

라카제를 이용한 폴리아미드 섬유의 효소 가공

서혜영 · 김혜림[†]

숙명여자대학교 의류학과

Laccase Treatment on Polyamide Fabrics

Hye Young Seo · Hye Rim Kim[†]

Dept. of Clothing & Textiles, Sookmyung Women's University

접수일(2011년 8월 1일), 수정일(2011년 8월 24일), 게재확정일(2011년 8월 30일)

Abstract

This study is to optimize the conditions for the treatment of polyamide fabrics using laccase. The pH, temperature, treatment time, and concentration were varied; their effects were evaluated by measuring the number of primary amide groups by the uptake of an acid dye measured by K/S of dyed polyamide fibers. The hydrophilicity of the fabrics was evaluated in terms of moisture regain and wettability. The effects of the mediator, ABTS, on the laccase activity were also evaluated. The optimal treatment conditions were identified as a pH of 4.5, temperature of 30°C, treatment time of 6 hours, and concentration of 10% of the weight of the fabric (o.w.f.). ABTS facilitated the activity of laccase on the polyamide fabrics. Voids and cracks on the surfaces of the laccase-treated polyamide fabrics were responsible for improved wettability. The results proved that laccase treatment improved the hydrophilicity of polyamide fibers without decreasing their strength.

Key words: Polyamide, Laccase, Enzymatic treatment, Wettability; 폴리아미드, 라카제, 효소 가공, 젖음성

I. 서 론

라카제는 산화효소의 일종으로, 섬유 가공 공정에서는 인디고 염료로 염색된 데님의 탈색에 적용되고 있으며, 그 외에는 식, 음료 제조 및 폐수 처리 등에 사용되고 있다. 최근 라카제는 바이오연료, 바이오센서, 바이오리액터(bioreactor)로서의 잠재적 가능성이 보고되어 연구, 보고되고 있다(Uthandi et al., 2009). 특히 섬유 공정에서는 산화효소인 라카제를 이용한 폴리아미드 및 폴리에틸렌 등 합성 고분자 분해에 대한 연구가 보고되고 있다(Deguchi et al., 1997; Deguchi et al., 1998; Fujisawa et al., 2001; Nomura et al., 2001). 그러나 이

러한 연구는, 섬유의 생분해를 목적으로 하는 연구로서, 폴리아미드 섬유 등 합성섬유의 후가공 공정에 적용 가능성에 대한 연구는 보고되고 있지 않다. 이는 폴리아미드 섬유의 라카제 처리시 섬유 손상을 최소화하면서 섬유를 개질할 수 있는 가공 조건 설정이 용이하지 않기 때문이다(Silva et al., 2010).

이에 본 연구에서는 폴리아미드 섬유의 후가공 공정에 라카제 적용 가능성을 확인하고자 한다. 이를 위해서는 다음의 내용이 검토되어야 한다. 첫째, 섬유 감량을 외에 라카제 활성 조건을 측정하는 방법이 제시되어야 한다. 둘째, 라카제의 최적 활성 조건이 제시되어야 한다. 셋째, 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 첨가제에 의한 영향이 검토되어야 한다. 넷째, 라카제 처리시 폴리아미드 물성 변화에 대하여 검토하여야 한다.

이를 위하여 본 연구는 시판 라카제 중 섬유 산업에 상업적으로 최초로 적용된 데니라이트(Denilite II S, Novozymes)를 선택하였다. 우선 라카제 활성 조건 측정은

[†]Corresponding author

E-mail: khyerim@sm.ac.kr

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0002581).

