

해도형 초극세 나일론 섬유의 알칼리 용출 및 염색성

이혜정¹ · 이효영 · 박은지 · 최연지 · 김성동[†]

건국대학교 공과대학 섬유공학과, ¹한국생산기술연구원 섬유융합연구부

Alkaline Dissolution and Dyeing Properties of Sea-island Type Ultrafine Nylon Fiber

Hae Jung Lee¹, Hyo Young Lee, Eun Ji Park, Yeon Ji Choi and Sund Dong Kim[†]

Department of Textile Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701 Korea

¹Textile Fusion Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Ansan 426-171, Korea

(Received: December 2, 2010/Revised: December 14, 2010/Accepted: December 15, 2010)

Abstract— The alkaline dissolution behavior of sea-island type ultrafine nylon fiber were dependent on the concentration of NaOH and treatment time, and the most appropriate condition for alkaline dissolution was to treat with 20g/l NaOH for 30 min at 80°C. The dyeing properties of sea-island type ultrafine nylon fiber and regular nylon fiber were examined with 3 different types of acid dyes in this study. The dye uptakes of ultrafine nylon fiber were higher than regular nylon fiber because of large surface area per unit mass, which increased as the dye bath pH decreased. The dyeing rates on ultrafine nylon fiber were faster and dye exhaustions were higher than regular nylon fiber, however color strength and rating of wash fastness were lower. It was also found that levelling type acid dye showed fast dyeing rate on both nylon fibers than metal-complex and milling type acid dyes.

Keywords: sea-island, ultrafine, nylon, dyeing, alkaline dissolution, acid dyes

1. 서 론

최근 섬유산업에서는 초극세사 기술의 발달로 PET 섬유의 경우 단사섬도가 0.02 dpf급에 달하는 초극세 섬유가 개발 가능하게 되었다. 이러한 초극세사는 일반 합성섬유가 가지는 탁월한 내구성, 치수안정성, 이지케어성 뿐만 아니라 고도의 벌크성, 유연성, 드레이프성, 부드러운 촉감을 갖기 때문에 고급 인공피혁, 스웨이드 조직 편물, 다텀 등 의류산업 외에도 산업자재로서 이용되는 등 그 용도가 폭 넓어지고 있다^{1,2)}.

일반적인 극세사의 생산방식은 직접방사와 복합방사의 두 가지 방식으로 나눌 수 있는데, 직접방사는 매우 균일한 물성의 제품을 생산할 수 있는 반면, 통상적인 섬도의 섬유를 방사하는 경우보다 공정이 까다롭고 복잡하며, 방사 작업성의 문제로 인해, 생산 가능한 극세사의 섬유도에 한계(~0.2d)가 있다³⁾. 그러나 복합방사의 경우에는 해성분의 용출과 같은 추가적인 공정

이 필요하지만 직접방사시의 섬유도보다 더욱 세 섬유도의 극세사를 생산할 수 있다는 장점이 있다. 복합방사는 제품의 조성 및 단면 형태에 따라 분할형과 용출형으로 나뉘는데, 이중 용출형은 알칼리 등에 의해 용출이 가능한 해성분과 일반 고분자의 도성분으로 나뉘는 해도형 극세사가 대표적이다. 이러한 극세섬유의 섬유도는 0.04~0.06 dpf급으로서 단위중량당 표면적이 크고, 굴곡반경이 작으며 굴곡시 반발성이 낮기 때문에 일반적인 합성섬유에 새로운 기능이 부가되는 특징을 가진다⁴⁾. 그러나 알려진 것처럼 초극세 섬유의 경우는 소비자의 욕구를 충족시켜줄 수 있는 농색이나 여러 가지 다양한 컬러 및 견뢰도를 얻기가 어려운 점이 있으므로 이의 해결을 위해 초극세 섬유에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁵⁻¹⁰⁾.

