

## 아로마틱 고분자를 적용한 기능성 PET 가공사 제조 및 특성

### Preparation and Properties of Functional PET Textured Yarn Coated with Aromatic Polymer

**\*Corresponding author**

Sang Oh Lee  
(lso4015@ynu.ac.kr)

안다정, 최철훈, 이재웅, 이상오<sup>1,\*</sup>

영남대학교 파이버시스템공학과, <sup>1</sup>영남대학교 의류패션학과

**Dajeong Ahn, Chulhoon Choi, Jaewoong Lee and Sang Oh Lee<sup>1,\*</sup>**

Department of Fiber System Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

<sup>1</sup>Department of Clothing and Fashion, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Received\_August 21, 2017

Revised\_September 05, 2017

Accepted\_September 18, 2017

**Textile Coloration and Finishing**

TCF 29-3/2017-9/148-154

©2017 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Abstract** Many researches have been made on the processing technology of Poly(ethylene terephthalate) (PET), which is widely used for clothing and non-clothing applications. In this study, we coated PET filaments with *m*-aramid resin to improve heat resistance and antimicrobial properties. In order to enhance adhesion between PET and *m*-aramid polymer, the adhesive polymer was coated on the PET filaments using a winding speed of 100m/min and then treated with *m*-aramid. Scanning electron microscopy was used to analyze the surface of the adhesive polymer and *m*-aramid treated PET filament. The change of initial degradation temperature according to treatment was confirmed by thermogravimetric analysis. Antimicrobial activity analysis using bacterial reduction method showed that PET filament treated with adhesive polymer and *m*-aramid had an increased antibacterial effect compared to untreated PET filament.

**Keywords** coating, *m*-aramid, PET filament, adhesion, functional fiber

## 1. 서 론

섬유 소재는 다른 소재와 비교해서 강도, 경도, 연성, 유연성 및 복원성과 같은 우수한 장점을 가지고 있어 다양한 용도 조건에 쉽게 적용이 가능한 특성으로 섬유 응용 분야에서 성장하고 있다<sup>1,2)</sup>. 최근 섬유 산업은 고성능 섬유 및 원사를 중심으로 고부가가치 분야에서 상당한 진보를 이루었다<sup>3)</sup>.

일반적으로 PET 섬유는 가볍고, 고성능 및 저비용성으로 인해 의류 및 비의류 용도로 섬유시장에서 높은 시장점유율을 차지해왔다<sup>4,5)</sup>. PET는 기계적, 화학적 및 염색성이 우수하지만 열에 노출되면 쉽게 타며 dripping effect로 인해 위험한 물질을 만들어낸다<sup>6)</sup>. PET의 향상된 기능적 특성은 광범위한 산업분야에서

필수적이다<sup>7)</sup>. 많은 과학자들과 엔지니어들은 PET filament의 기계적 성질에 대한 지속적인 개선을 위한 연구를 해왔다. 지금까지 대부분의 산업적인 접근법은 기존 스핀들 기술의 개선 및 향상을 중심으로 이루어져 왔으나, 이러한 제품의 기계적 특성은 한계에 도달한 것으로 보인다. 그러므로 가공기술에 대한 연구는 산업 및 학계에서 여전히 중요하고 시급한 과제로 간주되고 있다<sup>8)</sup>. Filament는 안정성, 내마모성, 내화학적, smoothness, colour 또는 design과 같은 특성을 추가하기 위하여 기능성 층을 코팅한다<sup>9)</sup>.

고강도 및 내구성을 가진 새로운 coating solution은 산업 응용분야에 항상 요구되어 왔다<sup>10)</sup>. 고분자 코팅은 서로 다른 용도로 설계되었으며 다양한 요구사항을 충족해야 한다<sup>11,12)</sup>. 코팅은 섬유 표면 개질을 시키

는 방법 중 하나로, 섬유구조를 유지하고 섬유 표면의 결함을 고정시키며 복잡한 모양의 시료에 적합하다는 장점이 있다<sup>13)</sup>. 표면 코팅은 재료의 표면특성을 향상 시키거나 환경적 요소를 보호하기 위하여 광범위하게 사용된다<sup>14)</sup>. 코팅층과 섬유 사이의 접착강도는 안정성을 위해 중요한 역할로 여겨진다. 코팅층과 섬유 사이의 접착 강도가 비교적 약한 경우, 코팅층은 섬유로부터 쉽게 떨어질 수 있으므로 코팅의 안정성을 보장하기 위해 코팅층과 섬유 사이의 접착강도에 대해 연구하는 것은 매우 중요하다<sup>2)</sup>.

