

폴리피롤 코팅 직물의 성질에 미치는 폴리피롤 함량의 영향

Effect of Coated Polypyrrole Content on the Properties of Polypyrrole Coated Fabrics

*Corresponding author

Han-Do Kim
kimhd@pusan.ac.kr

손성호, 이영희, 이동진¹, 김성열², 김한도*

부산대학교 유기소재시스템공학과, ¹한국신발피혁연구원, ²경북대학교 기계공학부

Seong-Ho Son, Young-Hee Lee, Dong-Jin Lee¹, Sung Yeol Kim² and Han-Do Kim*

Department of Organic Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

¹Korea Institute of Footwear and Leather Technology, Busan, Korea

²School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

Received_May 23, 2016

Revised_June 15, 2016

Accepted_June 22, 2016

Textile Coloration and Finishing

TCF 28-2/2016-6/92-100

©2016 The Korean Society of

Dyers and Finishers

Abstract To chemically prepare polypyrrole(pPy) coated fabrics(silk, cotton and nylon fabrics), the fabrics were first soaked in 0.4M oxidant FeCl₃/0.06M dopant anthraquinone-2-sulfonic acid solution for 5min at room temperature, and subsequently soaked in a 0.4M monomer pyrrole aqueous solution for 5min at room temperature. The content(wt%) of coated pPy in the coated fabrics was controlled by the number of treatments(these two steps). This study examined the effect of the number of treatments/pPy content on the sheet resistance, mechanical/bending properties and color behaviors of pPy coated fabrics. The coated pPy content, sheet resistance(Ω /square) and color strength(K/S) of pPy coated fabrics increased sharply with increasing number of treatments up to 20 times, while the increase slowed down afterward. The tensile strength, elongation at break and lightness(L*) decreased with increasing number of treatments. The tensile modulus and bending rigidity of coated fabrics increased significantly with increasing number of treatments/coated pPy content. This indicated that the flexibility of coated fabrics decreased considerably.

Keywords *conducting polymer, polypyrrole, coating, textile substrate, sheet resistance*

1. 서 론

일반적으로 전기 전도성 섬유 소재는 주로 대전방지/정전기방지, 전자파 차폐, 마이크로파 감쇠, 저항 가열식 소재 및 신호전달 소재 등으로 이용되고 있다. 기존의 전기 전도성 소재는 금속 소재를 섬유형태로 가늘게 만들어 이용하였다. 그러나 섬유 형태의 금속소재는 전기 전도성은 우수한 장점이 있지만 유연성이 부족하여 소재의 활용에 문제점이 있었다.

전도성 고분자는 상대적으로 높은 이론적인 커패시터, 고유의 빠른 산화-환원 전환, 양호한 전도도, 기계

적인 유연성 및 가벼운 특성 등으로 유연한 전극에 특히 관심을 받는 소재이다¹⁻³⁾. 그런데 폴리피롤, 폴리아닐린, 폴리에틸렌디옥시티오펜 및 폴리티오펜과 같은 대표적으로 우수한 전도성 고분자는 용매에 용해가 되지 않기 때문에 섬유 소재로 적용하기는 어려운 문제점이 있다.

전기 전도성 고분자를 직물 및 실에 코팅하여 낮은 표면 저항을 지닌 유연한 구조의 섬유소재를 얻을 수 있다. 따라서 여러 가지 형태의 섬유 기질재에 이들 전도성 고분자를 도입하여 활용하는 많은 연구가 이루어져 왔다. 전도성 고분자 중에서 폴리피롤은 합성이 용이하

고, 안정성이 우수하고 전도성이 높아서 전도성 섬유 소재를 제조하는데 가장 잘 활용되는 물질이다⁴⁻⁶⁾. 이러한 전도성 섬유소재의 전기 전도도는 반응물의 농도와 합성 조건에 따라서 다르지만, 반도체와 높은 전도체 사이 정도이며, 금속에 비하면 10^{-4} 배 정도의 수준에 달한다.

유연한 전자제품 및 착용하기에 적합한/신축성의 전자제품과 같은 다양한 분야에서 휴대용 전자장치의 수요가 급증하게 되므로 값싸고 유연하며, 가벼운 에너지 저장장치(배터리 및 슈퍼캐패시터)의 수요가 급증하게 되었다⁷⁻¹⁴⁾. 이러한 수요급증의 결과로 기존의 배터리 및 슈퍼캐패시터에 사용되는 전극 소재를 대체할 수 있는 새로운 유연한 전극 소재의 개발에 대한 많은 노력이 경주되어 왔다.

전도성 고분자의 높은 전도도와 다양한 구조로 변화될 수 있는 직물의 유연성의 결합은 센서^{9,15-18)}, 온열 직물^{19,20)}, 전자기 차폐^{21,22)}, 마이크로파의 흡수^{23,24)} 및 지능 텍스타일²⁵⁾ 등의 많은 분야에서 응용가능성이 제안된다. 전도성 고분자의 코팅은 면, 양모, 나일론 및 폴리에스터와 같은 여러 가지 섬유에 실행되어 왔다. 코팅 테크닉에는 섬유(실 혹은 직물)의 존재 하에서 헤테로고리 단량체의 in situ 화학적 중합 방법이 자주 이용된다.