극세사를 이루는 원사는 주로 PET를 중심으로 많은 개발이 진행되어 왔다. 나일론 극세사는 0.5 dpf급이 제품화 되었지만 모두 직접방사형 타입이거나 N/P 복합사 형으로 해도형 타입

[†]Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3511; Fax.: +82-2-457-8895; e-mail: ssdokim@konkuk.ac.kr

의 초극세사는 아직 출시되지 않고 있다. 나일론 섬유는 산성염료로 염색을 하는데, 레벨링 타입, 밀링 타입, 금속착염 타입 등에 따라 pH 조건의 설정이나 염료의 염착속도, 견뢰도 등에서 많은 차이를 나타낸다. 그러나 일반적으로 PET 초극세사의 감량 및 염색성에 비해 폴리아미드계 초극세사의 경우는 세침화에 따라 변화하는 염색특성에 대한 연구가 진행되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 해도형 초극세 나일론 섬유의 알칼리 용출 거동, 산성염료의 타입에 따른 염착량, 겉보기 색농도 및 세탁견뢰도 등을 고찰함으로써 제품화에 필요한 감량 및 염색기술의 기초를 마련하고자 한다.

2. 실험

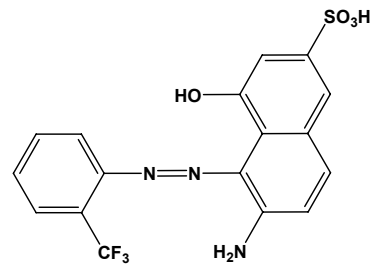
2.1 시료 및 시약

피염물로는 해도형 초극세 나일론사로 만든 경편물을 정련 및 기모된 상태로 (주)KMF로부터 제공받아 사용하였다. 이와 비교하기 위한 일반 나일론 직물은 실험 실습용 원단을 사용하였으며, 구성 원사의 조성 및 특성은 Table 1에 나타내었다.

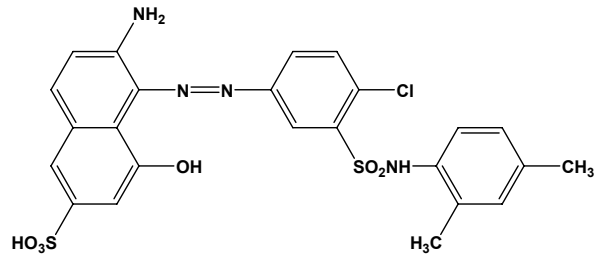
염료는 Red 색상을 띠는 산성염료를 염색에 사용하였다. 타입별로 레벨링, 밀링, 금속착염 염료 등 3가지를 사용하였고 그들의 화학구조를 Fig. 1에 나타내었다. 그 외 감량 및 염색 시 필요한 수산화나트륨, 초산, 균염제, 고착제 등은 1급 시약을 사용하였다.

2.2 해성분의 용출

해도형 초극세 나일론 경편물을 3가지 알칼리 농도 조건(5g/l, 10g/l, 20g/l NaOH)에서 2°C/min의 속도로 80°C까지 승온 후 40분간 유지하였으며 80°C가 된 시점에서 10분 간격으로 시료를 채취하여 감량률을 확인하였다.



C. I. Acid Red 337 (Levelling type)



C. I. Acid Red 336 (Milling type)

Unknown structure (one sulphonated azo dye)

C. I Acid Red 315 (1:2 Metal Complex type)

Fig. 1. Chemical structure of acid dyes used in the experiments.

2.3 염색

2.3.1 염색방법

염색은 액비 1:20로 하여 염욕을 조성하고 30°C에서 시작하여 1°C/min의 속도로 최고염색 온도인 100°C까지 상승시켜 40분간 유지하는 일반적인 나일론 염색방법에 준하여 행하였으며, IR 염색기(Starlet DL-6000, 대림)를 사용하였다. pH 변화에 따른 각 염료 타입별 염색성을 알아보기 위해 3가지 타입의 염료를 농도 2% o.w.f.의 조건에서 pH를 3, 4, 5, 6, 7로 변화시켜가며 해도형 초극세 나일론사와 일반 나일론사 각각 염색하였다.

초기 염욕과 염색 완료후 잔욕의 염액의 흡광도를 UV-visible spectrophotometer(UV mini, Shimadzu)를 이용해 측정된 후 다음의 식을 통해 염착율을 산출하였다.

