A., Pyles, C. O., Hamilton, L. H., Baker, M. M., McGuire, M. T., Nguyen, E. O., Osborn, L. E., Rossick, K. M., McDowell, E. G., Strohsnitter, L. M., & Currano, L. J. (2022). E-textile based modular sEMG suit for large area level of effort analysis. *Scientific Reports*, 12(1), 9650. doi:10.1038/s41598-022-13701-4
- Ryu, J. W., Jee, Y. J., Kim, H. J., Kwon, S. Y., & Yoon, N. S. (2011). Electrical properties of Ag-coated conductive yarns depending on physical and chemical conditions. *Textile Coloration and Finishing*, 23(1), 43-50. doi:10.5764/TCF.2011.23.1.043
- Scataglini, S., Moorhead, A. P., & Feletti, F. (2020). A systematic review of smart clothing in sports: Possible applications to extreme sports. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, 10(2), 333-342. doi:10.32098/MLTJ.02.2020.19
- Shuvo, I. I., Decaens, J., Lachapelle, D., & Dolez, P. I. (2021). *Smart textiles testing - A roadmap to standardized test methods for safety and quality-control*. London: IntechOpen.
- Sun, Z., Zhu, M., Shan, X., & Lee, C. (2022). Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions. *Nature Communications*, 13:5224. doi:10.1038/s41467-022-32745-8
- Syduzzaman, M., Patwary, S. U., Farhana, K., & Ahmed, S. (2015). Smart textiles and nano-technology - A general overview. *Journal of Textile Science and Engineering*, 5(1), 1-7. doi:10.4172/2165-8064.1000181
- Van Herreweghen, F., Amberg, C., Marques, R., & Callewaert, C. (2020). Biological and chemical processes that lead to textile malodour development. *Microorganisms*, 8(11), 1709. doi:10.3390/microorganisms8111709
- Zaman et al. (2019a). Launderability of conductive polymer yarns used for connections of e-textile modules - Mechanical stresses. *Fibers and Polymers*, 20(11), 2355-2366. doi:10.1007/s12221-019-9325-x
- Zaman, S. U., Tao, X., Cochrane, C., & Koncar, V. (2019b). Market readiness of smart textile structures - Reliability and washability. *Proceedings of the Aegean International Textile and Advanced Engineering Conference (AITAE 2018), Greece*, pp. 1-6. doi:10.1088/1757-899X/459/1/012071

(Received June 07, 2023; 1st Revised June 19, 2023;
Accepted June 22, 2023)