

## 초임계 유체 염색기술 적용 PET 섬유의 물리적 및 열적 특성 분석

# A Study of Physical and Thermal Properties of Dyed PET Fiber using Supercritical Fluid Dyeing Technology

### \*Corresponding author

Jaewoong Lee  
(jaewlee@yu.ac.kr)

김삼수, 오지연, 박창표, 이상오<sup>1</sup>, 이재웅\*

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

**Sam Soo Kim, Jiyeon Oh, Changpyo Park, Sang Oh Lee<sup>1</sup> and Jaewoong Lee\***

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

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

Received\_September 04, 2019  
Revised\_September 09, 2019  
Accepted\_September 18, 2019

### Textile Coloration and Finishing

TCF 31-3/2019-09/147-154

©2019 The Korean Society of

Dyers and Finishers

**Abstract** In this study, poly(ethylene terephthalate)(PET) fibres dyed with Disperse Red 167 using supercritical CO<sub>2</sub> technology. The purpose of this study was to investigate relationship between PET fibers and supercritical CO<sub>2</sub> during dyeing. The effects of temperature, pressure, dyeing time and mass ratio between the dye and PET in the dyeing chamber were considered. Thermal and mechanical properties of the fibers were investigated. Tensile strength of dyed PET fibers decreased at higher temperature and pressure conditions. DSC and DMA results indicated that the T<sub>g</sub> and T<sub>m</sub> values decreased significantly when compared to the pure PET fibers. However, uniformly dyed PET fibers were typically observed.

**Keywords** carbon dioxide, supercritical fluid, dyeing, environmental friendly, PET fiber

## 1. 서 론

최근 산업 전반에 걸쳐 환경 및 에너지 소비에 대한 관심이 꾸준히 증가 되고 있으며 이러한 경향에 따라 섬유산업에서도 환경오염을 최소화하고 에너지 소비, 독성 물질 배출이 없는 기술 개발에 관심이 높아지고 있다<sup>1)</sup>. 환경 문제의 관점에서 염색 산업에서 물의 소비를 감소시키기 위한 노력들은 세계적으로 많이 연구되고 있다. 국내 또한 환경 규제에 대한 요구가 급증하고 있으며, 특히 폐수 배출에 대한 규제가 강화되고 있어서 염색공정에서 발생하는 폐수 처리 문제에 대한 기술 개발 및 연구가 활발히 진행 중이다<sup>2-4)</sup>.

대표적인 합성섬유인 폴리에스테르와 같은 소수성 섬유 염색에 사용되는 분산염료의 경우 실제 염색과정에서 분산제, 계면활성제 등을 필요로 하며 그에 따른 폐수처리 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 개선

하고자 염색가공에서 물을 전혀 사용 하지 않는 기술로 초임계 유체 염색기술에 대한 관심이 급증하고 있다<sup>5)</sup>. 초임계 유체 염색은 기존의 수계 염색과는 달리 에너지 소비를 줄일 수 있고 용매(CO<sub>2</sub>)와 염료 이외에 분산제와 계면활성제 등과 같은 화학약물이 사용 되지 않아 염색 후에도 용매인 CO<sub>2</sub>는 90% 이상 다시 회수 하여 재활용이 가능하다는 여러 가지 큰 장점을 가지고 있다<sup>4,6,7)</sup>.

CO<sub>2</sub> 초임계 유체 염색에 대한 최초의 연구는 독일의 Shollmeyer 교수팀이며, PET(polyethylene terephthalate)섬유를 anthraquinone type 분산염료를 사용하여 CO<sub>2</sub> 초임계 유체 염색을 실시하였고 단시간에 염색이 이루어지며, 우수한 견뢰도를 얻었다<sup>5,8)</sup>. 이러한 초임계 염색기술을 적용하기 위한 초임계 염색 장비의 개발은 꾸준히 진행 중에 있으며, 상업용으로 개발에 성공한 회사는 DyeCoo社이다<sup>9)</sup>.