Table 1. Yarn composition of samples

Sample	Yarn composition
Sea-island type nylon fabric	Composition 1 (70%) : 75d/24f, 36islands, sea:island=3:7, 0.06 dpf Composition 2 (30%) : nylon 40d/48f, 0.83 dpf
Regluar type nylon	75d/24f, 3dpf

$$\text{Exhaustion}(\%) = \frac{A_o - A_t}{A_o} \times 100 \quad (1)$$

A_o ; absorbance of dye bath before dyeing
 A_t ; absorbance of dye bath at dyeing time t

염색한 모든 샘플들은 동일 1:20의 액비에서 고착제 2g/l, 초산 0.3g/l로 고착처리를 하였고, 이후 피염물의 겉보기 농도를 평가하기 위해 측색기(Color-Eye 3100, Macbeth)를 사용하여 400~700nm 영역의 각 흡수파장의 K/S 값에 시감각의 감도를 고려한 가중합수를 곱한 값의 총합(f_k)을 구하였다(ISO 7724/1-1984).

2.3.2 승온 염착곡선

해도형 나일론 초극세사 및 일반 나일론사의 시간에 따른 염착속도를 비교하기 위하여, 앞서 실시한 결과를 바탕으로 얻은 각 염료별 적정 pH 조건에서의 승온 염착곡선을 구하였다. 피염물은 1% o.w.f.의 농도로 30°C에서 100°C까지 염색을 진행시키는 동안 10분 간격으로 시료를 꺼내어 각 피염물의 f_k 값을 산출하는 방법으로 실시하였다.

2.3.3 견뢰도 평가

조건을 다르게 하여 염색된 시료들의 세탁견뢰도는 ISO-105-C01 규격에 준해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해성분의 용출

해도형 극세사의 도성분과 해성분은 각각 일반 나일론과 알칼리 용해성 PET로 구성되어 있다.

원하는 굵기의 초극세 나일론을 얻기 위하여 해성분인 알칼리 용해성 PET를 알칼리로 용출시켜야 한다. 알칼리 용해성 PET는 sulfonated isophthalate를 함유하고 있는 공중합체로 수산화나트륨과 같은 알칼리에 의해 쉽게 가수분해되는 특성을 가지고 있다. 수산화나트륨에 의한 알칼리 용해성 PET의 용출거동은 수산화나트륨의 농도, 처리온도, 처리시간 등에 따라 다르게 나타난다¹⁰⁾. 염색을 진행하기에 앞서서 해도형 초극세 나일론사의 해성분인 알칼리 용해성 PET 부분을 용출시킬 수 있는 적절한 감량 조건을 확립해야 할 필요성이 있다. 해도형 초극세 나일론 경편물에 있어 해도사의 함량은 70%이고 해도사 중의 해성분의 함량은 30%이므로 목표로 하는 감량율은 21%이다. 처리온도를 80°C로 정하고 알칼리 농도를 5g/l, 10g/l 및 20g/l로 달리하여 처리시간 10분마다 채취한 시료들의 감량거동을 Fig. 2에 나타내었다. 알칼리의 양과 감량시간이 증가할수록 감량율이 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

