

스마트웨어용 텍스타일형 전극 및 배선으로의 적용을 위한 전도성 복합사 개발 연구

김혜림¹⁾ · 노수현^{1,2)} · 정원영^{1)†}

¹⁾한국생산기술연구원 소재부품융합연구부

²⁾성균관대학교 나노과학기술학과

Research on the Development of Conductive Composite Yarns for Application to Textile-based Electrodes and Smartwear Circuits

Hyelim Kim¹⁾, Soohyeon Rho^{1,2)}, and Wonyoung Jeong^{1)†}

¹⁾Material and Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology; Ansan, Korea

²⁾Department of Nano Science and Technology, Sungkyunkwan University; Suwon, Korea

Abstract: This study aimed to research the local production of conductive composite yarn, a source material used in textile-type electrodes and circuits. The physical properties of an internationally available conductive composite yarn were analyzed. To manufacture the conductive composite yarn, we selected one type of conductive yarn with Ag-coated polyamide of 150d 1 ply, along with two types of polyethylene terephthalate (PET) with circular and triangular cross-sections, both with 150d 1 ply. The conductive composite yarn samples were manufactured at 250, 500, 750, and 1000 turns per meter (TPM). For both conductive composite yarn samples manufactured from two types of PET filaments, the twist contraction rate of the sample with a triangular cross-section was stable. Among the samples, the tensile strength of the sample manufactured at 750 TPM was the highest at approximately 4.1gf/d; the overall linear resistance was approximately 5.0 Ω/cm, which is within the target range. It was confirmed that the triangular cross-section sample manufactured with 750 TPM had a similar linear resistance value to the advanced product despite the increase in the number of twists. In future studies, we plan to manufacture samples by varying the twist conditions to derive the optimal conductive yarn suitable for smartwear and smart textile manufacturing conditions.

Key words: conductive yarn (전도사), conductive composite yarn (전도성 복합사), smartwear (스마트웨어), textile based electrode (텍스타일형 전극), performance evaluation (성능평가)

1. 서 론

최근 웰빙과 개인의 건강관리에 대한 욕구가 증가함에 따라, 생체신호 측정이 가능한 스마트 디바이스 및 의류에 대한 수요가 증가하고 있다(Ahsan et al., 2022; Kim et al., 2022a). 이에 따라 착용 가능한 스마트 디바이스 및 의류를 제조하고자 전자섬유 기술 기반의 원천소재 확보를 위한 연구도 활발히 진행되고 있다 (Choi et al., 2021; Tang et al., 2021). 일반적으로 웨어러블 스마트웨어에 사용되는 전극 및 배선의 소재로는 hard type, conductive sheet 또는 screen printing type, embroidery type 및 knit type 등이 있으며, 그 중에서 착용시 이물질감이 적고 착용성이 우수한 스마트웨어 제조를 위해 전도

사를 사용한 자수 또는 니트 기반의 섬유형 전도성 소재로 제조된 건식 전극 개발에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 이에 대한 성능 검증뿐만 아니라 착용쾌적성 향상까지 연구가 되고 있다(Kim et al., 2020; Kim et al., 2023; Lee et al., 2023; Shuvo et al., 2022; Zhao et al., 2022).

스마트 텍스타일 및 스마트 의류 시장이 지속적으로 증가함에 따라 전도사 사용량이 증가하고 있으며, lab-scale에서도 다양한 연구가 진행되고 있다(Dyson et al., 2020; Hong et al., 2021; Hou et al., 2012; Kim et al., 2022b). 전도사는 주로 비전도성을 가진 원사 표면에 탄소나노튜브, 카본블랙, 그래핀과 같은 탄소나노소재나 은 나노 와이어나 파티클 등 전도성 물질을 딥 코팅, 스프레이 코팅, 증착하는 방법으로 제조되고 있다. 이는 반복 인장 및 신축에 의해 표면에 코팅되어 있는 전도성 층의 박리 또는 전도성 입자들의 탈락으로 인해 전도사의 품질이나 성능이 저하되는 문제가 있다(Jung & Lee, 2018). 이를 보완하기 위해서 전도성 나노 입자들을 고분자 용액에 분산시켜 습식방사, 용융방사, 용액방사 등 lab-scale로 전도사를 얻는 연구가 많이 보고되고 있으나, 고분자 내 첨가 가능한 전도성 물질의 한계뿐만 아니라, 방사 공정상에서의 한계

†Corresponding author: Wonyoung Jeong
Tel. +81-32-8040-6233, Fax. +82-31-8040-6220
E-mail: wyjeong@kitech.re.kr

©2023 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). 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.

로 인해 충분한 전도성을 가지는 전도사의 제조에 어려움이 있는 실정이다(Arias-Monje et al., 2020; Lu et al., 2021).

또한, 일부 시판 중인 전도사는 비교적 저항이 낮은 스테인리스 방적사 또는 비전도성 원사 표면에 은 입자를 코팅하여 제조된 형태가 대부분이다(“Madeira”, 2023; “Shieldex”, 2023; “Soitex”, 2023). 이는 저항이 매우 낮은 반면 외부 환경에 손쉽게 노출되기 때문에 산화가 빠르게 일어날 뿐만 아니라, 봉제기, 자수기나 봉제기에 사용될 때 비늘의 움직임에 따라 전도성 입자의 탈락이 쉽게 발생하고, 강직하고 거친 표면으로 인해 장력 조절에 한계가 있다는 단점이 있다(Jung & Lee, 2018; Rho et al., 2022). 이에 해외 선진업체에서는 테크니컬 자수 및 봉제 장비의 개발과 더불어 이에 적합한 전도성 복합사가 출시되어 판매되고 있으며, 은 코팅 전도성 원사와 비전도성 원사를 합연하여 제조한 복합사의 형태로 되어있다(“Silver-tech”, 2023). 복합사 형태의 전도사는 전도성 입자뿐만 아니라 코팅된 전도성 원사에 비해 저항은 높지만, 텍스타일형 전극이나 회로 제작시에 전도성 입자들의 탈락이 감소하므로 스마트웨어 제조 후의 내구성이 보다 유지되므로 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 해당 제품들은 주로 국외에서 생산 및 제조되고 있으며 국내에서의 개발이 필요한 실정이다.

