

<연구논문(학술)>

Vectran[®]의 수중 분산 거동에 미치는 계면활성제의 영향(I) - 쿼드라트법을 결합한 수중 분산 거동 평가 -

강유정 · 이도현 · 송선혜 · 배진석^{1,†}

DYETEC연구원, ¹경북대학교 섬유시스템공학과

Effects of Surfactants on Dispersion Behavior of Vectran[®] in Water - Evaluation of Fibers Dispersion Behavior in Water with Quadrat Analysis -

Yoo-Jung Kang, Do-Hyun Lee, Sun-Hye Song and Jin-Seok Bae^{1,†}

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute, Daegu, Korea

¹Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received: November 12, 2014 / Revised: December 1, 2014 / Accepted: December 10, 2014)

Abstract: To give a positive effect on dispersion behavior of high performance fibers Vectran[®] in water with reference to wet-laid nonwoven technology, 9 kinds of sulfonate type anionic surfactants were chosen to study. After dispersion experiment, the number and the area occupied by fibers in each sample were counted and figured to calculate the index of dispersion in conjunction with quadrat analysis. Similar tendency was observed in the results of two experiments. The sample without addition of any surfactant resulted in the most aggregated dispersion behavior. As the length of alkyl group attached to sulfonate increases, the sample shows more dispersed behavior. The sample with the surfactant having the aryl group and the longer alkyl group shows the most dispersed behavior and it can be seen with the naked eye as well.

Keywords: sulfonate, anionic surfactant, fiber dispersion, quadrat analysis, index of dispersion

1. 서 론

일본의 쿠라레이사가 독점 생산 중인 Vectran[®]은 폴리에스테르-폴리아릴레이트 계열 섬유로 고분자 사슬 구조 내 에스테르 결합(-COO-)이 방향족 고리를 이어가는 형태이며 분자 내 나프탈렌 구조가 강직성을 부여하고 네마틱상 액정 형성을 촉진하여 방사 시 매우 배향성이 높은 섬유를 얻을 수 있다. 고배향성은 고강도, 고탄성율의 물성과 함께 매우 낮은 흡습율을 부여해 수분산시 섬유간이 뒤엉키듯 응집하고 반발력으로 인하여 수면으로 떠오르는 등 물과 친화하지 못하는 모습을 나타낸다.

Vectran[®]은 내크리프성, 내산성, 내열창성, 섬유간의 내마모성 등이 우수하고 ARAMID, PBO, 탄소

섬유, UHMWPE 등의 고성능섬유에 비해 간단하고 경제적인 용융방사법으로 제조되어 향후 다양한 산업분야에 자리 잡을 것으로 기대되고 있다^{1,2)}.

오늘날 부직포 제조기술은 크게 습식, 건식공정으로 나뉘며 고강도섬유는 고탄성과 취성성질에 의한 유연성의 결핍 및 크림프(crimp)가 없기 때문에 섬유 다발을 수중에서 개개의 섬유로 분리시켜 스크린 상에서 여과 탈수하여 웹을 형성한 후 건조시켜 웹을 제조하는 습식법이 각광을 받고 있다. 습식법은 타 공정에 비해 고균제도와 강도를 지닌 제품을 생산할 수 있는 기술로써 미세하고 균일한 성능이 요구되는 첨단 산업용 부품소재를 생산하기에 적합하다. 강도, 탄성률, 내열성 등의 여러 특성을 극대화시킨 고성능섬유를 습식법에 응용하여 전기 절연지, 전지분리막, 산업용필터 등 다양한 고기능성, 경량의 부품소재를 제조할 수 있다^{3,4)}.

이를 좌우하는 핵심 제조기술은 수중 분산성 제

[†]Corresponding author: Jin-Seok Bae (jbae@knu.ac.kr)

Tel.: +82-53-950-7281 Fax.: +82-53-950-6617

©2014 KSDF 1229-0033/2014-12/339-346

어로, 그라인더 및 교반과 같은 외력을 가하고 양친매성 분자인 계면활성제를 첨가하여 친수기 분자를 물 쪽으로 배열해 물과의 친화성을 높이는 등 수중 분산 효율을 증가시켜 최종 부직포의 사용을 제한하게 하는 로그(log), 덤벨(dumbbell), 로프(rope) 등의 결점 형태를 줄어든다⁵⁻⁸⁾.

