

사 염색의 Spindle 유동에 관한 기초적 연구

강민성[†] · 이호준* · 노석홍* · 전두환* · 김희동**

A Fundamental Study on the Spindle Flow of the Yarn Dyeing

Min-Sung Kang, Ho-June Lee, Seok-Hong Noh, Doo-Hwan Chun and Heuy-Dong Kim

Key Words : Incompressible Flow(비압축성 유동), Porosity(다공율), Spindle(스핀들), Yarn Dyeing(사 염색), Level Dyeing(균염)

Abstract

In the field of yarn dyeing, the most generally employed method is a type of package dyeing which uses a package of cheeses stacked on a spindle made of a perforated tube. In order to understand the process of level dyeing, it is essential to perform a study of the porous flow through the spindle for the cheese dyeing method. In this paper, the axisymmetric, incompressible, Navier-Stokes equations are solved for several spindle configurations using a fully implicit finite volume scheme. For investigating the flow patterns through the spindle, porous diameter and porosity is varied in the present study. The computational results show that the total pressure loss depends only on the velocity of inflow regardless of porous diameter and porosity and a large percentage of the mass flow rate through the spindle is discharged at the upside of the spindle. Therefore, it is required to design a new spindle to obtain the level dyeing.

1. 서 론

국내 염색산업은 저가 대량 생산에 의한 이윤 창출이 용이한 포염(fabric dyeing)에 치중하여왔으나, 의복의 고급화 및 특성화에 중점을 두면서 고부가가치의 염색산업을 위한 사 염색 산업기반으로 탈바꿈하고 있다. 사염(yarn dyeing)은 일반적으로 타래실, 치즈(cheese), 정경사 등의 상태로 전처리 및 염색을 하는 방법을 일컬으며, 포염에 비하여 색과 무늬를 다양하게 표현할 수 있고, 원면 염색이나 튜염색에 비하여 완제품을 만드는 시간이 짧아 다품종 소량생산화에 적합한 염색방법이다.

그러나 제직시 잔사가 많아지고, 제품 완성시까지 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 가공단가가 높은 단점을 가지고 있다. 따라서 적은 염료로 균일한 염색이 가능하며, 염색시간이 짧은 사 염색 기술 개발이 시급한 실정이다.

일반적으로 사 염색에서 패키지 염색으로 많이 이용되는 치즈 염색법은 실을 스핀들(spindle)이라 불리는 다공성 튜브에 치즈 상태로 비교적 딱딱하게 감아 사층의 내부로 염액을 순환시켜 염색하는 방법이다.⁽¹⁾ 개략적인 치즈 염색기의 형태는 그림 1에 나타나있다. 캐리어(carrier)를 통해 공급되는 염액은 스핀들의 다공을 통하여 치즈로 분사하게 된다. 이때 중요한 점은 균염성의 확보인데, 균염을 얻기 위해서는 일반적으로 염료의 분산성 및 확산성이 우수하여야 하며, 염액의 유량이 클수록 좋다고 알려져 있다. 그러나, 스핀들 입구에서부터 유동 하류로 갈수록 다공을 통한 유량의 손실 및 공급된 염액의 운동량 변화에 따라 스핀들에서부터 치즈로 분사되는 염액은 상하방향

[†] 안동대학교 대학원 기계공학과

* (재)한국섬유기계연구원

** 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)820-6127

으로 균일하지 못하게 된다. 따라서, 치즈 염색법에서 고효율의 균염기술 확보와 염색 시간의 단축을 위해서는 캐리어로부터 다중 스펀들로 공급되는 유량 및 각 스펀들에서 치즈로 공급되는 유량을 균일하게 만드는 것이 핵심적 기술이다. 이를 위해서는 스펀들의 구멍을 통한 축맥부(vena contracta)의 영향, 유동의 전압 손실 등과 같은 기초적인 연구가 반드시 뒷받침 되어야만 한다.⁽²⁾

본 연구에서는 피염물로 균일한 염액유동을 공급하기에 적합한 스펀들의 설계를 목표로 하며, 그 기초단계로 비압축성, 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 적용한 수치계산을 수행하여 다공벽으로 이루어진 스펀들 내부의 유동 특성을 고찰하였다.