일반적으로 원사는 기본적으로 원형의 단면을 가지고 있다. 폴리에스터와 같은 용융방사로 얻어진 섬유는 특정한 모양의 방사구를 사용하여 다양한 형태의 단면을 지닌 섬유를 제조하기도 한다. 이를 이형 단면이라고 하며, 광택이나 촉감, 유연성이나 마찰특성, 수분율 등에 영향을 미친다(Ahmad & Zhou, 2022; Das et al., 2008; Karaca et al., 2012; Karaca et al., 2015). 전도성 복합사 또는 전도사 제조를 위해 합연에 사용된 원사들은 대부분 원형 단면의 형태로 제조되며 꼬임수가 꼬임 각도에 대한 연구가 주로 수행되고 있다(Medvetski et al., 2021;

Ryklin & Medvetski, 2017). 실제로 스마트 웨어의 전극부는 형태를 유지할 수 있는 내구성이 우수한 전도성 복합사 또는 원사가 필요하며, 회로부는 착탈의 또는 활동시에도 신장회복이 우수한 제품이 필요하므로, 다양한 어플리케이션으로의 적용을 위해서는 이에 맞는 전도사의 개발이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는, 텍스타일형 전극 및 회로에 사용되는 원천 소재인 전도성 복합사의 국산화를 위한 기초연구로, 은 코팅 전도성 원사 1종과 단면이 상이한 PET 2종을 선정하여 단면 형상 및 꼬임수에 따른 전도성 복합사를 제조하고 모폴로지, 꼬임수, 연축율, 인장 특성 및 선저항을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료 및 기기

Table 1은 본 연구에 사용된 재료를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 봉제기, 자수기 등의 섬유·의류용 장비에 적용이 가능한 전도사 제조를 위하여 은 코팅 전도성 원사 (Soitex, Korea) 1종과 단면 형상이 상이한 2종의 폴리에스터 원사 (Daehan Synthetic Fiber Co. Ltd, Korea)를 사용하여 합사 조건에 따른 샘플을 제조하였으며, 가연기 (Twisting Machine, TY 370, TesTex, China)를 사용하였다. 또한 자수 및 봉제용 전도사 분야의 해외 선진 제품인 Silver tech 120 (Amann & Söhne GmbH & Co KG, Germany)을 분석에 사용하였다.

2.2. 합사 조건에 따른 전도성 복합사 제조

Table 2는 전도성 복합사를 제조하기 위한 합사 조건 및 이에 따른 샘플코드를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 PET 단면 형상이 상이한 2종의 비전도성 원사와 전도성 원사를 사용하여 다양한 꼬임수를 가지는 전도성 복합사를 제조하였다. 합사

Table 1. Specification and sample code of used materials

Type	Sample code	Specification
Materials for manufacturing conductive yarn	Conductive part Ag_PA	Ag coated PA, 100d
	Non-conductive part C_PET	PET *FDY, 150d Circular cross section
	T_PET	PET FDY, 150d Triangular cross section
Advanced product	Conductive yarn Cond.Y	Ag coated PA/PET, 250d

*FDY: Fully draw yarn

Table 2. Conditions of twist factor for manufacturing samples

(Pre-load: 10 cN)

Non-conductive part	Conductive part	Twisting Direction	TPM (Turn per Meter)	Sample code
C_PET	Ag_PA	S	250	C_PET/Ag_PA-250
			500	C_PET/Ag_PA-500
			750	C_PET/Ag_PA-750
			1,000	C_PET/Ag_PA-1000
T_PET	Ag_PA	S	250	T_PET/Ag_PA-250
			500	T_PET/Ag_PA-500
			750	T_PET/Ag_PA-750
			1,000	T_PET/Ag_PA-1000

를 위해 비전도성 원사와 전도성 원사를 가연기 지그에 동시에 고정해주었고, 이 때 10 cN의 초하중을 주었다. 이후 장비 내에 꼬임방향은 우꼬임인 ‘S’ 꼬임으로 고정하고, 꼬임수를 250, 500, 750 및 1,000 TPM으로 변경하여 복합사 샘플들을 제조하였다.

2.3. 특성분석

2.3.1. 필라멘트 수 및 섬도 분석

해의 선진 제품의 필라멘트 수와 섬도를 확인하고자 KS K 0215에 준하여 필라멘트수를 분석하였으며, 고성능 3D X-ray 표면 분석기 (XRM, High-resolution 3D x-ray microscope, Xradia 510 Versa, ZEISS, USA)를 통해 구조 분석을 실시하였다. XRM 측정 조건은 $\times 0.4$ 배 대물렌즈로 60 kV 전압하에서 해상도 3.1 pixel로 측정하여 데이터를 얻었다. 또한, KS K ISO 2060에 준하여, 단위 길이당 질량을 측정하는 방식인 항장식으로 해의 선진 제품 및 합연에 사용된 비전도성 및 전도성 원사의 섬도 분석을 실시하였다.

2.3.2. 꼬임수 분석

해의 선진 제품의 꼬임수를 분석하고자 3D 광학현미경 (RH-2000, HIROX Co. Ltd, Japan)을 이용하여 실의 표면을 촬영한 후, 2D 계측 틀을 사용하여 전도성 원사가 1회 가연된 직선 길이를 3회 계측한 후 평균값을 사용하였다.

2.3.3. 모폴로지 분석

해의 선진 제품 및 합연에 사용된 재료의 표면 및 단면 구조 분석을 위해 FE-SEM (SU8000, Hitachi High-Technologies, Japan)을 이용하여 분석하였다. 해의 선진 제품의 경우 비전도성 원사 및 전도성 원사 부분을 분리하여 분석하였으며, 이 때 원사의 표면은 $\times 2,000$ 및 $\times 5,000$ 배율에서 측정하였고, 단면은 $\times 4,000$ 및 $\times 10,000$ 배율에서 측정하였다. 원사의 단면 이미지를 통해 직경 및 전도성 원사의 전도성 재료의 코팅층의 두께를 측정하였다.

2.3.4. 열적 특성 분석

재료의 열적 특성을 분석하고자 TGA (Thermogravimetric Analysis, A500, TA instrument, USA) 및 DSC (Differential

Scanning Calorimeter, Q100, TA instrument, USA)를 이용하여 분석하였다. TGA는 상온에서 800°C까지, DSC는 상온에서 350°C까지 범위에서 측정하였다. 이 때 승온속도는 20°C/min로 질소 분위기 하에서 측정하였다.