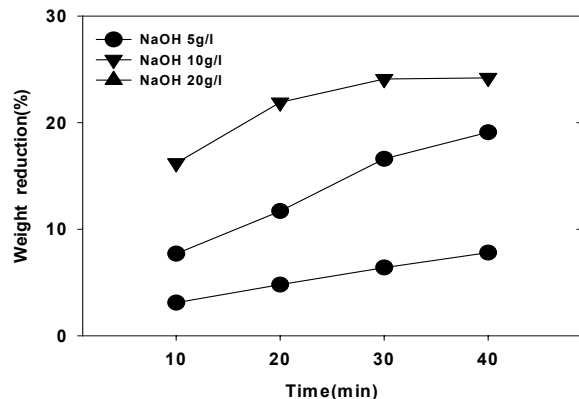
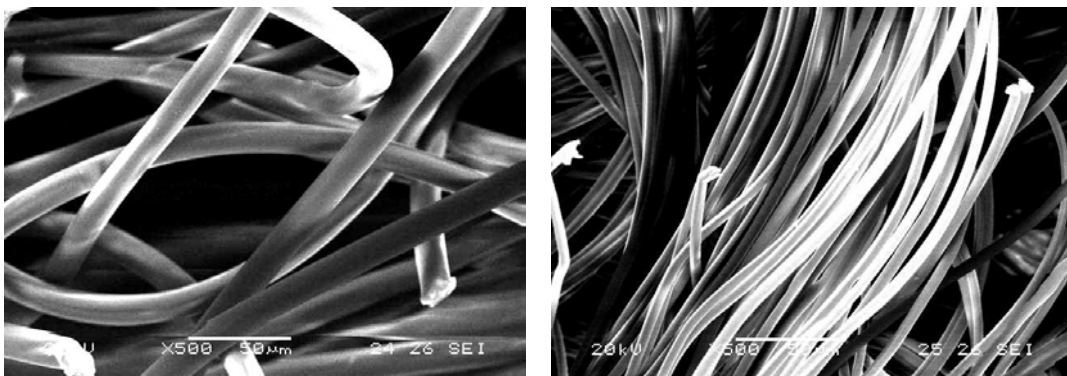


Fig. 2. Weight reduction behavior of sea-island type ultrafine nylon fiber.



(a) before alkali-treatment (b) after alkali-treatment

Fig. 3. Effect of alkali-treatment on sea-island type nylon fiber.

알칼리 농도가 5g/l와 10g/l인 경우 처리시간에 따라 감량율이 거의 직선적으로 증가하나 최종 감량율은 목표치에 도달하지 못하였다. 알칼리 농도가 20g/l로 처리하면 초기에 용출이 빠르게 진행되면서 30분 처리부터는 더 이상 감량이 진행되지 않는 것으로 나타났고, 최종 감량율은 목표치보다 다소 높은 23%였다. 이러한 용출 실험을 통해 해도형 초극세 나일론사를 목표 감량율에 가까운 값으로 감량하기 위해서 20g/l의 수산화나트륨 용액으로 30분간 유지하는 것이 적절하다고 판단된다. 이후의 염색실험에 필요한 시료 제조 시 이 조건을 사용하여 해도형 나일론사를 초극세화 시켰다. 알칼리로 용출 전후의 나일론사의 굵기 변화를 전자현미경으로 촬영하여 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 pH 변화에 따른 염색성

나일론 섬유는 pH의 변화에 따라서 염료의 염착율 및 염착속도, 겉보기 색 농도 등이 다른 결과 값으로 나타나기 때문에 염색 시에 적절한 pH 조건의 설정이 매우 중요하다. 일반 나일론사와 해도형 초극세사의 pH 변화에 따른 염착율을 각각 Fig. 4와 5에 나타내었다. 일반 나일론사는 pH가 3일 때는 95%에 가까운 염착율을 보이다가, pH가 7일 때는 최저 68% 까지 염착율이 감소한다. 해도형 초극세사는 세 염료 모두 100%에 가까운 염착율을 보이다가 pH가 7일 때는 최저 75%까지 감소한다. 즉, 두 시료 모두 pH가 낮아질수록 염착율은 증가한다. 이는 나일론 고분자의 말단에 위치하는 아미노기가 낮은 pH 조건에서 양이온화 되어 염료상의 음이온성인 술폰산기와 이온결합하게 되는 염색 메커니즘을 고려하였을 때, 이러한 경향은 예상과 일치한다. 해도형 나일론사의 경우 일반 나일론사에 비해 모든 pH 조건에서 더 높은 염착율을 나타내며, pH의 영향을 일반 나일론사에 비해서 비교적 덜 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 단위중량당 표면적이 넓으므로 염료와 섬유가 결합할 수 있는 표면이 많은 특징으로 인해 더 많은 양의 염료를 흡진하기 때문이다⁹⁾. 또 다른 특징으로 두 시료 모두 레벨링 타입의 염료와 금속착염염료는 pH의 영향을 많이 받지만, 밀링 타입의 염료는 다른 염료들에 비해 pH의 영향을 적게 받음과 동시에 모든 pH 영역에서 높은 염착율을 나타낸다.

