

초임계 CO<sub>2</sub> 접촉량이 염색 균염성에 미치는 영향에 대한 연구The Influence of the Contact Amount of Supercritical CO<sub>2</sub> on Dyeing Uniformity**\*Corresponding author**

Shin Park

(parkgod@djair.co.kr)

박신\*, 최현석<sup>1</sup>, 김태영, 송태현(주)대주기계, <sup>1</sup>DYETEC연구원**Shin Park\*, Hyunseuk Choi<sup>1</sup>, Taeyoung Kim and Taehyun Song**

Daejoo Machinery, Daegu, Korea

<sup>1</sup>DYETEC Institute, Daegu, KoreaReceived\_October 17, 2018  
Revised\_November 23, 2018  
Accepted\_January 17, 2019

**Abstract** The influence of the contact amount of carbon dioxide per unit mass of dyestuff (a) on dyeing uniformity in supercritical fluid dyeing is analyzed in this study. The experiments using a 5L class Pilot Scale dyeing machine is carried out for this study purpose. For a fixed temperature and pressure, the amount of sample and the dyeing leveling time were considered as process variables. The results show that the increase in the amount of the sample causes a higher color difference than the reference sample, and it also increases the amount of residual dye. On the other hand, the color difference tended to decrease with the increase in dyeing time. Based on these results, the correlation between a value and dyeing uniformity in supercritical fluid dyeing is obtained.

**Textile Coloration and Finishing**

TCF 31-1/2019-03/25-32

©2019 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Keywords** *supercritical fluid dyeing, contact amount, carbon dioxide, leveling, dyeing uniformity, waterless dyeing*

## 1. 서 론

염색가공공정은 섬유에 심미성을 부여하는 공정으로 섬유/염색 산업에 가장 높은 부가가치를 생성한다. 일반적인 수계염색의 염색가공공정은 섬유 1kg 당 약 100L의 물이 필요하고, 물을 130℃까지 상승시키고 유지하는데 많은 에너지가 소비되는 에너지 다소비 공정이다. 또한 염료에 분산제, 계면활성제와 같은 화학 물질이 포함되어 염색 후 잔여 폐수로 인한 환경문제를 야기하고 있다. 때문에 이를 개선하기 위한 많은 연구 개발이 진행되고 있으며, 이 중 초임계 유체를 이용하여 폴리에스테르 섬유를 염색하는 기술이 등장하게 되었다.

초임계 염색 기술은 임계온도, 임계압력 이상의 영역에서 존재하는 초임계 유체를 용매로 사용하는 염색 기술이다. 초임계 유체는 높은 확산성과 용해도를 가지면

서, 낮은 점성과 표면장력을 갖기 때문에 투과력이 좋다. 특히 CO<sub>2</sub>는 무극성 분자로 일부 무극성 분산염료를 녹이는데 용이하기 때문에 초임계 염색공정에 적용하기 좋은 유체로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>. 초임계 염색공정은 수계 염색과 유사한 방식으로 염액이 빔 내부에서 외부로 순환하면서 염색이 이루어진다. 다만 차이점은 염료를 녹이는 용매와 염액의 형성방법이다. 염액을 형성한 뒤 염색이 이루어지는 수계염색과 달리 초임계 염색은 염색공정이 진행되면서 초임계 CO<sub>2</sub>가 염료를 용해시키면서 염액이 형성되어, 별도의 분산제나 계면활성제가 없이도 염액을 형성할 수 있기 때문에 화학물질의 사용이 최소화된다.

초임계 염색공정에 대한 연구는 1993년 독일의 Schollmeyer 교수팀에 의해 제안된 이후 1996년 독일 Udhe社에서 Ciba社와의 공동연구를 통해 Pilot Scale의 초임계 염색기가 개발된 것이 시초이다<sup>1,3)</sup>. 이

후 고압기술에 강점이 있던 미국, 일본에서 초임계 염색에 대한 연구가 이루어졌지만, 상용 염색기는 구성에 필요한 고압기기의 높은 가격으로 인해 경제성의 이유로 기술개발 속도가 둔화되었다. 하지만, 고압기기 제작기술의 발전과 환경문제에 대한 높은 관심으로 2012년에 네덜란드 다이쿠社에서 상업용 초임계 유체 염색기가 개발되었다. 그 뒤 나이키, 아디다스와 같은 글로벌 기업에서 초임계 염색 기술을 적용한 제품이 출시되면서 다시 주목받게 되었다<sup>3-7</sup>. 초임계 유체 염색기술에 대한 초기연구는 염색 공정을 등압, 가압, 가온, 염색, 감온, 감압, 방출의 7단계로 세부화하여 장치를 만들고 PET 섬유에 대한 염색 실험을 진행하였다. 그 결과 염색균염성을 높이기 위해 200bar 이상의 압력조건이 필요함을 밝혔다<sup>1,3</sup>. 이들의 연구들을 기초로 Kraan은 100L급 Pilot Scale 초임계 염색설비를 개발하고, 설비 각 구성품의 요구사양을 정리하였다. 또한 염색공정 중 염액이 형성되는 초임계 염색 기술의 특성 상 염료의 용해도가 주요 구성품 중 하나인 순환펌프 사양을 결정하는데 필수요소임을 제시하였다<sup>6</sup>. 하지만, 염료와 용매인 초임계 CO<sub>2</sub>간 엄밀한 분석까지는 진행되지 못하였다.