2.3.5. 연축율 분석

합연 조건에 따른 샘플의 연축율을 분석하고자, 복합사 길이를 5회 측정 후 Equation 1에 따라 연축율(% contraction)을 계산하였다.

$$\% \text{ contraction} = \{(L_0 - L_f) / L_0\} \times 100\% \quad (\text{Equation 1})$$

(L_0 : Length before twisting, L_f : Final length after twisting)

2.3.6. 인장 특성 분석

합연 조건에 따라 제조된 복합사 샘플 및 원재료, 해의 선진 전도사 제품 등의 인장 특성을 분석하고자, 만능재료시험기인 Instron 3343 장비(Universal testing machine, Instron, USA)에 yarn grip 2714-005 series를 사용하여 각 원사의 물성을 측정하였다. 이 때 각 지그간 표점 거리는 100 mm로 고정하였고, 인장 속도는 100 mm/min으로 측정하였다. S-S 곡선, 인장강도 및 파단신도를 얻었으며, 5회 측정 후 평균값을 사용하였다.

2.3.7. 전기적 특성 분석

전도성 복합사의 전기적 특성을 분석하고자, 멀티미터 (True RMS Multi-meter 287, FLUKE, USA)를 이용하여 선저항을 측정하였다. 3 cm길이의 저항을 10회 측정하였고 이를 단위 길이당 저항 (Ω/cm) 값으로 변환하여 측정하였으며, 평균값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전도성 복합사 제조를 위한 원사 재료 분석

3.1.1. 필라멘트 수 및 섬도 분석

Fig. 1은 해의 선진 제품의 섬도를 분석하기 위해 XRM 분석을 통해 얻은 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)은 XRM 측정 완료된 이미지이며, 해당 이미지에서 분석하고자 하는 영역을 crop 및 이성분을 가지는 일반 원사와 전도성 원사를 구

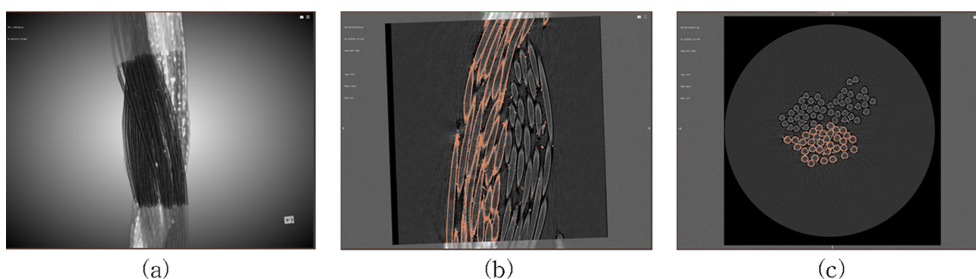


Fig. 1. XRM image of the advanced conductive composite yarn; (a) surface, (b) crop and segment and (b) cross section.

분한 후의 표면과 단면의 이미지를 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)에 나타내었다.

이미지에서 보이는 것과 같이, 전도성 영역의 경우 주황색으로 표기되었다. 단면 이미지를 통해 PA 원사에 전도성 물질인 Ag가 코팅된 PA 원사의 수는 36f로 확인되었고, PET 원사는 48f로 2ply로 합사가 되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Ag coated nylon 원사와 PET 원사 각각의 번수를 측정된 결과, Ag가 코팅된 PA 원사파트(Cond.Y_Ag_PA)는 104d, PET 원사파트(Cond.Y_PET)는 148d로 Cond.Y의 테니어는 약

232d로 확인되었다.

3.1.2. 꼬임수 분석

본 연구에서는 전도성 복합사 개발시 기준 꼬임수를 설정하기 위해 해외 선진 제품의 꼬임수를 분석하였다. 광학현미경으로 개당 꼬임수를 측정하여 TPM으로 환산하였으며, Table 3에 그 결과 값을 나타냈다. 2D 계측 프로그램을 이용하여 1개의 꼬임을 측정된 결과, 약 2,019 μm로 확인되었다고, 이를 TPM으로 변환한 결과 약 500 TPM의 꼬임을 준 것으로 확인되었다.

Table 3. Results of TPM of advanced conductive composite yarn

Image	Length per turn (μm)	Turns per meter (TPM)
	2019.7 ± 159.9	497.4 ± 37.8

Table 4. Morphology of non-conductive and conductive yarn

Sample Code	Surface		Cross section		Size	
	×2,000	×5,000	×4,000	×10,000	Diameter (μm)	Coated layer (nm)
Cond.Y_Ag_PA					17.6 ± 0.2	203.3 ± 5.9
Ag_PA					19.5 ± 0.5	211.3 ± 38.9
Sample Code	Surface		Cross section		Size	
	×2,000	×5,000	×1,000	×4,000	Diameter (μm)	
Cond.Y_PET					17.6 ± 0.6	
C_PET					18.6 ± 0.3	
T_PET					18.9 ± 0.6	

3.1.3. 모폴로지 분석

Table 4는 해외 선진 제품의 비전도성 원사와 전도성 원사를 분리한 것과 합연에 사용된 원사의 표면 및 단면 이미지를 나타낸 것이다. 해외 선진 제품의 전도성 및 비전도성 원사는 원형 단면을 가지고 있음을 확인하였으며, 각각의 직경은 약 17.6 μm 로 유사한 원사 직경을 가짐을 확인하였다. 또한, 앞서 XRM 이미지에서 확인된 것과 같이, Cond.Y_Ag_PA 원사에는 은이 코팅된 부분이 확인되었으며, 코팅층의 두께는 약 211.3 nm로 나타났다.