폴리아미드 섬유의 말단기 변화로 측정하고자 한다. 라카제 처리된 폴리아미드 섬유에는 -CHO, -NHCOH, -CH₃, -CONH₂ 네 종류의 말단기 변화가 보고되고 있다(Deguchi et al., 1997; Deguchi et al., 1998). 따라서 본 연구는 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 활성 조건 측정 방안으로서, 말단기 중 일차 아미드(-CONH₂)의 변화를 측정하여, 라카제의 폴리아미드 활성 조건을 제시하고자 한다. 라카제 처리시 폴리아미드 섬유에 증가된 -CONH₂는 산성 염료 염색시 염액의 pH를 섬유의 등전점 이하인 산성 조건으로 조절시, 아미노 그룹으로 이온화되어 산성 염료와의 이온결합이 증가되며, 섬유의 K/S값이 증가될 것으로 생각된다. 따라서 본 연구는 라카제 처리에 의한 폴리아미드 섬유의 -CONH₂의 양 변화는 라카제 처리 후 산성 염료 염색시 폴리아미드 섬유의 표면색값(K/S)을 통해 측정하고자 한다. 이를 통하여, 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 최적 활성 조건(pH, 온도, 농도, 시간)을 제시할 수 있다. 또한 라카제 처리시 첨가제로서 매개체(mediator)의 효과에 대하여 검토하고자 한다. 매개체는 라카제의 기질을 다양화하여 폴리아미드 및 폴리에틸렌 등의 합성 고분자를 분해할 수 있도록 보조하거나, 라카제의 활성제로서 그 효과가 보고되고 있다(Fujisawa et al., 2001; Johannes et al., 1996; Morozova et al., 2007). 따라서 본 연구에는 라카제의 매개체 중 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate)(이하 ABTS)를 선택하여, 그 효과를 검토하고자 한다. 또한 최적 활성 조건에서 라카제 처리한 폴리아미드 섬유의 물성 변화는 염색견뢰도, 수분율, 접착각, 흡수속도, 감량률, 인장강도로 확인하고자 한다.

II. 실험

1. 시료 및 시약

본 연구에 사용된 시료는 시판 폴리아미드 직물을 사

용하였으며, 효소는 라카제를 사용하였다. 각 시료 및 효소의 특성은 <Table 1>-<Table 2>와 같다. 효소 처리시 일정한 pH를 유지하기 위해 버퍼는 아세트산(Acetic acid glacial, CH₃COOH, Duksan pure chemicals, Korea), 아세트산 나트륨(Sodium acetate, C₂H₃O₂Na, Sigma chemicals Co., USA)을 혼합, 사용하였고, 라카제 매개체는 ABTS(2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate, Sigma chemicals Co., USA)를 사용하였다. 효소 처리 후 잔여단백질 제거는 탄산나트륨(Sodium carbonate, Na₂CO₃, Duksan pure chemicals, Korea)과 비이온계면활성제 Triton x-100(Sigma chemicals Co., USA)을 사용하였다. 효소 활성 측정은 산성 염료(Orange, C. I. Acid Orange 7, Junsei, chemicals Co., Japan), 포름산(Formic acid, HCOOH, Duksan pure chemicals, Korea)을 사용하였다. 시약은 모두 1등급을 사용하였다.

2. 실험방법

1) 효소 처리

라카제의 버퍼 용액은 아세트산과 아세트산 나트륨을 0.1M의 농도로 혼합 제조하여 사용하였다.

폴리아미드 섬유의 라카제 처리시, 처리 조건은 pH (4.0~5.0), 온도(30~50°C), 농도(1~50%(o.w.f.)), 시간(1~72시간), ABTS 농도(0.5~1mM)를 변화시켜 1:50, 교반 속도 120rpm으로 처리하였다. 효소 사활은 90°C에서 10분간 처리하였다. 잔여단백질 제거는 2g/L 탄산나트륨 수용액 50°C에서 1시간 처리 후 2g/L의 비이온계면활성제 수용액 50°C에서 1시간 처리 후 수세, 상온 건조하였다.

2) 효소 활성 측정

효소의 활성은 폴리아미드 섬유의 말단기 변화를 폴리아미드 섬유의 산성 염료 염색 후 표면색값으로 측정하였다. 효소 처리 후 폴리아미드 섬유는 1%(o.w.f.) 산성 염료로 액비 1:50, 90에서 60분간 염색하였으며, 측

Table1. Fabric characteristics

Fiber (%)	Weave	Fabric count (yarns/inch)	Thickness (mm)	Fabric Weight (g/m ²)
Polyamide 100	Plain	128×96	0.11	61.8