염액의 형성 및 섬유에 대한 염료의 공급이 연속적으로 이루어지는 초임계 염색 공정의 특성 상 상용 초임계 염색설비의 개발을 위해서는 섬유-염료-초임계 CO<sub>2</sub>간의 물질전달 및 평형상태에 대한 연구를 기초로 염색공정이 설계되어야 한다. 이를 위해 기존 연구를 살펴보았다. 초임계 CO<sub>2</sub>는 폴리에스테르 섬유의 비결정 영역에 침투하여 폴리에스테르 섬유 고분자 사슬의 분절운동을 증가시켜 고분자의 가소성을 높인다. 이로 인해 섬유의 팽윤 현상은 가속화된다<sup>8-10</sup>. 섬유의 팽윤이 이루어지고 난 뒤 초임계 CO<sub>2</sub>에 용해되어 폴리에스테르 섬유로 이송된 염료는 팽윤된 조직 중 비결정영역으로 침투하게 된다.

기존 연구자들은 초임계 유체 염색공정에서 폴리에스테르 섬유는 무게 대비 3~10% 정도의 분산염료를

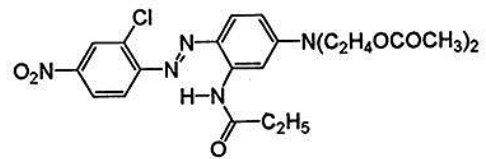


Figure 1. Chemical structure of Red 167.

흡수하며, 공정온도와 압력이 증가할수록 흡수량이 증가함을 밝혔다<sup>11-15</sup>. 더불어 유체상의 염료 농도에 대한 고분자 섬유 내의 염료농도의 비인 분배계수는 일정한 농도에서 압력이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다<sup>12,15</sup>. 이는 압력의 증가에 따라 초임계 CO<sub>2</sub>의 용해능력이 폴리에스테르 섬유 고분자 섬유 내의 염료농도의 증가보다 커졌기 때문이다.

이 연구결과를 종합해보면 고정된 공정조건에서는 섬유 내 염료의 농도와 초임계 CO<sub>2</sub> 내 염료의 농도가 일정하게 유지되기 때문에 염액을 섬유에 많이 접촉시키는 것이 염색공정에 유리할 것이므로, 접촉량이 초임계 유체 염색에서 주요 공정변수임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 상용설비와 유사한 공정을 형성시킬 수 있는 5L급 Pilot Scale 염색기를 사용하여 초임계 CO<sub>2</sub> 접촉량이 염색균염성에 영향을 미침을 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료 및 실험장치

본 연구에 사용된 용매는 CO<sub>2</sub>로 99.9%의 순도의 것을 사용하였다. 본 실험에서는 정련이 되어 이물질이 없는 100% 폴리에스테르 더블니트 원단을 사용하였으며, 염료는 아조계의 C.I. Disperse Red 167을 아크로마코리아(주)로부터 제공받아 사용하였다. 염료처방은 0.5% o.w.f로 동일하게 하였다.

Figure 1에 사용한 염료의 구조식을 나타내었다. 본 연구에 사용된 염료는 아크로마코리아(주)에서 기존 수계염색에서 사용하는 염료와 달리 계면활성제, 분산제

Table 1. Information of fabric and dyestuff

Fabric	Polyester double knit (After scouring, 30inch, 22G, Wale 30/inch × Course 45/inch)
Dyestuff	C.I. Disperse Red 167 (Archroma Korea)