PET 섬유에 polyurethane(PU)<sup>15)</sup>, polypyrrole<sup>16)</sup>, chitosan<sup>17)</sup> 및 *m*-aramid<sup>18)</sup> 등이 단독으로 처리되어 코팅된 경우가 있었다. 그 중 *m*-aramid는 내열성, 난연성, 전기절연성, 용해성, 인장강도 및 신장도가 우수한 섬유로 항공우주, 전자, 통신 및 화학 등 광범위한 산업 분야에서 이용되며<sup>19)</sup>, 많은 연구자들은 아라미드 섬유의 계면을 향상 시키기 위하여 커플링제, 표면 그래프트, 플라즈마 처리, 감마선 및 초음파와 같은 화학적 또는 물리적 처리를 한 표면개질에 대해 연구하였다<sup>20-23)</sup>. 아라미드 섬유 표면을 변형시키는데 많은 코팅 처리기술이 이용되었지만 성공은 제한적으로 이루어졌으며<sup>24)</sup>, 접착 고분자와 *m*-aramid를 함께 PET 섬유에 코팅한 경우는 확인하지 못하였다.

본 연구에서는 비교적 간단한 공정을 이용하여 *m*-aramid 및 접착고분자로 표면 코팅 처리된 PET사를 제조한 후, 기존 미처리 PET사 대비 향상된 내열성 및 항균성을 확인하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 Polyester 원사를 이용한 접착고분자 코팅

Filament 피복시설을 이용하여 granule 형태 접착 고분자(PES 3115, Handling Temp 140-160°C, Melting range 91-129°C, JCC Company, China)를 polyester 원사(Spin Draw Yarn 250denier/48 filament, Seongan Synthesis Co., Ltd., Korea)에 코팅하기 위하여 접착고분자 용융온도 140°C, 노즐 크기 0.4mm, 권취속도 70, 120, 300, 600m/min으로 설정하여 코팅하였다. 접착고분자를 코팅한 polyester 원사는 500denier로 미처리 원사 대비 2배 정도 굵기로 형성되었다.

### 2.2 *m*-aramid dope을 이용한 PET 코팅사 제조

접착고분자가 코팅된 PET사에 *m*-aramid dope (Huvis, Korea)을 도포하여 코팅하였다. 습식방사기를 이용하여 접착고분자 처리된 PET 코팅사를 *m*-aramid를 코팅 후 고체화시켰으며, 노즐크기 0.5mm, 권취 속도 100m/min의 조건을 설정하였다. 접착고분자 및 *m*-aramid를 코팅한 polyester 원사는 700denier로 미처리 원사 대비 2.8배 정도 굵기로 형성되었다.

### 2.3 광학현미경

접착고분자와 *m*-aramid/PET 코팅사의 단면을 관찰하기 위하여 광학현미경(MX51-N633MU, Olympus, Korea)을 사용하였다. 순수한 PET사, 접착고분자 처리된 PET 코팅사 및 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사 측정 시 100배의 배율로 관측하였다.

### 2.4 주사전자현미경

작은 외력을 가한 후 접착고분자 사용 유무에 따른 이종 폴리머 간의 상분리 현상의 표면 정도를 관찰하기 위하여 주사전자현미경(S-3200N, Hitachi, Tokyo, Japan)을 사용하여 분석하였다. 분석 전 시료에 플라티늄으로 박막 코팅하였고, 1.0kV의 가속 전압 하에서 40.0k 배율로 관측하였다.

### 2.5 열 중량 분석

순수한 PET사, 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사 섬유의 열적 특성을 분석하기 위하여 TG-DTA(Q500, TA Instruments, USA)를 사용하여 열 분석 데이터인 TGA 중량감소 곡선을 분석하였다. 측정 조건은 질소 분위기하에서 측정하였으며, 600°C까지 10°C/min 승온 조건으로 측정하였다.