한편, 초임계 유체는 임계점의 온도와 압력 이상에서

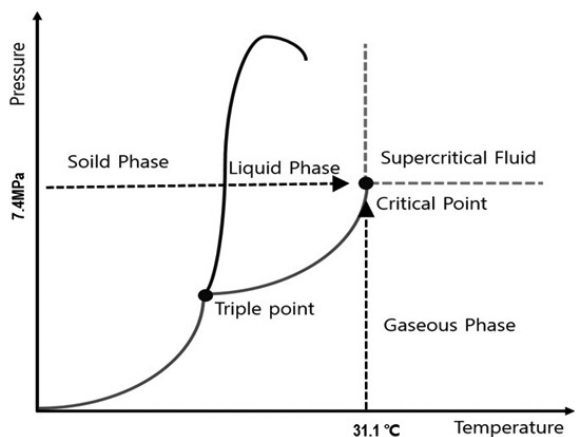


Figure 1. Phase diagram of supercritical fluid of CO<sub>2</sub>.

존재하는 상태로 고체-기체-액체 외의 상으로 Figure 1과 같이 물질마다 일정 온도 압력에서 Critical point 이상이 되면 기체와 액체의 성질을 모두 가지게 된다<sup>10)</sup>. 초임계 유체는 기체의 점도, 확산계수 및 밀도가 액체와 비슷하여 액체용매와 유사한 용해도를 가진다. 초임계 유체는 온도와 압력을 조절하여 용해도 증가 및 감소가 가능하며, 임계 온도 31.1°C, 임계 압력은 7.4MPa로 상온 부근에서 초임계 상태인 CO<sub>2</sub>를 염료의 용매로 사용할 경우 용매의 역할을 충분히 발휘하게 된다<sup>11,12)</sup>. 초임계 유체는 열전도도 또한 높게 나타나며, 특별히 표면장력이 없고 압축특성도 높게 나타난다<sup>13)</sup>. 또한 CO<sub>2</sub> 초임계 유체는 강한 소수성 성질을 가지므로 소수성성질을 가지는 분산염료를 사용하여 염색할 경우 수계 염색에서 사용되는 분산제가 필요치 않으며 초임계 염색 후 남은 잔량 염료는 순수 염료로 다시 회수가 가능하다<sup>9,14)</sup>.

수계염색 방법과 유사하게 초임계 유체 염색방법은

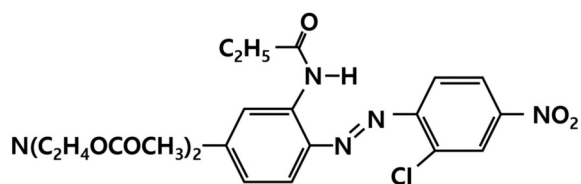


Figure 2. Dyes chemical structure of C.I. Disperse Red 167.

CO<sub>2</sub>에 녹은 염료가 고온에서 팽윤된 섬유의 비결정영역에 흡착 및 확산되어 비결정영역 속으로 염료가 들어가고 염색 온도가 감소하면 팽윤이 감소되고 비결정영역에 염료가 갇히면서 염색이 된다고 알려져 있다<sup>11-17)</sup>. 앞선 초임계유체 염색 조건에 따른 PET 섬유의 염색 특성에 관한 선행 연구에서는 온도와 압력 및 균염시간이 증가할수록 농색으로 염색이 되며 염료의 염착량이 증가하였다. 이를 통해 초임계 염색의 이상적인 조건을 염색 온도 120°C, 압력 250bar, 균염시간 60-100min으로 제시하였다<sup>15)</sup>.

지금까지의 초임계 유체 염색 연구는 염색성 평가에 집중되어 있었으나 본 연구에서는 실험실용 초임계 유체 염색기를 사용하여 염색한 PET(Polyethylene terephthalate) 섬유의 초임계 염색 전/후 염색조건에 따른 물성변화를 물리적, 열적 특성 중심으로 고찰하고 이들 특성을 분석하고 알아보는 것을 목표로 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

초임계 유체 염색 실험에서의 용매로 사용된 CO<sub>2</sub>는 99.9%의 순도를 사용 하였으며, Table 1에서와 같이 시

Table 1. Specification of sample and equipment

Pretreatment	Specification
Film sample	Polyethylene terephthalate 100% thickness: 0.1mm, size: 210×297mm (Lami, Ace)
Filament sample	Polyethylene terephthalate 100% 2000denier/500filament 3g (Kolon korea)
Equipment	Supercritical Fluid Lab. Dyeing Machine (Pot volume 200mL, Daejoo Machinery)

