

고강도/고분자량 폴리에틸렌 섬유의 적색 초소수성 형광염료 염색

Dyeing of High Strength and High Molecular Weight Polyethylene Fiber Using Super Hydrophobic Red Fluorescence Dyes

*Corresponding author

Taekyeong Kim
(taekyeong@knu.ac.kr)

김태건, 이준헌, 박지훈, 김태경*

경북대학교 섬유시스템공학과

Taegun Kim, Junheon Lee, Jihoon Park and Taekyeong Kim*

Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

Received_November 21, 2018

Revised_December 06, 2018

Accepted_December 11, 2018

Textile Coloration and Finishing

TCF 30-4/2018-12/237-244

©2018 The Korean Society of
Dyers and Finishers

Abstract Three super hydrophobic red fluorescence dyes were selected to dye high molecular weight polyethylene fiber. Their absorbance and emission spectra were obtained and Stokes' shift was measured. Fluorescence emission strength of the dyes on the fiber was investigated and therefore Fluoro Red 3 was determined as the best one among those three dyes in this experiment. Dyeing properties and fluorescence intensities were investigated using the Fluoro Red 3 on high molecular weight polyethylene fiber at various dyeing conditions. The optimum concentration of a dispersing agent was appeared at 10wt% in aqueous solution. The best dyeing was obtained at 125°C for 1 hour. The color fastnesses to the washing and rubbing were as high as ratings 4~5, however, the fastness to light was exhibited ratings 2~3.

Keywords high molecular weight polyethylene fibers(hmwpe), super hydrophobic dyes, fluorescence dyes, red dyes, dyeing

1. 서 론

다양한 산업용 섬유들의 사용이 증가하는 가운데 고강도 및 고탄성률 등의 뛰어난 성능을 가지는 슈퍼섬유들에 관심이 집중되고 있다^{1,2)}. 이들 슈퍼섬유에는 방탄복이나 방염복의 용도로 활용되는 아라미드계 섬유를 비롯하여 경량복합소재용으로 활용되는 탄소섬유 등 여러 가지가 알려져 있다^{3,4)}. 이와는 별도로 내열성은 부족하지만 우수한 강도특성과 내화학성, 그리고 경량성 등의 장점을 가지는 폴리에틸렌계 섬유 또한 슈퍼섬유에서 큰 비중을 차지하고 있다. 폴리에틸렌 섬유는 분자량의 정도에 따라 초고분자량 폴리에틸렌(Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE)과 고분자량 폴리에틸렌(High Molecular Weight Polyethylene, HMWPE) 섬유가 있는데 용도에 맞게 연신배율과 분자량을 조절하는 것이 가능하다^{5,6)}. 고분

자량 폴리에틸렌 섬유는 극소수성의 특성과 치밀한 내부구조로 인해 염색에 의해 색상을 발현하는 것이 어려운 것으로 알려져 있지만 제품의 다양한 전개와 용도 확대로 색상을 가지는 섬유가 시장으로부터 지속적으로 요구되고 있다.

본 연구팀에서는 이러한 고분자량 폴리에틸렌 섬유를 대상으로 지속적인 연구를 통해 긴 알킬기를 가지는 초소수성 염료가 우수한 친화력을 나타낸다는 사실을 확인한 바 있으며 전 범위의 가시광선 파장에 해당하는 모든 색상의 초소수성 염료들을 합성하고 폴리에틸렌계 섬유에 대한 친화력과 견뢰도 특성을 조사한 바 있다⁷⁻¹⁰⁾.

고분자량 폴리에틸렌 섬유는 우수한 강도 특성으로 인해 안전이나 보호용 제품 분야에 활용되는 사례가 많으며 이 경우에 눈에 잘 띄도록 하는 시인성 또는 고가시성이 요구가 되는 추세인데 이런 요구에 부응하기 위

하여 선행연구에서는 고강도 폴리에틸렌섬유에 친화력을 가지는 옐로우그린 계열의 형광염료를 확보하고 이 염료의 광학적 특성과 염색성을 연구하여 보고한 바 있다¹¹⁾.

본 연구에서는 옐로우그린 계열 이외의 형광염색을 가능하도록 하기 위해 기존에 상용화되어 있는 적색형광염료 중에서 화학적 구조 내에 비교적 큰 소수성 작용기를 가짐으로써 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 대한 친화력이 높을 것으로 판단되는 염료 3종을 선별하여 적용가능성을 조사하였다. 선별된 3가지 적색형광염료를 대상으로 흡수 및 방출거동을 조사하여 형광염료의 기본적인 형광특성을 확인하였으며 또한 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 대한 여러 가지 조건별 염색성과 형광염료가 섬유에 적용되었을 때 나타나는 형광발현의 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 시료 및 시약

실험에 사용한 섬유는 휴비스에서 제공된 고분자량 폴리에틸렌계 섬유를 편직(340g/m²)한 후 일반적인 조건으로 정련하여 사용하였다. 적색형광염료의 선별에 있어서는 상용화되어 있는 초소수성 염료들 중에서 화학구조 확인을 통해 소수성이 충분하다고 판단되는 3가지 적색형광염료를 선정하였으며 본 실험에서는 편의상 Fluoro Red 1, Fluoro Red 2, Fluoro Red 3라고 명명하였다. 3종의 초소수성 적색형광염료의 화학구조는 Figure 1에 나타내었다.

