

<연구논문(학술)>

텐터기 노즐 분사각의 최적설계를 위한 수치해석적 연구

전두환[†] · 박시우¹ · 김정환

¹한국섬유기계연구원, 영남대학교 융합섬유공학과

A Numerical Study for Design Optimization of Nozzle Injection Angle in Tenter Machine

Du Hwan Chun[†], Si Woo Park¹ and Jung Han Kim

¹Korea Textile Machinery Research Institute, Gyeongsan, Korea

Department of Textile Engineering and Technology, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

(Received: February 14, 2013 / Revised: March 14, 2013 / Accepted: April 17, 2013)

Abstract: A tenter is very important to dry and heat-set fabrics in textile dyeing and finishing industry. However, the tenter machine typically utilizes more than 80% of all the power in dyeing system, and yet is one of the primary machine which affects quality of fabrics. Therefore, performance optimization of the tenter machine is required to reduce energy consumption and enhance quality of fabrics. To optimize the tenter machine, it is important to maintain the uniform flow rate, which can be obtained by optimizing a nozzle geometry. In this study, emboss hole angle was investigated as main parameter in flow rate uniformity and heat flux efficiency. The analysis results were compared with those acquired from bench-scale dryer test in the laboratory. The tenter machine performance simulated by Computational Fluid Dynamics(CFD) was optimized by controlling emboss hole angle.

Keywords: tenter, optimization, computational fluid dynamics, flow rate uniformity, heat flux efficiency

1. 서 론

일반적으로 텐터는 염색 제품의 제조시 건조, 수지가공 또는 폭출(Setting) 작업에 활용되어 염색 제품의 품질에 큰 영향을 주는 장치로 24시간 풀가동이 되는 에너지 다소비 설비이다^{1,3)}.

염색가공 공정 작업상 필수적으로 사용되는 텐터는 각종 염색설비 중 가장 활용도가 높은 장치 중 하나이다.

텐터의 성능을 결정하는 요인은 여러 가지가 있으나, 섬유의 종류 또는 가공 공정의 목적에 따라 적절한 건조속도 및 효율성²⁾, 원단의 전 폭에 걸친 건조 균일도³⁾, 습윤 공기의 자동 배출, 원단의 장력 및 오버피드, 그리고 각종 자동화 제어 장치의 활용 등으로 구분되어 질 수 있다^{2,3,6-8)}.

그러므로 텐터기 챔버 내부의 공간구조에 따른

비효율적 유로형상과 공기 분사노즐 및 안내덕트의 정확한 압력 및 온도분포에 대한 현장 기초자료를 확보하여 텐터의 에너지 절약 및 건조 원단의 품질을 향상시킬 수 있는 구조의 설계가 요구된다⁴⁾.

텐터 내부의 고온 건조 공기가 섬유상의 수분을 균일 건조시키고 습윤 공기의 배출, 유입 공기의 혼합 및 순환되는 과정에서 유로 형상의 영향을 파악하고 효과적인 수분 배출 및 유동 효율을 최적화할 수 있는 형상 최적화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다²⁻⁵⁾. 그러나 섬유기계에 대한 연구 인력의 부족으로 인하여 이러한 연구가 이루어지지 않고 있다.

본 연구를 통하여 수치해석을 활용한 최적화 설계로써 에너지 다소비 설비인 텐터기 노즐의 유동 균일도를 향상시키고 유동 효율을 최적화함으로써 에너지 소비를 감소시키고 가공 원단의 품질을 향상시킬 수 있는 구조를 연구하고자 한다.

[†]Corresponding author: Du Hwan Chun (dhchun@ynu.ac.kr)