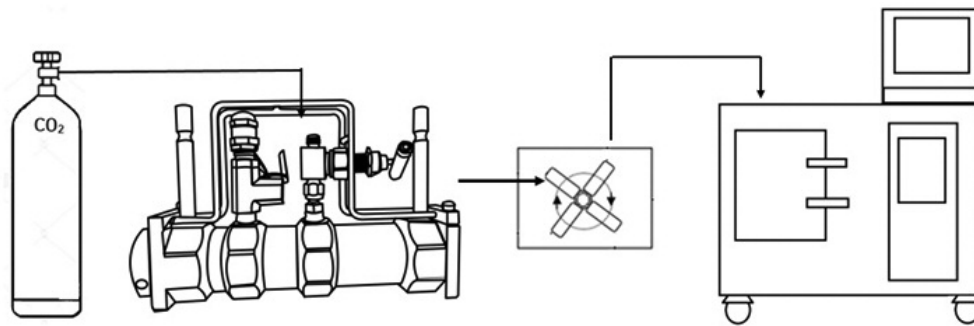


Figure 3. Supercritical fluid dyeing machine of laboratory scale.

료는 Polyester filament와 PET film을 사용하였다.

염료는 Figure 2와 같이 (주)아크로마코리아(Korea)로부터 공급받아서 0.5% o.w.f. 농도로 염색을 하였다<sup>15)</sup>.

## 2.2 실험 방법

연구 진행에 있어서 실험조건은 PET의 Tg, 분산염료의 용해도, 흡광도 및 세탁견뢰도를 고려하여 120℃, 250bar, 60min으로 실험을 진행하였다<sup>15-21)</sup>.

실험설비는 (주)대주기계(Korea)에서 자체 개발한 pot와 oil-bath를 사용하였다(Figure 3).

Pot 속에 PET knit, PET filament 및 시료의 마찰손상을 방지하기 위한 cotton 순으로 감은 carrier를 넣고 0.5% o.w.f.의 C.I. Disperse Red 167 및 CO<sub>2</sub>

순환을 용이하게 해주는 쇠구슬을 넣어주었다. NTIS Isothermal Data를 활용하여 CO<sub>2</sub> 온도와 밀도에 따른 압력 그래프 값을 이용하여 주입량을 계산 후 CO<sub>2</sub>를 주입 하였으며 CO<sub>2</sub>주입이 끝난 pot를 oil-bath를 이용해 열을 가해 pot 속의 압력이 증가하면 실험 조건에 맞는 온도와 압력에서 PET의 초임계 유체 염색이 되도록 하였다.

실험 조건은 온도 압력 균염시간 별 Table 2, Table 3, Table 4에 나타내었다<sup>11)</sup>.

CO<sub>2</sub> 초임계 유체 염색 조건 별 PET filament의 물성 변화를 측정하고 고분자 재료의 기계적 특성을 알기 위해 힘에 따른 시편의 기계적 특성을 확인 하였다. 초임계 유체 CO<sub>2</sub> 염색 전후 시편의 유리전이온도(Tg.

Table 2. Supercritical fluid CO<sub>2</sub> dyeing conditions according to the applied temperature

Temperature (°C)	PET knit weight (g)	PET filament weight (g)	Wrap cotton weight (g)	CO <sub>2</sub> Density (g/ml)	CO <sub>2</sub> amount of injection (g)	Pressure (bar)	Leveling time (min)
100	3	3	1.3	0.58	103.0	250	60
120				0.50	88.8		
130				0.47	83.5		
140				0.44	78.1		

Table 3. Supercritical fluid CO<sub>2</sub> dyeing conditions according to the applied pressure

Pressure (bar)	PET knit weight (g)	PET filament weight (g)	Wrap cotton weight (g)	CO <sub>2</sub> Density (g/ml)	CO <sub>2</sub> amount of injection (g)	Temperature (°C)	Leveling time (min)
100	3	3	1.3	0.16	28.4	120	60
150				0.28	49.7		
200				0.40	71.0		
250				0.50	88.8		