본 연구에서는 우수한 성능으로 다양한 산업용 제품에서 사용되어 오고 있는 Sulfonate계열 음이온 계면활성제 9종의 영향에 따른 고성능섬유 소재인 Vectran[®]의 분산 거동을 연구하여 최종 부직포의 최적 물성을 이끌어내는 계면활성제를 선정하고자 한다.

이에 본고에서는 각 계면활성제 분자 내 친수기, 소수기의 구조적 특징에 따른 Vectran[®]과의 수중

분산 거동을 평가하고자, 쿼드라트(Quadrat) 분석을 결합하여 구획된 구간 내 Vectran[®]의 공간 패턴 및 분포 면적의 비교를 통해 분산 정도를 현상학적으로 접근 및 고찰하였다^{9,10)}.

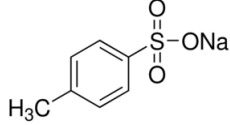
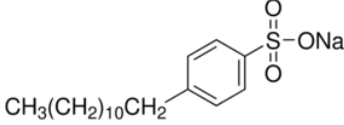
2. 실험

2.1 시료 및 시약

시료는 3mm 길이로 그라인딩된 Vectran[®]이 사용되었고 시약은 Sulfonate계열의 음이온 계면활성제 9종이 선정되었다.

Table 1에 본 실험에 사용된 계면활성제들을 나타내었으며 모든 시약들은 Aldrich에서 구매하였다.

Table 1. The Chemical Structure of surfactants

Surfactants	Chemical Structure
Sodium methanesulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_3\text{C}-\text{S}-\text{ONa} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Sodium hexanesulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2-\text{S}-\text{ONa} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Sodium 1-heptanesulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_2-\text{S}-\text{ONa} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Sodium p-toluenesulfonate	
Sodium dodecylbenzenesulfonate	
Potassium methanesulfonate	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_3\text{C}-\text{S}-\text{OK} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Methanesulfonic acid	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_3\text{C}-\text{S}-\text{OH} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Vinylsulfonic acid sodiumsalt solution	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_2\text{C}=\text{C}-\text{S}-\text{ONa} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$
Formaldehyde-sodium bisulfite adduct	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{HO}-\text{C}-\text{S}-\text{ONa} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$

2.2 실험 방법

계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수중 분산 후 공간 패턴 분석

평균 3mm 섬유 길이의 Vectran® 0.005g을 증류수 500ml에 넣고 500rpm의 교반속도에서 각각의 계면활성제를 2%(o.w.f.)의 농도로 첨가 후 3분간 분산시켰다. 교반된 혼합액은 필터페이퍼가 깔려진 지름 110mm 크기의 자제 부후너 깔대기에 붓고 여과시켰다.

여과가 거의 끝날 때쯤 진공 펌프를 이용해 잔여 수분을 10초간 제거하였으며 샘플 보관이 용이도록 보호 필름을 덮고서 여과지를 제거하였다.

계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수중 분산 후 분포 면적 분석

단위 면적에 분산된 Vectran®의 면적 측정이 용이도록 각 샘플에 사용된 시료의 중량을 0.1g으로 늘리되 분산 실험 방법 및 첨가한 계면활성제는 공간 패턴 분석과 동일하게 진행하였다.

2.3 실험 분석 및 평가

계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수중 분산 후 공간 패턴 분석

특정 연구 영역 조사 시 사용되는 작은 단위 공간의 표본 추출을 의미하는 쿼드라트법에 따라 계면활성제가 첨가된 샘플의 쿼드라트 크기를 가로 세로 길이가 10mm인 정방형으로 설정하고, 분산 실험 진행 후 섬유들이 여과되는 지름 110mm의 필터페이퍼를 Figure 1(a)와 같이 89개의 쿼드라트로 구획 후 각 쿼드라트 내 자리 잡은 섬유장의 개수를 세었다.