합연을 위해 선정된 전도성 원사는 해외 선진 제품에서 사용된 전도성 원사와 유사한 직경을 가지는 원형 단면으로, 원사의 직경은 약 2 μm 두꺼웠으나 코팅 두께는 약 8 nm로 큰 차이를 나타내지 않음을 확인하였다. 또한 PET의 경우, C_PET는 해외 선진 제품의 PET와 동일한 원형단면을 가지는 것을 확인하였고, T_PET은 Y자 형태의 삼각형 단면을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 단면의 직경은 해외 선진 제품의 PET 원사와 유사한 것을 확인하였다. 원사의 단면 형상은 벌기성, 굽힘강성, 내마모성, 태, 광택, 열안정성, 내구성, 표면특성 등 다양한 물성과 관련이 있다(Ahmad & Zhou, 2022; Das et al., 2008; Karaca et al., 2012; Karaca et al., 2015). 원형 단면과 삼각 단면 형상을 가지는 섬유는 섬유-섬유 접합을 비교한 선행 연구에서는 삼각 단면을 가지는 섬유가 섬유 집합체로 구성될 때 각각의 회전 각도가 다르기 때문에 원형 단면보다 패킹될 수 있는 영역이 많아 성능이 우수해짐을 보고하였다(Tao et al., 2018). 따라서, 원사의 단면 형상이 실 내부에 패킹과 관계가 있는 것으로 확인되며, 이는 합연 공정시 단면 형상 및 꼬임수에 따라 기계적 특성 등에 영향을 줄 것으로 보인다.

3.1.4. 열적 특성 분석

Fig. 2 및 Table 5는 해외 선진 제품 및 본 연구에 사용된 원사의 열적 특성인 TGA 및 DSC 결과를 나타낸 것이다. TGA 측정 결과, Cond.Y의 1차 열분해 온도는 약 421°C 부

Table 5. Thermal property of advanced conductive composite yarn and used yarn

Sample code	TGA		DSC	
	1 st decomposition temp. (°C)	Residue at 800°C (%)	T _g (°C)	T _m (°C)
Cond.Y	420.82	10.53	62.53	257.70
Cond.Y_Ag_PA	421.60	24.06	63.44	255.82
Ag_PA	436.83	19.93	62.31	222.98
Cond.Y_PET	427.22	14.86	-	260.94
C_PET	440.79	13.60	-	257.81
T_PET	438.91	10.38	-	255.82

근에서 나타났으며, Cond.Y 중 전도성 원사파트와 합사를 위해 선정된 전도성 원사(Ag_PA)는 모두 약 430°C 부근에서 나타났다. 이들 원사는 PA 원사에 은 코팅이 된 것으로, 일반적인 PA 원사의 분해 온도 범위로 보고된 420~520°C 범위 내에 속하는 것을 확인하였다(Pannase et al., 2020). Cond.Y_PET를 포함한 3종의 PET 원사의 경우, 1차 분해 온도는 약 430~440°C 부근에서 피크가 나타남을 확인했다(He et al., 2022; Küçük & Öveçoğlu, 2018).

또한, DSC 결과에서도 세 가지 샘플 모두 일반적인 PA가 가지는 T_g와 T_m 범위 내인 약 62°C 및 220~260°C 부근에서 나타남을 확인하였다(Braun & Levin., 1987; Hu & Yang, 2010). PET 원사 3종의 경우에도 약 260°C 부근에서 T_m 피크를 나타냄을 확인하였다. 따라서, 본 연구에 사용된 원사는 해외 선진 제품과 유사한 열적 특성을 가짐을 확인하였다.

3.1.5. 인장 특성 분석

Fig. 3은 해외 선진 제품 및 합연에 사용된 원사의 S-S 곡선을 나타냈으며, Fig. 4는 각각의 초기탄성률, 인장강도 및 파단 신도를 나타냈다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이, Cond.Y_Ag_PA의 인장 거동을 살펴보면, 초기에 비교적 적은 힘을 받

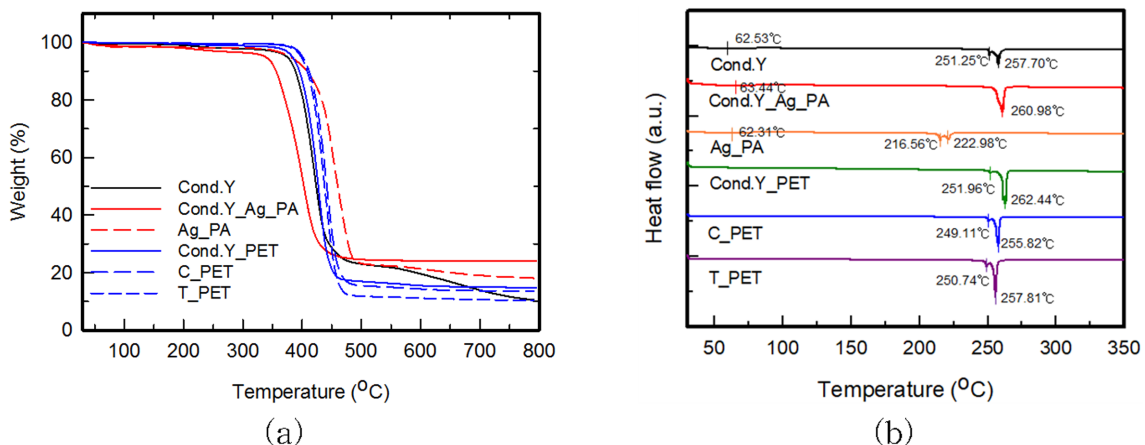


Fig. 2. (a) TGA, (b) DSC curves for advanced conductive composite yarn and used yarn.

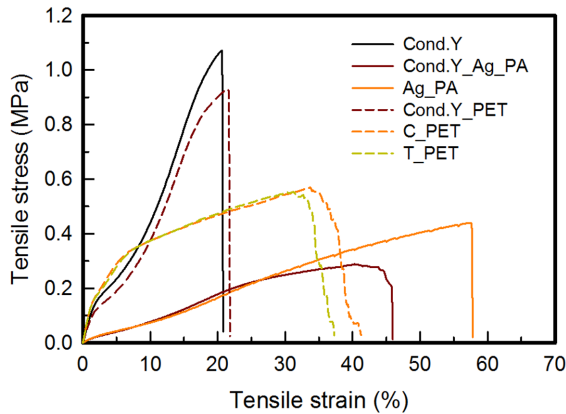


Fig. 3. S-S curve of advanced conductive composite yarn and used yarn.