**Table 4.** Supercritical fluid CO<sub>2</sub> dyeing conditions according to the dyeing time

Dyeing time (min)	PET knit weight (g)	PET filament weight (g)	Wrap cotton weight (g)	CO <sub>2</sub> Density (g/ml)	CO <sub>2</sub> amount of injection (g)	Temperature (°C)	Pressure (bar)
50							
60							
80	3	3	1.3	0.5	88.8	120	250
100							

Glass transition temperature)의 변화를 확인하기 위해 시차주사열량분석으로 유리전이온도(Tg)를 측정하였다. 시료는 초임계 유체 CO<sub>2</sub> 염색한 PET film(두께: 0.1mm) 및 filament 시편을 사용하였다. 용융점(Tm)의 변화를 확인하기 위해서 CO<sub>2</sub> 초임계 유체 염색한 PET film에 주기적인 stress를 가하여 시료에 변형으로써 modulus와 damping특성을 측정하는 동적 점탄성 분석 장치(Dynamic mechanical analyzer)를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 인장강도 측정

PET 섬유의 염색 조건에 따른 물리적 성질을 확인하기 위하여 온도, 압력, 시간을 달리하여 염색한 PET filament에 대하여 인장강도를 측정하였다. 또한 초임계 염색공정 시 PET 고분자의 물성변화에 초임계 CO<sub>2</sub> 및 염료가 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 염료를 넣지 않고 초임계 CO<sub>2</sub>에 처리한 filament와 염료를 넣고 염색한 filament를 각각 비교하였다. 그 결과는 Figure 4~Figure 6에 나타내었다.

##### 3.1.1 염색 온도에 따른 인장강도 비교

Figure 4는 어떠한 처리도 하지 않은 PET filament(control)와 염색 온도 각각 100°C, 120°C, 130°C 및 140°C에서 염색한 PET filament의 인장강도를 측정된 결과를 나타내었다.

Control 시료의 인장강도는 8g/d였으나 CO<sub>2</sub> 초임계 유체로 염색한 시료의 인장강도는 이보다 감소하는 것으로 확인되었다. 구체적으로 100°C에서 염색한 시료와 120°C에서 염색한 시료는 인장강도가 거의 유사한 결과를 보였으나 130°C이상에서는 7.5g/d로 감소

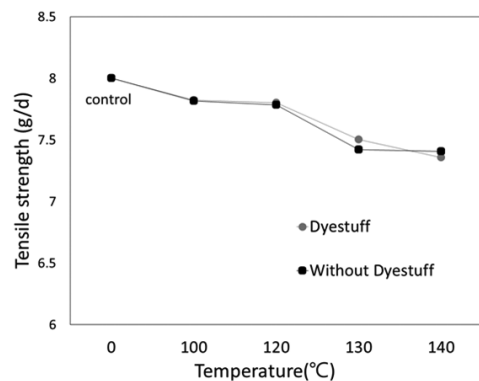
하는 결과를 나타내었다.

이를 근거로 볼 때, CO<sub>2</sub> 초임계 염색에서 온도가 증가할수록 PET filament의 인장강도는 일부 감소가 일어나는 것을 알 수 있다.

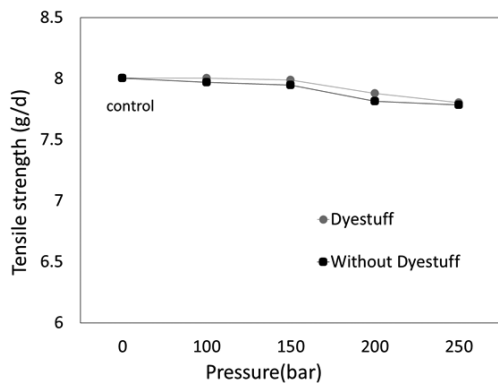
온도별로 염료를 넣지 않고 처리한 시료와 염료를 넣고 염색한 시료 각각의 결과를 보았을 때 120°C까지는 유사한 값을 보였으나, 130°C에서는 염료를 넣고 염색한 시료가 염료를 넣지 않은 시료보다 인장강도에서 높은 값을 보였다. 반면 140°C에서는 염료를 넣고 염색한 시료의 값이 더 낮음을 알 수 있다. 이를 통해 보았을 때 온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하는 것을 알 수 있었다. 다만, 염료의 유무는 초임계 염색에서 PET 섬유의 인장강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 여겨진다.