공간 패턴은 분산 지수라고도 불리는 ‘Variance-to-Mean Ratio’의 수치를 통해 분산 정도를 판단하게 되는데 계산된 VMR값이 1에서 멀어질수록 해당 공간 패턴이 응집되어 있다고 여기고, VMR값이 0에 가까울수록 잘 분산되어 있다고 판단하며 아래 식(1)에 의해 산출하였다¹¹⁾.

$$VMR = \frac{VAR}{Mean} = \frac{\sum f_i x_i^2 - \left[\frac{(\sum f_i x_i)^2}{m} \right]}{\frac{m-1}{\frac{n}{m}}} \dots\dots\dots (1)$$

VAR : Variance of the quadrat frequencies
Mean : Mean quadrat frequency

f_i : Frequency of quadrats
 x_i : Number per quadrats
 m : Number of quadrats
 n : Number of Vectran®

계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수중 분산 후 분포 면적 분석

계면활성제 첨가 조건에 따라 각기 다른 분산 거동의 결과로 나타난 Vectran®의 면적 분포를 비교하므로, 표준편차를 평균으로 나눈 값에 100을 곱한 변동계수(CV(%), Coefficient of Variation)를 계산해 Figure 1(b)와 같이 8구획된 각 샘플의 평균 면적에 기초한 상대적인 분산 정도를 비교하였다. CV(%)는 부직포 직물의 불균일성 척도로 관행적으로 사용하는 cut-and-weight법 및 다양한 부직포 연구에서 균일성의 지수로써 사용되고 있다.

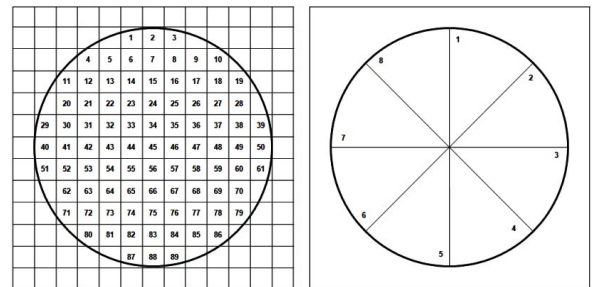
섬유 분포 면적은 이미지 프로그램을 사용해 Relaxation-Thresholding-Inverting-Stylize Filtering(Finding edge)-Layer Selecting의 과정을 거친 후 히스토그램에 나타난 픽셀수를 통해 측정되었다.

아래 식(2)에 의해 산출된 CV(%값을 통해 통계적인 관점에서 각 샘플들이 평균 면적을 중심으로 얼마나 분산되어 있는지를 상대적으로 비교하고, 촬영된 각 샘플 사진을 통해서도 분산된 섬유 분포 모습을 육안으로 확인하였다¹²⁻¹⁵⁾.

$$CV = \frac{S}{Mean} \times 100(\%) \dots\dots\dots (2)$$

S : Standard deviation of 8 areas covered with Vectran®

Mean : Mean of 8 areas covered with Vectran®



(a) Sample 1 (b) Sample 2

Figure 1. The images of divided samples for each experimental methods.

3. 결과 및 고찰

3.1 계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수증 분산 후 공간 패턴 분석

Figure 2에 각 샘플의 쿼드라트 내 위치하고 있는 섬유의 개수를 흑백 음영값으로 표현하였으며 이를 바탕으로 분산 지수로써 계산한 VMR값은 Table 2와 같다. 계면활성제를 첨가하지 않은 Vectran®의 공간 패턴에 따른 VMR값은 실험군 중 가장 큰 2.49(S1)로 우선적으로 계면활성제 유무 효과를 확인할 수 있었다.

3.1.1 Sulfonate계열 계면활성제의 알킬기의 길이에 따른 공간 패턴 분석: Sodium methanesulfonate(S2), Sodium hexanesulfonate(S3), Sodium 1-heptanesulfonate(S4)

소수기로써의 탄화수소는 탄소 수와 그 구조에 따라 계면활성제 수용액의 물성에 큰 영향을 미치게 되는데, 소수기에 결합된 알킬기의 길이가 길어

짐에 따라 소수성 상호작용이 일어나 계면활성제 분자간이 회합하려는 힘이 강력해진다. 이에 따라 임계미셀농도가 떨어지게 되어 계면 성질에 변화가 일어나 Vectran®과의 분산 작용이 원활히 일어날 것으로 사료되었다^{16,17}.