### 2.6 강력

순수한 PET사, 접착고분자 처리된 PET 코팅사 및 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사의 역학적 성질을 측정하기 위하여 KS K 0412:2015 시험방법을 이용하여 평가하였다. 강력테스트 시험기(OTT-Series, Oriental, Korea)를 이용한 방법으로, 항온 항습(20 ± 1°C, 65 ± 2% RH) 조건에서 정속 인장식 기준으로 클램프 사이 파지거리가 20mm, 신장속도 200mm/min의 조건으로 측정하였다.

## 2.7 염소화

시중에서 판매되고 있는 4% sodium hypochlorite (NaOCl) solution을 증류수와 각각 15:85의 비율로 희석하여 사용하였다. 희석된 용액에 acetic acid (CH<sub>3</sub>COOH, Duksan Pure Chemical, Korea)를 이용하여 pH 7.5로 조정하여 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사를 60min 동안 상온에서 침지시켰다. 염소화를 거친 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사에 결합되지 않은 염소를 제거하기 위하여 증류수 300mL로 2회 수세 한 후 45°C에서 2시간 동안 건조 하였다.

## 2.8 적외선 분광분석

순수한 PET사와 *m*-aramid 처리된 PET사 및 염소화 시킨 *m*-aramid 처리된 PET사의 표면에 특징적인 관능기 관찰로부터 PET사의 코팅과 염소화 여부를 확인하였다. Attenuated total reflection(ATR)이 장착된 적외선 분광 분석기(Spectrum 100, Perkinelmer Co., USA)를 사용하여 700~4000cm<sup>-1</sup>범위에서 분광 분석을 실시하였다.

## 2.9 세탁견뢰도

접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET사의 항균성능 내구성을 측정하기 위하여 세탁 견뢰도를 평가하였다. 세탁 견뢰도 시험으로는 KS K IOS 105-C01 : 2007의 시험방법을 이용하였다. 이 방법은 유리 또는 스테인리스로 제작된 지름(75±5)mm, 높이(125±10)mm, 용량(550±50)mL인 실린더를 사용하여 실시하였다.

AATCC 표준세제 WOB(without optical brightener) 이용하여 5g/L로 세제 수용액을 제조하였다. 이렇게 제조한 비누액은 액비 50:1로 실린더에 넣어 온도(40±2°C)에서 회전수(40±2)min<sup>-1</sup>으로 30분간 세탁 처리하였다. 세탁 과정이 끝난 후 꺼낸 시험편은 증류수로 2회 수세 후, 상온 건조하여 관찰하였다.

## 2.10 항균성 분석

접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET 코팅사의 항균 활성 측정을 위하여 정량시험법인 AATCC Test Method 100(Contact assay in liquid)을 이용하였다.

항균성 테스트에 사용된 균주는 Gram-negative bacteria으로는 *Escherichia coli* O157:H7(ATCC

43895)와 Gram-positive bacteria인 *Staphylococcus aureus* MRSA(ATCC BAA-1707)를 사용하였으며, 균들을 각각의 균 증식에 Luria-Berani(LB; ATCC bioscience, NJ, USA), Nutrient Broth(NB; ATCC Medium, Sigma-Aldrich, USA), Agar(Difco) 배지를 사용하였다. 동결 보존된 균을 액체배지에 넣어 37°C, 24h 인큐베이터에서 활성화시킨 후 시료에 1mL 접종 하였다. 24h 후 0.85% 생리식염수에 시료를 넣어 vortex한 후 십진법을 이용하여 균 농도를 조절된 희석액을 실험에 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 접착제 및 *m*-aramid 처리된 PET 코팅사의 표면분석