##### 3.1.2 염색 압력에 따른 인장강도 비교

압력별 실험에서는 control 시료와 염색압력 100bar, 150bar, 200bar 및 250bar에서 염색한 시료의 인장강도를 Figure 5에 나타내었다.



**Figure 4.** The variations of the tensile strength of SC-CO<sub>2</sub> dyed PET filaments under different dyeing temperature condition.



**Figure 5.** The variations of the tensile strength of SC-CO<sub>2</sub> dyed PET filaments under different dyeing pressure.

그 결과 control 시료와 100bar 및 150bar에서 염색한 시료의 인장강도는 유사하게 나타났으나 200bar 이상에서 PET filament의 인장강도가 다소 감소하는 것을 확인하였다. 압력이 증가할수록 인장강도는 감소하는 경향을 보이나 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

염료를 넣고 염색한 시료와 염료를 넣지 않고 처리한 시료의 압력별 실험 결과를 보았을 때, 각각의 압력에서 염료를 넣고 염색한 시료의 값이 소폭 높게 나타났다. 이를 근거로 염료가 PET 섬유의 비결정영역에 침투하여 결합하더라도 인장강도의 결과 값의 차이는 거의 없다는 것을 확인할 수 있다.

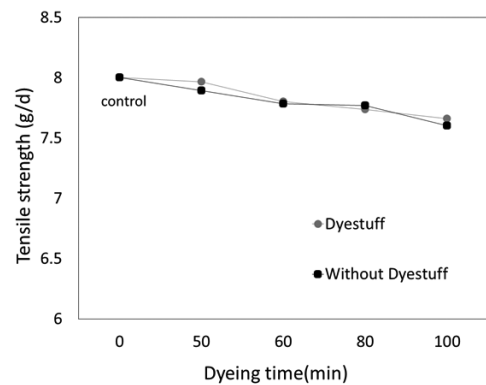
### 3.1.3 염색 시간에 따른 인장강도 비교

Figure 6은 control 시료와 50min, 60min, 80min, 100min 염색 시간별 염색한 시료의 인장강도 측정 결과를 나타내었다. control 시료와 비교했을 때 50min, 60min간 염색한 시료의 인장강도는 낮은 결과를 보였고 60min과 80min에서는 비슷한 결과를 보였으며, 100min에서는 더 감소하는 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 볼 때 염색 시간이 증가할수록 인장강도는 감소하는 것으로 판단된다.

시간에 따라서는 염료를 넣지 않고 처리한 시료와 염료를 넣고 염색한 시료의 결과 값이 거의 비슷하게 나타난 것으로 보아 전술한 온도조건에 따른 인장강도의 결과처럼 염색시간 조건에서도 염료가 PET 섬유 고분자에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 추측된다.

### 3.2 DSC 분석

초임계 염색 공정 중 초임계 이산화탄소와 염료가

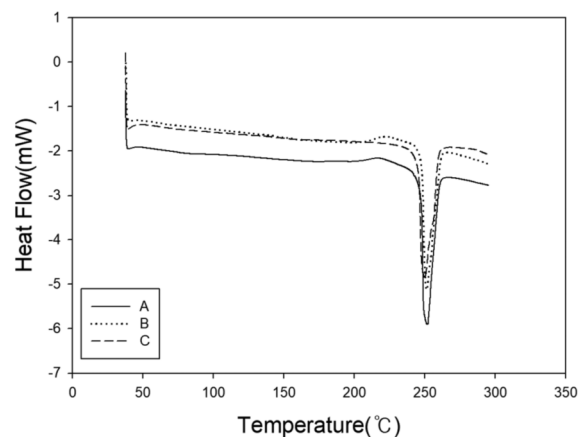


**Figure 6.** The variations of the tensile strength of SC-CO<sub>2</sub> dyed PET filaments under different dyeing time.

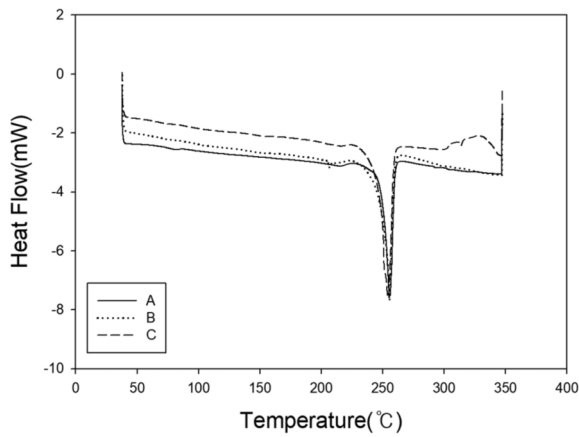
PET 고분자의 열적특성에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 DSC 분석을 실시하여 그 결과를 Figure 7, Figure 8 및 Table 5에 나타내었다.