공간 패턴을 분석한 결과, 메틸기(-CH₃)보다는 펜틸기(-C₅H₁₁), 헥실기(-C₆H₁₃)처럼 알킬기의 길이가 길어질수록 다소 미소하나마 1.57, 1.53, 1.5로 VMR값이 낮아져 Vectran®간의 응집 현상이 개선된 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 Sulfonate계열 계면활성제의 아릴기 도입에 따른 공간 패턴 분석: Sodium p-toluenesulfonate (S5), Sodium dodecylbenzene sulfonate(S6)

소수성이 매우 강한 원자단인 아릴기가 소수기로 작용 시 이에 따른 계면활성제의 분산 성능을 확인하고자 파라 위치로 연결된 아릴 Sulfonate계열 계면활성제 S5, S6을 선정하였다. 이의 공간패턴은 계면활성제를 첨가하지 않은 S1(2.49)의 VMR값에

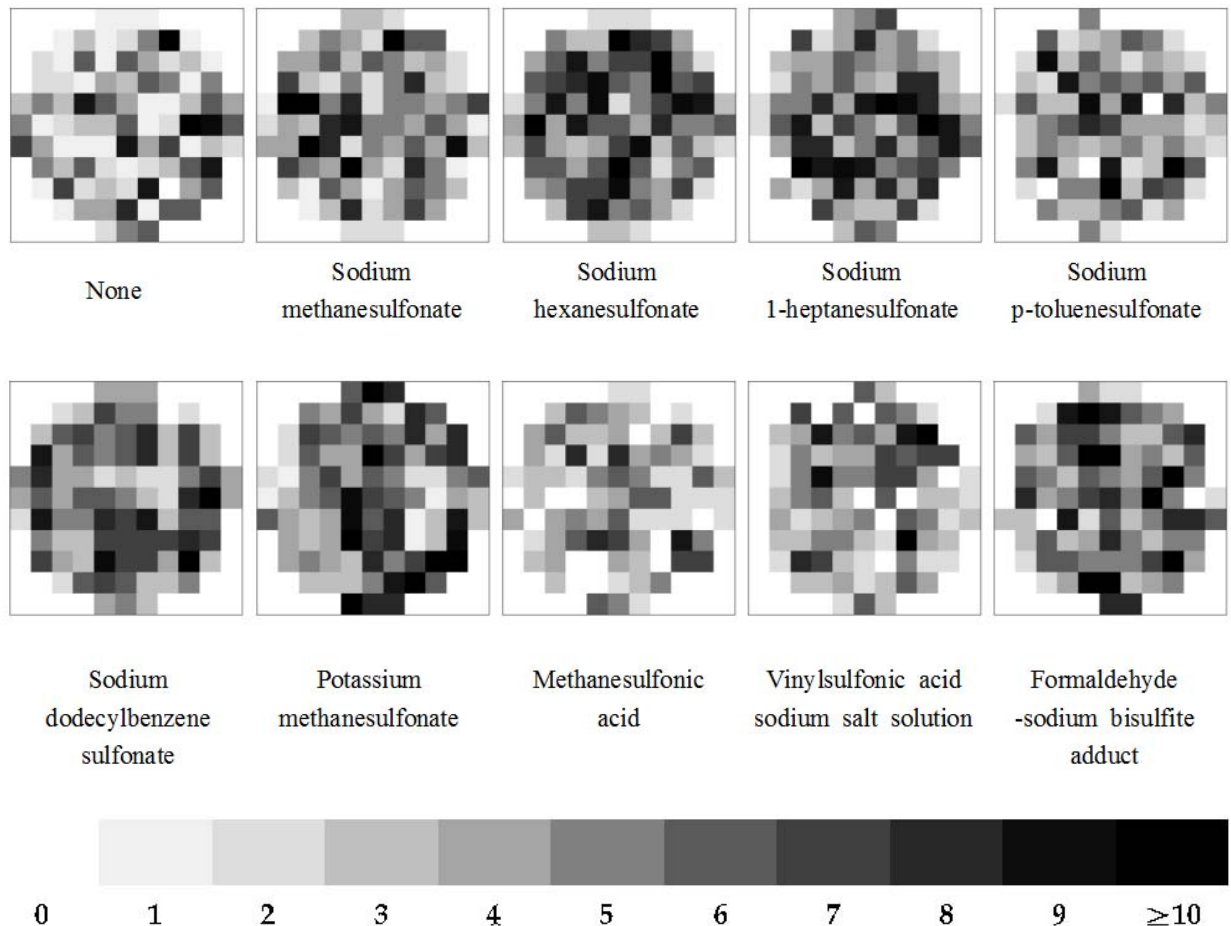


Figure 2. The color intensity variation over number of Vectran® for each sample.