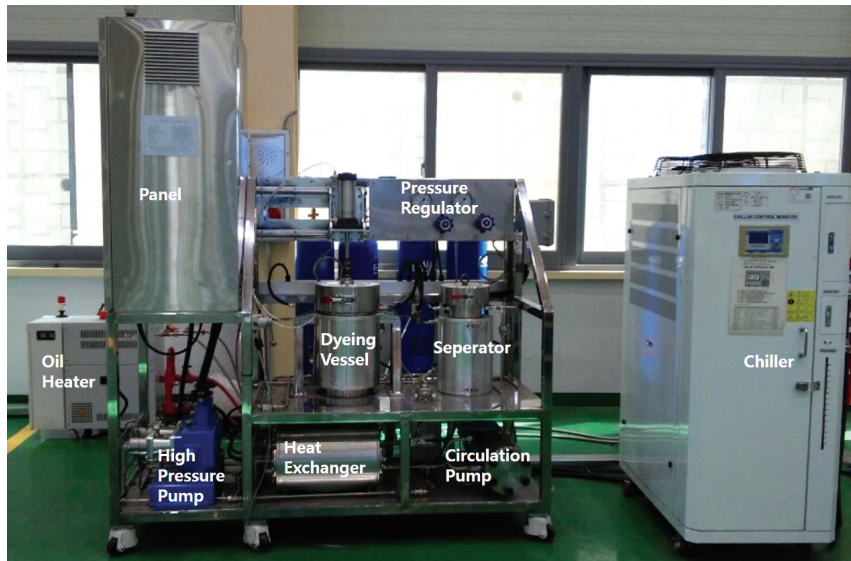


Figure 2. 5L class pilot scale supercritical CO<sub>2</sub> dyeing machine.

를 제외하고 순수한 염료만 합성하여 제공받았다. 다음의 Table 1은 시료에 대한 정보이다.

연구에 사용한 5L급 Pilot Scale 초임계 염색기는 Figure 2와 같으며, 주요 구성품의 배치를 같이 표기하였다. 본 실험 장치는 염색이 이루어지는 염색조는 내부 체적이 5L이며, 최대 300bar까지 실험이 가능하며, 초임계 염색의 각 단계 별 공정인 등압→가압→가온→염색→감온→감압→방출 공정을 구현할 수 있도록 장치가 구성되어 있다.

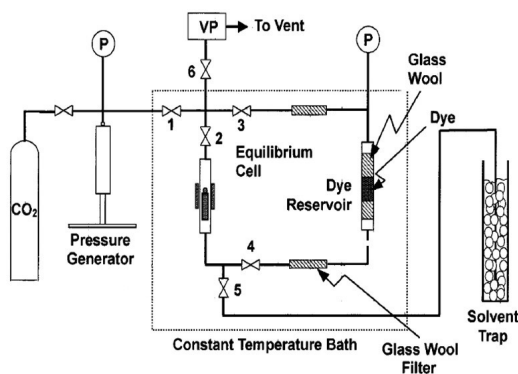
Figure 3에 초임계 유체 염색 공정연구를 위한 기존 연구자들과 본 연구에서 사용한 5L급 Pilot Scale 염색기의 개념도를 나타내었다.

기존 연구자들은 주로 CO<sub>2</sub>를 주입하고, 공정조건을

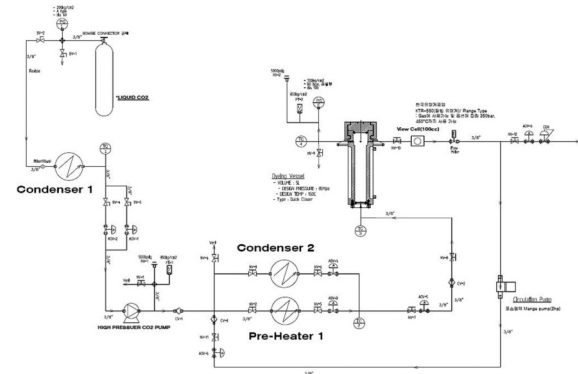
형성한 뒤 CO<sub>2</sub>의 순환이 없는 Pot형 장비를 가지고 연구를 진행한 반면에 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>의 공급 이후 염색조 내부에 장입된 빔의 감긴 원단의 내부에서 외부로 CO<sub>2</sub>가 순환하는 장비를 사용하였다. Pot형과 달리 순환형 장비는 상용설비와 가장 유사한 공정을 형성시킬 수 있는 장비이다.

### 2.2 초임계염색 실험방법

본 연구에서 수행한 염색실험에서 온도와 압력조건을 결정하기 위해 기존 문헌의 자료를 참고하였다<sup>17,18)</sup>. 기존 문헌에 따르면, 초임계 CO<sub>2</sub> 분위기에서 염료의 용해도는 고온 고압으로 갈수록 증가하는 경향성을 나타낸다. 이를 고려하여 상용설비를 개발한 다이쿠社



(a) Pot type equipment<sup>16)</sup>



(b) Circulation type equipment

Figure 3. Experimental equipment for supercritical fluid dyeing.