Tel.: +82-53-810-2772 Fax.: +82-53-810-4684

©2013 KSDF 1229-0033/2013-06/134-139

2. 수치해석

2.1 지배 방정식

텐터기 내부 유로 및 노즐 유동의 모사를 위한 지배방정식들은 연속체 가정에 의한 연속방정식과 운동량 방정식이며, 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서, u_j 는 j 방향의 순간속도, ρ 는 유체의 밀도, P 는 정압, τ_{ij} 는 점성 스트레스 텐서, 그리고 f_i 는 외력항을 나타낸다. 점성 스트레스 텐서 τ_{ij} 는 뉴턴 유체에서 식(3)과 같은 속도구배의 항으로 표현될 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right) \delta_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, μ 는 유체의 점성, δ_{ij} 는 Kronecker delta 이다. 이로부터 Navier-Stokes 방정식을 얻는다. Navier-Stokes 방정식은 비선형성과 경계조건의 복잡성이 결부되어 정확한 엄밀해를 얻기가 불가능하다. 그러므로 근사적인 해를 구하거나 수치적으로 해를 구하는 방법이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 가장 대표적인 난류 유동의 해석방법인 FANS 방정식을 적용하여 텐터기 내부에서 발생하는 난류 유동을 모사하였다. 난류 유동에 대한 연속방정식과 운동량 방정식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\mu} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

난류 유동에 대한 운동량 방정식은 레이놀즈 응력이라고 불리워지는 $-\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j$ 의 미지항을 추가적으로 포함하게 된다. 이러한 섭동 요소들 간의 상관

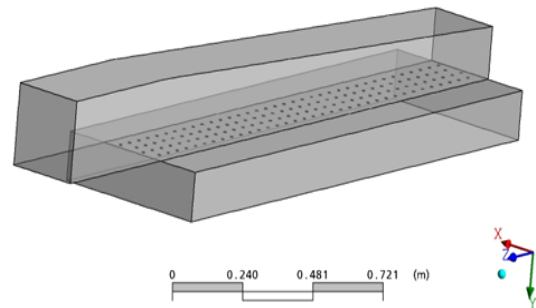
관계는 Averaging 과정에서 생성된 것이며, 이로 인한 FANS(Favre averaging Navier-Stokes) 방정식을 닫힘을 이루기 위한 모델링이 필요하다^{9,10}.

본 연구에서는 Boussinesq 가정에 의하여 레이놀즈 응력을 선형함수로 가정하여, 난류운동에너지 $k = \frac{1}{2} \bar{u}_i \bar{u}_i$ 를 정의하고, 가장 잘 알려진 난류 모델인 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류를 해석하였다.

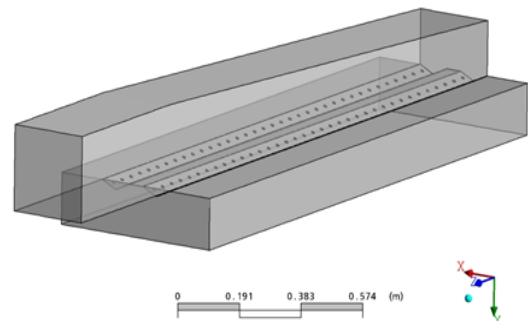
각 지배방정식들은 각 검사체적에 대하여 수치적으로 적분되어 검사체적의 Cell 중심에 유동값들이 축적되어지며, 검사체적간의 경계면에서 출입되는 유동값들의 Conservation을 고려하여 계산되어지는 유한체적법에 의하여 이산화되고, 압력과 속도 및 난류량의 보정을 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 계산을 수행하였다.

2.2 해석 모델

텐터기 유동을 최적화하여 에너지를 저감하기 위하여 텐터기 노즐부 형상, 노즐 덕트의 유동에 대한 해석을 수행하고 분출유동 및 내부 유동을 최적화 할 수 있도록 형상을 개선하였다. 본 연구를 위한 노즐 덕트 해석 모델은 Figure 1과 같고 경계조건은 Table 1과 Figure 2에 나타내었다.



(a) Emboss hole nozzle



(b) Zigzag hole nozzle

Figure 1. Tenter nozzle.