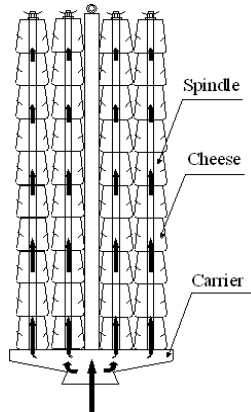


Fig. 1 Configuration of cheese dyeing machine

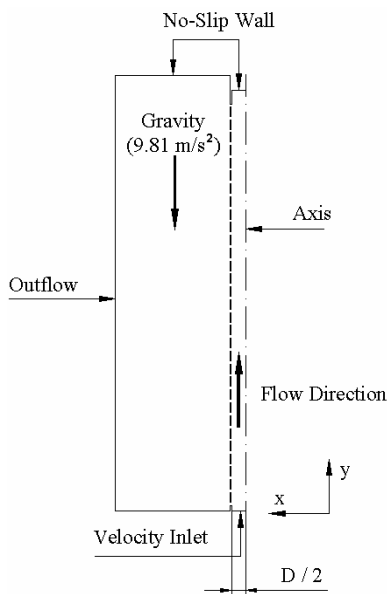


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

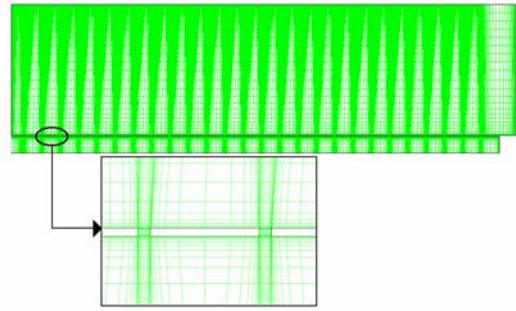


Fig. 3 Grid system

2. 연구 방법

2.1 수치계산 방법

본 연구에서는 사 염색법의 일종인 치즈 염색법에서 효과적인 염색기술 개발을 위하여, 스펀들을 통한 염액의 유동장을 수치적으로 모사하였다. 수치계산에는 비압축성, 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 완전 내제적 유한체적법(fully implicit finite volume scheme)을 적용하였다. 또, 난류 유동장을 모사하기 위하여 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다. 본 연구에 적용된 지배방정식 및 수치계산 방법에 대한 상세는 문헌(3)에 나타나있다.

본 연구에 적용된 계산 영역과 경계조건은 그림 2에 나타나있다. 캐리어로부터 다공성 튜브인 스펀들로 유입된 유동은 다공 벽면을 통하여 치즈로 공급된다. 다공성 튜브의 직경(D)은 53 mm이며, 튜브의 길이(L)은 780 mm이다. 이때 튜브의 두께는 2 mm이며, 다공의 직경(d)는 3 및 4 mm이다.

스핀들 입구의 경계조건으로는 velocity inlet 조건을 적용하였으며, 입구유속(U_i)은 1~3 m/s 까지 변화시켰다. 다공 벽면 및 스펀들 바깥의 상/하부 경계조건으로는 no-slip 벽조건을 적용하였다. 다공 열은 축대칭 계산의 특성상 기하학적인 환형의 틈으로 단순화 하여 구성하였다. 또, 스펀들 바깥 측면은 outflow 조건을 적용하였으며, 실제적으로 스펀들을 통한 유동은 연직상방 방향으로 생성되므로, 중력을 필히 고려하였다.

수치계산에 사용된 작동 유체는 실제 염액과는 밀도 및 점성이 다소 차이가 발생하지만 계산의 단순화를 위하여 물을 사용하였다.

그림 3은 본 수치계산에 적용된 격자계를 나타낸다. 스펀들 내/외부의 계산영역 모두에 대하여 사각격자를 정렬 격자를 사용하였으며, 경계층이

발달하는 모든 벽면과 염액 유동이 외부로 방출되는 다공벽면에 격자를 집중시켰다. 총 격자수는 대략 10 만개를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4 는 스펀들 구멍 직경이 3 mm 이고 다공율이 14 %인 경우, 등 속도분포를 나타낸다. 스펀들 입구의 유속이 1 m/s 인 그림 4 (a)의 경우, 스펀들 외부로 방출되는 대부분의 유량은 스펀들 상부에서만 나타나고 있다. 즉, 스펀들 입구에서부터 유동 상류에 위치한 곳의 다공을 통해서는 축방향으로의 운동량이 상대적으로 매우 크기 때문에 스펀들 외부로의 방출 유량이 거의 나타나지 않는다. 스펀들 입구의 유속이 증가하더라도 스펀들을 통해 외부로 방출되는 유동의 경향성은 거의 동일하게 나타나고 있다.