Table 2. The values of VMR for each sample added different surfactants

No.	Surfactants	VMR
1	None	2.49
2	Sodium methanesulfonate	1.57
3	Sodium hexanesulfonate	1.53
4	Sodium 1-heptanesulfonate	1.5
5	Sodium p-toluenesulfonate	1.43
6	Sodium dodecylbenzene sulfonate	1.24
7	Potassium methanesulfonate	1.64
8	Methanesulfonic acid	2.26
9	Vinylsulfonic acid sodium salt solution	1.85
10	Formaldehyde-sodium bisulfite adduct	1.72

비해 확연히 낮은 값인 1.42, 1.24로 원활한 분산이 일어났음을 시사하였다.

앞서 알킬기의 길이에 따른 공간 패턴 분석을 통해 길이가 길어질수록 분산 성능이 우수한 것을 확인하였듯, 아릴기와 함께 긴 길이의 알킬기가 결합된 S6(1.24)은 전체 VMR값 중 최소값을 가지고 육안으로도 확연히 Vectran®이 균일하게 분포하고 있음을 체감할 수 있었다.

3.1.3 Sulfonate계열 계면활성제의 이온결합 차이에 따른 공간 패턴 분석: Sodium methanesulfonate(S2), Potassium methanesulfonate(S7), Methanesulfonic acid(S8)

Sulfonate계열 계면활성제의 친수기에 결합된 이온의 종류에 따른 분산 영향성을 알아보기 위해 이온 결합이 각기 다른 원소로 이루어진 계면활성제를 선정하였다. S2, S7과 S8은 동일한 소수기 구조를 가지지만 친수기와 이온결합을 각각 나트륨 이온(Na⁺), 칼륨 이온(K⁺), 수소 이온(H⁺)과 이루고 있다. 계면활성제 내 친수기 분자 구조에 이온화 에너지가 큰 양이온이 결합될수록 전기적인 반발력으로 적은 수의 분자 수가 회집함에도 미셀이 형성되고, 이와 직접적인 관계가 있는 크라프트점(kraft point) 또한 상승하게 되어 Vectran®과의 분산 작용에 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상하고 공간 패턴 실험을 진행하였다.

Table 3. The values of CV(%) for each sample added different surfactants

No.	Surfactants	CV(%)
1	None	145.4
2	Sodium methanesulfonate	48.6
3	Sodium hexanesulfonate	46.6
4	Sodium 1-heptanesulfonate	27.2
5	Sodium p-toluenesulfonate	35.9
6	Sodium dodecylbenzene sulfonate	25.7
7	Potassium methanesulfonate	51.1
8	Methanesulfonic acid	74.7
9	Vinylsulfonic acid sodium salt solution	80.4
10	Formaldehyde-sodium bisulfite adduct	78.2

그 결과 S2, S7과 S8의 VMR값은 각각 1.57, 1.64, 2.26으로 양이온성이 큰 나트륨 이온과 결합되었을 시 분산성이 상대적으로 개선되었으며 수소 이온과 결합한 S9(2.26)는 계면활성제를 무첨가한 값(2.49)과 유사한 수치로 수중 내 Vectran®과의 분산 작용에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보였다.

3.1.4 Sulfonate계열 계면활성제의 특수구조 도입에 따른 공간 패턴 분석: Vinylsulfonic acid sodium salt solution(S9), Formaldehyde-sodium bisulfite adduct(S10)

계면활성제 분자 내 이중결합과 기능기의 도입에 따른 공간 패턴은 다음과 같다.

계면활성제를 첨가하지 않은 조건과의 비교 시 분산성이 다소 개선되었지만, 각각 1.85, 1.72의 비교적 높은 VMR값을 나타내었다. 이를 통해 이중결합 및 하이드록시기(-OH)와 같은 기능기의 도입에 따른 효과는 미비한 것으로 확인되었다.