섬유에 대한 화학적 중합에서는 섬유를 먼저 산화 개시제에 노출시킨 다음에 단량체 및 도핑제에 노출시켜 중합 반응이 일어나게 한다. 반응은 용액 및 기질 섬유의 표면에서 단량체의 산화에 의하여 라디칼 카치온으로 개시되어 이량체(다이머)가 형성되고 이러한 반응의 연속으로 불용성의 올리고머 및 폴리머가 만들어진다. 일반적으로 전도성 고분자는 도핑에 의하여 전도도를 크게 향상시킬 수 있으므로 이러한 물질을 유연한 기질에 직접 코팅한다면 전원의 구조를 크게 단순화 시키며 가격을 줄일 수 있을 것이고 전극 및 집전장치로 사용할 수 있을 것이다.

폴리피롤 코팅 직물에 대한 연구는 응용에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나 강직성이 높은 폴리피롤이 직물에 코팅 처리되면 직물의 유연성이 저하됨과 동시에 처리 횟수에 따라서 강신도의 감소가 초래되며 직물의 색상도 변화될 것이다. 그런데 이러한 처리 횟수 및 코팅된 폴리피롤의 함량에 따른 코팅 직물의 유연성의 변화, 인장강도/탄성율의 변화, 파단 신도의 변

화 및 색의 변화에 관한 연구를 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 처리 횟수 및 코팅된 폴리피롤의 함량에 따른 코팅 직물의 인장강도/탄성율의 변화 및 파단 신도의 변화, 굽힘 강성의 변화 및 색상 변화를 조사하였다. 폴리피롤(pPy)을 견, 면 및 나일론 직물에 효과적으로 코팅하기 위하여 2단계 처리 즉 산화 개시제 0.4M FeCl₃/dopant 0.06M anthraquinone-2-sulfonic acid 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리한 후 직물을 꺼내어 0.4M 피롤 단량체 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리를 하였다. 이러한 공정을 반복 처리하여 처리 횟수가 코팅된 폴리피롤의 함량의 증가에 미치는 영향을 조사하고, 코팅된 폴리피롤의 함량에 따른 시트저항의 변화, 코팅 직물의 기계적 물성(인장강도/탄성율 및 파괴신도)의 변화, 굽힘강성의 변화 및 색 특성의 변화에 대한 연구를 수행하여 유연한 전기 전도성 소재 개발 및 그들의 응용을 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 실 험

2.1 시료 및 시약

2.1.1 시료

본 연구에서는 ISO 105-F06, F02 및 F03에 규정된 견, 면 및 나일론 직물을 고온의 증류수에 세척한 후 사용하였으며, 크기가 20cm×20cm인 시료를 사용하였다.

2.1.2 시약

모노머로 피롤(pyrrol, 98%, Aldrich Chemical, Milwaukee, WI), 도펀트로 anthraquinone-2-sulfonic acid sodium salt(AQSA-Na, 97%, Aldrich Chemical, Milwaukee, WI) 및 산화제로 염화철 [Iron(III)chloride hexahydrate, FeCl₃·6H₂O, 98%, Junsei Chemical)을 정제 없이 그대로 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 직물에 대한 폴리피롤 코팅처리

증류수 2L에 도펀트(AQSA, 39.39g)을 60℃에서 용해시킨 후 실온으로 식힌 후 이 용액에 산화제(FeCl₃·6H₂O, 216.24g)를 첨가하여 500rpm으로 실온에서 5분 동안 교반한 후에 산화제/도펀트 수용액(산화제

/도펀트: 0.4M/0.06M)으로 사용하였으며, 단량체 피롤(53.67g)을 2L의 증류수에 용해시키어 단량체 피롤 수용액(0.4M)을 만들어 사용하였다. 직물(견, 면 및 나일론 직물)에 피롤이 효과적으로 중합/코팅되게 하기 위하여 다음과 같은 2단계 방법을 사용하였다²⁶⁾. 즉 세정된 직물(견, 면 및 나일론 직물, 20cm×20cm)을 먼저 산화제/도펀트 수용액에 실온에서 5분 동안 침지하여 직물이 산화제/도펀트 수용액을 충분히 흡수하게 한 후, 산화제/도펀트 수용액을 흡수한 직물을 꺼내어 흡수한 용액이 흘러내리는 것이 멈출 때까지 상온에서 방치(약 5분 이내)하였다(1단계). 그리고 직물을 단량체 피롤 0.4M 수용액 2L에 실온에서 5분 동안 침지하여 피롤이 직물의 섬유간 및 표면에서 중합되게 하여 직물에 pPy층을 형성 시키고, 직물을 꺼내어 실온에서 5분 동안 방치한 후 증류수로 행군 후에 상온에서 건조시켰다(2단계). 여기서 모노머, 도펀트 및 산화제의 몰비는 1:0.15:1로 일정하게 조절하였다. 이러한 1과 2단계를 4-40회까지 반복하여 반복한 횟수에 따라서 코팅된 pPy의 함량(wt%)을 식(1)을 이용하여 측정하였다.

$$pPy \text{ content}(wt\%) = \frac{\text{Weight of coated polypyrrole}}{\text{Weight of polypyrrole coated fabric}} \dots (1)$$

2.2.2 시트저항 측정

4-point probe 방법은 직물의 시트저항을 측정하는 표준 테크닉이다. 본 연구에서 시트저항(sheet resistance: R_s)을 측정하기 위하여 4-point probe method(Electric conductivity, CMT-100 MP, Advanced Instrument Technology, Korea)를 사용하였다.