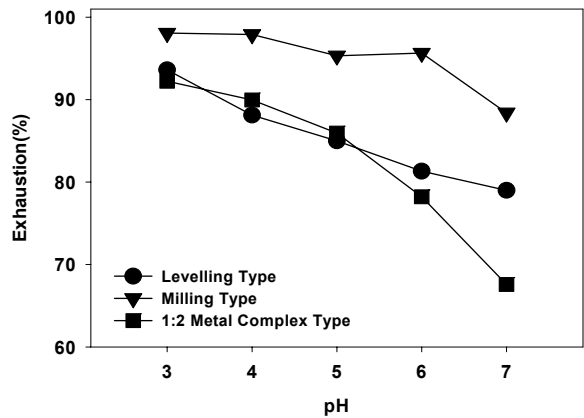


Fig. 4. Exhaustion of regular type nylon dyed at different pH conditions (2% o.w.f.).

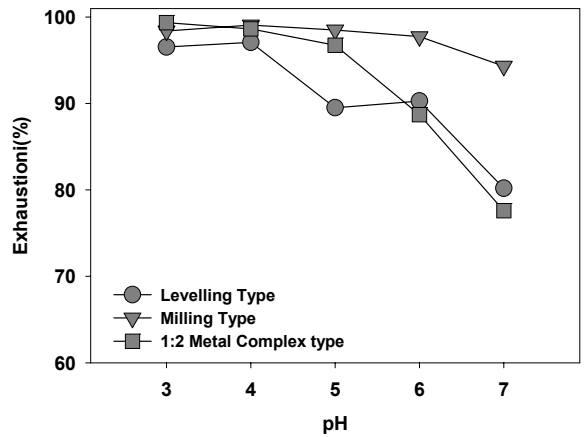


Fig. 5. Exhaustion of sea-island type nylon dyed at different pH conditions (2% o.w.f.).

이는 밀링 타입의 염료가 상대적으로 염료의 분자량이 높아 섬유와의 반데르발스 힘이 강하기 때문에 염료가 잘 탈리되지 않아 염착량이 많은 것으로 판단된다.

다음으로 일반 나일론사와 해도형 초극세 나일론사의 pH에 변화에 따른 겉보기 색 농도의 값을 f_k 값으로 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 4와 5에서 살펴 본 것처럼 염착율은 해도형 초극세 나일론사가 더 높았지만, 겉보기 색 농도는 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 섬유도가 가늘어지면 일반적으로 나타나는 겉보기 색 농도 저하 현상이다. 동일한 양의 염료가 흡진되더라도 섬유도가 가늘수록 섬유의 단위중량당 표면적이 넓어지게 되어 섬유 표면에서 반사하는 정반사광의 비율이 높아지기 때문에 나타나는 현상으로 설명할 수 있다. 한편, pH의 증가에 따라 염착율이 급격하게 감소하는 경향에 비해 겉보기 색 농도의 저하가 다소 미미한 것 또한

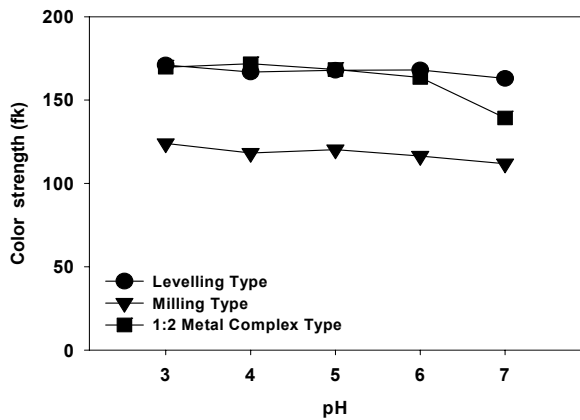


Fig. 6. Color strength of regular type nylon dyed at different pH conditions (2%o.w.f.).