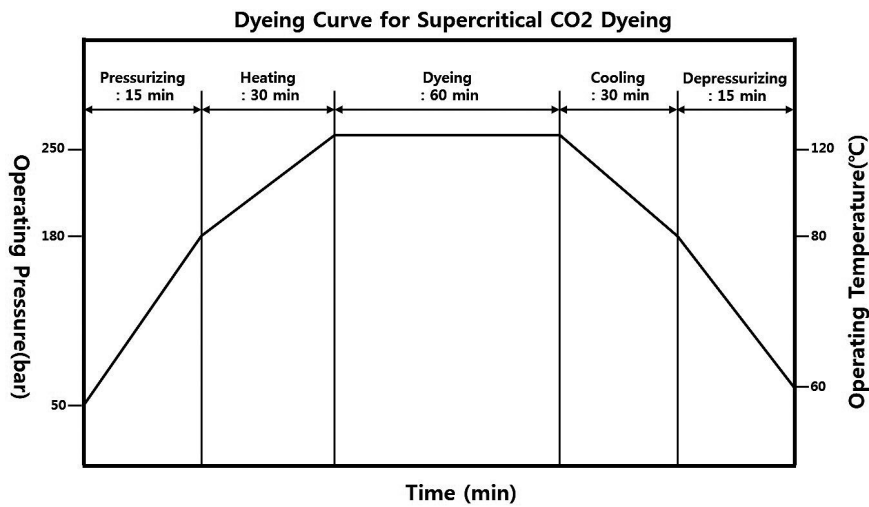


Figure 4. Dyeing cycle.

에서는 120℃, 250bar를 기준 염색조건으로 설정하였으며, 이를 받아들여 본 연구에 적용하였다<sup>6)</sup>. 250bar의 공정조건을 형성하기 위해 CO<sub>2</sub> 공급량은 3.17kg으로 동일하게 하였으며, 이는 여러 공정 조건 형성실험을 바탕으로 얻어진 값이다.

해석의 편의를 위해 순환량을 투입된 염료의 단위 질량으로 나눈 값을 접촉량( $\alpha$ )으로 식(1)에 정의하였다. 순환량은 염색시간 동안 실험장비 내부를 순환한 CO<sub>2</sub>의 총량이며, 순환유량에 염색시간을 곱하여 구한다. CO<sub>2</sub> 접촉량의 변화에 따른 염색균염성을 알아보기 위해 원단의 양을 50, 100, 250g으로 변화시켰으며, 염색 시간을 0분에서 120분까지 30분 간격으로 증가시켰다. 이때 염료처방량, 온도, 압력 등 기타 공정조건은 동일하게 하였다.

$$\alpha = \frac{CO_2 \text{ circulation mass}(g)}{Dyestuff \text{ mass}(g)} \dots\dots\dots (1)$$

모든 실험조건에서 원단 대비 염료처방량은 0.5%

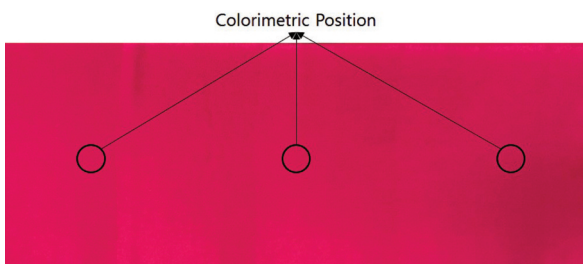


Figure 5. Colorimetric position.

o.w.f로 고정시켰으며, 염색시간을 제외한 각 공정 소요시간은 동일하게 유지하였다.

Figure 4에 각 공정 별 소요시간을 나타내었다. 실험결과와 분석은 CCM 측정을 통해 이루어졌으며, 균염성에 대한 기준 색차값은 1 미만이다. 사용한 측색계는 Colorlist Plus(FOUR-ONE SYSTEM Co. Ltd., Korea)이다. 배치 간 색차 측정 시 기준 샘플은 육안 상 균염성이 가장 높은 샘플을 삼았으며, 위치는 기준 샘플의 중앙값을 기준으로 좌, 중, 우 세 영역의 중간 지점을 선정하였다.

Figure 5는 각 샘플의 측색위치를 도시한 것으로, 배치 내 색차의 경우 각 샘플 별 중앙 부분을 기준으로 측색하였다. 더불어 샘플은 별도의 세척을 진행하지 않고, 10회 털어내어 측색하였다.