시트저항 R_s 는 식(2)으로 계산하였다.

$$R_s = R \times CF \dots (2)$$

where

$$R = V/I$$

R: Resistance

V: Voltage

I: Current

CF: Correlation factor

2.2.3 인장 특성 측정

KSK 0521(텍스타일-천의 인장 성질- 인장 강도 및 신도 측정: 스트립법) 규격에 따라 미처리 직물과 처리 횟수에 따른 직물의 강신도 변화를 알아보기 위하여 universal testing machine(DWU 2100A, Dongwon SM, Korea)을 사용하여 인장 강신도를 측정하였다. 직물의 길이 방향으로 실온에서 20mm/min의 속도로 측정하였으며 5회 평균값을 사용하였다.

2.2.4 굽힘 강성 측정

굽힘 강성은 KES-FB 02(Kawabata evaluation system, Japan)를 사용하여 실온에서 50mm×50mm의 시료 크기에서 측정하였다. 결과 값은 5번의 시험을 통해 얻은 평균값을 사용하였다.

2.2.5 색 특성 측정

색 특성인 CIE L^* 를 측정하기 위하여 D65광원과 10° 관찰자 시야각의 조건에서 computer color matching (CCM, Gretag Macbeth Color-Eye 7000A, software: Propalette, USA)을 사용하였으며, 겉보기 색 강도인 K/S는 $\lambda_{max}(440nm)$ 에서 시료의 표면 반사율을 측정하여 Kubelka Munk 식(3)으로 계산하였다.

$$K/S=(1-R)^2/2R \dots (3)$$

where

K: Absorption coefficient

S: Scattering coefficient

R: Reflectance

3. 결과 및 고찰

3.1 처리 횟수가 코팅된 폴리피롤 함량에 미치는 영향

폴리피롤의 중합은 피롤 단량체의 산화에 의한 라디칼/양이온 형성을 통하여 이루어지며, 점차적으로 이량체, 삼량체, 올리고머 및 도핑된 폴리머가 형성된다 (Scheme 1).

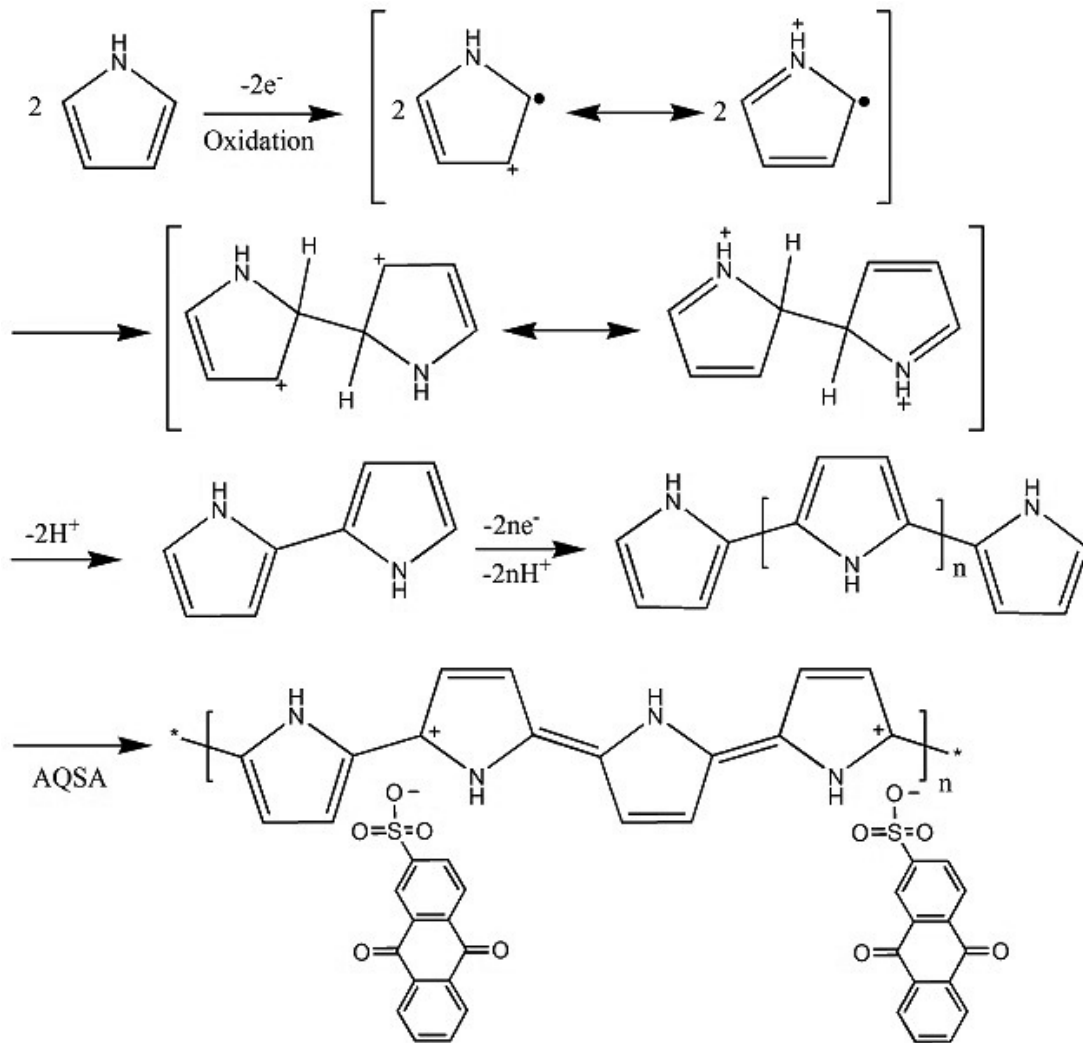
폴리피롤을 견, 면 및 나일론 직물에 효과적으로 코팅하기 위하여 2단계 처리 즉 산화 개시제 0.4M $FeCl_3$ /dopant 0.06M anthraquinone-2-sulfonic acid 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리한 후 직물을 꺼