염료의 분산을 위해서는 비이온계 면활성제인 Tween20을 사용하였으며, 나머지 실험에 사용된 시

약들은 모두 함량 97% 이상의 고순도 시약들이 사용되었다.

2.2 적색형광염료의 광학적 특성 분석

적색형광염료 3종의 형광발광특성을 분석하기 위해 Fluorescence spectrometer(Scinco FS-2)를 사용하여 파장별 흡수 및 방출 거동을 측정하였다. 방출 스펙트럼을 확인하기 위한 excitation 파장은 각 염료의 최대흡수파장으로 하였고 광학적 특성분석에서 염료의 용해를 위해 사용된 용매는 DMF(N,N-dimethylformamide)였다.

2.3 적색형광염료의 분산 및 염색

실험에 사용된 초소수성 적색형광염료들은 당연히 비수용성이며 기존의 분산염료의 염색메커니즘을 따른다고 생각되므로 다음과 같은 방법으로 분산시켜 사용하였다. 먼저 3종의 적색형광염료의 염착성과 섬유상에서의 형광강도 비교를 위해 다음과 같은 조건으로 염액을 제조하고 염색하였다.

분산제로 사용된 Tween20 10.0g에 염료 0.02g (2% owf)의 염료를 혼합한 후 약 90℃ 정도로 가열하여 염료를 용해시킨다. 여기에 적당량 증류수를 첨가하여 용비 1:100이 되도록 조절하고 상온에서 10분간 교반하여 염료분산액을 제조한다. 1.0g의 고분자량 폴리에틸렌 섬유를 염액에 넣은 후 밀폐하고 70℃에서 2℃/min의 속도로 승온한 후 125℃에서 1시간 동안 염색하고 냉각하였다. 염색이 종료된 후 100ml의 아세톤으로 30초간 세정을 6~7회 실시하여 표면에 단순 흡착된 염료를 모두 제거하였다. 많은 선행연구의 결과에 의하면 아세톤 세정법이 환원세정에 비해 비교적 편

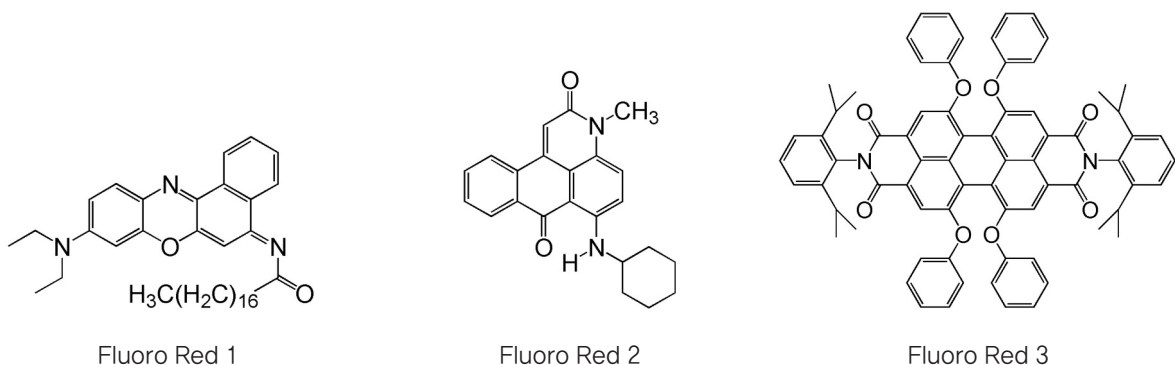


Figure 1. Chemical structure of super hydrophobic fluorescence red dyes used in this study.

리하고, 결과물의 성능에는 큰 차이가 없는 것으로 확인하였다⁷⁻¹⁰.