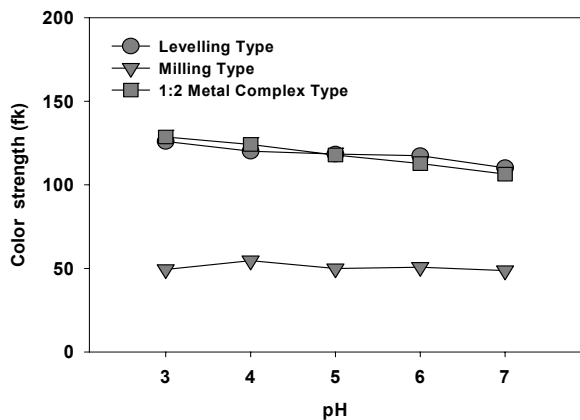


Fig. 7. Color strength of sea-island type nylon dyed at different pH conditions (2%o.w.f.).

확인할 수 있다. 이는 2%o.w.f. 라는 다소 높은 염료 농도로 염색했기 때문에 염착율이 어느 정도 감소했다 하더라도 육안으로 보는 색의 농도에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단할 수 있다. 또한 염색의 주요 메카니즘인 이온결합에서 염료의 염착좌석으로 작용하는 아미노기가 나일론 섬유에는 말단기에만 존재하기 때문에 그러한 염착좌석의 개수가 많지 않아 염착율에 비해 겉보기 색 농도의 저하가 크지 않다는 것을 예상할 수 있다. 각 염료에 따른 겉보기 색 농도를 비교하면 레벨링 타입의 염료와 금속착염 염료에 비해 밀링 타입의 값이 더 작게 나타났다. 이는 염착율이 밀링 타입의 염료가 가장 높았던 것과는 상반되는 결과이다. pH에 따른 염착율과 겉보기 색 농도의 결과를 고려할 때, 레벨링 타입의 경우 pH 3은 두 결과 값이 모두 높지만 섬유 취화의 우려가 있으므로, 비교적 높은 염착율을 유지하면서 겉보기

색 농도의 저하가 크지 않은 pH 4~5, 밀링 및 금속착염 염료는 불균염의 우려가 없는 pH 6~7 사이가 적합한 것으로 판단된다.

3.3 염색속도

세 종류 염료들의 일반 나일론사와 해도형 초극세 나일론사에 대한 승온 염착곡선을 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. 일반 나일론사 염색에 있어 산성염료들은 염색온도가 상승함에 따라 지속적으로 염착량이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 레벨링과 밀링 타입의 염료는 50~60분 사이에 염착이 완료되고, 금속착염염료는 80분까지 계속해서 염착이 진행된다. 그러나 Fig. 9에 있는 해도형 초극세 나일론의 승온 염착곡선은 레벨링과 밀링 타입의 염료가 염색을 시작한지 10~20분 사이에 염착이 상당부분 진행되며 금속착염염료 또한 50분정도에 염착이 완료되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 초극세사의 경우 단위 중량당 표면적이 넓기 때문에 염료의 염착 속도가 더 빠른 특성을 잘 보여주는 것이다. 해도형 초극세 나일론의 승온 염착곡선에서 파악할 수 있는 또 다른 특성은 모든 염료가 공통적으로 40~50분 사이에 최고 염착량을 보였다가, 시간이 지날수록 둔한 기울기로 염착량이 줄어드는 것이다. 이는 시료의 조직 및 구성에 따른 결과이다. 해도사를 이용하여 경편물을 만드는 경우 표면은 해도사 그리고 이면은 일반사가 주가 되도록 제편하고 있다. 본 실험에서 사용한 시료도 이와 같은 구조로 되어 있기 때문에, 실제 염색 시 표면적이 넓어 저온에서 염착이 시작되는 해도사에 염료들이 우선적으로 빠르게 염착을 하고, 이후 온도가 상승함에 따라 염료의 이염성이 증가하면 점차적으로 염료의 농도가 상대적으로 낮은 일반사로 이염되는 현상에 기인하는 결과이다. 이런 이유로 해도사로 이루어진 표면의 겉보기 색 농도가 감소하게 되는 것이므로, 양면의 구성이 다른 해도형 초극세사의 염색을 진행할 경우 더 낮은 온도에서 염색을 하는 것이 색 농도를 높이면서 생산비용 또한 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 레벨링 타입의 염료는 수용액에서 단 분자 형태로 용해되기 때문에 확산이 신속하게 이루어지며, Fig. 8과 9에서 보는 것처럼 초기 염착이 상당히 빠르게 일어나게 된다. 반면, 밀링 타입과 금속착염 염료