내어 0.4M 피롤 단량체 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리를 하였다. 이러한 공정을 반복 처리하여 처리 횟수가 코팅된 폴리피롤 함량의 증가에 미치는 영향을 Table 1 및 Figure 1에 나타내었다.

처리 횟수가 증가함에 따라서 코팅된 폴리피롤의 함량이 증가하는 경향을 보였으나, 약 20회 까지는 폴리피롤의 증가가 거의 직선적으로 급격하게 일어나며 코팅된 폴리피롤의 함량이 53-59wt%에 도달하고, 그 이후에는 대체로 증가가 둔화되는 경향을 보였다. 40회 처리한 결과 코팅된 폴리피롤의 함량은 약 64-70wt%인 것으로 나타났다. 이러한 경향은 20회 이후 폴리피롤 층이 두꺼워 짐에 따라서 코팅된 폴리피롤의 탈리가 급격히 증가한 때문인 것으로 생각되었다.

3.2 처리 횟수/코팅된 폴리피롤 층의 함량이 시트저항에 미치는 영향

처리 횟수/코팅된 폴리피롤의 함량에 따른 시트저항을 Table 1 및 Figure 2에 나타내었다. 미처리 건, 면 및 나일론 직물은 전형적인 부도체로서 시트저항이 10^{12} - $10^{14} \Omega$ /square 정도로 알려져 있다. 처리 횟수가 증가함에 따라서 시트저항은 급격히 저하하여, 20회 처리(폴리피롤 코팅층의 함량: 53-59wt%)에서 시트저항은 7-15 Ω /square로 감소하고, 40회 처리(폴리피롤 코팅층의 함량: 64-70wt%)에서 6-10 Ω /square 정도인 것을 알 수 있었다.



Scheme 1. Schematic representation of doped polypyrrole formation with FeCl₃ and anthraquinone-2-sulfonic acid on fabric surface.

Table 1. The effect of the number of treatments on the pPy content(wt%), sheet resistance, bending rigidity and colorimetric data

Fabric	Number of Treatment	pPy Content (wt%)	Sheet Resistance (Ω /square)	Modulus at 2% Strain (MPa)	Bending Rigidity ($mN \cdot cm^2/cm$)	Colorimetric Data	
						L*	K/S
Silk	0	—	10^{12} – 10^{14}	134.75	0.0035	82.51	0.15
	4	3.42	727.50	208.25	0.0041	23.18	25.28
	6	7.30	183.60	257.25	0.0082	17.56	34.26
	10	17.55	56.27	318.50	0.0252	14.12	42.74
	20	52.71	15.09	367.50	0.0904	8.75	65.69
	40	63.57	9.22	522.75	0.1091	6.85	75.63
Cotton	0	—	10^{12} – 10^{14}	47.04	0.0079	85.56	0.11
	4	20.22	28.44	58.80	0.1200	11.85	39.54
	6	25.59	20.51	78.40	0.1460	11.30	44.26
	10	34.40	15.60	90.16	0.2060	9.95	53.05
	20	58.70	7.33	490.00	0.3985	5.50	69.35
	40	69.64	9.65	501.76	0.4342	5.23	82.34
Nylon	0	—	10^{12} – 10^{14}	117.60	0.0065	85.95	0.10
	4	10.75	93.36	126.65	0.0505	10.69	45.45
	6	17.25	69.93	128.63	0.0610	8.68	50.54
	10	23.77	50.20	166.60	0.0849	7.94	59.92
	20	57.39	10.33	178.50	0.1860	5.27	73.70
	40	67.72	6.18	229.60	0.1955	4.85	85.97