Table 2. Enzyme characteristics

Enzymes	Source	Activity	Form	Manufacturer
DeniLite II S (EC 1.10.3.2)	<i>Aspergillus</i> microorganism	120 LAMU/g	Powder	Novozymes

염제는 포름산을 사용하였다. 염색 후 섬유 표면의 잔류 염액을 제거하기 위해 2%(o.w.f.) Triton X-100, 액비 1:50, 50°C, 5분간 처리 후 상온에서 반복 수세하였다. 표면색 측정은 색차계(Computer Color Matching System, JX-777, Japan, 이하 CCM이라 함)를 사용하여 염색포의 표면 반사율을 측정 후, Kubelka-Munk식에 의해 K/S값을 산출하였다.

3) 수분율

수분율은 ASTM D 629-99에 의해 시료의 건조, 습윤 상태의 무게를 측정 후, 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{Moisture regain(\%)} = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100$$

W_m: weight of the fabrics in moisture-equilibrium at 20°C, 65% RH

W_d: weight of the fabrics dried at 105°C for 90 min.

4) 접촉각

직물 표면의 접촉각(Water Contact Angle, 이하 WCA라 함)은 접촉각 측정기(KRÜSS DSA100, KRÜSS Inc., Germany)를 사용하여 시료 표면에 3 μ l의 증류수를 적하하여 측정하였다. 실험은 시료 당 10회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

5) 흡수속도

흡수속도는 적하법(AATCC method 79-1992)에 의하여 직물 표면에 10 μ l의 증류수를 적하한 후, 표면의 물방울이 물에 의한 반사를 하지 않을 때까지의 시간을 측정하였다. 실험은 시료당 10회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

6) 감량률

효소 처리포의 감량률은 건조무게를 측정 후, 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{Weight loss(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

W₁: Dry weight of the fabric before treatment

W₂: Dry weight of the fabric after treatment

7) 인장강도

인장강도는 KS K 0521에 준하여, 인장강도 시험기

(ASA 211-1, Asia, Korea)를 사용하였으며, 스트립법으로 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

8) 세탁견뢰도

세탁견뢰도는 Launder-O-meter(Koa Shokai Ltd, Kyoto, Japan)를 사용하여 KS K ISO 105-C01에 준하여 측정하였다.

9) 표면형태

표면형태는 주사 전자 현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope JSM-7600F, Japan, 이하 SEM)을 사용하여 비교·관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. pH 및 시간에 따른 라카제 활성

<Fig. 1>-<Fig. 2>는 라카제 처리시 pH 및 처리 시간 변화에 따른 폴리아미드 섬유 K/S 측정 결과로, ABTS 첨가 유무에 따른 차이를 나타낸 것이다. ABTS 미첨가시<Fig. 1> 폴리아미드 섬유의 K/S값은 미처리와 유사하거나, 오히려 감소하였다. 그러나 ABTS 첨가시<Fig. 2>에는 pH 4.0 및 pH 4.5에서 일정 시간 효소 처리시, 폴리아미드 섬유의 K/S값은 미처리에 비하여 증가하였다. 이는 ABTS와 같은 매개체 첨가에 의해 라카제의 기질이 다양화되어, 폴리아미드 섬유와 같은 합성 고분자 물질을 분해할 수 있음을 보고한 선행연구와 같은 결과이다(Fujisawa et al., 2001). 따라서 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 ABTS가 첨가되지 않으면, 라카제가 활성되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 본 연구는 ABTS 첨가 후에 폴리아미드 섬유에 라카제 활성 조건을 설정하였다.

<Fig. 2>의 ABTS 첨가시 pH 및 처리 시간 변화에 따른 K/S값은 pH 4.5에서 6시간 처리시 최대값을 나타냈다. 이는 라카제 활성에 의해 폴리아미드 섬유의 -COHN₂의 양이 증가하기 때문으로 생각된다. 라카제 분해 후 폴리아미드 섬유에서 확인되는 -CHO, -NHCOH, -CH₃, -CONH₂ 등의 말단기 변화는 섬유 내의 아미드기의 가수분해가 아닌, NH-CH₂ 내의 C-N 결합의 분해에 의한 것으로 보고되고 있다(Deguchi et al., 1997; Deguchi et al., 1998). 따라서 폴리아미드 섬유에 형성된 일차 아미드(-CONH₂)는 산성 염료 염색시 등전점 이하에서 이온화되어, 산성 염료와 이온결합이 증가되는 것이다.