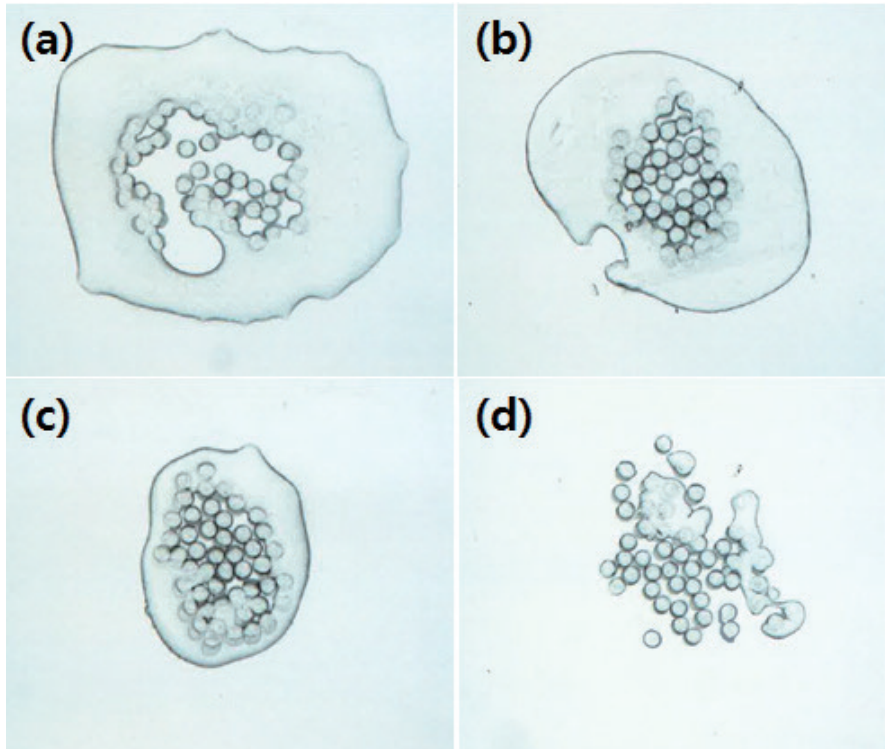
PET사에 접착고분자를 pre-coating할 때, winding속도변화에 따른 코팅층 두께 변화 정도를 관찰하기 위하여 광학현미경(microtome)으로 측정된 후 결과를 Figure 1에 나타내었다.

Figure 1(a)의 경우 winding속도가 70m/min의 비교적 느린 속도로 접착고분자가 PET사 표면에 고르게 코팅되지 못하여 상대적으로 매끄럽지 못한 표면을 가졌다. Winding 속도가 증가할수록 PET사의 코팅되는 접착고분자 층이 비교적 매끄러운 표면을 가지는 것을 알 수 있었다. 300m/min의 winding 속도로 처리된 PET사의 경우 두께 및 표면의 정도가 비교적 큰 형상을 보이는 것을 확인하였다.

그러나 600m/min 이상의 winding속도에서는 PET사가 높은 장력을 받음으로써 사절이 발생하였으며, 사절 발생 전까지의 PET사를 살펴보면 접착제의 코팅 또한 미미한 수준으로 실질적인 코팅이 이루어지지 않음을 알 수 있었다(Figure 1(d)).

*m*-Aramid 단독 처리한 PET사와 접착고분자 및 *m*-aramid가 코팅된 PET사의 표면 상태를 비교 분석하였다. 사의 외층의 코팅층 박리를 위해 Instron을 이용하여 파지 압력 1.2kgf을 가한 후 사를 인장시켜 PET 코팅사 표면의 형태 변화를 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관측한 후 그 결과를 Figure 2에 나타내었다.

*m*-Aramid 단독 처리한 PET사(Figure 2(b))는 *m*-aramid 코팅층이 PET사로부터 분리되었다. 그에 비해 접착고분자가 선처리된 PET사의 경우 *m*-



**Figure 1.** Microtome images of (a) winding speed 70m/min, (b) winding speed 120m/min, (c) winding speed 300m/min, and (d) winding speed 600m/min.

aramid 코팅층이 부착 및 유지됨을 확인 하였으며, 이는 접착고분자의 사용이 서로 다른 고분자인 PET사와 *m*-aramid 계면 간의 접착에 직접적으로 기여한 것으로 여겨진다.