2.4 최적의 적색형광염료 선정 후 조건별 염색실험

2.3의 실험을 통해 3종의 적색형광염료 중 Fluoro Red 3이 섬유상에서의 형광강도가 가장 높게 측정되었다. 그래서 Fluoro Red 3을 최적의 염료로 선정하고 적정 염색조건을 확립하기 위해 분산제농도, 염색온도, 염색시간, 염료농도 등의 조건을 달리하여 실험을 진행하였다. 분산제 농도별 실험에서는 염료농도 1% owf, 125℃, 1시간의 염색조건을 고정한 후에 분산제 농도를 2~30%로 다르게 하여 실험을 진행하였다. 온도별 염색에서는 분산제의 농도 10%와 염료농도 1% owf로 고정한 후 염색온도를 100~125℃로 변화시켜 가며 1시간 염색을 실시하였다. 염색시간에 따른 실험에서는 분산제 농도 10%와 염료농도 1% owf를 고정한 후 염색온도 125℃에서 10~180분 염색을 하였으며, 염료농도별 실험에서는 분산제 농도 10%, 염색온도 125℃, 염색시간 1시간 조건을 고정하고 염료농도를 1~30% owf로 달리하여 염색하였다. 염색 후 세정 조건은 앞의 경우와 마찬가지로 100ml의 아세톤으로 30초간 세정을 6~7회 실시하여 표면에 단순 흡착된 염료를 모두 제거하였다.

2.5 염색물의 측색 및 형광강도 측정

적색형광염료로 염색된 섬유의 색상강도 측정을 위해 측색기(Konica-Minolta spectrophotometer CM-360d)를 사용하여 일반적인 겉보기 색상강도의 척도로 사용하는 K/S로 나타내었다. 파장범위는 360~740nm였으며 D65광원으로 10도 시야로 측정되었다. 염색물의 형광강도 측정을 위해서는 Fluorescence spectrometer(Scinco FS-2)를 사용하여 excitation을 위한 조사 광원에 대해 40도의 각도에서 형광발광강도를 측정하였고, 이 경우에도 excitation 파장은 각 염료의 최대흡수파장으로 하였다. 조사광원에 대해 40도의 각도에서 형광발광강도를 측정하는 이유는 선행연구 등을 통해 40도 각도에서 형광발광강도가 가장 높게 측정되었기 때문이다¹¹.

2.6 견뢰도 조사

최적염료로 선정된 Fluoro Red 3의 최대형광발광

강도를 나타내는 조건에서 염색된 고분자량 폴리에틸렌 섬유의 세탁(KS K ISO 105-C06 A1S:2014), 마찰(KS K ISO 105-X12:2016), 일광견뢰도(KS K ISO 105-B02:2015)를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초소수성 적색형광염료 3종의 광학적 특성 분석

형광염료의 광학적 특성을 분석하기 위해 형광의 기본적인 거동을 나타내는 흡수-방출 스펙트럼을 관찰하였다. 일반 유색 염료와는 다르게 형광염료는 빛을 흡수한 후 다시 스스로 빛을 내놓는 현상이 나타난다. 빛 에너지의 흡수에 의해 염료분자는 ground state에서 excited state로 들뜨게 되는데 이때 흡수한 에너지를 빛의 형태로 다시 방출하게 되면서 ground state로 되 돌아오게 된다. 여기서 방출한 빛 에너지는 원리적으로 흡수한 빛 에너지보다 작으므로 방출한 빛 에너지의 파장은 흡수한 빛 에너지의 파장보다 길어야 한다. 이를 Stokes' law라고 하고, 흡수한 빛의 파장과 방출한 빛의 파장 차이를 Stokes' shift라 정의한다¹²⁻¹⁵.

3종의 초소수성 적색형광염료의 경우에도 흡수-방출시에 발생하는 Stokes' shift를 관찰하였다.

Figure 2에서 보는 바와 같이 3종의 염료 모두 정상적인 흡수-방출 거동을 보였으며, Fluoro Red 1의 경우는 약 140nm, Fluoro Red 2는 약 80nm, Fluoro Red 3의 경우에는 약 40nm의 shift를 보여 3종의 염료 중에서 Fluoro Red 1이 상대적으로 큰 Stokes' shift를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 고분자량 폴리에틸렌 섬유에서의 형광강도와 최적 형광염료 선정

형광염료 염색의 경우 염착량이 높다고 해서 반드시 형광강도가 비례해서 높다고 할 수 없다. 일반적인 유색염료의 경우 염착량이 높을수록 빛의 흡수량이 높아지고 반사율이 낮아져 염색물의 겉보기 색상강도가 높아지게 된다. 형광염색의 경우에는 염착량이 높아짐에 따라 염색물의 형광강도가 증가하다가 일정 수준의 염착량을 넘어서면 오히려 형광강도가 낮아지는 경향을 보이게 되는데 그 이유는 형광염료의 염착량이 과도하게 높아질 경우 형광염료 분자들이 방출한 빛을 인접한 주위의 다른 염료분자가 재흡수하거나, 형광염료의 여