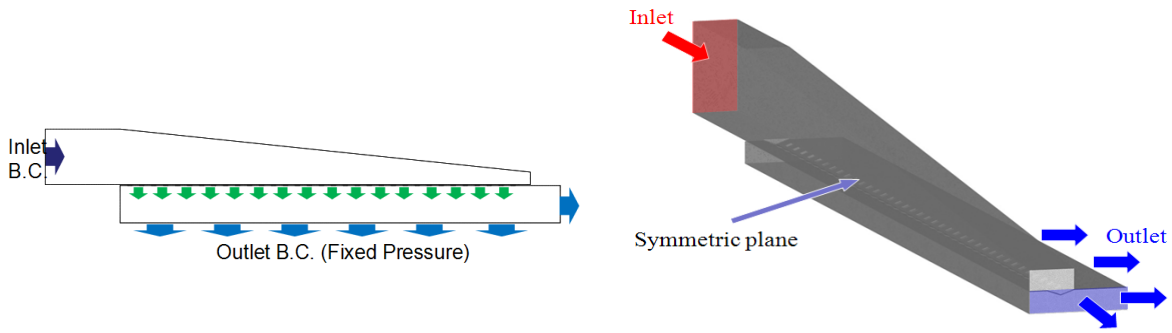


Figure 2. 2D model and boundary condition.

노즐의 분포를 변화하여 계산을 수행하였다. 각 덕트 분배구에는 동일한 압력 조건을 적용하고, 열 챔버를 통과한 이후인 입구부에는 이상적인 속도 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다.

Table 1. Boundary conditions

Inlet	Outlet
Mass flow rate 17.5CMM (m ³ /min)	Fixed pressure 1 atm

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐덕트 유동해석

노즐 덕트와 노즐 구멍의 형상에 따라 분사류의 각도 및 강도가 결정되며, 이상적인 분사류의 각도 및 강도는 노즐덕트의 입구로부터 끝단까지 모든 노즐에서의 강도 및 분사각도가 일정할 때라고 가정한다. 그러한 조건에서 원단에 가해지는 힘의 강도가 증가하고 원단 전체에 균일한 힘이 가해지기 때문에 원단의 가공 효율 및 품질이 향상된다. Figure 3은 타원형

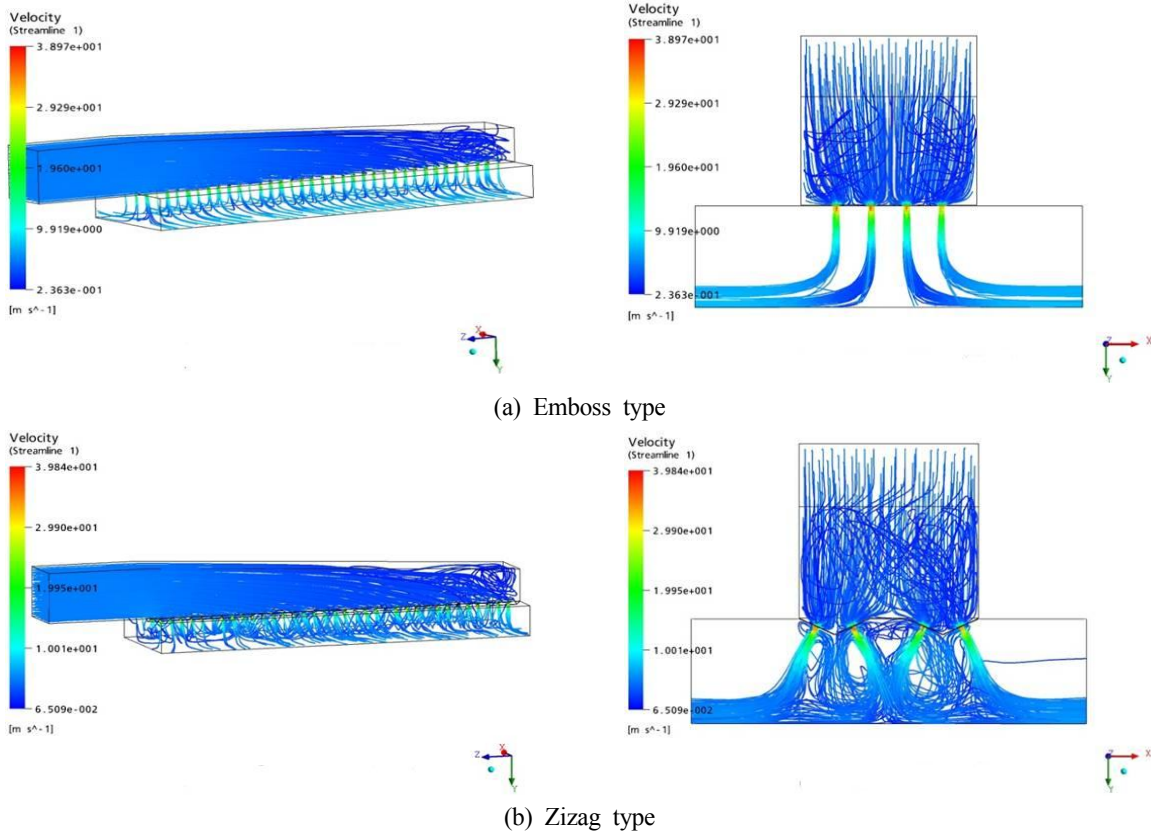


Figure 3. Injection flow behavior.