3.3 처리 횟수가 기계적 성질에 미치는 영향

폴리피롤 코팅 처리 직물의 처리 횟수에 따른 인장 탄성률을 Table 1에 나타내었으며, 응력-변형률 관계

곡선을 Figure 3에 나타내었다. 처리 횟수가 증가함에 따라 인장강도와 파단신도는 급격히 감소하는 반면, 초기 탄성율은 상당히 증가하는 경향을 나타내었다. 일반

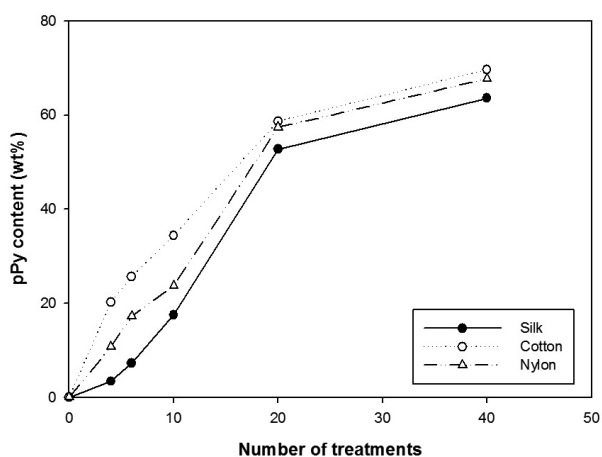


Figure 1. The relationship between pPy content [(weight of polypyrrole/weight of fabrics) x 100] and number of treatments(soaking in 0.4M FeCl₃+0.04M AQSA(dopant) aq. solution/soaking in 0.4M pyrrole aq. solution) of fabrics.

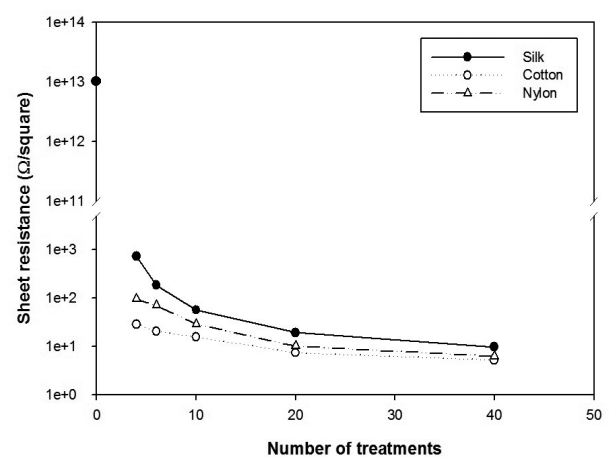


Figure 2. Relationship between sheet resistance of polypyrrole coated fabrics and number of treatments of fabrics.

적으로 응력-변형률 곡선에서 초기직선 부분의 기울기 (탄성률)로서 변형에 대한 저항성의 정도 즉 강직성의 정도(1/유동성)을 나타낸다. 즉 직물에 대한 피롤 처리 횟수가 증가 함에 따라서 코팅된 공액 이중 결합구조를 지닌 강직한 폴리피롤 층의 함량이 증가하고, 이에 따라서 직물의 유연성은 저하한 것이라 생각된다.

3.4 처리 횟수가 굽힘 강성에 미치는 영향

폴리피롤 코팅 처리 직물의 처리 횟수에 따른 유연성의 변화를 알아보기 위하여 단위 길이의 물체를 단위 곡률만큼 휘는데 필요한 굽힘 모멘트를 말하는 굽힘 강성 (bending rigidity)의 변화를 조사하였다. 처리 횟수에 따른 굽힘 강성의 변화를 Figure 4에 나타내었다. 처리 횟수의 증가/코팅층의 함량의 증가에 따라서 굽힘 강성은 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 굽힘 강성의 증가는 면 > 나일론 > 실크 순으로 약간 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 순서는 아마도 미처리 섬유 고유의 유연성에 차이가 있기 때문으로 생각되며, 코팅층이 증가하면서 이러한 차이가 현저히 증가한다는 것을 알 수 있었다.

3.5 처리 횟수가 색 특성에 미치는 영향

폴리피롤 코팅 처리 직물의 처리 횟수가 색 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 CIE Lab 중 명도(lightness) L* 값과 겉보기 색 강도 K/S 값을 측정하였다. 검정색인 폴리피롤 코팅 처리 직물의 처리 횟수에 따른 명도 L*의 변화를 Figure 5에 나타내었다.

미처리 견/면/나일론 직물의 명도 값은 백색에 가까운 값 82.51/85.56/85.95을 나타내었다. 처리 횟수가 증가함에 따라서 명도가 급격히 감소한 후 아주 작은 감소를 나타내었다.