았으며 약 46%의 신장율을 가지는 것을 확인할 수 있다. Cond.Y_PET는 초기에 하중에 영향을 받은 후 고분자 사슬이 늘어나는 구간을 거쳐 다시 하중을 강하게 받은 후 신장율 약 20%에서 파단되는 거동을 보였다. Cond.Y도 동일한 거동을 보였으며 이는 인장시에 신도가 낮은 PET 원사가 먼저 파단되었기 때문으로 확인된다. 합연에 사용된 Ag_PA는 Cond.Y_Ag_PA와 유사한 거동을 보였으나 보다 높은 강도와 신장율을 보였다. 또한 C_PET 및 T_PET의 경우 Cond.Y_PET에 비해 초기에 기울기가 다소 높게 나타났으며, 신장율 약 5%~30%까지는 하중에 의해 신장되다가 이후 파단된 것을 확인하였다. 이는 Cond.Y_PET와는 상이한 거동을 보였으나, C_PET와 T_PET는 유사한 물성을 가지는 것을 확인하였다. 두 원사의 단면 형상은 상이하나 동일한 고분자, 방사조건 하에서 제조된 원사이기 때문에 인장특성은 유사한 물성을 가지는 것으로 생각된다 (Karaca et al., 2012).

Fig. 3에서 얻어진 S-S 곡선을 바탕으로, 합연에 사용된 전도성 원사 및 PET 원사의 인장 특성을 확인하였으며, 이는 Fig. 4에 나타났다. 앞서 S-S 곡선에서 확인한 것과 같이, 전도성 원사파트에 비해 합연용으로 채택된 PET 원사의 탄성률이 높게 나타났다. 특히 C_PET 및 T_PET의 초기탄성율이 약 120 gf/d로 가장 크게 나타났다. Tenacity의 경우 Cond.Y_PET 원사가 약 6.2 gf/d로 가장 크게 나타났고, 본 연구에서 사용한 2종의

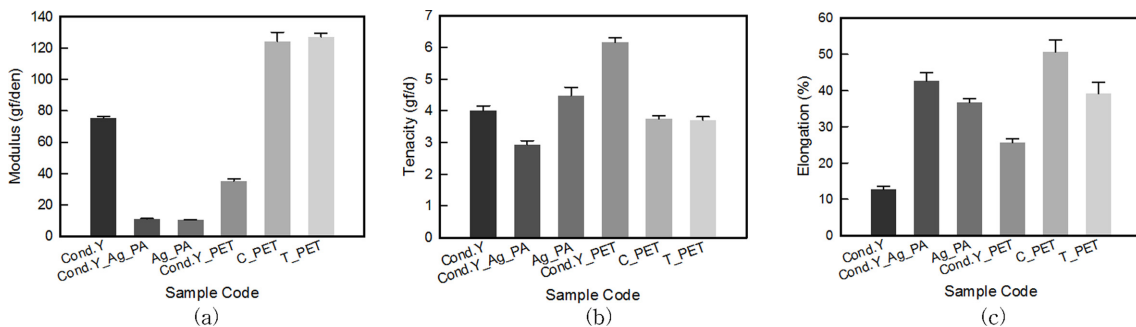


Fig. 4. Tensile property of advanced conductive composite yarn and used yarn in this study; (a) Modulus (b) Tensile strength (c) Elongation at break.

Table 6. Linear resistance of advanced conductive composite yarn and conductive yarns

Linear resistance (Ω/cm)	Sample code			
	Cond.Y		Cond.Y_Ag_PA	Ag_PA
	Data sheet	Measured value		
	< 5.30	4.48 ± 0.68	4.48 ± 0.60	4.68 ± 0.35

PET 원사는 각각 약 3.8 gf/d, 3.7 gf/d로 약 1.7배 낮은 값을 보였다. 그러나 전도성 원사 파트는 Cond.Y_Ag_PA보다 Ag_PA의 강도가 약 1.5배 높은 경향을 보였다. 신장율의 경우, Cond.Y 샘플은 전도성 원사인 Cond.Y_Ag_PA와 및 Cond.Y_PET 원사의 편차가 약 20%로 크게 나타났으나, 본 연구에서 사용된 전도성 원사와 PET 원사 2종의 편차는 약 10%로 유사 수준의 신장율을 가짐을 확인하였으며 이점이 복합사 제조 시 물성에 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상되었다.

3.1.6. 전기적 특성 분석

Table 6은 해외 선진 제품과 해당 제품의 전도성 원사 및 합연에 사용된 전도성 원사 3종의 전기적 특성을 알아보고자 선 저항 값을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. Cond.Y의 경우, 제조사 data sheet에서 제시한 선저항은 < 5.30 Ω/cm 이다 (“Silver-tech”, 2023). 이를 실측한 결과, $4.48 \pm 0.68 \Omega/cm$ 로 data sheet 범위 내의 값을 확인했으며, 전도성 복합사를 분리하여 전도성 원사만 측정하였을 때도 유사한 값은 $4.48 \pm 0.60 \Omega/cm$ 로 나타났다. 또한, 합연에 사용된 Ag_PA는 $4.68 \pm 0.35 \Omega/cm$ 를 가졌으며 해외 선진 제품의 전도성 원사와 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

3.2. 제조된 전도성 복합사 분석

3.2.1. 꼬임수 및 연축율 분석

앞서 제시된 조건대로 꼬임수에 따른 샘플을 제조하고 이에 따른 연축율을 분석하였다 (Table 7). Table 7에서 나타낸 것과 같이, 꼬임수가 증가함에 따른 복합사의 꼬임 상태를 광학 현미경 이미지를 통해 육안으로 확인할 수 있다.