### 3.2 물리적 및 열적 특성

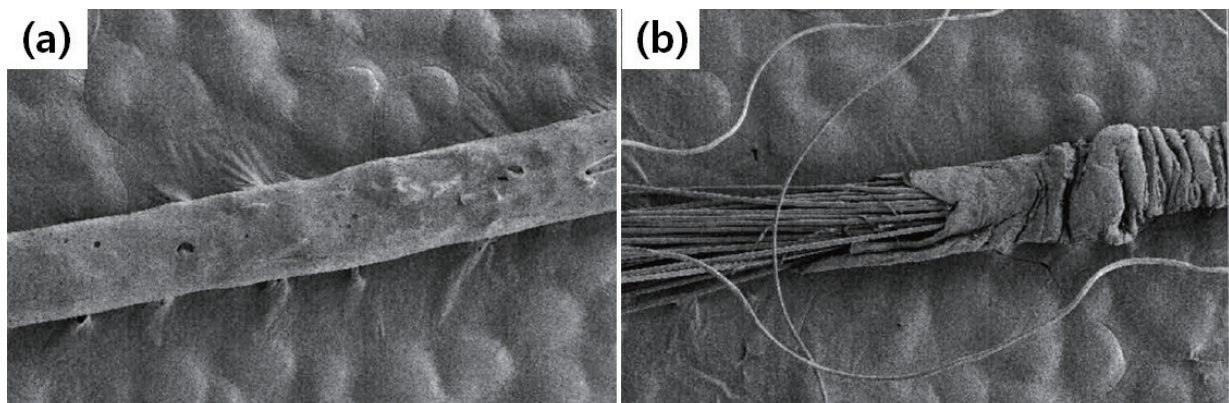
PET사의 접착고분자/*m*-aramid coating 처리 전과 후의 tensile strength를 측정하여 Table 1에 나타

내었다.

미처리 PET사에 비해 접착고분자만 처리된 PET사의 경우 미처리 PET사 대비 2.6%, 접착고분자 및 *m*-aramid 코팅 처리한 PET사의 경우 미처리 PET사 대비 11.7% 정도의 인장강도가 증가한 것을 알 수 있었다.

접착고분자/*m*-aramid 처리한 PET사의 Thermogram을 측정하여 Figure 3에 나타내었다.

Figure 3(b)를 보면 미처리한 PET사의 경우 100℃



**Figure 2.** SEM images of (a) PET coated with adhesive polymer/*m*-aramid and (b) PET coated with *m*-aramid.

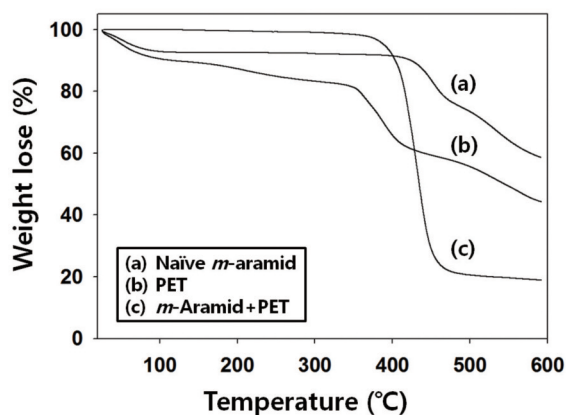
**Table 1.** Tensile strength of untreated and adhesive polymer/*m*-aramid treated PET filament [Unit. kgf]

Control (Untreated PET filament)	Treated with adhesive	Treated with adhesive/ <i>m</i> -aramid
1.334 ± 0.037	1.369 ± 0.059	1.51 ± 0.034

부근의 탈수과정 이후로 나타난 Initial degradation temperature(IDT)는 340°C임을 알 수 있다. 이에 반해 접착고분자/*m*-aramid 처리된 PET사는 IDT가 400°C 부근으로 증가한 것을 알 수 있다. 순수한 *m*-aramid의 경우 435°C의 IDT를 가지는데, 선행된 연구를 보면 *m*-aramid가 상대적으로 열적 특성이 낮은 물질이 부착될 경우 *m*-aramid의 열적특성이 소폭 감소되나 그 정도가 미약한 수준이었다<sup>25</sup>). 이를 미루어 보아 상대적으로 높은 열적 안정성을 가지는 *m*-aramid가 비교적 낮은 열적 안정성을 가지는 PET사에 코팅되어 결과적으로 미처리 PET사 대비 *m*-aramid 코팅된 PET사의 열적 특성이 증가된 것으로 추정된다.