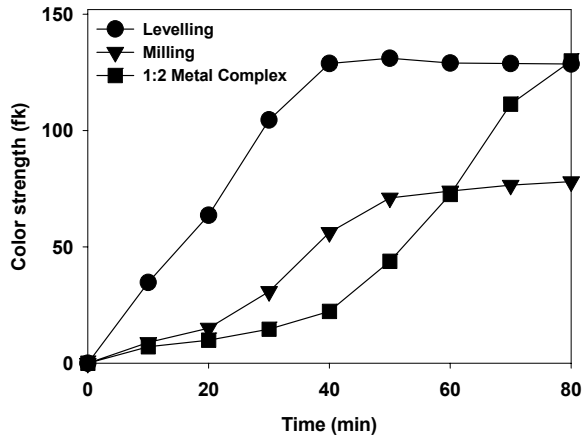


Fig. 8. Exhaustion curves of regular type nylon fiber dyed at 1%o.w.f. and pH 5.

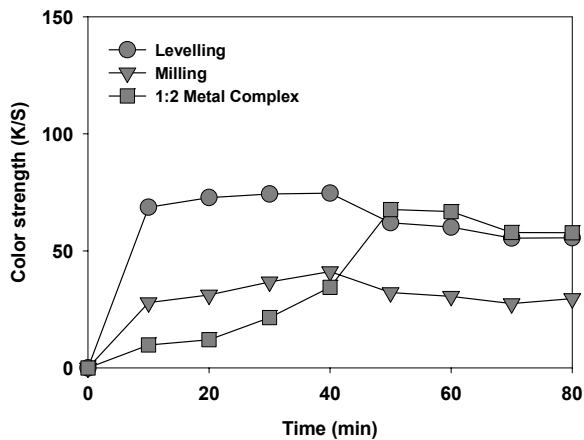


Fig. 9. Exhaustion curves of sea-island type nylon fiber dyed at 1%o.w.f. and pH 5.

는 초기 염착이 상대적으로 느리게 나타나지만 온도의 상승에 따라 염착이 빠른 속도로 진행된다. 밀링 타입과 금속착염 염료는 염착속도에 따라 피염물의 균염성이 변화하게 되므로 앞서 실험한 pH의 조건별 염착율 및 겉보기 색 농도를 함께 고려하여 최적 염색 조건을 설정해야 할 것이다.

3.4 세탁견뢰도

세 가지 타입의 산성염료로 일반 나일론사 및 해도형 초극세 나일론사 편성물을 1%o.w.f.로 염색한 피염물에 대한 견뢰도 시험 결과를 Table 2와 3에 나타내었다. 세탁 견뢰도는 섬도가 가는 해도사의 경우가 대체로 더 낮은 등급을 나타내었다. 특히 나일론과 면, 울의 오염을 기준으로 판정한 견뢰도가 1~2등급 정도 낮은 견뢰도 등급을 보였다. 이는 상대적으로 많은 양이 흡진된 해도형 초극세사상의 염료들이 세탁 시 많이 탈락하여 주변 섬유를 쉽게 오염시키는 것으로 판단된다.

한편, 염료의 타입에 따른 견뢰도 특성은 레벨링 타입의 염료가 밀링 타입이나 금속착염 염료에 비해 낮은 견뢰도 등급을 나타내었다. 이는 염료의 분자량 및 분자크기가 작아 염료와 섬유간의 결합력이 밀링 타입이나 금속착염 염료에 비해 감소하기 때문이다.

Table 2. Washing fastness of regular nylon fabric dyed at 1%o.w.f.