처리 횟수가 4회일 때 pPy 코팅 처리한 견/면/나일론 직물의 명도는 23.18/11.85/10.69로 겉보기로 검정색에 가까운 것으로 나타났다.

처리 횟수가 20회일 때 견/면/나일론 직물의 명도는 8.75/5.50/5.27로써 심도가 아주 높은 검정색을 띄는 것을 알 수 있었다.

처리 횟수가 40회에서는 20회에 비교하여 명도가 약간 낮아졌다. 섬유의 종류에 따라서 명도는 약간의 차이를 나타내었으나, 그다지 의미 있는 차이라고 말할 수는 없었다.

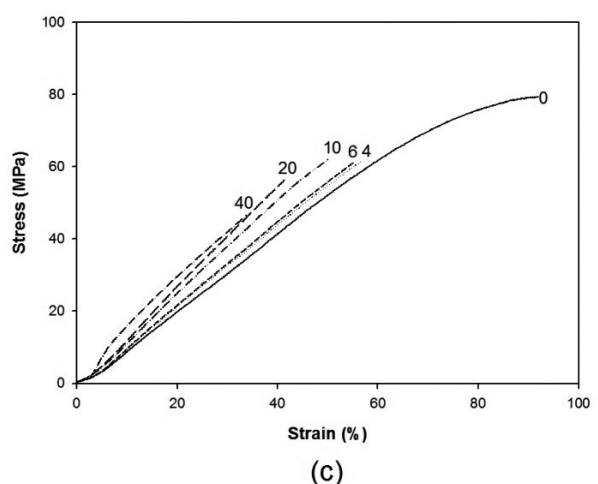
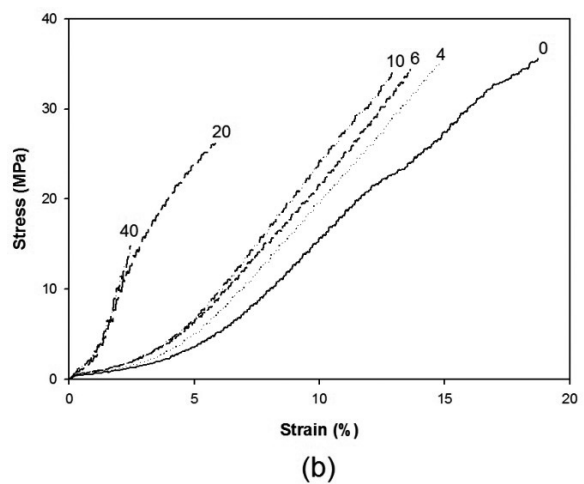
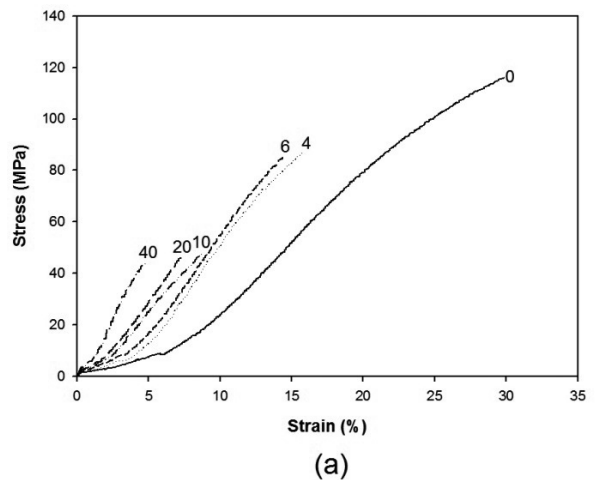


Figure 3. Stress-strain curves of polypyrrole coated fabrics; (a) silk, (b) cotton and (c) nylon.

The number indicates the number of treatments.

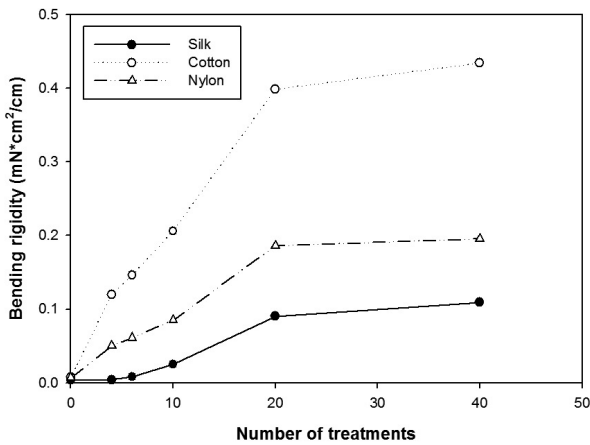


Figure 4. Relationship between bending rigidity of polypyrrole coated fabrics and number of treatments of fabrics.