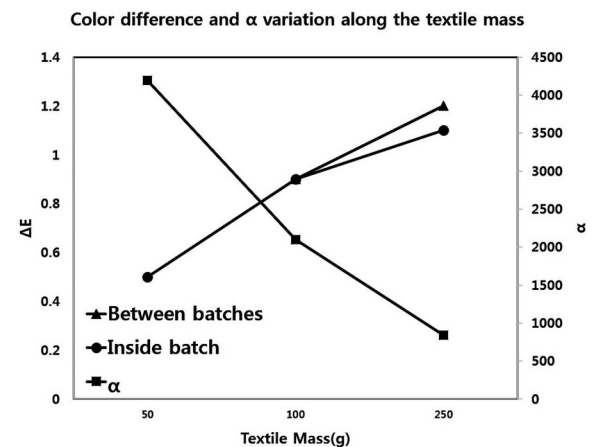
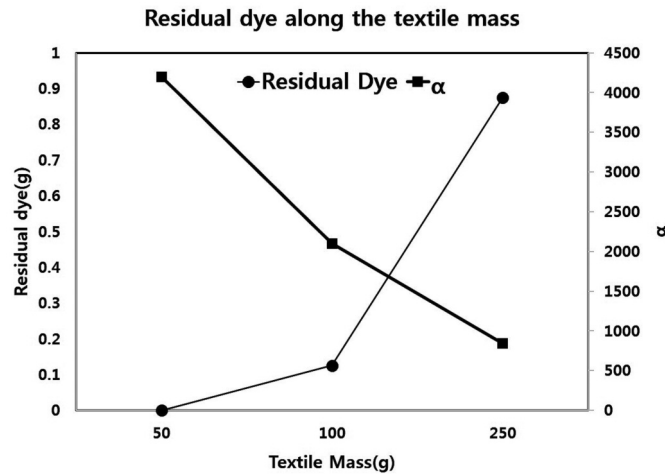
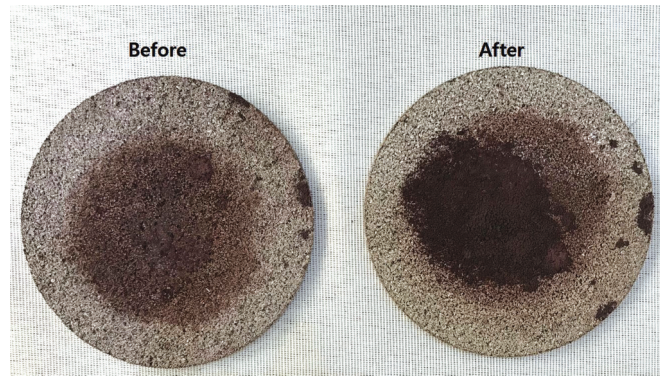


Figure 6. Comparison of color difference and  $\alpha$  along the PET mass.



(a) Residual dye and  $\alpha$  value depending on PET mass



(b) Residual dye before and after dyeing at 250g textile mass

**Figure 7.** Residual dye depending on PET mass.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 원단량에 따른 $\alpha$ 값과 염색균염성

원단량 50g 샘플을 기준샘플로 하여 측색한 결과를 각 원단량 별  $\alpha$  값과 같이 Figure 6에 도시하였다. 원단량이 증가하면서  $\alpha$  값은 감소하는 반면 배치 간, 배치 내 색차는 감소하여  $\alpha$  값과 색차는 반비례 관계를 나타냄을 알 수 있다. 또한 염색실험 이후 원단량에 따라 염료조의 잔류염료 양에 차이가 있었으며, 이를 정량적으로 분석하기 위해 잔류염료의 양을 염료 처방 전 염료조의 질량을 측정하고, 염색 후 염료조와 잔류염료의 질량을 측정한 뒤 두 값을 빼서 계산하였다. 사용한 저울은 0.0001g까지 계측이 가능한 Shinko 社의 HTR220E 모델을 사용하였다. 이를 Figure 7에 나타

내어 원단량 별 잔류염료의 양을 살펴보면, 원단량의 증가에 따라 잔류염료의 양이 증가함을 확인하였다. 이는 순환하는 CO<sub>2</sub>의 총량은 고정되어 있는데 반하여, 원단량이 증가하면서  $\alpha$  값이 감소하게 되었고, 이로 인해 처방된 염료의 총량 중 섬유로 이송되는 비율이 점차 감소하게 되었기 때문이다.

결국 염색과정 중 레벨링(leveling)보다 염료를 용해시켜 원단에 공급하는데 상당한 시간이 소요되는 경우 불균염성이 상승하는 결과를 초래하게 되는 것으로 추정할 수 있다. 이를 보여주는 것이 Figure 7(b)으로 원단량 250g을 처방하였을 때의 염색 전/후 염료조 필터에 잔존한 염료의 사진이다.