연축율(twist contraction)은 꼬임에 의해 실의 길이가 줄어드는 양으로, 값이 클수록 복합사에 사용된 원사의 소요량이 큰

Table 7. Digital image and twist contraction of samples with various TPM

Item	Sample code			
	C_PET/Ag_PA-250	C_PET/Ag_PA-500	C_PET/Ag_PA-750	C_PET/Ag_PA-1000
Image				
Twist Contraction (%)	2.7 ± 0.7	4.6 ± 1.1	6.5 ± 0.2	10.2 ± 1.2

Item	Sample code			
	T_PET/Ag_PA-250	T_PET/Ag_PA-500	T_PET/Ag_PA-750	T_PET/Ag_PA-1000
Image				
Twist Contraction (%)	2.3 ± 0.2	4.0 ± 0.2	6.0 ± 0.6	9.9 ± 0.2

것을 의미한다(Jeon & Lee, 2002). Table 7과 같이 꼬임수에 따른 연속율을 분석한 결과, C_PET/Ag_PA 복합사는 250 TPM에서 1000 TPM으로 증가함에 따라 연속율은 2.7 ± 0.7%, 4.6 ± 1.1%, 6.5 ± 0.2% 및 10.2 ± 1.2%로 증가하였으며, T_PET/Ag_PA 샘플들의 연속율은 2.3 ± 0.2%, 4.0 ± 0.2%, 6.0 ± 0.6% 및 9.9 ± 0.2%로 증가함을 확인하였다. 2 종의 PET 원사 모두 꼬임수가 증가함에 따라 연속율이 증가하였다. 또한, T_PET/Ag_PA로 합사된 샘플들이 C_PET/Ag_PA로 합사된 샘플보다 연속율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 합연 공정 시 원형 단면을 가지는 C_PET사가 Y자 형의 이형 단면을 가진 T_PET에 비해 매끈한 표면을 가지고 있기 때문에 서로 결합할 수 있는 영역이 많은 T_PET가 연속율을 감소에 영향을 준 것으로 확인된다 (Toydemir & Bayramol, 2021). 따라서, C_PET/Ag_PA-500 조건이 모폴로지적으로 안정적임을 확인하였다.

3.2.2. 인장 특성 분석

Fig. 5은 해외 선진 제품 및 단면 형상과 꼬임수에 따라 제조된 샘플의 S-S 곡선을 나타냈으며, Fig. 6는 각각의 초기탄

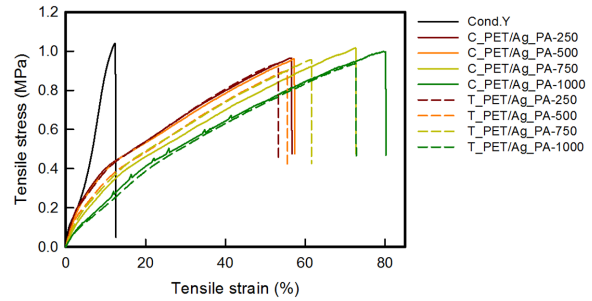


Fig. 5. S-S curve of samples with various TPM.

성을, 인장강도 및 파단 신도를 나타냈다. 초기탄성영역을 비교해보면, Cond.Y이 C_PET/Ag_PA 및 T_PET/Ag_PA 샘플보다 초기 탄성율이 높게 나타났다. 이는 앞서 Fig. 3의 원사의 S-S 거동을 살펴보면, Cond.Y PET가 C_PET 및 T_PET보다 기울기가 크게 나타났으며 이에 영향을 받은 것으로 보인다. 합연을 통해 제조한 전도성 복합사의 초기탄성율이 낮아진 것은 실제로 봉제 및 자수 등의 공정에서 사용될 때 상대적으로 유연성이 확보되어 공정 중 실에 부과되는 마찰 등의 물리적 부하

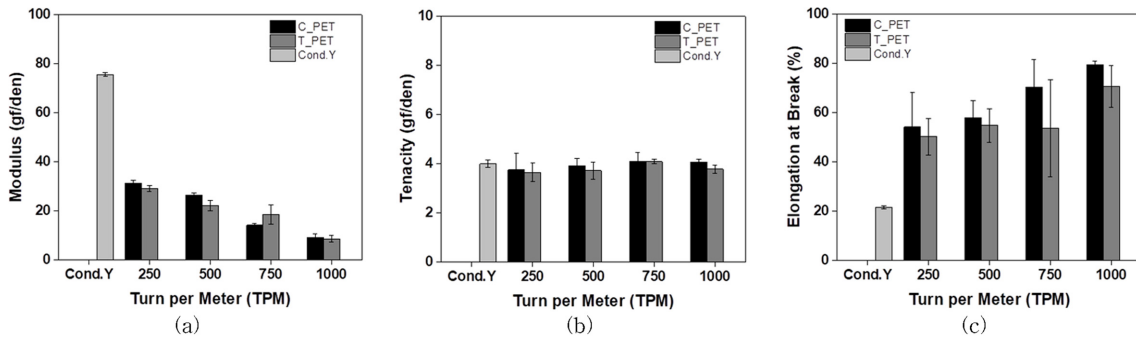


Fig. 6. Tensile property of samples with various TPM; (a) Modulus (b) Tensile strength (c) Elongation at break.

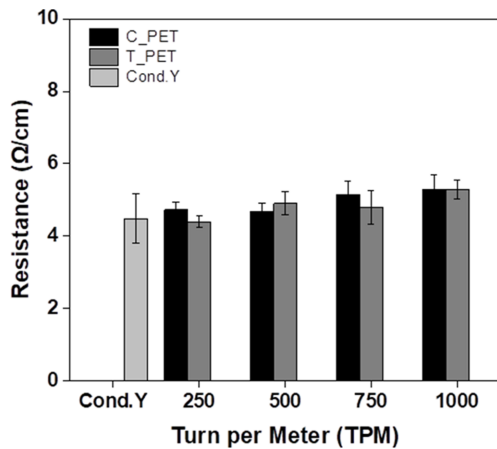


Fig. 7. Linear resistance of advanced conductive composite yarn and conductive yarns.

가 줄어들 것으로 기대할 수 있다. 또한, C_PET/Ag_PA와 T_PET/Ag_PA 샘플은 꼬임수가 증가함에 따라 기울기가 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 이는 꼬임수가 많아짐에 따라 꼬여있는 원사의 양이 증가하면서 연속되었던 영역이 펼쳐지는 효과를 나타내기 때문으로 확인된다. 이에 따라 신장율도 꼬임수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 반면 tenacity는 꼬임수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, C_PET/Ag_PA-750 및 T_PET/Ag_PA-750에서 모두 4.1 gf/d로 가장 큰 값을 보였고, Cond.Y_PET의 4.0 gf/d와 유사하게 나타남을 확인했다. 단면 형상별로는 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 이는 동일한 섬도 및 FOY의 필라멘트이므로 크게 영향을 주지 않은 것으로 확인된다. 그러나 신장율에서는 T_PET/Ag_PA 샘플이 낮은 값을 보였다. 이는 앞서 확인한 것과 같이 C_PET/Ag_PA를 합성한 샘플의 연속율이 더 크기 때문에 T_PET/Ag_PA보다 PET 원사가 더 많이 소요되었기 때문에 신장율 또한 증가한 것으로 보인다. 따라서, C_PET/Ag_PA-750 및 T_PET/Ag_PA-750이 Cond.Y 샘플보다 높은 강도 및 신장율을 가짐을 확인하였다.