3.2 계면활성제가 첨가된 Vectran®의 수중 분산 후 섬유 분포 면적 분석

본 실험에도 공간 패턴 분석 실험에 첨가되었던 동일한 계면활성제들이 사용되었으며 Figure 3에 Relaxation-Thresholding-Inverting 과정을 거친 각 샘플의 이미지를 Table 3에 상대적인 분포 면적 계산을 통한 CV(%)값을 나타내었다. 선행 실험값과 비

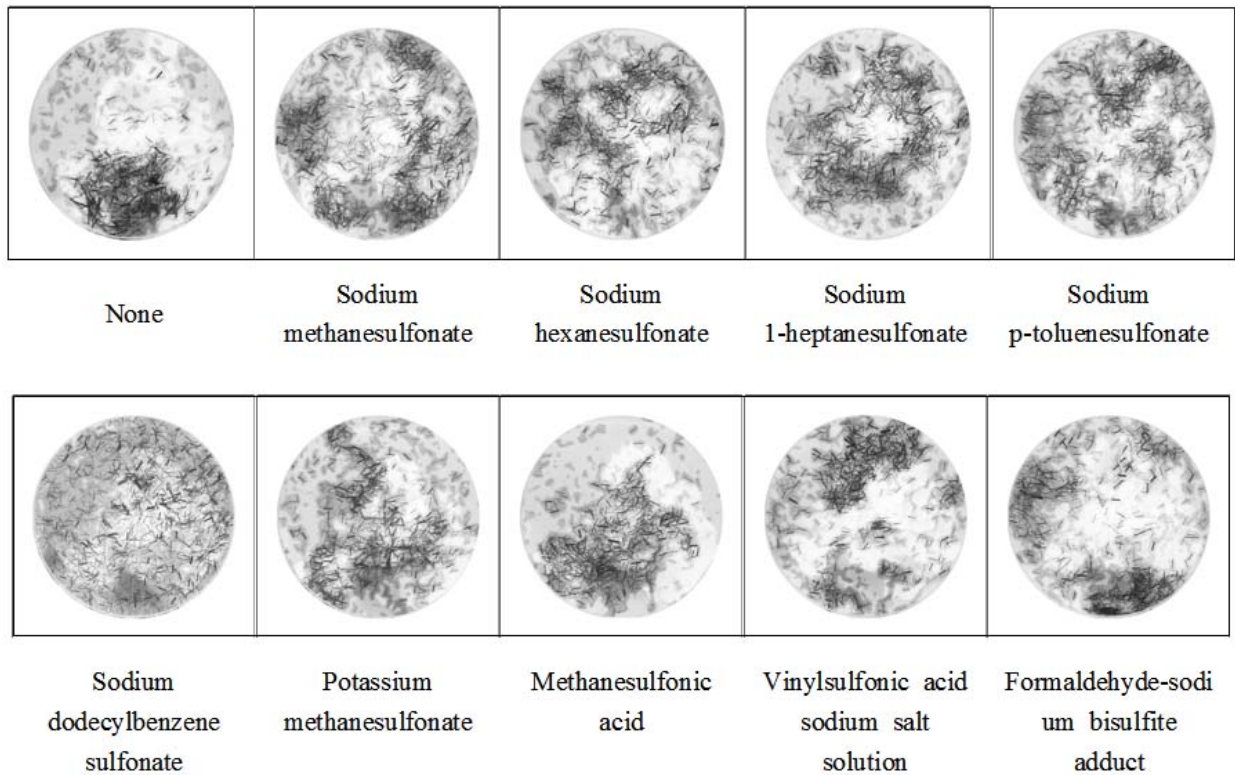


Figure 3. Inverted images of each sample added different surfactants.

교하여 전반적으로 비슷한 양상이 관찰되었으며 육안으로 보다 선명한 값 변화를 확인할 수 있었다.

3.2.1 Sulfonate계열 계면활성제의 알킬기의 길이에 따른 섬유 분포 면적 분석: Sodium methanesulfonate(S2), Sodium hexanesulfonate(S3), Sodium 1-heptanesulfonate(S4)

알킬기가 결합된 Sulfonate계열 계면활성제가 첨가된 섬유 분포 면적 따른 CV(%값은 48.6(S2), 46.6(S3), 27.2(S4)와 같으며, 전반적으로 50 이하의 값을 나타냈다. 점진적이라 여길 수는 없지만 분명히 알킬기의 길이가 길어짐에 따라 소수성 상호작용으로 분산 작용이 원활히 일어나는 조건이 갖추어져 Vectran®이 고르게 분포하는 것을 섬유 분포 면적 분석을 통해 확인하였으며, 이는 공간 패턴 분석 결과 값과 유사한 경향을 가지면서 보다 확연히 구분되었다.