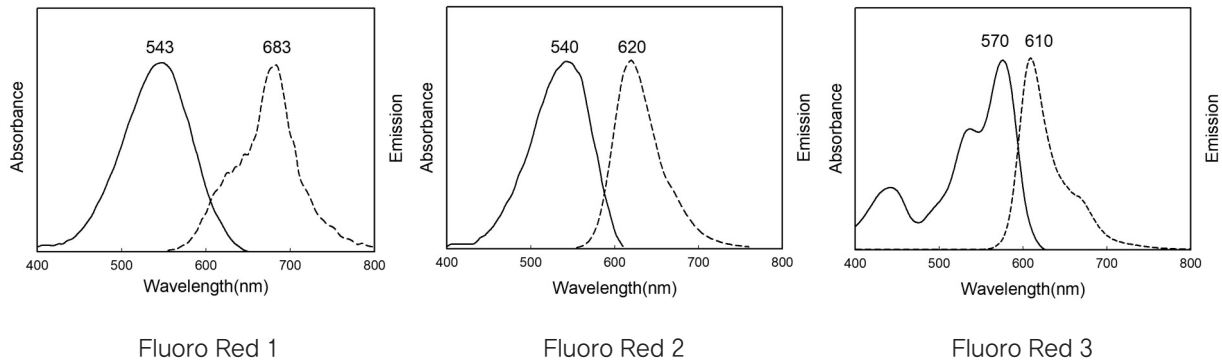


Figure 2. Absorbance and emission spectra of super hydrophobic fluorescence red dyes.

기에너지가 섬유고분자로 전이됨에 따라 열적진동에너지로 전환될 수 있기 때문인데, 이러한 현상으로 인해 형광강도가 오히려 감소하게 되고 이를 자기소광 현상으로 이해하고 있다¹⁶⁾.

본 실험에 사용된 3종의 적색형광염료의 화학적 구조를 보면, Fluoro Red 1은 긴 alkyl chain을 가지고 있으며 Fluoro Red 2의 경우 cyclohexyl group를 가지고 있다. 또한 Fluoro Red 3의 경우에도 perylene계 색소모체에 iso-propyl group과 phenyl group이 다수 포함되어 있어 3종의 염료 모두 높은 소수성을 나타냄으로써 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 친화력이 양호할 것으로 기대된다. 염착성을 조사하기 위해 염료 농도 2% owf 조건으로 125℃에서 1시간 동안 염색을 하여 파장별 겉보기 색상강도인 K/S와 형광강도를 조사하였다.

Figure 3에서 보는 바와 같이 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 대한 염착량(K/S)은 3종 모두 예상보다 낮은 수준이었으나 형광특성은 섬유상에 염색된 후에도 여전히 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 예비실험을 통해

보다 다양한 형광염료들을 대상으로 조사한 바에 따르면 고분자량 폴리에틸렌 섬유상에 염색된 후에는 형광발광특성이 대부분 사라지는 심각한 자기소광현상이 관찰되었으나 본 실험에서 사용된 3종의 적색형광염료는 일단은 섬유상에 염색이 된 후에도 형광발광특성이 어느 정도는 유지되는 것으로 확인되었다. 3종의 염료 중에서 Fluoro Red 3이 Fluoro Red 1과 Fluoro Red 2에 비해 상대적으로 형광발광강도가 높은 것으로 확인되었으며 따라서 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 적용 가능성이 높은 염료로서 Fluoro Red 3을 본 실험에서는 최적염료로 결정하였다.

3.3 Fluoro Red 3의 조건별 염색 및 형광강도

앞선 3.2 실험을 통해 3종의 염료 중 형광강도가 상대적으로 강하게 나타난 염료로 Fluoro Red 3를 선정하였으므로, 이 염료에 대해 분산제농도, 염색온도, 염색시간, 그리고 염료농도의 네 가지 조건을 각각 달리 하여 최적염색조건을 확립하였다.

Fluoro Red 3는 비수용성이기 때문에 염료의 분산

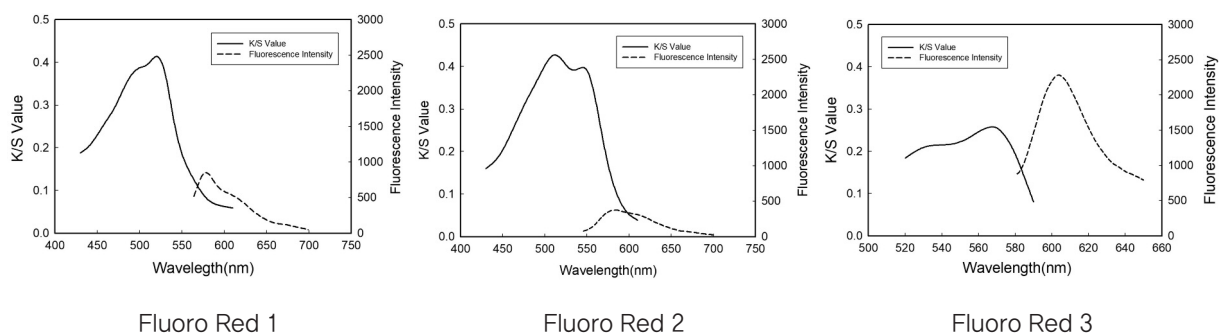


Figure 3. Color strength(K/S) and fluorescence intensity of the super hydrophobic fluorescence red dyes on the HMWPE fiber.