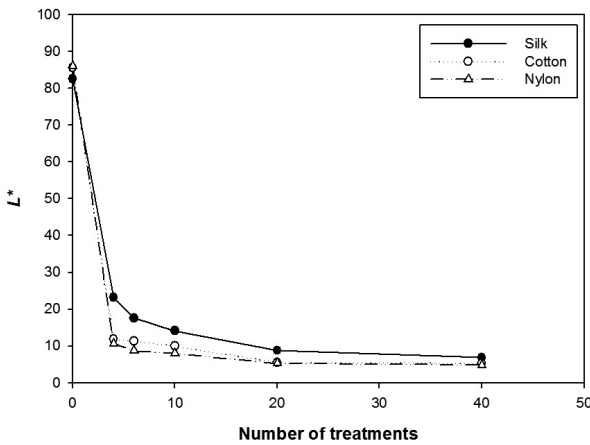


Figure 5. Relationship between L* of polypyrrole coated fabrics and number of treatments of fabrics.

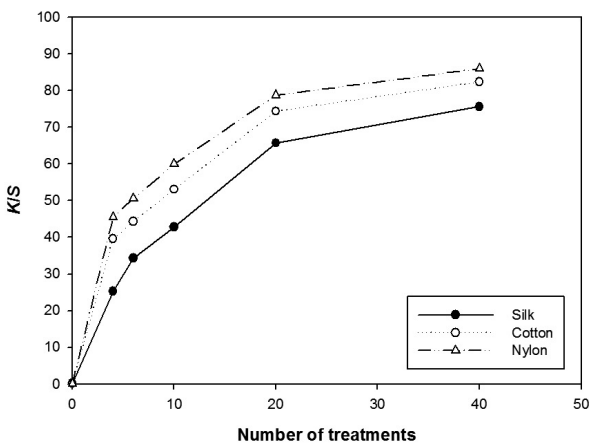


Figure 6. Relationship between K/S value of polypyrrole coated fabrics and number of treatments of fabrics.

폴리피롤 코팅 처리 직물의 처리 횟수에 따른 겉보기 색 강도인 K/S 값의 변화를 Figure 6에 나타내었다.

처리 횟수가 20회까지는 K/S 값이 급격히 증가하다가 그 이후에는 증가 폭이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

미처리 견/면/나일론 직물의 K/S 값은 0.15/0.11/0.10 이었으며, 20회 처리한 견/면/나일론 직물의 K/S 값은 65.69/69.35/73.70 이었다. 처리 횟수가 증가함에 따라서 앞서 고찰한 코팅된 폴리피롤의 함량이 증가하는 것과 K/S 값의 증가하는 경향은 거의 같은 결과를 나타내었다. 그런데 섬유 종류에 따라서 K/S 값이 약간의 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이는 아마도 섬유고분자와 폴리피롤 분자간의 극성 및 수소결합과 같은 분자간 상호작용의 차이와 직물구조의 차이로 코팅된 pPy의 함량의 차이를 야기하기 때문에 나타난 결과라 생각된다.

4. 결 론

우수한 전도성과 색 특성을 지닌 폴리피롤이 코팅된 견, 면 및 나일론 직물을 효과적으로 얻기 위하여 2단계 처리 즉 산화 개시제 0.4M FeCl₃/dopant 0.06M anthraquinone-2- sulfonic acid 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리한 후 0.4M 피롤 단량체 수용액에 실온에서 5분 동안 침지 처리 하였다. 이러한 처리 (2단계 처리) 공정을 반복하여 처리 횟수가 코팅된 폴리피롤의 함량의 증가에 미치는 영향을 조사하였으며, 코팅된 폴리피롤의 함량에 따른 시트저항의 변화, 코팅 직물의 기계적 물성(인장강도/탄성율 및 파괴신도)의 변화, 굽힘 강성의 변화 및 색 특성(L*, K/S)의 변화를 조사하였다.

처리 횟수가 약 20회 까지는 처리 횟수의 증가에 따라서 코팅된 폴리피롤의 함량이 거의 직선적으로 급격히 증가하지만 그 이후부터 40회 까지는 서서히 증가함을 알 수 있었다. 처리 횟수가 증가함에 따라서 시트저항은 급격히 저하하여, 약 20회 처리(폴리피롤 코팅 층의 함량: 53-59wt%)에서 시트저항은 7-15 Ω/square 로 감소하고, 약 40회 처리(폴리피롤 코팅 층의 함량: 64-70wt%)에서 6-10 Ω/square 정도인 것을 알 수 있었다. 처리 횟수의 증가에 따라서 인장강도 및 신도가 감소하며, 인장 탄성율 및 굽힘 강성은 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 처리 횟수의 증가에 따른 직물