### 3.3 염소화 및 항균성

선행된 연구에 따르면 염소 양이온은 박테리아를 비활성화시킬 수 있는 중요한 이온으로 *m*-aramid를 코팅한 PET 섬유에 처리하였으며<sup>18,26</sup>), 해로운 미생물이 번식하는 것을 막기 위해 표면에 쉽게 적용 가능한 항균 코팅은 생물막 형성 및 물질 표면에 박테리아의 부



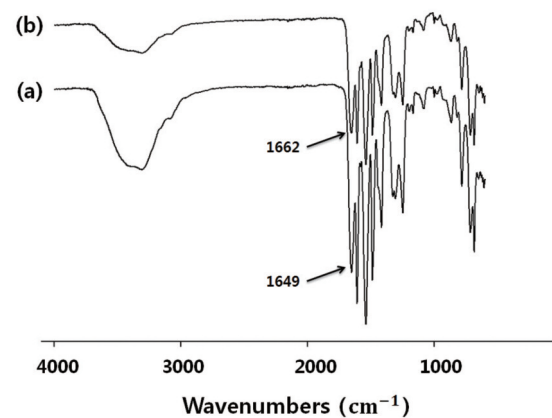
**Figure 3.** TGA pattern of (a) Naive *m*-aramid, (b) PET coated with adhesive polymer and (c) PET coated with adhesive polymer/*m*-aramid.

착을 현저히 줄여줄 수 있다<sup>27</sup>).

본 연구에서는 접착고분자/*m*-aramid 처리한 PET사를 염소화시킨 후 시료에 염소 원자의 성공적인 부착 여부 확인을 위해 FT-IR로 측정하여 Figure 4에 나타내었다.

염소화 시킨 접착고분자/*m*-aramid 처리한 PET사의 경우(Figure 4(b)), 염소화 시키기 전 *m*-aramid에서 기인한 1649cm<sup>-1</sup>부근의 C=O stretching band가 상대적으로 높은 파장대인 1662cm<sup>-1</sup>로 shift가 일어난 것을 확인할 수 있다. 이러한 peak shift는 *m*-aramid 처리된 PET사에 염소가 부착된 후 N-H결합이 염소화를 통하여 N-Cl결합으로 전환된 것에 기인한 것으로 해석된다<sup>26</sup>). 미처리 및 접착고분자/*m*-aramid를 처리한 PET사의 항균성 테스트를 진행하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

정량시험법인 균수 감소법으로 진행되었으며 미처리된 PET사에 비해 접착고분자 및 *m*-aramid를 처리한 PET사의 sample은 균들이 불활성화를 나타내었다. 특히 Gram-positive 균으로 분류되는 *Staphylococcus aureus* 뿐만 아니라 N-halamine 항균제에 상대적으로 저항성이 크다고 알려진 Gram-negative 균인 *Escherichia coli*<sup>26</sup>) 또한 항균 테스트를 진행한 후 완전한 불활성을 나타내었다. 기능성 섬유의 우수한 성능이 지속적으로 발현되기 위해서는 안정된 내구성에 대한 요구가 필수적이다. 염소화를 시킨 접착고분자/*m*-aramid를 처리한 PET사에 총 5회의 세탁 과정 후 동일한 조건으로 항균테스트를 진행하였으며, 모든



**Figure 4.** FT-IR spectra of (a) PET coated with adhesive polymer/*m*-aramid and (b) chlorinated of (a).

**Table 2.** Antimicrobial test results of naïve PET and treated with adhesive polymer/*m*-aramid

Samples	Bacterial no.(cfu/sample)	
	<i>E. coli</i> <sup>a</sup>	<i>S. aureus</i> <sup>b</sup>
Naïve PET filament	5.1 x 10 <sup>5</sup>	7.8 x 10 <sup>5</sup>
PET filament treated with adhesive/ <i>m</i> -aramid	0	0
PET filament treated with adhesive/ <i>m</i> -aramid after 5 washing cycles	0	0

<sup>a</sup>Total bacteria: 5.9 x 10<sup>6</sup> cfu/sample

<sup>b</sup>Total bacteria: 7.2 x 10<sup>6</sup> cfu/sample

균들이 불활성을 보이는 것으로 확인 되었다.