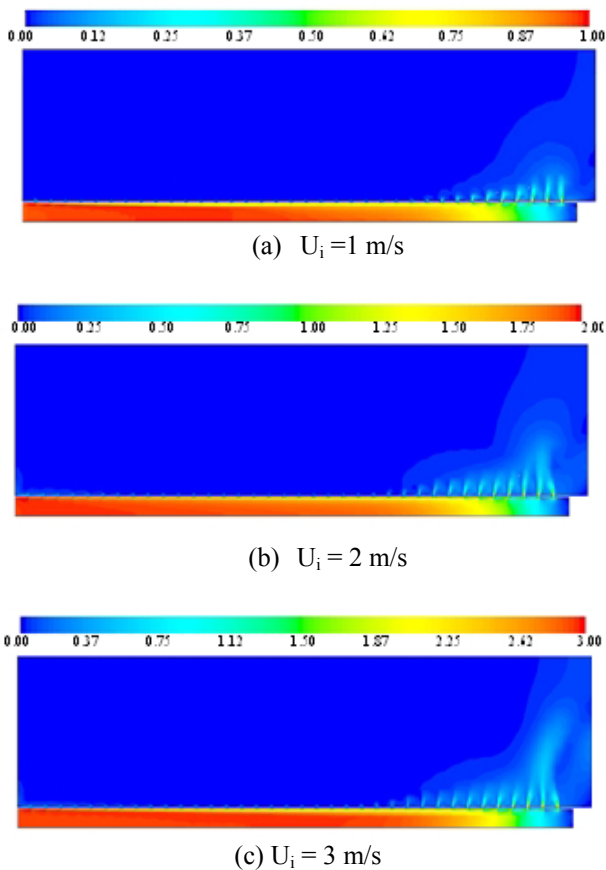


Fig. 4 Velocity contours
(d= 3 mm, Porosity = 14 %)

그림 5 는 스펀들 구멍 직경이 3 mm 이고 다공률이 14 %인 경우, 스펀들 각 구멍을 통해 외부로 방출되는 유량의 분포를 나타낸다. 그림의 횡축은

스핀들 입구를 원점으로 하는 구멍의 축 방향 거리를 스펀들의 수직높이 (L)로 무차원한 거리이며, 종축은 각 구멍을 통해 방출되는 유량을 스펀들 입구를 통해 유입되는 유량으로 무차원한 값이다. 그림 4 에서 살펴본 바와 같이, 스펀들 입구의 유입 유속에 상관없이, 외부로 방출되는 유량의 분포는 거의 동일한 형태로 나타난다. x/L 이 0.7 이하에서는 각 구멍을 통한 유량의 분포가 유입유량의 10 % 미만으로 일정하다가 스펀들 상부 영역에서는 약 16 %까지 증가하고 있다. 본 결과로부터 스펀들을 통해 외부로 방출되는 염액 유동의 분포는 스펀들 입구의 유속에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

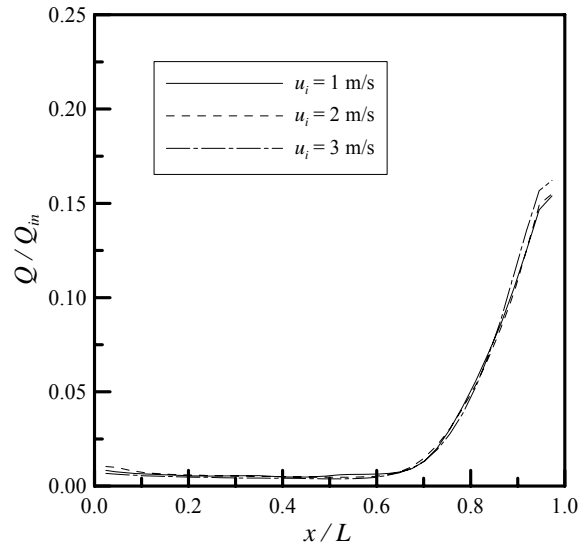
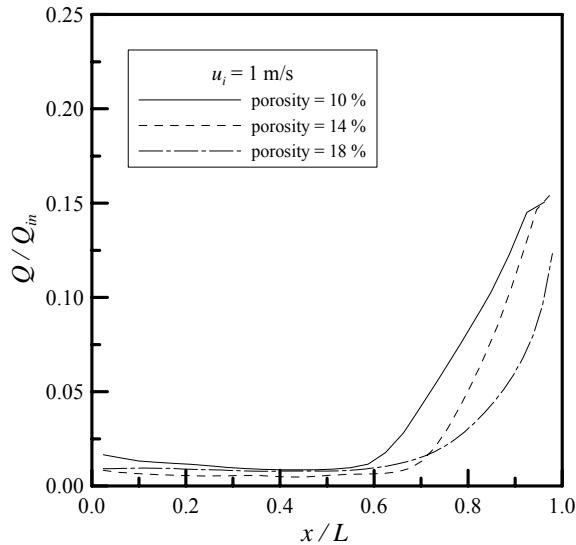