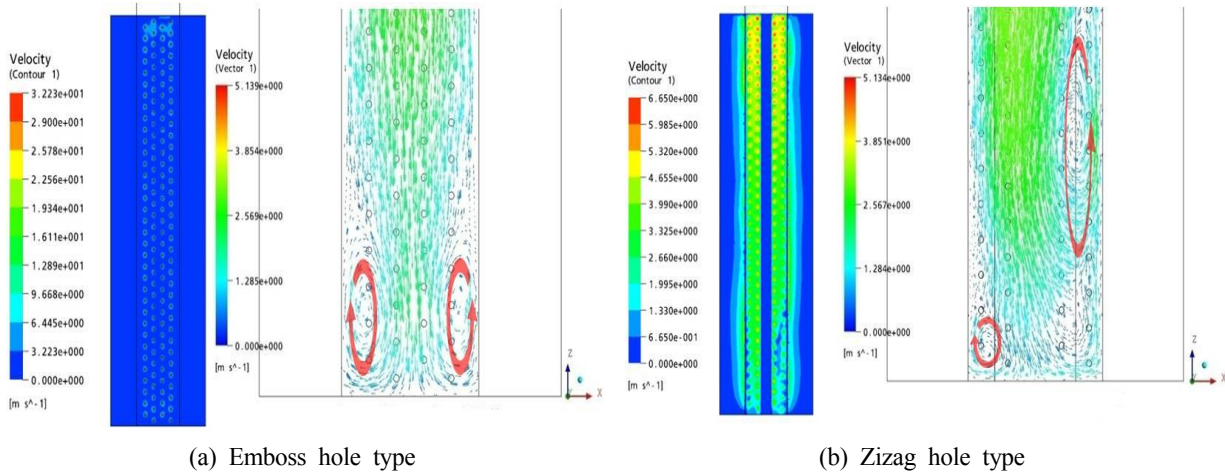


Figure 4. Inner flow of nozzle duct.

엠보홀과 지그재그 노즐 덕트의 내부 유선분포 및 분출율을 나타낸 것이다.

Figure 3 (a)와 Figure 4 (a)에 나타난 바와 같이 엠보형 노즐덕트의 끝단에 양측에 대칭적으로 와류가 발생하고 있으며 이는 텐터기의 에너지 효율을 저하시키는 원인이 된다. Figure 3 (b)와 Figure 4 (b)에 나타난 바와 같이 지그재그형 노즐덕트에서는 대칭적이지 않고 한쪽으로 치우치는 와류가 발생하고 있다.

이는 노즐의 형태에 기인한 무작위적인 분출유동으로 사료된다. 에너지 절감을 위한 이상적인 분사류의 각도 및 강도를 도출함에 있어서 지그재그형보다는 엠보형이 오차가 적기 때문에 본 연구에서 엠보형 노즐을 다룬다.

3.2 엠보형 노즐의 최적설계

Figure 5는 엠보형 노즐의 형상 및 분출 유동에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 타원 형태의 기울어진 홈에 노즐 구멍을 가공하여 Figure 5 (a)와 같이 노즐 덕트의 유동이 노즐 구멍의 타공 방향과 수직으로 형성되어 있음에 따른 분출각이 기울어지는 현상을 보정하는 역할을 하고, 이는 원단에 유동의 충돌 강도를 증가시키고, 분사류 기울어짐에 따른 원단이 받는 힘의 불균형 현상을 방지하는 목적을 가지고 있다.