결과적으로 접착고분자 및 *m*-aramid를 처리한 PET사가 상대적으로 우수한 항균성능이 발현됨을 확인 하였다.

#### 4. 결 론

PET사와 *m*-aramid의 서로 다른 고분자의 코팅 시 상분리를 방지하기 위하여 중간층에 접착고분자를 이용하여 기능성 PET 가공사를 제조하였다.

1. 권취 속도가 일정수준까지 증가함에 따라 코팅층의 두께가 감소하고 균일하게 코팅되며, 접착고분자 및 *m*-aramid를 처리한 PET사가 미처리 PET사 대비 2.8배 정도 굵기가 증가하는 것을 알 수 있었다.
2. SEM 표면 분석을 통하여 일정 수준의 파지압력에도 접착고분자를 선처리한 PET사와 *m*-aramid간의 계면 접착력이 발현됨을 확인하였다.
3. 미처리한 PET사에 비해 접착고분자 및 *m*-aramid를 처리한 PET사의 내열특성은 15% 가량 소폭 증가함을 보였다. 균수 감소법을 활용하여 접착고분자 및 *m*-aramid를 처리한 PET사의 항균특성을 확인한 결과 미처리한 PET사 대비 접착고분자 및 *m*-aramid 처리된 PET사에서 모든 균들이 사멸하였고 상대적으로 향상된 항균특성을 보임을 알 수 있었다.

이를 토대로 내열특성 및 항균성능 발현이 가능한 복합 기능성 섬유의 제조가 가능할 것이며, 산업용 섬유 및 비의류 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용 가능할 것으로 여겨진다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년 대한민국 중소기업청 기업부설연구소 설치지원사업(과제번호:C0342474)연구비 재정 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. A. Rawal and S. C. Anand, "Handbook of Technical Textiles 2nd Ed.", Wood Head Publishing, Bolton, pp.1-23, 2016.
2. Z. Du, R. Guo, J. Lan, S. Jiang, S. Lin, C. Cheng, and L. Zhao, Bismuth Tungstate Coating on Polyester Fabric Modified with Dopamine for Photocatalytic Property under Visible Light Irradiation, *Surface and Coatings Technology*, **319**(15), 219(2017).
3. B. Kim, V. Koncar, E. Devaux, and C. Dufour, Electrical and Morphological Properties of PP and PET Conductive Polymer Fibers, *Synthetic Metals*, **146**(2), 167 (2004).
4. S. H. Kim, W. G. Hahm, S. Y. Park, K. S. Lee, and H. J. Koo, Development of Environmentally Friendly Recycled Textiles, *Fiber Technology and Industry*, **12**, 1 (2010).
5. J. Suesat and P. Suwanruji, "Dyeing and Fastness Properties of Poly(lactic acid) Fiber", *Textile Dyeing, Thailand*, pp.351-372, 2011.
6. N. Didane, S. Giraud, E. Devaux, and G. Lemort, Development of Fire Resistant PET Fibrous Structures based on Phosphinate-POSS Blends, *Polymer Degradation and Stability*, **97**(6), 879(2012).
7. J. N. Baumgartner, C. Z. Yang, and S. L. Cooper, Physical Property Analysis and Bacterial Adhesion on a Series of Phosphonated Polyurethane, *Biomaterials*, **18** (12), 831(1997).
8. G. Wu, P. A. Tucker, and J. A. Cuculo, High Perform-