Fig. 5 Mass flow rate distributions
(d=3 mm, Porosity = 14 %)

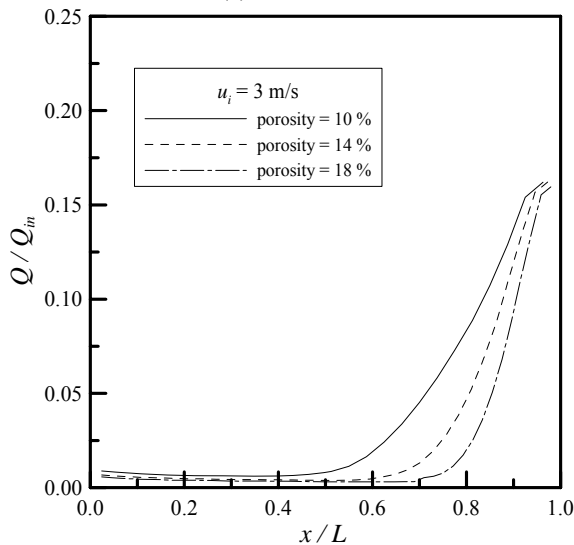
그림 6 은 구멍의 직경이 3 mm 인 경우, 각 구멍을 통한 질량유량에 미치는 다공률의 영향을 나타낸다. 스펀들 입구 유속이 1 m/s 인 그림 6(a)의 경우, 다공률이 10 %일 때 x/L 이 0.6 이하에서는 각 구멍을 통한 유량이 스펀들로 유입되는 유량의 약 2% 미만으로 유출되며, x/L 이 0.6 이상이 되면 유출 유량이 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 가장 상부에 있는 구멍을 통한 유출 유량은 스펀들 유입 유량의 약 15.5%까지 나타나고 있다. 다공률이 14%인 경우에는 구멍을 통한 유출유량이 급격하게 증가하는 위치가 대략 x/L 이 0.7 로 나타난다. 그러나, 최대 유출유량 값은 다공률이 10 %인 경우와 거의 동일하다. 스펀들 입구 유속이 3 m/s 인 경우에도 1 m/s 인 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다. 모든 다공률의 경우에 대하여

유출 유량이 급격하게 증가하기 이전에 위치한 구멍을 통한 유출 유량은 거의 일정하게 나타나지만, 유출 유량이 급격하게 증가하는 위치는 다공률이 증가할수록 스펀들 상부로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 다공률이 일정한 경우, 구멍의 직경이 스펀들을 통해 외부로 방출되는 유량 분포에 미치는 영향을 나타낸다. 구멍의 직경이 동일할 경우, 스펀들 입구의 유속에 상관없이 스펀들 축방향으로의 유량 분포는 거의 동일하게 나타난다. 또, 구멍의 직경에 상관없이 스펀들을 통해 외부로 방출되는 유량이 급격하게 증가하는 위치는 대략 x/L



(a) $U_i = 1\text{ m/s}$



(b) $U_i = 3\text{ m/s}$

Fig. 6 Effects of the porosity on the mass flow rate distributions ($d=3\text{ mm}$)

이 0.7에서 나타난다. 그러나, 구멍을 통한 최대 유량값은 $d=4\text{ mm}$ 일 경우에는 스펀들 유입 유량의 약 22%로서, $d=3\text{ mm}$ 일 때와 비교하여 약 5% 정도 증가한다.