Figure 7의 시료는 어떠한 염색조건에도 노출되지 않은 순수한 PET filament (A)와 염색 온도 120℃, 압력 250bar에서 염료 없이 처리된 PET filament (B) 그리고 염색 온도 120℃, 압력 250bar에서 염료를 넣고 염색한 PET filament (C)를 이용하였다.

분석 결과 순수한 PET filament 시료에 비해 염료 없이 초임계 공정조건에서 처리된 시료의 T<sub>m</sub>이 낮게 나타나는 결과를 보였고, 염료를 넣고 염색한 시료는 더 낮은 T<sub>m</sub>을 나타내었다. 이는 PET 섬유가 염색 온도 120℃, 압력 250bar의 고온, 고압에 노출되면서



**Figure 7.** DSC curves of (A) pure PET filament and (B) PET filament exposed in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar without dyestuff and (C) dyed PET filament in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar with dyestuff.



**Figure 8.** DSC curves of (A) pure PET film and (B) PET film exposed in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar without dyestuff and (C) dyed PET film in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar with dyestuff.

초임계 CO<sub>2</sub> 처리 후에 고분자 내부에 잔류하는 초임계 CO<sub>2</sub>와 염료의 영향으로 결정영역의 변화가 생겨 T<sub>m</sub>이 낮아진 것으로 판단된다.

상기의 결과를 추가적으로 확인하기 위해 PET film에서 고분자의 열적거동을 알아보았다. PET filament 측정 결과와 마찬가지로 순수한 PET film의 시료보다 염색 온도 120°C, 압력 250bar에서 염료 없이 처리한 시료의 T<sub>m</sub>이 낮게 나타났으며, 염료를 넣고 염색한 시료는 이보다 더 낮은 T<sub>m</sub>을 나타내는 것으로 확인되었다.

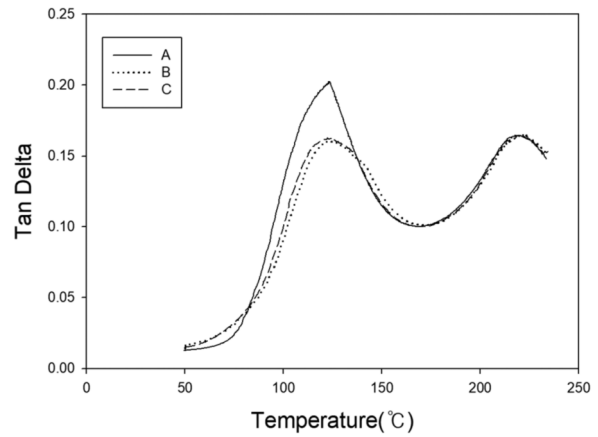
이러한 결과는 고온, 고압에 노출된 PET 섬유에 초임계 CO<sub>2</sub>와 염료의 영향으로 결정영역이 일부 감소된 것으로 추측된다.

### 3.3 DMA 분석

초임계 유체 염색 전후의 초임계 이산화탄소와 염료가 PET 섬유의 열적특성에 미치는 영향 중 섬유 고분자의 T<sub>g</sub> 변화를 알아보기 위하여 DMA 분석을 진행하였다. 그 결과를 Figure 9와 Table 6에 각각 나타내었다.

**Table 5.** Melting temperature(T<sub>m</sub>) of PET filaments and PET films

Sample	Melting temperature(°C)	
	PET filament	PET film
A	251.778	255.802
B	251.422	255.12
C	249.929	254.339



**Figure 9.** DMA curves of (A) pure PET film and (B) exposed PET film in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar without dyestuff and (C) dyed PET film in SC-CO<sub>2</sub> at 120°C, 250bar with dyestuff.