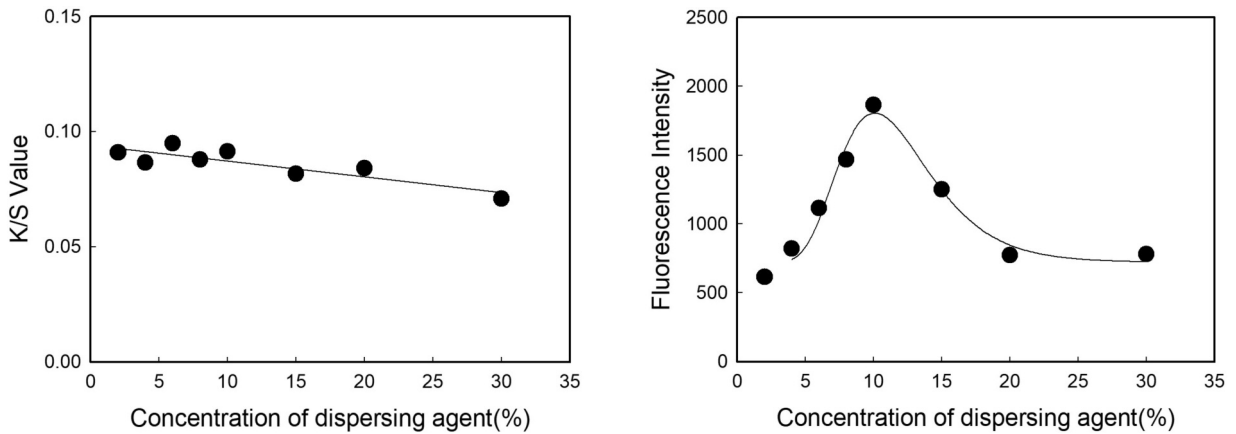


Figure 4. Color strength(K/S at λ max) and fluorescence intensity of the Fluoro Red 3 on HMWPE fiber at 125°C for 1 hour according to the concentration of dispersing agent.

상태에 따라 염색성에 많은 영향을 받으므로 분산제의 농도를 조절하는 것이 중요하다. 분산제 농도별 염색실험의 결과 K/S의 경우에는 분산제의 농도가 증가함에 따라 K/S가 완만하게 감소하는 경향이 나타났으나 형광강도에 있어서는 10%의 분산제 농도까지는 급격하게 증가하다가 그 이상의 분산제 농도에서는 다시 급격하게 형광강도가 감소하는 거동을 보이고 있다(Figure 4). 이러한 경향을 보이는 이유는 분산제의 농도가 증가함에 따라 염료의 염욕에서의 분산안정성이 높아 섬유로 이동 및 침투하려는 경향이 다소 낮아진 결과라고 생각된다.

그러나 형광발광특성의 경우에는 10%의 분산제 농도를 기준으로 그 이하의 농도에서는 염료의 분산성이 부족하여 섬유내부에서도 염료가 회합된 상태로 다수

존재하여 자기소광현상이 발생함으로써 형광강도가 약해진 것으로 생각되며, 10% 이상의 분산제 농도에서는 섬유상에 염착된 염료량 자체가 부족하기 때문으로 생각된다. 따라서 최적 분산제의 농도는 10%로 결정하였다.

고분자량 폴리에틸렌 섬유는 결정성이 아주 큰 극소수성의 섬유로서 폴리에스테르 섬유와 같이 고온에서 충분한 염료의 침투가 일어난다. 따라서 최적의 염색온도를 조사하기 위해 100, 110, 120, 125°C로 온도를 변화시켜가며 1시간동안 염색하였으며 그 결과를 Figure 5에 나타내었다.