Dye	Staining					
	Wool	Acryl	PET	Nylon	Cotton	Acetate
Levelling	4/5	5	4/5	3	3/4	4
Milling	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
1:2 Metal	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5

Table 3. Washing fastness of sea-islands type nylon fabric dyed at 1%o.w.f.

Dye	Staining					
	Wool	Acryl	PET	Nylon	Cotton	Acetate
Levelling	2/3	4/5	4/5	1/2	2/3	3/4
Milling	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5
1:2 Metal	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5

4. 결 론

본 연구에서 해도형 초극세 나일론사의 알칼리 용출, 염색성 및 견뢰도 특성을 파악하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 해도형 초극세 나일론사의 알칼리 용출거동은 해도형 초극세 PET사와 유사하게 알칼리의 농도와 처리시간의 증가에 따라 감량율이 증가하였으며, 목표 감량율과 가까운 값을 얻기 위해서는 20g/l의 알칼리 용액으로 80°C에서 30분간 처리하는 것이 적절하였다.
2. 세 염료들의 일반 나일론사와 해도형 초극세 나일론사에 대한 염착율은 pH가 낮을수록 증가하였고, 일반 나일론사에 비해 해도형 초극세 나일론사가 중량당 표면적이 넓기 때문에 더 높은 염착율을 나타내었지만, 해도형 초극세 나일론사의 겉보기 색 농도는 저하여 일반 나일론사보다 옅은 색상을 띠었다.
3. 두 시료의 승온 염착곡선을 분석하여 해도형 초극세 나일론사가 일반 나일론사보다 염료들의 염착 속도가 빠른 것을 확인하였고, 염료별로는 레벨링 타입의 산성염료의 염착 속도가 밀링 타입 및 금속착염염료보다 더 빨랐다.
4. 섬도가 가는 해도형 초극세사가 보다 많은 양의 염료를 흡진하기 때문에 세탁 시 염료가 탈락하는 경향이 높으므로 일반 나일론사보다 세탁견뢰도는 나쁘게 나타났다.

참고문헌

1. O. Wada, Control of Fiber Form and Yarn and Fabric Structure, *J. Text Inst.*, **83**, 322-347(1992).
2. K. S. Kim, M. S. Lee, and H. J. Shim, Manufacturing and Characterization of Artificial Suede Made from Split Type Fine Fibers in Wet Process, *Textile Science and Engineering*, **42**, 48-53(2005).
3. Anonymous, Various Microfibers for Clothing, *Jap. Text News*, **83**, 81-85(1992).
4. J. W. S. Hearle, P. Grosberg and S. Backer, "Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics", John Wiley & Sons, New York, US, pp.81-100, 1969.
5. J. S. Oh, D. S. Jeong and M. C. Lee, Dyeing Properties and Aftreatment of UMF Nylon 6 Nonwoven Fabric, *J. Korean Fiber Soc.*, **12**, 8-16(2000).
6. D. S. Jeong, D. H. Lee and M. C. Lee, Effect of Heat Treatment on Dyeing and Physical Properties of Nylon 6 Ultramicrofiber, *J. Korean Fiber Soc.*, **14**, 24-30(2002).
7. S. D. Kim, K. S. Lee, S. S. Lee and K. S. Kim, Dyeing Properties and Improvement of Washfastness of Ultrafine Polyester, *Textile Coloration and Finishing*, **15**(1), 48-55(2003).
8. K. S. Lee, B. S. Lee, Y. H. Park, Y. M. Kim, M. J. Oh, S. H. Jung, and S. D. Kim, A Study on Dyeing Properties of Nylon Nano-fiber, *Textile Coloration and Finishing*, **16**, 1-9(2004).
9. J. S. Koh, J. H. Park, K. S. Lee and S. D. Kim, Weight Reduction and Dyeing Properties of Sea-island Type PET Supermicrofiber Fabrics, *Textile Science and Engineering*, **42**(6), 355-362(2005).
10. H. T. Cho and H. Lee, Dyeing Behaviors of a Disperse Dye on Ultra-micro PET Fibers, *Textile Science and Engineering*, **47**(2), 77-84(2010).