Figure 9의 시료는 상기의 DSC 분석과 마찬가지로 어떠한 염색조건에도 노출되지 않은 순수한 PET film (A)와 염색 온도 120°C, 압력 250bar에서 염료 없이 처리된 PET film (B) 그리고 염색 온도 120°C, 압력 250bar에서 염료를 넣고 염색한 PET film (C)를 이용하였다. 순수한 PET film (A)보다 염료 없이 120°C, 250bar에서 염색한 film (B)의 T<sub>g</sub>가 낮게 나타났으며, 염료 없이 120°C, 250bar에서 처리된 film과 같은 조건에서 염료를 넣고 염색한 film (C)의 경우 T<sub>g</sub>는 그 값의 차이가 0.04°C 정도로 미비하였다. 시료 A의 T<sub>g</sub>는 122°C에서 나타났으며, 시료 B와 시료 C의 T<sub>g</sub>는 120°C 부근에서 나타났다<sup>22)</sup>.

순수한 PET가 고온, 고압에 노출될 경우 PET 섬유 내에 초임계 CO<sub>2</sub>의 영향으로 비결정영역 내 유리상에서 고무상으로 변화가 일어나는 지점의 온도가 떨어진 것으로 판단되며, 같은 조건에서 염료를 넣었을 때 T<sub>g</sub>의 변화의 차이가 미비한 것으로 보아 섬유의 비결정영역 내에 침투된 염료의 영향은 크지 않은 것으로 추정된다.

**Table 6.** Glass transition temperature(T<sub>g</sub>) of PET films

Sample	Glass transition temperature(°C)
	PET film
A	122.85
B	120.52
C	120.48

## 4. 결 론

본 연구에서는 Polyester filament와 film에 대한 초임계 염색 공정 전후의 물리적, 열적특성 변화를 알아보기 위해 인장강도, DSC, DMA 분석을 진행하였다. 염색 온도가 증가할수록 PET filament의 인장강도는 감소하는 것을 확인하였다. 염색 압력별 시험의 경우 압력이 높아질수록 인장강도가 다소 감소하였으나 그 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 염색 시간이 증가할수록 인장강도가 감소하는 것을 확인하였다.

따라서 고온, 고압의 초임계 염색조건에 노출되었을 때 PET 섬유 고분자의 물리적 성질의 변화가 일어나며 강도가 다소 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또한 초임계 유체 염색에서 염색 온도별, 시간별 실험에서는 염료를 넣지 않고 처리한 시료와 염료를 넣고 염색한 시료의 결과 값이 유사한 것으로 보아 온도, 시간 조건에서 염료가 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 반면 초임계 염색 압력별 실험에서는 염료를 넣고 염색한 시료가 염료를 넣지 않고 염색한 시료보다 100bar, 150bar, 200bar, 250bar에서 각각의 결과 값이 약간 크게 나타났다.

DSC 및 DMA 측정 결과는 순수한 PET film보다 염료 없이 염색온도 120℃, 압력 250bar에 처리된 PET film의 Tg와 Tm이 떨어지는 것을 확인 하였다. 염료를 넣고 같은 염색조건에서 염색한 PET film의 Tm은 더 감소하는 것으로 나타났으나 Tg의 경우에는 염료를 넣지 않은 시료와의 차이가 크지 않았다. 이와 같은 결과로 초임계 염색공정 중 초임계 CO<sub>2</sub> 및 염료가 섬유 물성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 지원을 받아 물 없는 컬러산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다(200kg급 초임계유체 염색설비 및 염색공정 기술 개발, 10078329).