Figure 5에 의하면 온도가 증가할수록 K/S가 증가하였으며, 형광강도는 크지는 않으나 온도에 따라 다소 증가하는 경향을 보이는 것으로 조사되었다. 최고염색

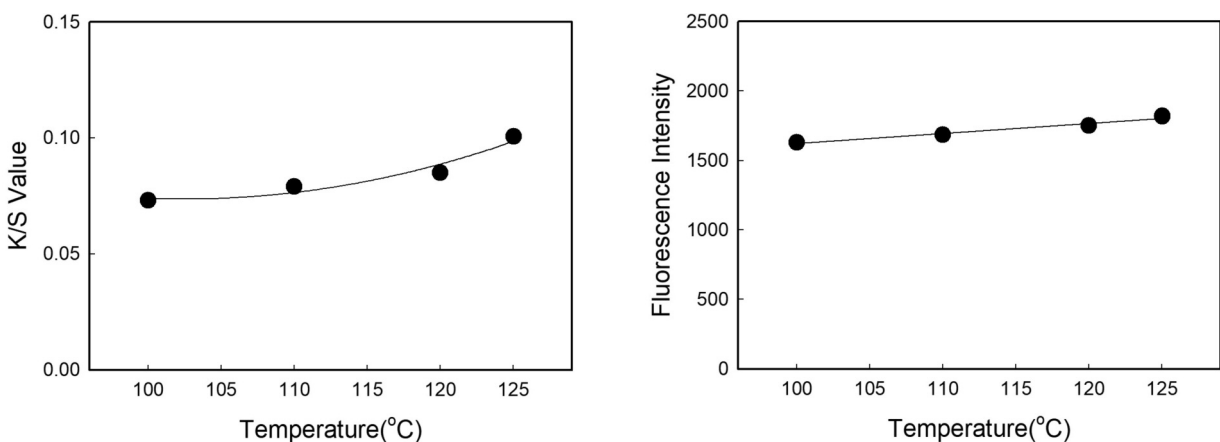


Figure 5. Color strength(K/S at λ max) and fluorescence intensity of the Fluoro Red 3 on HMWPE fiber according to the dyeing temperature for 1 hour.

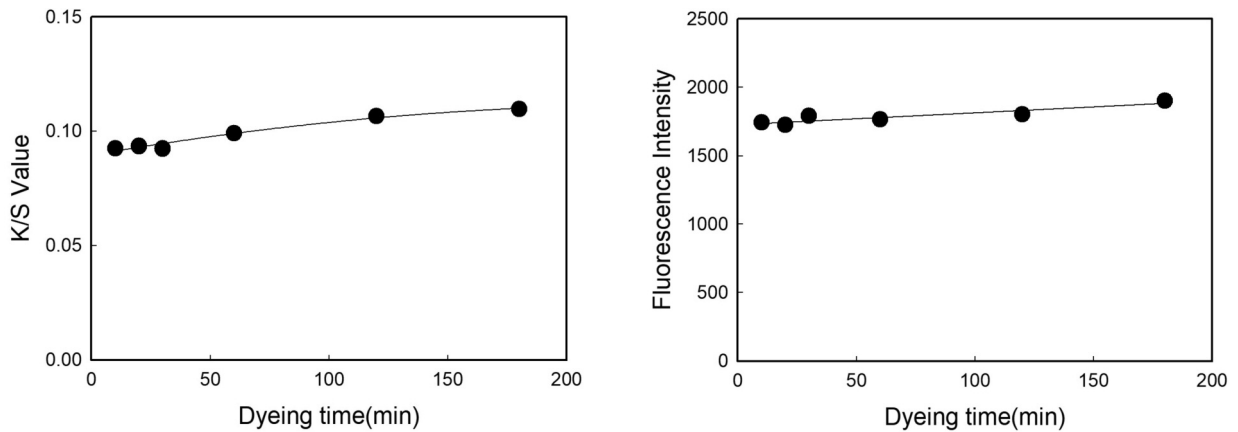


Figure 6. Color strength(K/S at λ max) and fluorescence intensity of the Fluoro Red 3 on HMWPE fiber at 125°C according to the dyeing time.

온도를 130°C가 아닌 125°C로 한 이유는 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 염색의 경우 내열성이 부족하여 130°C의 온도에서 일부 변형이 발생하는 것이 관찰되었으며 125°C에서는 변형이 일어나지 않았기 때문이다. 따라서 125°C를 본 실험의 최적염색시간으로 결정하였다.

최적염색시간을 결정하기 위해 최대 3시간까지 시간을 변화시켜가며 염색하였다(Figure 6). 125°C에서의 염색속도는 상당히 빠른 것으로 보이며 불과 20~30분 정도만에 사실상 평형에 가까운 염착량을 보이지만 균염을 위해서 일반적인 경우와 마찬가지로 1시간을 염색시간으로 결정하였다.

Figure 7의 염료농도에 따른 염착성과 형광강도의 실험에서는 염료농도 약 5% owf까지는 염착량과 형광강도가 급격히 증가하다가 그 이상의 농도에서는 완만한 경향을 보이며 10% owf농도에서 최대염착량을 보

였다. 형광염색의 경우 염착량이 과도하게 증가함에 따라 나타나는 자기소광에 의한 형광강도감소는 본 실험에서는 관찰되지 않았다. 그 이유는 본 실험에 사용된 Fluoro Red 3의 고분자량 폴리에틸렌 섬유에 대한 염착량이 크게 높지 않아 자기소광에 이를 만큼의 염료가 섬유내부에 염착되지 않았기 때문으로 생각된다.