3.2.3. 전기적 특성 분석

Fig. 7은 꼬임수별로 제조된 전도성 복합사의 전기적 특성을 알아보기 위해 선 저항 값을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 앞서 확인한 것과 같이, Cond.Y은 약 4.48 Ω/cm의 저항값을 가짐을 확인했다. 본 연구에서 제조된 8종의 샘플들은 모두 해외 선진 제품과 유사한 저항 범위인 4.40 Ω/cm~5.29 Ω/cm로 나타났으며, 꼬임수가 증가함에 따라서 미세하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 꼬임수가 증가함에 따라 소요되는 전도사의 길이가 증가하기 때문으로 보인다. 또한, T_PET/Ag_PA를 사용하였을 때 C_PET/Ag_PA를 사용하였을 때 보다 일부 낮은 저항값을 보였으며, 이는 앞서 연속율에서 확인한 것과 같이 T_PET를 사용하였을 때 더 적은 값을 나타내었기 때문으로 보

인다. 특히 T_PET/Ag_PA-750에서는 꼬임수가 증가함에도 불구하고 Cond.Y과 유사한 수준의 저항을 나타냄을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자수 및 봉제에 적용가능하고 텍스타일형 전극 및 회로에 사용되는 원천 소재인 전도성 복합사의 국산화를 위한 기초연구를 진행하고자, 해외 선진 제품 1종을 선정하여 이에 대한 물성을 분석하였다. 이후 합연 공정 기반의 전도성 복합사를 제조하기 위해 은 코팅 PA 전도성 원사 1종과 원형 및 이형단면을 가지는 PET 2종을 선정하여 꼬임수별 샘플을 제작하고, 모폴로지, 인장 특성 및 선저항을 분석하였다.

해외 선진 제품은 250d의 Ag coated Nylon/PET 복합사로, Ag coated Nylon 100d 1 ply, PET 75d 2 ply로 구성되어 있었다. 500 TPM의 꼬임수를 가지고 약 75.6 g/den의 인장강도와 5.3 Ω/cm의 선저항을 가짐을 확인했다. 합연 공정 기반의 전도성 복합사 제조를 위해 150d 1 ply의 Ag coated Nylon 1종과, 원형 및 이형 단면을 가지는 1 ply의 150d 2종의 PET를 선정하여 250, 500, 750, and 1000 TPM의 조건으로 샘플을 제조하였다. 제조된 샘플의 연속율을 확인한 결과, 이형단면으로 제조된 샘플이 원형단면에 비해 적은 값을 보여 안정적임을 확인하였다. 인장 특성 분석 결과, 2종의 PET 원사로 제조된 샘플 중 750 TPM에서 제조된 샘플의 강도가 모두 약 4.1 gf/d로 가장 크게 나타났으며, 단면의 형상에 따라 신장율의 변화가 있음을 확인하였다. 또한, 선저항은 전반적으로 약 5.0 Ω/cm 이하로 해외 선진 제품과 유사한 성능을 가짐을 확인하였으며, 특히 이형단면으로 750 TPM을 주어 제조된 샘플에서 꼬임수가 증가함에도 불구하고 해외 선진 제품과 유사한 약 4.5 Ω/cm의 선저항 값을 나타냈다. 이에 본 연구에서는 이형단면을 사용하였을 때 보다 안정적인 연속율을 얻을 수 있고, 750 TPM에서 강도가 크고 선저항이 낮은 전도사를 제조할 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구는 기초연구로 수행된 것으로, 추후 합연 조건에 다양성을 주어 샘플을 제조한 후 최적의 전도사 제조 조건을 도출하는 후속연구를 실시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국생산기술연구원 생산기술국제공동연구사업 (KITECH JE-23-0015)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahmad, J., & Zhou, Z. (2022). Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 333, 127353. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127353
- Ahsan, M., & Teay, S. H., & Sayem, A. S. M., & Albarbar, A. (2022). Smart clothing framework for health monitoring applications. *Signals*, 3, 113-145. doi:10.3390/signals3010009