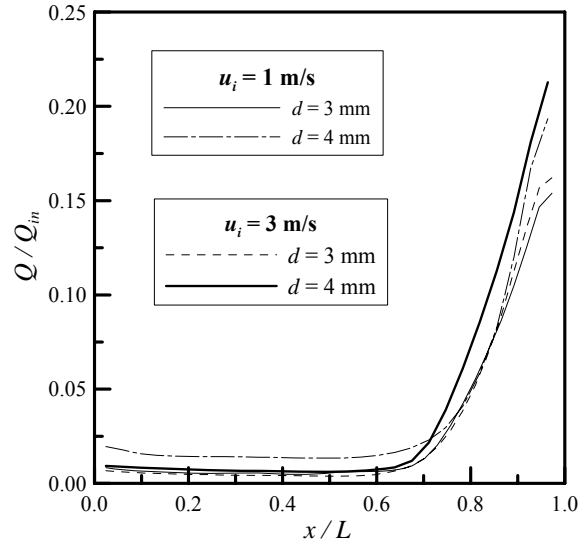


Fig. 7 Effects of the porous diameter on the mass flow rate distributions (porosity=14%)

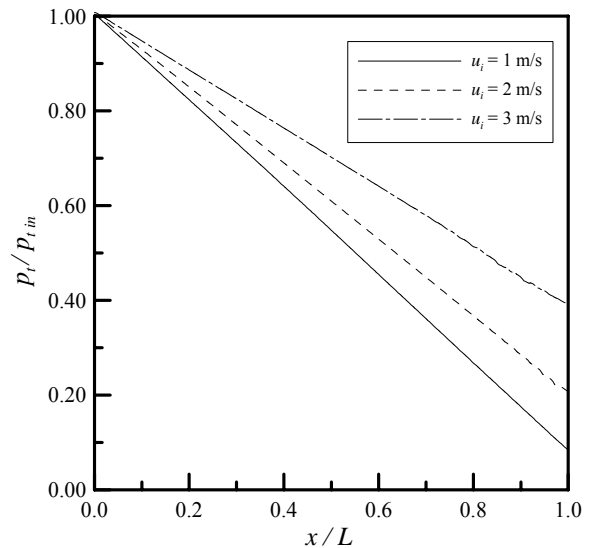


Fig. 8 Total pressure distributions along the spindle axis ($d=3\text{ mm}$, porosity=14%)

그림 8은 스펀들의 중심축을 따르는 전압의 분포를 나타낸다. 그림의 종축은 스펀들 중심축의 국소 전압 (p_i)을 입구의 전압($p_{t,i}$)으로 무차원하였다. 스펀들 입구 유속이 1 m/s 인 경우, 중심축을 따라 전압은 선형적으로 감소하며, 스펀들 상부

끝단에서의 전압 값은 $0.1 p_{ti}$ 이 된다. 스피들 입구 유속이 증가할수록 스피들 상부 끝단에서의 전압 값은 증가하지만, 중심축을 따라 선형적으로 감소하는 경향은 동일하다. 이것은 중력이 고려된 본 수치계산에서 스피들 입구부분에서의 전압은 스피들의 높이에 의한 정수압과 유입 유속에 의한 동압과의 합으로 주어지게 되며, 스피들 중심축을 따른 전압의 손실은 체적력을 극복하는 곳에서 대부분 발생하기 때문이다. 즉, 구멍을 통한 유량의 방출에 의해서 발생하는 전압의 손실과 유체의 점성에 의한 손실 보다는 중력에 의한 전압의 손실이 상대적으로 매우 크기 때문으로 판단된다.

그림 9 와 10 은 각각 다공률과 구멍의 직경이 스피들 중심축을 따르는 국소 전압 분포에 미치는 영향을 나타낸다. 다공률이 전압 분포에 미치는 영향을 나타낸 그림 9 의 경우, 축방향으로의 전압 감소는 거의 동일하게 나타나고 있다. 그림 8 에서 앞서 살펴본 바와 같이 구멍을 통한 질량 유량의 유출에 의한 전압의 손실은 극히 미약하여 동일한 스피들 입구 유속 값에서는 다공률의 변화가 전압 손실에 미치는 영향은 없다고 판단된다. 그림 10 은 다공률이 14 %로 동일한 경우, 구멍의 직경이 전압 손실에 미치는 영향을 나타낸다. 스피들 입구 유속이 동일한 경우에는 구멍의 직경에 따라서 스피들 중심축을 따르는 국소 전압의 분포가 동일하게 나타난다.