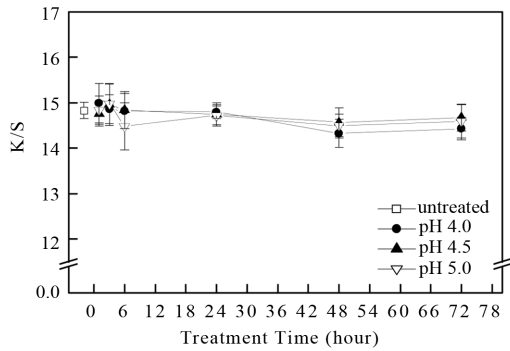


Fig. 1. K/S of polyamide fibers treated with different pH levels and treatment time in the absence of ABTS (Treatment condition: temperature 30°C, laccase 10% (o.w.f.)).

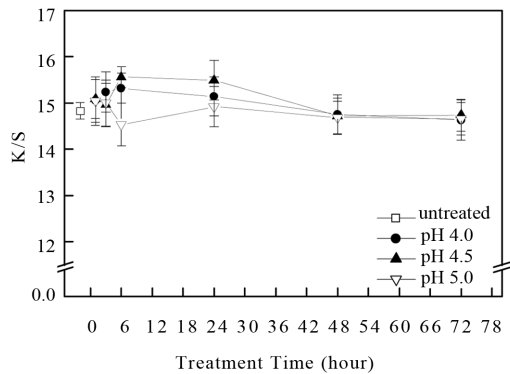


Fig. 2. K/S of polyamide fibers treated with different pH levels and treatment time in the presence of ABTS. (Treatment condition: temperature 30°C, laccase 10% (o.w.f.), 0.5mM ABTS).

K/S값은 pH 5.0에서는 처리 시간이 증가함에 따라 미처리에 비하여 감소하는 것으로 나타났다. 이는 효소가 최적 pH 이외의 조건에서는 효소 단백질의 입체 구조 변성으로 인하여 활성이 저하된다는 보고와 일치한다(Cavaco-Paulo & Guebitz, 2003). 따라서 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 pH는 4.5로 조정하는 것이 적절하다. 또한 pH 4.5에서 처리 시간에 따른 영향을 살펴본 결과, 처리 시간 6시간까지 K/S값은 향상되나, 24시간 초과시에는 효소 활성이 저하되는 것으로 나타났다. 이는 처리 시간이 증가함에 따라 효소의 활성 능력이 저하되고, 효소에 의한 가수분해 산물이 처리액 내에 축적되어 오히려 효소 활성을 저해하기 때문이다(Lee et al., 2008).

2. 온도에 따른 라카제 활성

<Fig. 3>은 라카제 처리시 pH 4.5, 시간 6시간, 농도 10%(o.w.f.), ABTS 농도 0.5mM에서 온도(30, 40, 50°C) 변화에 따른 폴리아미드 섬유의 K/S 측정 결과이다. 폴리아미드 섬유의 K/S값은 라카제 처리시 처리 온도 30°C에서 최대값을 나타냈으며, 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 온도에 민감한 효소 단백질이 최적 처리 온도 이상에서는 구조가 변화되어 변성되거나 효소가 부분적으로 사멸되기 때문이다(Cavaco-Paulo & Guebitz, 2003). 따라서 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 최적 처리 온도는 30°C로 설정하였다.

3. 농도에 따른 라카제 활성

<Fig. 4>는 라카제 처리시 pH 4.5, 시간 6시간, 온도 30°C, ABTS 농도 0.5mM에서 라카제 농도(1, 5, 10, 30, 50%(o.w.f.)) 변화에 따른 폴리아미드 섬유의 K/S 측정 결과이다. 라카제 처리한 폴리아미드 섬유의 K/S값은 10%(o.w.f.)에서 최대값을 나타내고, 10%(o.w.f.)를 초과하면 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기질의 양이 일정한 경우 효소 농도가 증가하더라도 분해 가능한 기질의 양이 제한되어 있으므로 일정 농도 이상 효소가 첨가되면 효소 분자 간의 경쟁 증가 및 충돌, 응집에 의하여 효소의 활성이 저하되기 때문이다(Lee et al., 2010). 따라서 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 라카제 농도는 10%(o.w.f.)로 설정하였다.