3.4 고분자량 폴리에틸렌 섬유상에서 Fluoro Red 3의 견뢰도

선정된 Fluoro Red 3 형광염료를 사용하여 최대형광강도로 염색된 고분자량 폴리에틸렌 섬유의 세탁, 마찰, 일광견뢰도가 각각 조사되었다.

Table 1에 의하면 Fluoro Red 3 형광염료 구조 내의 iso-propyl group과 phenyl group의 초소수성, 그리고 염료의 분자크기가 큰 특성으로 인해 일단 섬유에 염착된 염료의 경우에는 사실상 거의 빠져나오지 않

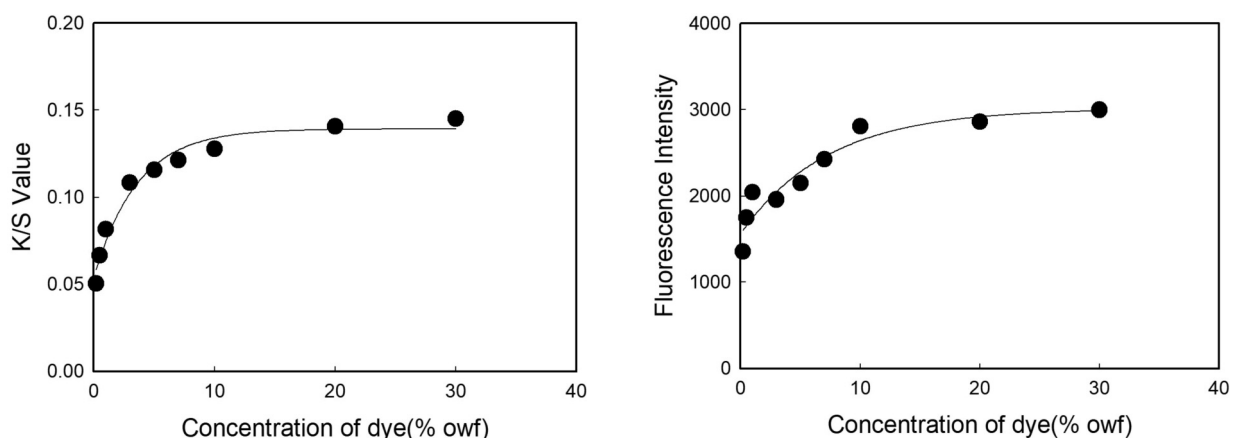


Figure 7. Color strength(K/S at λ max) and fluorescence intensity of the Fluoro Red 3 on HMWPE fiber at 125°C for 1 hour according to the concentration of dye.

Table 1. Color fastness of the HMWPE fiber dyed with the Fluoro Red 3 at 125°C for 1 hour

Color fastness		Ratings	
	Change in color	4-5	
Washing	Staining	Acetate	4-5
		Cotton	4-5
		Nylon	4-5
		PET	4-5
		Acrylic	4-5
		Wool	4-5
Rubbing	Staining	Dry	4-5
		Wet	4-5
Light	Change in color	2-3	

아 세탁과 마찰견뢰도는 4-5급으로 아주 우수한 결과를 보였다. 그러나 일광견뢰도의 경우에는 2-3급으로 다소 부족한 결과를 보이고 있다.

관련한 선행연구의 결과에서 알 수 있었던 바에 의하면 우수한 내광특성을 보이는 염료라 하더라도 폴리프로필렌이나 폴리에틸렌 섬유와 같은 폴리올레핀 섬유에 염색이 되면 일광견뢰도가 낮아지는 양상을 보였는데 이는 다양한 이유가 있을 수 있으나 그 중에서도 폴리올레핀 섬유자체의 광흡수 특성도 영향을 끼치는 것으로 생각된다. 대부분의 다른 섬유에 비해 폴리올레핀계 섬유는 일광견뢰도에 영향을 끼치는 자외선을 흡수할 π -결합이나 비공유전자쌍이 존재하지 않음으로써 조사되는 자외선이 섬유내부에 염착된 염료분자에 그대로 전해지기 때문으로 생각된다. 그러나 이 부분에 있어서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

고분자량 폴리에틸렌 섬유의 형광염색을 위해 3종의 초소수성 적색형광염료를 선정하였고, 이들 염료의 흡수-방출 스펙트럼을 조사하였다. 염료의 광학적 특성으로는 Fluoro Red 1, 2, 3의 3종의 염료가 모두 정상적인 흡수-방출 거동을 보였으며, Fluoro Red 1이 상대적으로 다소 큰 Stokes' shift를 보이고 있음을 확인하였다. 3종의 염료로 고분자량 폴리에틸렌 섬유를 염색하여 형광강도를 조사한 결과, Fluoro Red 3이 가장 형광강도가 높아 Fluoro Red 3을 본 실험에서는

최적염료로 선정하였다. Fluoro Red 3의 최적 염색 조건을 확립하기 위해 분산제 농도별, 온도별, 염색시간별, 염료농도별로 실험을 진행하였으며 그 결과 분산제 농도 10%, 염료농도 10% owf에서 염색온도와 시간이 125°C, 1시간일 때 최적의 염색조건임을 확인하였다. 세탁과 마찰견뢰도는 4-5급으로 우수하였으며, 일광견뢰도는 2-3급의 결과를 나타내었다.