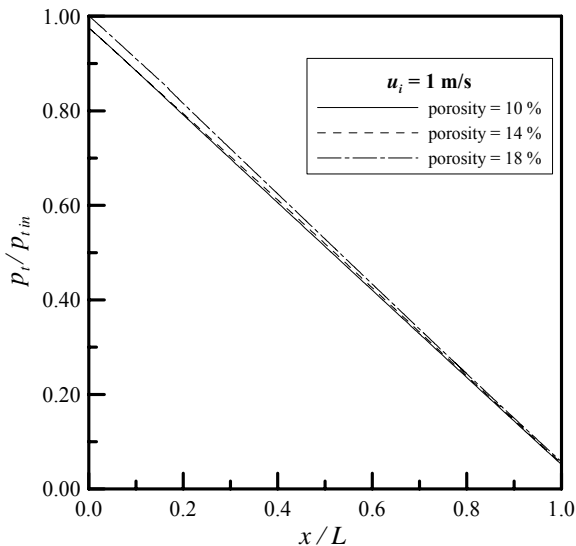


Fig. 9 Relationship between total pressure loss and spindle porosity for $d=3$ mm

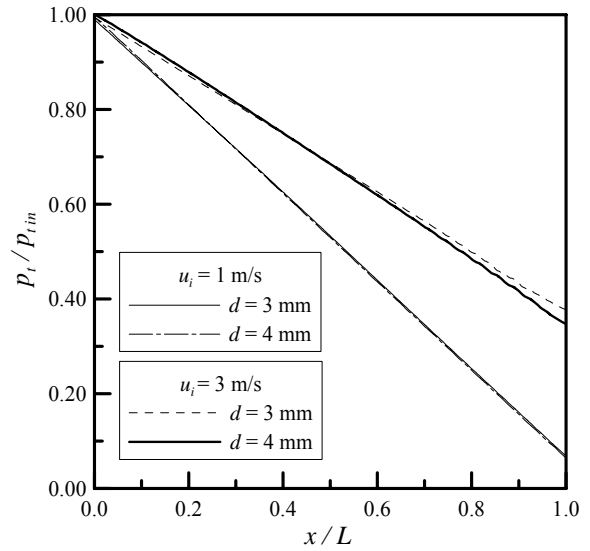


Fig. 10 Total pressure distributions along the axis for porosity = 14 %

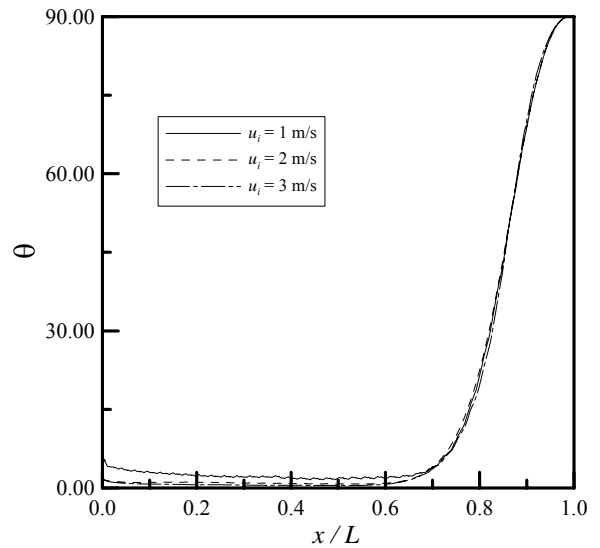


Fig. 11 θ value distributions along the spindle axis ($d = 3$ mm, porosity = 14 %)

그림 11 은 구멍의 직경이 3 mm 이고, 다공률이 14%인 경우, 스피들 축 방향으로의 θ 값의 변화를 나타낸다. 여기에서 θ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} \right) \quad (1)$$

Δp 와 $\frac{1}{2} \rho v^2$ 는 각각 구멍 내/외부의 국소 정압

의 차이와 스핀들 중심축을 따르는 동압을 의미한다. 즉, 스핀들의 구멍을 통한 질량의 유출은 구멍의 입/출구 부분의 국소 정압의 차이에 비례하여 나타날 것이다. 그러나, 유출 유동의 방향과 스핀들 내부의 주 유동의 방향은 서로 수직이 되므로, 차압과 동압의 비로 주어지는 속도 벡터의 방향에 의하여 유출 유량의 변화가 발생할 것으로 판단된다. x/L 이 약 0.7 이하에서는 θ 가 거의 0 도에 가깝게 나타나지만, $x/L > 0.7$ 이상의 영역에서는 θ 가 급격하게 증가한다.