3.2.2 Sulfonate계열 계면활성제의 아릴기 도입에 따른 섬유 분포 면적 분석: Sodium p-toluenesulfonate(S5), Sodium dodecylbenzene sulfonate(S6)

아릴기가 도입된 Sulfonate계열 계면활성제 역시

공간패턴 분석의 결과 값과 유사한 양상을 보였으며 계면활성제를 첨가하지 않은 샘플의 CV(%값과 비교 시 145.4, 35.9, 25.7로 극명한 차이를 나타냈다.

선행 실험과 마찬가지로 소수성이 강한 아릴기, 그리고 긴 알킬기와 결합된 아릴기의 도입이 Vectran®과의 분산에 큰 영향을 나타내 S5와 S6의 CV(%값이 전체 결과 값 중 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다. S6은 육안으로 판단 시에도 확연히 고르게 분산된 모습을 가지고 있다.

3.2.3 Sulfonate계열 계면활성제의 이온결합 차이에 따른 섬유 분포 면적 분석: Sodium methanesulfonate(S2), Potassium methanesulfonate(S7), Methanesulfonic acid(S8)

앞절에서는 S8의 공간패턴이 계면활성제를 첨가하지 않은 조건에 가까운 값을 나타냈으나 실험에서는 CV(%값이 각각 145.4(S1), 74.7(S8)을 나타내 수치적인 양상에 변화를 나타냈으며 육안으로도 어느 정도 분산 효과를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

각기 다른 양이온이 결합된 S2(48.6)과 S7(74.7)의 경우 선행 실험값과 비슷한 경향을 나타냈다.

3.2.4 Sulfonate계열 계면활성제의 특수구조 도입에 따른 섬유 분포 면적 분석

계면활성제 내 특수구조 도입에 따른 섬유 분포 면적 경향성 역시 공간 패턴 분석의 결과 값과 유사하였으며 이를 통해 이중 결합 및 하이드록시기와 같은 기능기는 Vectran®과의 분산성에 별다른 영향을 주지 않는 것을 다시 확인할 수 있었다.

육안으로 파악한 각 샘플의 섬유 분포 면적과 전체 실험군의 계산된 CV(%값을 비교 시, 최소 50 이하의 CV(%값이 산출될 때부터 긍정적인 분산 형태를 가지는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제 분자 내 친수기, 소수기의 구조적 특징에 따른 Sulfonate계열의 음이온 계면활성제과 고성능 섬유 소재인 Vectran®의 수중 분산 거동을 현상학적으로 연구하고자 쿼드라트 분석을 결합해 구획된 구간에 분산된 섬유장의 공간 패턴 및 섬유 분포 면적을 비교하여 분산 정도를 판단하였다. 두 실험의 결과 값은 비슷한 경향을 나타냈으며, 섬유 분포 면적을 비교 시 분산 정도를 더욱 선명히 평가할 수 있었다.

1. 계면활성제를 첨가하지 않은 샘플의 공간 패턴 및 섬유 분포 면적을 나타내는 VMR과 CV(%값은 실험군 중 가장 높은 수치를 나타내 계면활성제 첨가 유무에 따른 분산 효과를 확인할 수 있었다.
2. 메틸기(-CH₃)보다는 펜틸기(-C₅H₁₁), 그리고 헥실기(-C₆H₁₃)처럼 계면활성제에 결합된 알킬기의 길이가 길어질수록 소수성 상호작용이 일어나 임계미셀농도가 감소되어 Vectran®과의 분산 작용이 원활히 일어났음을 VMR과 CV(%값이 낮아지는 것을 통해 확인하였다.
3. 소수성이 매우 강한 원자단인 아릴기가 도입된 Sulfonate계열의 계면활성제 첨가 시 현저히 낮은 VMR과 CV(%값을 나타냈는데, 계면활성제에 결합된 알킬기가 길어질수록 분산 성능이 개선되었듯 아릴기가 도입된 계면활성제 또한 긴 알킬기가 결합되었을 시 가장 낮은 VMR과 CV(%값을 나타내 분산 성능이 우수한 것을 확인하였으며, 육안으로도 Vectran®이 고르게 분포하고 있었다.