- Arias-Monje, P. J., Lu, M., Kirmani, M. H., & Kumar, S. (2020). Processing, structure and properties of polyacrylonitrile fibers with 15 weight percent single wall carbon nanotubes. *Polymer*, *211*, 123065. doi:10.1016/j.polymer.2020.123065
- Braun E., & Levin, B. C. (1987) Nylons - A review of the literature on products of combustion and toxicity. *Fire and Materials*, *11*, 71-88. doi:10.1002/fam.810110204
- Choi, M., Vu, C., & Kim, J. (2021). Effects of Ag-coated twisted-yarns and equivalent circuits on textile pressure sensors. *Sensors and Actuators - A. Physical*, *332*, 113150. doi:10.1016/j.sna.2021.113150
- Das, B. D., Kothari, V. K., Fanguiero, R., & Araújo, M. (2008). Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics. *Fibers and Polymers*, *9*(2), 225-231. doi:10.1007/s12221-008-0036-y
- Dyson, M., & Ghaffarzadeh, K. (2020). *Flexible hybrid electronics 2020–2030 - Applications, challenges, innovations and forecasts*. IDTechEx, Cambridge, UK.
- He, H., Wu, P., Yang, Z., Shi, Z., Yu, W., Liu, F., Zhu, F., Zheng, Q., Zhang, D., & Li, S. (2022). A facile way to modify polyester fabric to enhance the adhesion behavior to rubber. *Coatings*, *12*, 1344. doi:10.3390/coatings12091344
- Hong, S., Nam, J., Park, S., Lee, D., Park, M., Lee, D. S., ... & Hwang, J. Y. (2021). Carbon nanotube fibers with high specific electrical conductivity - Synergistic effect of heteroatom doping and densification. *Carbon*, *184*, 207-213. doi:10.1016/j.carbon.2021.08.024
- Hou, S., Lv, Z., Wu, H., Cai, X., Chu, Z., & Zou, D. (2012). Flexible conductive threads for wearable dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, *22*(14), 6549-6552. doi:10.1039/C2JM16773E
- Hu, X-C., & Yang, H. H. (2000). Polyamide and polyester fibers. In A. Kelly & C. Zweben (Eds.), *Comprehensive Composite Materials* (pp. 327-344). Pergamon, Oxford.
- Jeon, T. H., & Lee, J. S. (2002). Effect of twisting conditions of filament yarns on the twist contraction. *Journal of the Korean Fiber Society*, *39*(1), 48-55.
- Jung, I., & Lee, S. (2018). Durability evaluation of stainless steel conductive yarn under various sewing method by repeated strain and abrasion test. *Journal of Korean Society Clothing Textile*, *42*, 474-485. doi:10.5850/JKSC.T.2018.42.3.474
- Karaca, E., Kahraman, N., Omeroglu, S., & Becerir, B. (2012). Effects of fiber cross sectional shape and weave pattern on thermal comfort properties of polyester woven fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, *20*(3), 67-72.
- Karaca, E., Omeroglu, S., & Becerir, B. (2015). Effects of fiber cross-sectional shapes on tensile and tearing properties of polyester woven fabrics. *Textile and Apparel*, *25*(4), 313-318.
- Kim, H., Kim, E., Choi, C., & Yeo, W. H. (2022a). Advances in soft and dry electrodes for wearable health monitoring devices. *Micromachines*, *13*, 629. doi:10.3390/mi13040629
- Kim, H., Rho, S., Lim, D., & Jeong, W. (2023). Characterization of embroidered textile-based electrode for EMG smart wear according to stitch technique. *Fashion and Textiles*, *10*, 32. doi:10.1186/s40691-023-00351-x
- Kim, S., Lee, S., & Jeong, W. (2020). EMG Measurement with textile-based electrodes in different electrode sizes and clothing pressures for smart clothing design optimization. *Polymers*, *12*, 2406. doi:10.3390/polym12102406
- Kim, S. G., Choi, G. M., Jeong, H. D., Lee, D., Kim, S., Ryu, K. H., ... & Ku, B. C. (2022b). Hierarchical structure control in solution spinning for strong and multifunctional carbon nanotube fibers. *Carbon*, *196*, 59-69. doi:10.1016/j.carbon.2022.04.040
- Küçük, M., & Öveçoğlu, M. L. (2018). Surface modification and characterization of polyester fabric by coating with low temperature synthesized ZnO nanorods. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *88*, 345-358. doi:10.1007/s10971-018-4817-5
- Lee, S., Kim, H. & Jeong, W. (2023). Development and evaluation of wearable smart clothing for combined EMG devices. *Fashion & Textile Research Journal*, *25*(2), 210-220. doi:10.5805/SFTI.2023.25.2.210
- Lu, M., Liao, J., Gulgunje, P. V., Chang, H., Arias-Monje, P. J., Ramachandran, J., Breedveld, V., & Kumar, S. (2021). Rheological behavior and fiber spinning of polyacrylonitrile (PAN)/Carbon nanotube (CNT) dispersions at high CNT loading. *Polymer*, *215*, 123369. doi:10.1016/j.polymer.2020.123369
- 'Madeira'. (n.d.). *Madeira USA*. Retrieved August 31, 2023, <https://www.madeirausa.com/hc-12-sp-highly-conductive-embroidery-thread-12.html>
- Medvetski, S. S., Ryklin, D. B., & Davidziuk, V. V. (2021). Research of influence of blended yarn structure including stainless steel fibers on its properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1031*, 012042. doi:10.1088/1757-899X/1031/1/012042
- Pannase, A. M., Singh, R. K., Ruj, B., & Gupta, P. (2020). Decomposition of polyamide via slow pyrolysis - Effect of heating rate and operating temperature on product yield and composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *151*(104886). doi:10.1016/j.jaap.2020.104886
- Rho, S. H., Lee, S., Lim, D. Y., & Jeong, W. (2022). Study of the optimization of embroidery design parameters for the technical embroidery machine - Derivation of the correlation between thread consumption and electrical resistance. *Textile Research Journal*, *92*(9-10), 1550-1564. doi:10.1177/00405175211061028
- Ryklin, D., & Medvetski, S. (2017). Investigation of the technology of conductive yarns manufacturing. In *IOP Conference Series - Materials Science and Engineering*, *254*(7), 072021. doi:10.1088/1757-899X/254/7/072021
- 'Silver-tech'. (n. d.). *Amann group*. Retrieved August 31, 2023, from <https://www.amann.com/products/product/silver-tech/>
- 'Shieldex'. (n. d.). *Shieldex*. Retrieved August 31, 2023, from <https://www.shieldex.de/en/>
- Shuvo, I. I., Shah, A., & Dagdeviren, C. (2022). Electronic textile sensors for decoding vital body signals - State-of-the-art review on characterizations and recommendations. *Advanced Intelligent Systems*, *4*, 2100223. doi:10.1002/aisy.202100223
- 'Soitex'. (n. d.). *Soitex*. Retrieved August 31, 2023, from <https://smartstore.naver.com/zip/products/7617092963>
- Tang, X., Cheng, D., Ran, J., Li, D., He, C., Bi, S., Cai, G., & Wang, X. (2021). Recent advances on the fabrication methods of nanocomposite yarn-based strain sensor. *Nanotechnology Reviews*, *10*, 221-236. doi:10.1515/ntrev-2021-0021
- Tao, Y., Li, T., Yang, C., Wang, N., Yan, F., & Li, L. (2018). The influence of fiber cross-section on fabric far-infrared properties. *Polymers*, *10*, 1147. doi:10.3390/polym10101147.

Toydemir, Y., & Bayramol, D. Y. (2021). Properties investigation of polyester yarns with different cross-sections. *BEU Journal of Science*, 10(1), doi:10.17798/bitlisfen.793752.

Zhao, J., Deng, J., Liang, W., Zhao, L., Dong, Y., Wang, X., & Lin, L. (2022). Water-retentive, 3D knitted textile electrode for long-term and motion state bioelectrical signal acquisition. *Composites*

Science and Technology, 227, 109606. doi:10.1016/j.compsitech.2022.109606

(Received September 13, 2023; 1st Revised September 20, 2023;
2nd Revised October 6, 2023; Accepted October 12, 2023)