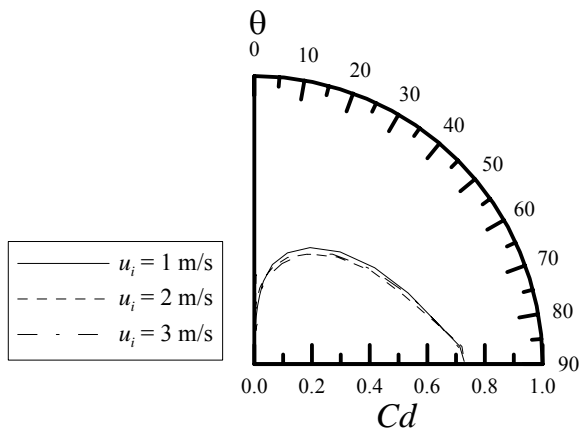


Fig. 12 discharge coefficient vs θ value ($d = 3$ mm, porosity = 14 %)

그림 12는 θ 값 변화에 따른 각 구멍의 유출계수의 변화를 나타낸다. 구멍을 통한 유출계수는 실제 구멍을 통해 유출되는 질량 유량과 이론 질량 유량의 비로 정의된다.

$$Cd = \frac{Q_{act}}{Q_{theo}} \quad (2)$$

이론 질량 유량은 각 구멍의 입/출구의 차압의 차에 의해서 구하여지며, 식(3)과 같이 정의된다.

$$Q_{theo} = \sqrt{2\rho\Delta p} \times A_p \quad (3)$$

여기에서 Q 와 A_p 는 수치계산에서 얻어진 각 구멍을 통한 질량유량과 구멍의 단면적을 의미한다. θ 값이 0 에 가까우면 유출계수도 거의 0 에 가깝게 나타난다. θ 가 45 도가 되면 유출계수는 대략 0.5 가 되며, 스핀들 입구의 유입 속도가 유출계수에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타난다.

4. 결 론

본 연구는 사 염색법의 일종인 치즈 염색법에

서 다공벽으로 이루어진 스핀들을 통하여 치즈로 방출되는 염액 유동장을 수치적으로 모사하여, 사 염색기의 균염성을 향상시키기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 수치계산에서는 축대칭 모델로 단순화시킨 스핀들을 지나는 유동장에 대하여 비압축성, 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 적용하였다. 스핀들에서 구멍의 직경 및 다공률 변화에 따른 스핀들 내부 유동장 및 구멍을 통한 유량의 분포에 대하여 조사하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

스핀들의 구멍을 통한 유량의 분포는 스핀들 입구의 유입 유속에 상관없이 거의 동일한 분포를 나타내었으며, 다공률 및 구멍의 직경에 따라 스핀들을 통해 외부로 방출되는 유량분포는 다소 다르게 나타났으나, 대부분의 유량은 스핀들의 상부를 통해 방출되는 동일한 결과를 얻었다. 이때 스핀들 중심축을 따른 전압의 손실은 다공률 및 구멍의 직경에는 무관하며, 중력에 의한 체적력의 극복하는데 대부분 발생하였다. 그리고, 각 구멍에서의 유출계수는 스핀들 유입 유속과는 무관하게 나타났다. 따라서, 직관 형태의 스핀들 형상에서는 균염을 확보하기에는 다소 무리가 있는 것으로 보이며, 스핀들의 단면적을 축방향으로 변화시켜 각 구멍의 내외부의 정압 차와 축방향 동압의 비율을 적절하게 조절하여야만이 균염성을 확보할 수 있으리라 판단된다.

후 기

이 연구는 지역산업기술개발 중 기초기술 개발 사업비의 지원(과제번호 7000426)으로 행해진 연구임.

참고문헌

- (1) Shannon, B., Hendrix, W. Smith, B. and Montero, G., 2000, "Modeling of supercritical fluid flow through a yarn package," *J. Supercritical fluids*, Vol. 19, pp. 87-99.
- (2) Benedict, R. P. and N. A. Carlucci, 1965, "Flow with losses," *Trans. ASME J. Eng. Power*, January Issue, pp. 37.
- (3) Venkateswaran, S.m Weiss, J. M. and Merkle, C. L., 1992, "Propulsion Related Flowfields Using the Preconditioned Navier-Stokes Equation," *AIAA Paper* 92-3437.