이상의 결과를 통해, 폴리아미드 섬유에 라카제 처

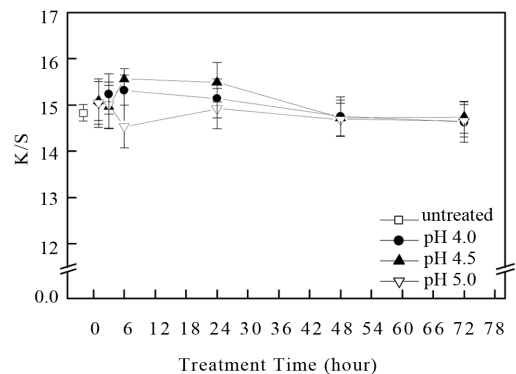


Fig. 3. Effect of temperature on K/S of polyamide fibers (Treatment condition: pH 4.5, treatment time 6hr., laccase 10% (o.w.f.), ABTS 0.5mM).

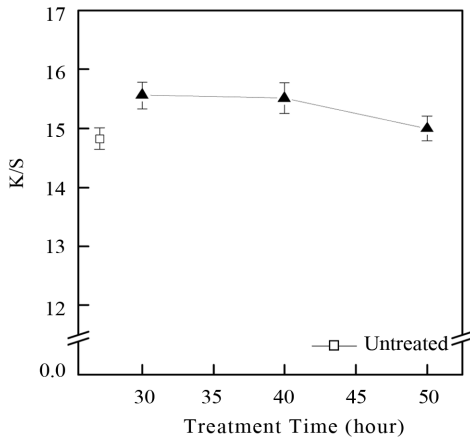


Fig. 4. Effect of laccase concentration on K/S of polyamide fibers (Treatment condition: pH 4.5, treatment time 6hr., ABTS 0.5mM).

리시 최적 활성 조건은 pH 4.5, 처리 시간 6시간, 처리 온도 30°C, 라카제 농도 10%(o.w.f)로 설정하였다.

4. ABTS 농도에 따른 라카제 활성

<Fig. 5>는 라카제 처리시 pH 4.5, 온도 30°C, 시간 6시간, 농도 10%(o.w.f)에서 ABTS 농도(0.1, 0.3, 0.5, 1mM) 변화에 따른 폴리amide 섬유 K/S 측정 결과이다. ABTS 미첨가시에는 폴리amide 섬유 K/S값이 미처리 값과 유사하게 나타나, 라카제가 효과적으로 활성되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 ABTS 첨가에 의해 폴리amide 섬유 K/S값은 미처리에 비하여 상승하여, 폴리amide 섬유에 라카제 처리시 ABTS가 첨가

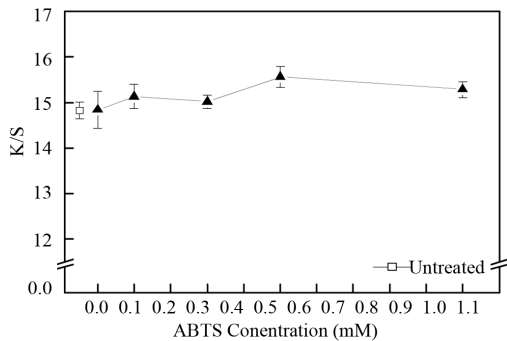


Fig. 5. Effects of ABTS concentration on K/S of acid dyed polyamide fibers (Treatment condition: pH 4.5, temperature 30°C, time 6hr., laccase 10% (o.w.f)).