이 결과를 비추어 볼 때 초임계 CO<sub>2</sub> 내 염료의 농도가 결정된 상태에서 균염성을 확보하기 위해서는  $\alpha$  값

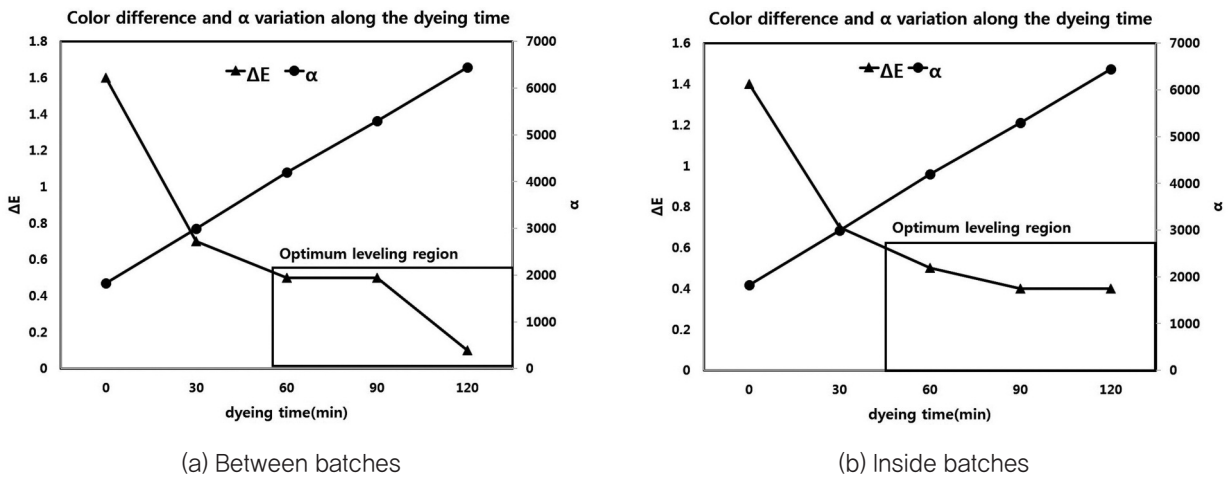


Figure 8. Comparison of color difference and  $\alpha$  along the dyeing time.

의 증가가 필요하게 된다.  $\alpha$  값의 증가를 위해서는 원단량을 줄여 염료의 공급량을 줄이거나(% o.w.f 값이 고정된 경우) 염색시간을 길게 확보하여 CO<sub>2</sub>의 순환량을 증가시키는 방법이 있다.  $\alpha$  값의 증가를 위해 원단의 질량을 감소시키는 경우 염색 공정 후 산출되는 생산량이 감소하기 때문에 생산성과 운영비용을 증가시켜 균염성 향상에 대한 편익 대비 경제성이 낮을 것으로 추정된다.

따라서 염색 시간을 증가시켜 CO<sub>2</sub> 순환량을 많게 하는 것이 염색 균염성을 높이는 유효한 방법이 될 수 있다.

### 3.2 염색시간에 따른 $\alpha$ 값과 염색균염성

염색시간에 따른 염색균염성을 분석을 위해 배치 간 색차의 기준 샘플은 육안 검사 결과 가장 균염성이 높

을 것으로 예상되는 120분 샘플의 중앙지점을 삼아 Figure 8에 염색시간에 따른 배치 간, 배치 내 색차의 변화를  $\alpha$  값과 같이 도시하였다. 염색시간이 증가함에 따라 배치 내 색차와 배치 간 색차 모두 감소하여, 균염성이 점차 향상되는 것을 수치적으로 알 수 있다. 염색시간이 90분 이후부터 배치 내 색차는 유지되는 반면 배치 간 색차는 120분인 샘플에서 상당히 떨어진 것을 알 수 있다. 이는 기준 샘플의 동일 위치에 대해 측정하고, 평균을 내었기 때문에 색차가 거의 나타나지 않은 것으로 큰 의미를 부여하기 어렵다. 더불어 염색시간이 60분 이상이 되면, 색차값의 변화가 거의 없게 되는 것을 볼 때 본 연구에서 사용한 C.I. Disperse Red 167 염료에 대해 60분 이상의 염색시간이 요구됨을 알 수 있다. 이는 초임계 CO<sub>2</sub> 내 염료의 농도와 섬유 내 염료

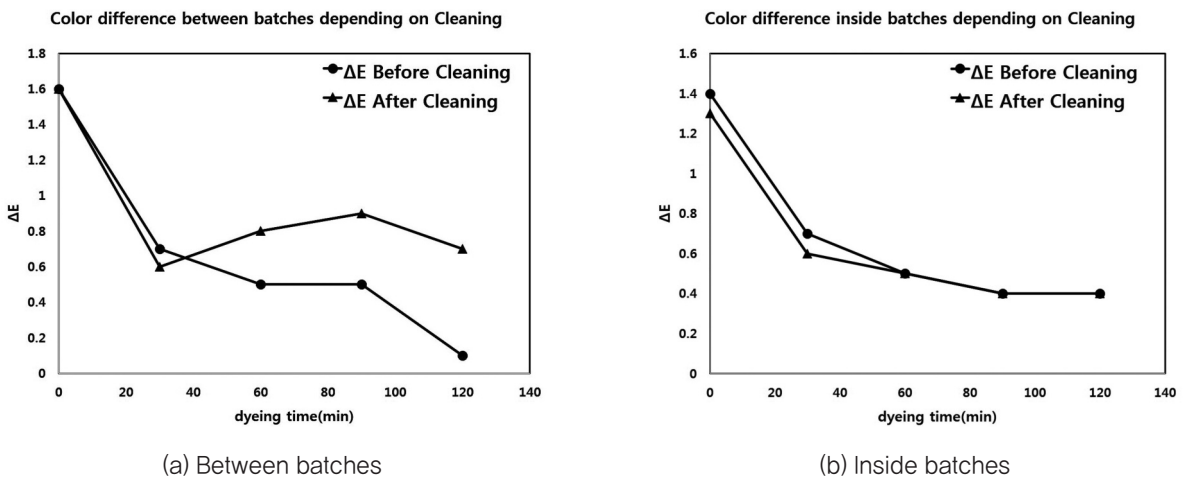


Figure 9. Color difference before and after cleaning along the dyeing time.