## References

1. Z. Knez, E. Markocic, and M. Leitgeb, Industrial Applications of Supercritical Fluids: A Review, *Energy*, **77**,

- 235(2014).
2. G. A. Montero, C. B. Smith, and W. A. Hendrix, Supercritical Fluid Technology in Textile Processing: An Overview, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 4806(2000).
3. J. Lee, Review : Present Status of Green Chemistry, *Journal of the KIMST*, **14**(2), 246(2011).
4. G. Lee, J. Chae, S. Lee, J. Lee, and S. Kim, Supercritical CO<sub>2</sub> Dyeing and Finishing Technology -A Review, *Textile Coloration and Finishing*, **31**(1), 48(2019).
5. I. Jung, S. Lee, and G. Lim, Supercritical Fluid Dyeing of Polyester Fiber with Two Different Dispersion Dyes, *Clean Technology*, **17**(2), 110(2011).
6. H. Lim, B. Choi, M. Park, S. Hwang, J. Park, J. Seo, J. Bang, E. Yoon, B. Kim, and D. Lee, Development of Power Turbine for Supercritical CO<sub>2</sub> Power System, *Proceeding of Korea Supercritical Tech*, Daegu, pp.177-178, 2017.
7. S. Wang and F. Kienzle, The Syntheses of Pharmaceutical Intermediated in Supercritical Fluids, *ACS Publication*, **39**, 4487(2000).
8. D. Knittel and E. Schollmeyer, Environmentally Friendly Dyeing of Synthetic Fibres and Textile Accessories, *International Journal of Clothing Science and Technology*, **7**(1), 36(1995).
9. Y. Lee, Supercritical Fluid Dyeing Technology, *Machine Journal*, **155**(7), 7(2015).
10. R. Oakes, A. Clifford, K. Bartle, and M. Pett, Sulfur Oxidation in Supercritical Carbon Dioxide: Dramatic Pressure Dependent Enhancement of Diastereoselectivity for Sulfoxidation of Cysteine Derivatives, *Chem. Commun*, **8**, 247(1999).
11. H. Zheng, J. Zhang, J. Yan, and L. Zheng, An Industrial Scale Multiple Supercritical Carbon Dioxide Apparatus and its Eco-friendly Dyeing Production, *CO<sub>2</sub> Utilization*, **16**(3), 272(2016).
12. P. Coimbra, M. R. Blanco, H. R. C. Silva, and D. Sousa, Experimental Determination and Correlation of Artemisinin's Solubility in Supercritical Carbon Dioxide, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **51**(3), 1097(2006).
13. E. Lee, K. Chang, Y. Kwon, and E. Lee, Optimization

- of the Alliins Extraction in the Garlic by Supercritical Carbon Dioxide, *Food Engineering Progress*, **1**, 149 (1997).
14. D. Weinstein, K. Muske, J. Moriarty, and E. Schmidt, The Solubility of Benzocaine, Lidocaine, and Procaine in Liquid and Supercritical Carbon Dioxide, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **49**(3), 547(2004).
  15. H. Choi and S. Park, A Study of Dyeing Properties of PET Fabrics under Supercritical CO<sub>2</sub> Depending on Test Condition: by Temperature, Pressure, Leveling Time, *Textile Coloration and Finishing*, **31**(1), 14(2019).
  16. B. Subramaniam, R. Rajewski, and K. Snively, Pharmaceutical Processing with Supercritical Carbon Dioxide, *J. Pharm. Sci.*, **86**(8), 885(1997).
  17. E. Bach, E. Cleve, and E. Schollmeyer, Past, Present and Future of Supercritical Fluid Dyeing Technology, *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, **32**(1), 88(2002).
  18. H. D. Sung and J. J. Shim, Solubility of C.I. Disperse Red 60 and C.I. Disperse Blue 60 in Supercritical Carbon Dioxide, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **44**(5), 985(1999).
  19. C. C. Tsai, H. M. Lin, and M. J. Lee, Solubility of Disperse Yellow 54 in Supercritical Carbon Dioxide with of without Cosolvent, *Fluid Phase Equilibria*, **260**(2), 287(2007).
  20. A. Ozcan, A. A. Clifford, and K. D. Bartle, Solubility of Disperse Dyes in Supercritical Carbon Dioxide, *J. of Chemical and Engineering Data*, **42**, 590(1997).
  21. M. Banchero, Supercritical Fluid Dyeing of Synthetic and Natural Textiles -A Review, *Coloration Technology*, **129**(1), 2(2013).
  22. C. Fang, R. Yang, and Z. Zang, Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes on the Physical Properties and Crystallisation of Recycled PET/TPU Composites, *RSC Advances*, **8**, 8920(2018).

## Authors

---

- 김삼수    영남대학교 파이버시스템공학과 교수  
 오지연    영남대학교 파이버시스템공학과 석사과정 학생  
 박창표    영남대학교 파이버시스템공학과 석사과정 학생  
 이상오    영남대학교 의류패션학과 교수  
 이재웅    영남대학교 파이버시스템공학과 교수