되어야 하는 것으로 확인되었다. 이는 라카제가 ABTS와 같은 매개체 첨가에 의해 폴리amide 등 합성 고분자를 분해할 수 있음을 보고한 선행연구와 같은 결과이다(Fujisawa et al., 2001). 또한 ABTS 첨가에 의해 폴리amide 섬유의 K/S값이 상승하므로, 폴리amide 섬유에 라카제 처리시 ABTS는 활성제로서 효소의 활성을 보조하는 것으로 나타났다(Morozova et al., 2007). 폴리amide 섬유의 K/S값은 ABTS 0.5mM 첨가시 최대값을 나타내고, 0.5mM 초과시 감소하였다. 따라서 ABTS 농도가 임계값 이상으로 증가되면, 오히려 라카제의 활성은 저하되는 것으로 나타났다. 이는 일정 농도 이상 첨가된 ABTS가 효소의 기질 접근성을 감소시켜, 오히려 효소와 기질 간의 결합을 저해시키는 것으로 생각된다.

5. 라카제 처리시 폴리amide 섬유 물성

1) 수분특성

라카제 처리시 폴리amide 섬유 말단기 변화가 섬유의 수분특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 폴리amide 섬유의 수분율 및 젖음성(접촉각, 흡수속도)을 측정하였다. <Fig. 6>에 나타난 바와 같이 폴리amide 섬유 수분율은 미처리시 4.57%(±0.64)에서 라카제 처리시 5.33%(±0.2)로 약 1.17배 향상되었다. 또한

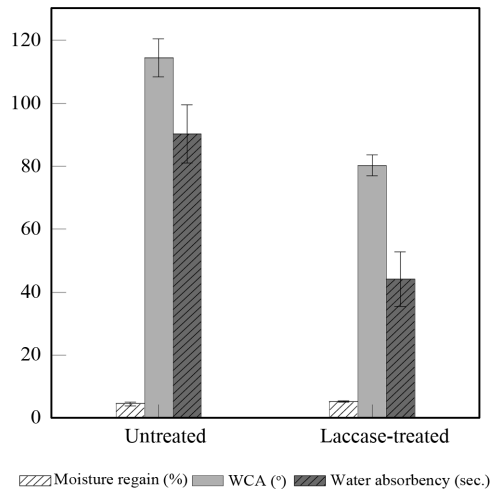


Fig. 6 Moisture related properties of laccase-treated polyamide fibers (Treatment condition: pH 4.5, temperature 30°C, time 6hr, laccase 10% (o.w.f), ABTS 0.5mM).

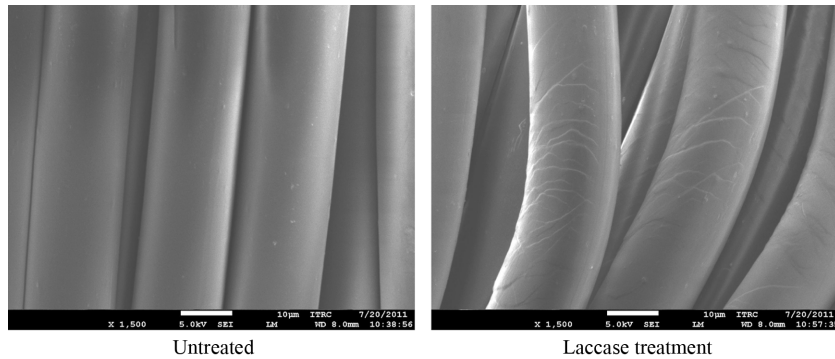


Fig. 7. SEM micrographs of polyamide fibers (Treatment condition: pH 4.5, temperature 30°C, time 6hr., laccase 10% (o.w.f.), ABTS 0.5mM).