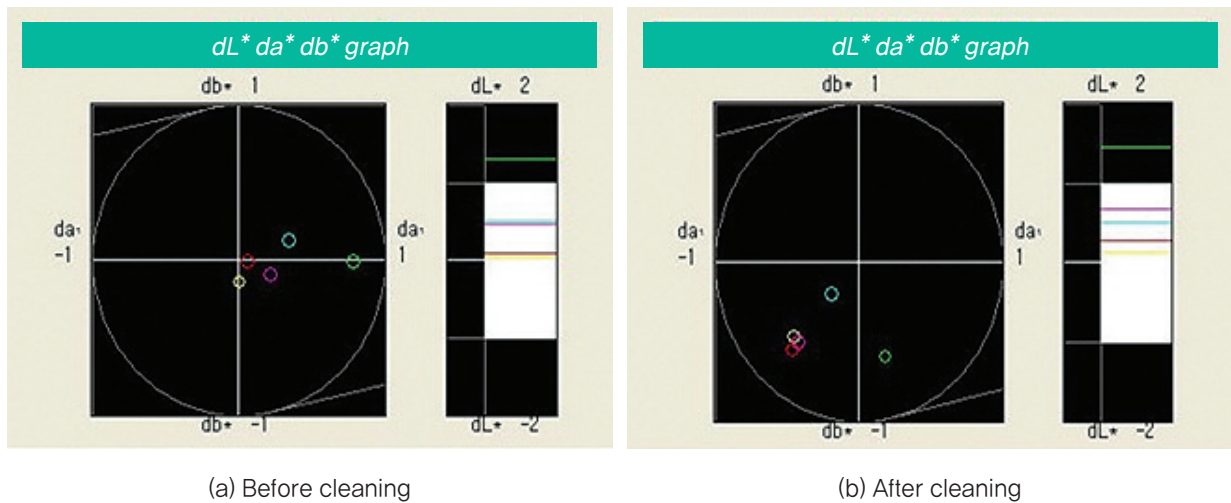


Figure 10. Capture of color difference before and after cleaning along the dyeing time.

의 농도의 비, 즉 분배계수가 동일한 상태에서 염색시간이 증가하면서, 섬유 내 조직으로 침투된 염료의 양을 증가시키는 한편 섬유에 이송된 염료가 섬유 조직내부에서 재분포 되는 레벨링 시간이 추가로 확보되었기 때문으로 판단된다.

다음으로 원단의 세척 후 염색시간에 따른 균염성이 유지되는지를 확인하기 위해 에탄올에 샘플을 30분 간담가 세척을 진행하였고, 측색을 다시 진행 하였다. 세척 전/후의 배치 간 색차와 배치 내 색차를 세척 전 120분 샘플을 기준으로 측색하여 Figure 9의 (a)와 (b)에 도시한 결과 각 염색시간에 대해 원단에 잔존하던 미고착염료가 제거되면서, 배치 간 색차는 감소 후 증가하는 경향성을 보였지만, 배치 내 색차는 동일한 경향성을 보였다. 이는 배치 간 색차의 경우 기준 샘플이 세척 전 120분 샘플이었기 때문에 발생한 차이로 판단된다.

다음으로 세척 전/후의 색좌표의 이동을 살펴보기 위해 Figure 10에 각 공정조건에 대해 세척 전/후의 색좌표를 나타내었다. 세척 전 색좌표를 기준으로 세척 후 농도가 약간 연해지고, 레드옐로 방향에서 그린블루 방향으로 색좌표가 평행이동 했을 뿐 그 상대적인 위치는 변함이 없었다. 또한 색좌표의 변동폭이 ΔE값이 1 미만인 원 내부에서 평행이동 되었기 때문에 세척 전/후의 변화가 육안상 구분을 할 수 없을 정도로 크지 않음을 알 수 있다.

이를 정리하면 염색시간의 증가를 통해 CO<sub>2</sub> 순환량이 증가하면서 α 값의 증가, 즉 접촉량이 증가하면서 섬유로 이송된 염료가 자리 잡고, 균일하게 배치될 수

있는 여력을 발생시켜 균염성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한 세척 전/후 배치 내 색차는 큰 차이를 보이지 않고, 특히 60분 이상의 염색시간 조건에서는 색차 값의 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 염색 균염성을 보장할 수 있는 최소 염색시간이 존재함을 추정할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초임계 CO<sub>2</sub>를 이용한 염색에서 주요한 공정변수로 CO<sub>2</sub> 접촉량이 있음을 확인하였으며, 이를 염료 단위 질량 당 CO<sub>2</sub> 접촉량을 α 라는 변수로 정의하고 이 값이 염색균염성에 미치는 영향을 분석하였다. 접촉량에 따른 효과를 분석하기 위해 물리적인 측면에서 온도, 압력, 염료처방비율을 고정시킨 뒤 원단량과 염색시간을 변화시켰으며, 염색실험 결과 α 값이 증가함에 따라 염색균염성이 향상됨을 알 수 있었다. 다음으로 염색샘플의 세척 전/후의 염색균염성의 변화를 분석하였다. 충분한 염색시간이 보장된 경우에 염색균염성이 유지됨을 알 수 있었고, 결국 최소 요구되는 염색시간의 범위가 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 물 없는 컬러산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다(200kg급 초임계 유체 염색설비 및 염색공정 기술 개발, 과제번호 : 10078329).