엠보형 노즐은 엠보홀 각도에 따라 분출되는 유동의 각에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 엠보홀 각도를 조정하여 해석을 수행하여 각 노즐에서 발생하는 유동의 각도와 노즐 덕트 위치에 따른 분출각의

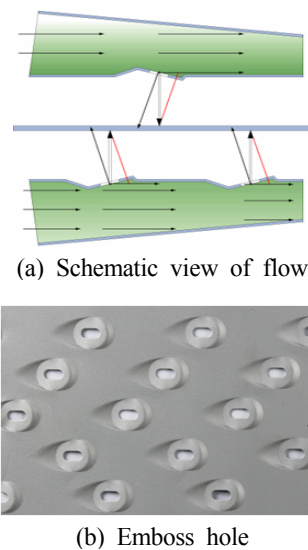


Figure 5. Emboss hole nozzle type.

변화를 분석 모든 노즐 위치에서 유동각이 수직에 가깝게 형성되면서 유량 강도 및 각도의 편차가 최소화 될 수 있는 최적의 엠보 각도를 찾는 것을 목표로 연구를 수행하였다.

Figure 6은 엠보홀 각도가 변함에 따라서 분출 유동의 각도 변화를 보여준다. 이는 앞서 언급했듯이 엠보홀 각도와 분출 유동의 각도는 서로 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 엠보홀 각도가 증가함에 따라 분출 유동의 각도가 분사 노즐 플레이트에 대해 수직에 가까워진다. 분출 유동 각도의 변화는 특히 입구부에서 뚜렷이 나타난다.

각 노즐 구멍에서의 평균 유량과 평균 분사각의 노즐 위치에 따른 변화를 Figure 7에 도시하였다.

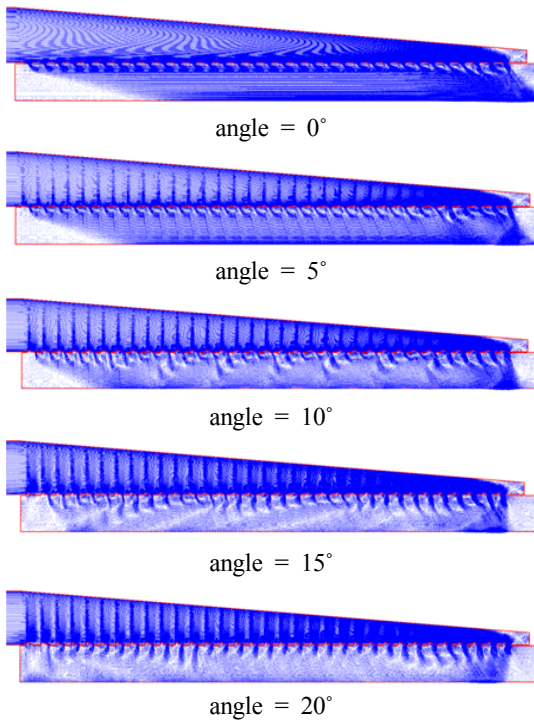
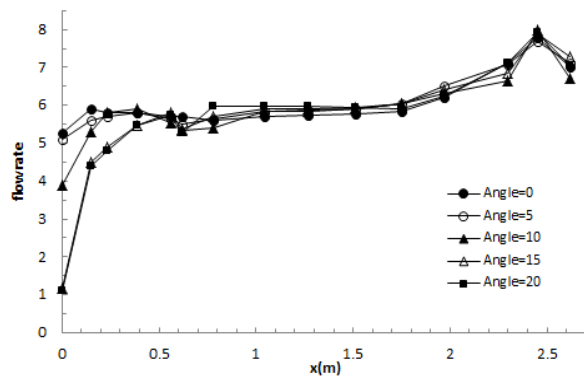
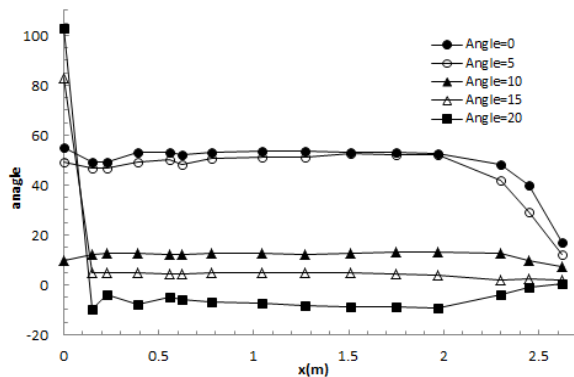


Figure 6. Flow angle according to emboss hole angle.