폴리아미드 섬유의 접촉각 및 흡수속도 시간은 라카제 처리시 미처리에 비하여 각각 약 1.4배, 2배 단축되어 폴리아미드 섬유 표면의 젖음성이 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 폴리아미드 섬유의 젖음성 증가에 비하여, 수분율의 증가는 크지 않다. 이는 라카제 처리가 폴리아미드 섬유의 소수성의 아미드 결합을 가수분해하여 친수성인 아미노 그룹의 양을 증가시키는 가수분해 공정이 아닌, 산화 공정에 의한 것이기 때문이다 (Deguchi et al., 1997). 또한 본 연구에서 제안한 산성 염료 K/S값 측정에 의한 라카제 활성 측정 방법 또한 염액의 pH를 등전점 이하로 조정함에 따라 섬유에 도입된 일차 아미드 그룹이 아미노기로 이온화되어 K/S 값이 증가하는 것을 고려할 때, 이러한 말단기의 변화가 폴리아미드 섬유의 수분율을 증가에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 고려된다. 그러나 폴리아미드 섬유의 젖음성을 측정하는 흡수속도 및 접촉각은 섬유의 말단기 변화 외에도 폴리아미드 섬유의 표면 변화에 영향을 받는다(Kim & Song, 2006). 폴리아미드 섬유는 라카제 처리에 의해 미세한 표면 변화가 나타남에 따라 젖음성이 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 폴리아미드 섬유의 표면 변화는 <Fig. 7>에서 확인할 수 있다.

2) 세탁견뢰도

라카제 처리에 의해 폴리아미드 섬유 표면에 도입된 일차 아미드 그룹인 $-CONH_2$ 의 안정성(stability) 여부를 확인하기 위하여 산성 염료 염색 후 세탁견뢰도를 측정하였다. 세탁견뢰도 측정 결과 미처리포 및 효소 처리포는 처리 조건에 관계없이 오염은 4등급으로 나타났다. 그러나 변퇴의 경우, 미처리포는 4~5급, 효소 처리

포는 5급의 변퇴를 나타냈다. 세탁견뢰도 측정 결과, 라카제 처리된 폴리아미드 섬유는 우수한 견뢰도를 나타냈으며, 또한 미처리에 비하여 변퇴가 다소 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 라카제 처리에 의해 폴리아미드 섬유 표면에 도입된 일차 아미드 그룹은 안정적으로 섬유에 도입된 것으로 판단되며, 또한 견뢰도 향상에도 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3) 표면 형태

<Fig. 7>은 라카제 처리에 의한 폴리아미드 섬유의 표면 관찰 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 라카제 처리시 폴리아미드 섬유의 표면에 미세한 요철이 생성되는 것으로 확인되었다. 라카제 처리에 의한 폴리아미드 섬유 표면의 미세한 변화는 섬유의 젖음성 향상에 영향을 미친다(Kim & Song, 2006). 또한 라카제 처리한 폴리아미드 섬유의 감량률은 약 0.2% 내외로, 인장강도 또한 저하되지 않았다. 따라서 라카제 처리시 폴리아미드 섬유의 말단기는 변화되어도 섬유의 물리적 손상은 발생되지 않는 것으로 관찰되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 라카제 처리는 폴리아미드 섬유의 강도 저하는 최소화하면서, 수분특성을 향상시키는 것으로 확인되었다. 그러나 라카제 처리에 의해 폴리아미드 섬유의 감량률이 낮아, 태 등의 외관적 성능도 변화시키지 않는 것으로 확인되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 폴리아미드 섬유의 후가공 공정에 라카제 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구는 시판 라카제 중 테니라이트를 선택하였고,