## References

1. W. Saus, D. Knittel, and E. Schollmeyer, Dyeing of Textiles in Supercritical Carbon Dioxide, *Tex. Res. J.*, **63**(3), 135(1993).
2. J. H. Kim, Theme : Supercritical Fluid, *J. KSME*, **55**(7), 30(2015).
3. E. Bach, E. Cleve, and E. P. Schollmeyer, Present and Future of Supercritical Fluid Dyeing Technology, *Rev. Prog. Color. Relat. Top.*, **32**, 88(2002).
4. A. Hou, B. Chen, J. Dai, and K. Zhang, Using Supercritical Carbon Dioxide as Solvent to Replace Water in Polyethylene Terephthalate(PET) Fabric Dyeing Procedures, *J. Clean Prod.*, **18**, 1009(2010).
5. M. Banchemo, S. Sicardi, A. Ferri, and L. Manna, Supercritical Dyeing of Textiles - From the Laboratory Apparatus to the Pilot Plant, *Text. Res. J.*, **78**, 217(2008).
6. M. V. D. Kraan, Process and Equipment Development for Textile Dyeing in Supercritical Carbon Dioxide, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2005.
7. J. J. Long, Y. Q. Ma, and J. P. Zhao, Investigations on the Level Dyeing of Fabrics in Supercritical Carbon Dioxide, *J. Supercrit. Fluids*, **57**, 80(2011).
8. J. V. Schnitzler and R. Eggers, Mass Transfer in Polymers in a Supercritical CO<sub>2</sub>-Atmosphere, *J. Supercrit. Fluids*, **16**, 81(1999).
9. A. Hou, K. Xie, and J. Dai, Effect of Supercritical Carbon Dioxide Dyeing Conditions on the Chemical and Morphological Changes of Poly(ethylene terephthalate) Fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 2008(2004).
10. O. S. Fleming, S. G. Kazarian, E. Bach, and E. Schollmeyer, Confocal Raman Study of Poly(ethylene terephthalate) Fibres Dyed in Supercritical Carbon Dioxide: Dye Diffusion and Polymer Morphology, *Polymer*, **46**, 2943(2005).
11. M. V. D. Kraan, M. V. F. Cid, G. F. Woerlee, W. J. T. Veugelers, and G. J. Witkamp, Equilibrium Study on the Disperse Dyeing of Polyester Textile in Supercritical Carbon Dioxide, *Text. Res. J.*, **77**, 550(2007).
12. P. Bao and J. Dai, Relationships between the Solubility of C. I. Disperse Red 60 and Uptake on PET in Supercritical CO<sub>2</sub>, *J. Chem. Eng. Data*, **50**, 838(2005).
13. M. W. Park and H. K. Bae, Dye Distribution in Supercritical Dyeing with Carbon Dioxide, *J. Supercrit. Fluids*, **22**, 65(2002).
14. A. Ferri, M. Banchemo, L. Manna, and S. Sicardi, Dye Uptake and Partition Ratio of Disperse Dyes between a PET Yarn and Supercritical Carbon Dioxide, *J. Supercrit. Fluids*, **37**, 107(2006).
15. H. D. Sung and J. J. Shim, Solubility of C.I. Disperse Red 60 and C.I. Disperse Blue 60 in Supercritical Carbon Dioxide, *J. Chem. Eng. Data*, **44**, 985(1999).
16. C. C. Tsai, H. Lin, and M. Lee, Solubility of Disperse Yellow 54 in Supercritical Carbon Dioxide with or without Cosolvent, *Fluid Phase Equilibria*, **260**, 287(2007).
17. K. H. Chang, H. K. Bae, and J. J. Shim, Dyeing of PET Textile Fibers and Films in Supercritical Carbon Dioxide, *Korean J. Chem. Eng.*, **13**(3), 310(1996).
18. I. I. Jung, S. Y. Lee, G. B. Lim, and J. H. Ryu, Supercritical Fluid Dyeing of Polyester Fiber with Two Different Dispersion Dyes, *Clean Technology*, **17**(2), 110(2011).

## Authors

- 박신 (주)대주기계 유체기계기술연구소 사원  
 최현석 다이텍연구원 전임연구원  
 김태영 (주)대주기계 유체기계기술연구소 팀장  
 송태현 (주)대주기계 유체기계기술연구소 사원