- ance PET Fibers Properties Achieved at High Speed using a Combination of Threadline Modification and Traditional Post Treatment, *Polymer*, **38**(5), 1091(1997).
9. A. Glawe and A. Giessmann, Coating Technologies for Functional Finishing of Yarn and Filaments, *Chemical Fibers International*, **57**(3), 131(2007).
  10. D. Bellisario, F. Quandrini, and L. Santo, Nano-clay Filled Polyester Coatings, *Progress in Organic Coatings*, **76**(12), 1863(2013).
  11. J. F. Larche, P. O. Bussiere, and J. L. Gardette, How to Reveal Latent Degradation of Coatings Provoked by UV-light, *Polymer Degradation and Stability*, **95**(9), 1810(2010).
  12. B. Wei, H. L. Cao, and S. H. Song, Surface Modification and Characterization of Basalt Fibers with Hybrid Sizings, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **42**(1), 22(2011).
  13. B. S. Shim, W. Chen, C. Doty, C. Xu, and N. A. Kotov, Smart Electronic Yarns and Wearable Fabrics for Human Biomonitoring made by Carbon Nanotube Coating with Polyelectrolytes, *Nano Letter*, **8**(12), 4151(2008).
  14. K. Holmberg and A. Matthews, "Coatings Tribology, Properties Techniques and Application in Surface Engineering", Elsevier, London, pp.3-5, 1994.
  15. N. G. Gonzalez, M. Levi, and S. Turri, Development of Polyester Binders for the Production of Sustainable Polyurethane Coatings: Technological Characterization and Life Cycle Assessment, *J. of Cleaner Production*, **164**(15), 171(2017).
  16. S. Garg, C. Hurren, and A. Kaynak, Improvement of Adhesion of Conductive Polypyrrole Coating on Wool and Polyester Fabrics using Atmospheric Plasma Treatment, *Synthetic Metals*, **157**(1), 41(2007).
  17. P. Calvo, C. R. Lopez, J. L. V. Jato, and M. J. Alonso, Development of Positively Charged Colloidal Drug Carriers: Chitosan-coated Polyester Nanocapsules and Sub-micron-emulsions, *Colloid Polymer Science*, **275**(1), 46(1997).
  18. S. S. Kim, M. Kim, and J. Lee, Cellulose Filter Coated with *m*-aramid for Water Disinfection, *J. of Applied Polymer Science*, **129**(6), 3454(2013).
  19. E. M. Kim and J. H. Choi, Dyeing Properties and Color Fastness of 100% meta-Aramid Fibers, *Fiber and Polymers*, **12**(4), 484(2011).
  20. S. S. Nair, D. C. Hurley, S. Wang, and T. M. Young, Nanoscale Characterization of Inter-phase Properties in Maleated Polypropylene-treated Natural Fiber-reinforced Polymer Composites, *Polymer Engineering and Science*, **53**(4), 888(2013).
  21. J. M. Garcia, F. C. Garcia, F. Serna, and J. L. Pena, High-performance Aromatic Polyamides, *Progress in Polymer Science*, **35**(5), 623(2010).
  22. W. Wang, R. Li, M. Tian, L. Liu, H. Zou, X. Zhao, and L. Zhang, Surface Silverized Meta-aramid Fibers Prepared by Bio-inspired Poly(dopamine) Functionalization, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **5**(6), 2062(2013).
  23. G. J. Ehlert and H. A. Sodano, Zinc Oxide Nanowire Interphase for Enhanced Interfacial Strength in Lightweight Polymer Fiber Composites, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **1**(8), 1827(2009).
  24. P. J. Lange, E. Mader, K. Mai, R. J. Young, and I. Ahmad, Characterization and Micromechanical Testing of the Interphase of Aramid-reinforced Epoxy Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32**(3-4), 331(2001).
  25. C. Kang, S. S. Kim, D. Ahn, S. J. Kim, and J. Lee, Effective Surface Attachment of Ag Nanoparticles on Fibers using Glycidyltrimethylammonium Chloride and Improvement of Antimicrobial Properties, *Royal Society of Chemistry*, **7**, 23407(2017).
  26. S. S. Kim, J. Kim, T. S. Huang, H. S. Whang, and J. Lee, Antimicrobial Polyethylene terephthalate(PET) Treated with an Aromatic N-halamine Precursor, *m*-aramid, *J. of Applied Polymer Science*, **114**(6), 3835(2009).
  27. D. Lee, R. E. Cohen, and M. F. Rubner, Antibacterial Properties of Ag Nanoparticle Loaded Multilayers and Formation of Magnetically Directed Antibacterial Microparticles, *Langmuir*, **21**(21), 9651(2005).