라카제 활성 조건 측정은 폴리아미드 섬유의 말단기 변화로 측정하였다. 라카제 처리시 활성 조건 측정 방안으로서, 말단기 중 일차 아미드의 변화를 라카제 처리 후 산성 염료 염색시 폴리아미드 섬유의 표면색값을 통해 측정하였다. 이를 통하여 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 최적 활성 조건(pH, 온도, 농도, 시간)을 제시하였으며, 라카제 처리시 ABTS 첨가에 따른 영향을 검토하였다. 또한 최적 활성 조건에서 라카제 처리한 폴리아미드 섬유의 수분율, 젖음성(접촉각, 흡수속도), 감량률, 인장강도를 확인하였으며, SEM을 통하여 표면 형태 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 최적 활성 조건은 pH 4.5, 처리 시간 6시간, 처리 온도 30°C, 라카제 농도 10%(o.w.f)로 설정하였다. ABTS 미첨가시에는 라카제가 효과적으로 활성되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 ABTS 첨가에 의해 폴리아미드 섬유의 K/S값은 미처리에 비하여 상승하여, 폴리아미드 섬유에 라카제 처리시 ABTS가 첨가되어야 하는 것으로 확인되었다. 폴리아미드 섬유의 수분율은 미처리시 4.57%(±0.64)에서 라카제 처리시 5.33%(±0.2)로 약 1.17배 향상되었다. 또한 폴리아미드 섬유의 접촉각 및 흡수속도 시간은 라카제 처리시 미처리에 비하여 각각 약 1.4배, 2배 단축되어 폴리아미드 섬유 표면의 젖음성이 향상되는 것으로 나타났다. 산성 염료 염색 후 세탁견뢰도를 측정 결과, 라카제 처리에 의해 폴리아미드 섬유 표면에 도입된 일차 아미드 그룹은 안정적으로 섬유에 도입된 것으로 확인되었다. 섬유 표면은 라카제 처리시 폴리아미드 섬유의 표면에 미세한 요철이 생성되는 것으로 확인되었다. 라카제 처리에 의한 폴리아미드 섬유 표면의 미세한 변화는 폴리아미드 섬유의 젖음성 향상에 영향을 미친다. 또한 라카제 처리한 폴리아미드 섬유의 감량률은 약 0.2% 내외로, 인장강도 또한 저하되지 않았다. 본 연구는 라카제 처리시 폴리아미드 섬유의 강도를 저하시키지 않고, 라카제 처리 조건을 제시한 데 의의가 있다. 그러나 라카제 처리에 의해 폴리아미드 섬유의 감량률이 낮아, 태 등의 외관적 성능도 변화시키지 않는 것으로 확인되었다.

References

- Cavaco-Paulo, A., & Guebitz, G. M. (2003). *Textile process with enzymes*. Washington, DC: CRC Press.
- Deguchi, T., Kakezawa, M., & Nishida, T. (1997). Nylon degradation by lignin-degrading fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(1), 329–331.
- Deguchi, T., Kitaoka, Y., Kakezawa, M., & Nishida, T. (1998). Purification and characterization of a nylon-degrading enzyme. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(4), 1366–1371.
- Fujisawa, M., Hirari, H., & Nishida, T. (2001). Degradation of polyethylene and nylon 66 by the laccase-mediator system. *Journal of Polymers and the Environment*, 9(3), 103–108.
- Johannes, C., Majcherczyk, A., & Huttermann, A. (1996). Degradation of anthracene by laccase of *trametes versicolor* in the presence of different mediator compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 46(3), 313–317.
- Kim, H. R., & Song, W. S. (2006). Lipase treatment of polyester fabrics. *Fiber and Polymers*, 7(4), 339–343.
- Lee, S. H., Song, W. S., & Kim, H. R. (2008). Hydrolysis of non-cellulose of cotton fiber by lipase treatment. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 32(7), 1075–1081.
- Lee, S. H., Kim, H. R., Lee, B. H., & Song, W. S. (2010). Enzymatic hydrolysis of chitosan fiber using cellulase and papain. *Textile Science and Engineering*, 47(3), 212–221.
- Morozova, O. V., Shumakovich, G. P., Shleev, S. V., & Yaropolov, Ya. I. (2007). Laccase-mediator systems and their applications: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 43(5), 523–535.
- Nomura, N., Deguchi, T., Shigeno-Akuthsu, Y., Nakajima-Kambe, T., & Nakahara, T. (2001). Gene structures and catalytic mechanisms of microbial enzymes able to biodegrade the synthetic solid polymers nylon and polyester polyurethanes. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 18, 125–147.
- Silva, C., Matamá, M. T., & Cavaco-Paulo, A. (2010). Biotransformation of synthetic fibers. In M. C. Flickinger (Ed.), *Encyclopedia of industrial biotechnology, bioprocess, bio-separation, and cell technology* (pp. 1202–1217). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Uthandi, S., Saad, B., Humbard, M. A., & Maupin-Furlow, J. A. (2010). LccA, an archaeal laccase secreted as a highly stable glycoprotein into the extracellular medium by *haloferax volcanii*. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(3), 733–743.