4. 이온성인 Sulfonate계열 계면활성제의 친수기에 이온화 에너지가 큰 양이온이 결합될수록 Vectran®의 분산성이 개선되는 것을 확인하였고 이중 결합 및 하이드록시기와 같이 관능기의 도입은 분산에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 사료되었다.

본 연구에 적용된 분석법들은 현상학적인 관찰을 통해 접근되었기에 섬유 분산 거동 평가의 절대적인 지표로 삼기에는 다소 부족할 수 있다. 하지만 쿼드라트 분석을 결합한 공간 패턴 및 섬유 분포 면적 분석이라는 새로운 평가법을 제시하였고, 분산 지수로 나타낸 VMR과 CV(%이라는 산술값이 나란히 경향성을 가지며 이를 육안으로도 확인하였다는데 그 의미를 둘 수 있다.

향후 연구에서는 Vectran®과의 분산 작용이 우수했던 계면활성제를 선정해, Wet-laid식으로 제조한 Vectran® 부직포의 물성 연구를 통해 계면활성제의 영향을 확인하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. D. E. Beers and J. E. Ramirex, Vectran High-performance Fibre, *J. of the Textile Institute*, **81**(4), 561(1990).
2. I. S. Kim, High Performance Industrial Materials -Super Fiber Materials-, *Fiber Technology and Industry*, **18**(1), 1(2014).
3. B. Wulforst, "Textile Technology", Hanser, München, pp.167-187, 2004.
4. C. F. White, Wet-formed Nonwoven Webs from High-performance Fibers, *Tappi J.*, **72**(12), 109(1989).
5. A. Jayachandran, Fundamentals of Fiber Dispersion in Water, M.S. Thesis, North Carolina State University, 2001.
6. S. K. Lee and C. W. Joo, Studies on the Manufacture of Wet-laid Nonwoven Fabrics Using High Tenacity Fibers(I) -Theoretical and Phenomenological Consideration of Fiber Dispersion in Water-, *J. of Korean Fiber Society*, **34**(12), 810(1997).

7. Y. A. Kwon, Effects of Cationic Surfactant on the Selected Physical Properties of DP Finished Cotton Fabrics(I) -Wetting Behavior of Single Fiber-, *Textile Coloration and Finishing(J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **13**(1), 18(2001).
8. C. H. Kim, Detergency and Liquid Wetting/Retention Properties of Soiled Polyester/Cotton (65/35) Cloth in Nonionic Surfactant Solutions, *Textile Coloration and Finishing(J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **23**(2), 140(2011).
9. D. W. Harvey, Geographical Processes and the Analysis of Point Patterns: Testing Models of Diffusion by Quadrat Sampling, *Transactions of Institute of British Geographers*, **40**, 81(1966).
10. W. M. Linfield, "Anionic Surfactants", Marcel Dekker, INC, New York, pp.316-343, 1976.
11. J. F. Heltshe and T. A. Ritchey, Spatial Pattern Detection Using Quadrat Samples, *Biometrics*, **40**(4), 877(1984).
12. B. Pourdeyhimi and L. Kohel, Area-based Strategy for Determining Web Uniformity, *Textile Research J.*, **72**(12), 1065(2002).
13. C. Ericson and J. F. Baxter, Spunbond Nonwoven Fabric Studies I: Characterization of Filament Arrangement in the Web, *Textile Research J.*, **43**(7), 371(1973).
14. D. Das, B. S. Butola, and S. Renuka, An Investigation into Fiber Dispersion Behavior in Water with Reference to Wet-Lay Nonwoven Technology, *J. of Dispersion Science and Technology*, **33**(8), 1225(2012).
15. H. Lien and C. Liu, A Method of Inspecting Non-woven Basis Weight Using the Exponential Law of Absorption and Image, *Textile Research J.*, **76**(7), 547(2006).
16. M. J. Rosen, "Surfactants and Interfacial Phenomena", Wiley-Interscience Publication, New York, pp.105-177, 1978.
17. S. Paria and K. C. Khilar, A Review on Experimental Studies of Surfactant Adsorption at the Hydrophilic Solid-water Interface, *Advances in Colloid and Interface Science*, **110**, 75(2004).