(a) Flow rate distribution according to emboss hole angle



(b) Injection angle according to emboss hole angle

Figure 7. Effect of emboss hole angle on flow rate and injection angle.

Figure 7 (a)는 엠보홀 각도에 따른 위치별 노즐 구멍에서의 분사류의 유량을 나타낸 것이고, Figure 7 (b)는 각각의 분출 유동의 각도를 나타낸 것이다. 전체적으로 유량의 변화는 크지 않다. 다만 엠보홀 각도가 클 경우 노즐 덕트 입구측에 위치한 노즐에서 강한 회전 유동에 의한 유동 방해영역이 발생하여 분출유량이 급격히 줄어드는 영역이 발생하고 있다.

Figure 7 (b)의 각도에 따른 분출 유동의 각도 분포는 전체적으로 엠보홀 각도가 증가함에 따라 분출각도 감소하는 양상을 보이면서 엠보홀 각도가 약 15도에서는 대부분의 노즐에서 0도에 매우 가까운 분출 각도로 노즐로부터 분사되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 엠보홀 각도가 15도보다 큰 20도인 경우 분출 유동의 각도는 오히려 0도보다 작아져서 음의 각도를 나타내고 있다. 따라서 엠보형 노즐에서 수직방향으로 유동을 분사되도록 하는 최적의 엠보홀 각도는 약 15도이다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 엠보홀 각도가 너무 큰 경우 노즐 구멍 부근의 재순환 영역이 발생하여 유동을 방해하는 작용을 하고, 이러한 현상은 노즐 덕트의 에너지 효율을 저하시키는 역할을 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 텐터기 유동을 최적화하여 에너지 소비를 저감하기 위하여 텐터기 노즐부 형상, 노즐 덕트의 유동에 대한 해석을 수행하고 분출유동 및 내부 유동을 최적화 할 수 있도록 노즐부 형상을 개선하였다. 텐터기 노즐의 분사류는 노즐 덕트의 유동 진행방향에 따른 관성의 영향으로 수직으로 분사되지 못하고 일정각을 가지고 분사하고 있음을 확인하였으며, 분사각에 영향을 미치는 주요 설계인자는 노즐 구멍의 각도임을 확인하였다. 노즐 분사류의 수직 분사를 위한 최적의 엠보 각도는 약 15도이다.

References

1. W. F. Beckwith and J. N. Beard, A Scheme to Assist in the Evaluation of Tenter Frame Dryer Performance, *J. of Manufacturing Science and Engineering*, **101**(1), 80(1979).
2. D. W. Lyons and C. T. Vollers, The Drying of Fibrous Materials, *Textile Research J.*, **41**, 661(1971).
3. J. N. Beard, More Efficient Tenter Frame Oper-

- ations Through Mathematical Modeling, *Textile Chemist and Colorist*, **8**(3), 47(1976).
4. S. I. Park and D. H. Baik, Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame, *Textile Research J.*, **67**(5), 311(1997).
 5. A. H. Nissan and D. Hansen, Heat and Mass Transfer Transients in Cylinder Drying: Part I. Unfelted Cylinders, *American Institute of Chemical Engineers*, **6**(4), 611(1960).
 6. A. C. Dreshfield and S. T. Han, The Drying of Paper, *TAPPI*, **39**, 449(1956).
 7. H. V. Linden, J. Wassink and C. Theusink, Anwendung der Schallströmung von Gasen und Dampfen in der Textilveredlung, *Melliand Textilberichte*, **57**, 53(1976).
 8. R. S. Gregorian and C. G. Namboodri, Comparison of Chemical and Physical Properties of Conventionally and Foam Finished Fabrics, *Textile Chemist and Colorist*, **16**(12), 213(1984).
 9. M. Juraeva, D. J. Song and D. H. Chun, A Design Study of an Air-twist Nozzle by Analysis of Fluid Flow, *Textile Research J.*, **80**(15), 1616(2010).
 10. ANSYS Workbench, CFX-Pre, CFX-Solver, CFX-Post, Version 2005 User's Manual.