의 인장 탄성을 및 굽힘 강성의 증가로부터 직물의 유연성이 상당히 크게 저하된다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 처리 횟수의 증가에 따라서 코팅직물의 색 특성 중 명도 L* 값은 감소하여 진한 검정색으로 변하며, 색 강도 K/S 값은 크게 증가하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- G. A. Snook, P. Kao, and A. S. Best, Conducting-Polymer-Based Supercapacitor Devices and Electrodes, *J. Power Sources*, **196**, 1(2011).
- R. Ramya, R. Sivasubramanian, and M. V. Sangaranarayanan, Conducting Polymers-Based Electrochemical Supercapacitors-Progress and Prospects, *Electrochim. Acta*, **101**, 109(2013).
- L. Pan, H. Qiu, C. Dou, Y. Li, L. Pu, J. Xu, and Y. Shi, Conducting Polymer Nanostructures: Template Synthesis and Applications in Energy Storage, *Int. J. Mol. Sci.*, **11**, 2636(2010).
- B. Kim, V. Koncar, and E. Devaux, Electrical Properties of Conductive Polymers: PET-Nanocomposites Fibers, *AUTEX Research J.*, **4**(1), 9(2004).
- C. D. Pina, E. Falletta, and M. Rossi, Conductive Materials by Metal Catalyzed Polymerization, *Catal. Today*, **160**, 11(2011).
- M. Omastova and M. Micusik, Polypyrrole Coating of Inorganic and Organic Materials by Chemical Oxidative Polymerisation, *Chemical Papers*, **66**, 392(2012).
- G. G. Wallace, D. D. Rossi, Y. Wu, K. T. Lau, and S. Coyle, Smart Nanotextiles: A Review of Materials and Applications, *MRS Bull.*, **434**, 32(2007).
- 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 Lett.*, **8**(12), 4151(2008).
- F. Carpi and D. D. Rossi, Electroactive Polymer-Based Devices for E-Textiles in Biomedicine, *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, **9**(3), 295(2005).
- M. Hamed, R. Forchheimer, and O. Inganas, Towards Woven Logic from Organic Electronic Fibres, *Nat. Mater.*, **6**, 357(2007).
- A. Lymberis and A. Dittmar, Advanced Wearable Health Systems and Applications, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, **26**(3), 29(2007).
- C. Y. Wang, A. M. Ballantyne, S. B. Hall, C. O. Too, D. L. Officer, and G. G. Wallace, Functionalized Polythiophene-Coated Textile: A New Anode Material for a Flexible Battery, *J. Power Sources*, **156**, 610(2006).
- S. H. Cho, J. S. Joo, B. R. Jung, T. M. Ha, and J. Y. Lee, PET Fabric/Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Composite as Polymer Electrode in Redox Supercapacitor, *Macromol. Res.*, **17**(10), 746(2009).
- C. Y. Wang, G. Tsekouras, P. Wagner, S. Gambhir, C. O. Too, D. Officer, and G. G. Wallace, Functionalised Polyterthiophenes as Anode Materials in Polymer/Polymer Batteries, *Synth. Met.*, **160**, 76(2010).
- P. Xue, X. M. Tao, and H. Y. Tsang, In Situ SEM Studies on Strain Sensing Mechanisms of PPy-Coated Electrically Conducting Fabrics, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 3387(2007).
- X. Xue, X. M. Tao, M. Y. Leung, and H. Zang, "Wearable Electronics and Photonics", Woodhead Publishing Co., UK, pp.81-104, 2005.
- Y. Li, X. Y. Cheng, M. Y. Leung, J. Tsang, X. M. Tao, and M. C. W. Yuen, A Flexible Strain Sensor from Polypyrrole-Coated Fabrics, *Synth. Met.*, **155**, 89(2005).
- D. Kincaid, A. Kumar, A. D. Child, and J. R. Reynolds, Conductivity Switching in Polypyrrole-Coated Textile Fabrics as Gas Sensors, *Synth. Met.*, **92**, 53(1998).
- A. C. Sparavigna, L. Florio, J. Avloni, and A. Henn, Polypyrrole Coated PET Fabrics for Thermal Applications, *Materials Sciences and Application*, **1**, 253(2010).
- E. Hakansson, A. Kaynak, T. Lin, S. Nahavandi, T. Jones, and E. Hu, Characterization of Conducting Polymer Coated Synthetic Fabrics for Heat Generation, *Synth. Met.*, **144**, 21(2004).
- J. Avloni, M. Ouyang, L. Florio, A. R. Henn, and A. C.

- Sparavigna, Shielding Effectiveness Evaluation of Metallized and Polypyrrole-Coated Fabrics, *J. of Thermoplastic Composite Materials*, **20**, 241(2007).
22. J. Avloni, R. Lau, M. Ouyang, L. Florio, A. R. Henn, and A. C. Sparavigna, Polypyrrole-coated Nonwovens for Electromagnetic Shielding, *J. of Industrial Textiles*, **38**(1), 55(2008).
 23. H. H. Kuhn, A. D. Child, and W. C. Kimbrell, Toward Real Applications of Conductive Polymers, *Synth. Met.*, **71**, 2139(1995).
 24. A. Kaynak, Aging Studies on Conducting Polypyrrole, *Fibers and Polymers*, **2**(4), 171(2001).
 25. K. Kukkonen, T. Vuorela, J. Rantanen, O. Ryyanen, A. Siili, and J. Vanhala, The Design and Implementation of Electrically Heated Clothing, Proceedings of the International Symposium on Wearable Computers, p.180, 2001.
 26. S. Y. Kim, J. K. Hong, and G. T. R. Palmore, Polypyrrole Decorated Cellulose for Energy Storage Applications, *Synth. Met.*, **162**, 1478(2012).