References

1. J. U. Choi, M. H. Jee, M. H. Lee, J. S. Lee, and D. H. Baik, Structure and Property Relations in Heat-treated para-Aramid Fibers, *Textile Science and Engineering*, **47**(1), 15(2010).
2. H. J. Lee, J. S. Won, S. C. Lim, T. S. Lee, J. Y. Yoon, and S. G. Lee, Preparation and Characterization of PAN-based Carbon Fiber with Carbonization Temperature, *Textile Science and Engineering*, **53**(2), 103(2016).
3. H. E. Khaljiri, R. E. Farsani, and K. A. Banaie, The Evaluation of the Thermal and Mechanical Properties of Aramid/Semi-Carbon Fibers Hybrid Composites, *Fibers and Polymers*, **18**(2), 296(2017).
4. L. Yao, C. Lee, and J. Kim, Fabrication of Electrospun meta-Aramid Nanofibers in Different Solvent Systems, *Fibers and Polymers*, **11**(7), 1032(2010).
5. M. An, H. Xu, Y. Lv, Q. Gu, and Z. Wang, Structural Difference of Gel-spun Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Fibers Affected by Cold Drawing Process,

- Fibers and Polymers*, **18**(3), 549(2017).
6. M. Bartusch, R. D. Hund, H. Hund, and C. Cheri, Surface Functionalisation of UHMW Polyethylene Textile with Atmospheric Pressure Plasma, *Fibers and Polymers*, **15**(4), 736(2014).
 7. S. J. Kim, D. Kwak, and Y. Chae, Coloration of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fibers Using Alkyl-substituted Anthraquinoid Blue Dyes, *Fibers and Polymers*, **13**(2), 212(2012).
 8. D. Kwak and T. Kim, Dyeing of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fibers with Diaminoanthraquinoid Blue Disperse Dyes Having Linear Long Alkyl Substituents, *Textile Coloration and Finishing*, **24**(3), 180 (2012).
 9. N. Jo, J. Lee, and T. Kim, Synthesis of Bluish-green Dyes for Pure Polyolefin Fibers, *Textile Coloration and Finishing*, **28**(3), 156(2016).
 10. T. Kim and M. Ryu, Synthesis of Super Hydrophobic Orange Dyes Having Maximum Absorption at 450-500nm for Pure Polyolefin Fibers, *Textile Coloration and Finishing*, **26**(3), 165(2014).
 11. T. Kim, J. Park, J. Lee, and T. Kim, Dyeing of High Strength and High Molecular Weight Polyethylene Fiber Using Super Hydrophobic Fluorescence Dyes, *Textile Coloration and Finishing*, **29**(4), 223(2017).
 12. H. Zollinger, "Color Chemistry", Wiley-VCH, Weinheim, pp.34-37, 2003.
 13. J. Yanga, X. Wang, X. Wang, and L. Xu, The Synthesis and Spectral Properties of Novel 4-phenylacetylene-1,8-naphthalimide Derivatives, *Dyes and Pigments*, **66**, 83(2005).
 14. C. Jianzhong, H. Suh, and S. Kim, Synthesis and Properties of Conjugated Copolymers with 2-pyran-4-ylidene Malononitrile, *Dyes and Pigments*, **68**, 75(2006).
 15. O. Oter, K. Ertekin, C. Kirilmis, M. Koca, and M. Ahmedzade, Characterization of a Newly Synthesized Fluorescent Benzofuran Derivative and Usage as a Selective Fiber Optic Sensor for Fe(III), *Sensors and Actuators B*, **122**, 450(2007).
 16. J. R. Lakowicz, J. Malicka, S. Dauria, and I. Gryczynski, Release of the Self-quenching of Fluorescence Near Silver Metallic Surfaces, *Analytical Biochemistry*, **320**, 13(2003).

Authors

- | | |
|-----|------------------------|
| 김태건 | 경북대학교 섬유시스템공학과 석사과정 학생 |
| 이준현 | 경북대학교 섬유시스템공학과 박사과정 학생 |
| 박지훈 | 경북대학교 섬유시스템공학과 석사과정 학생 |
| 김태경 | 경북대학교 섬유시스템공학과 교수 |