

잉크젯 프린터를 이용한 섬유인쇄 시 노즐 관에서의 입자 흐름

김영대, 이무성, 최창남, 이기영*

전남대학교 응용화학부

* 전남대학교 화학공학부

Stokesian Dynamic Simulation of Pigment Flow in Ink Jet Printer Nozzle

Young Dae Kim, Moo Sung Lee, Chang Nam Choi and Ki Young Lee*

Faculty of Applied Chemistry, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Faculty of Chemical Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

요 약

섬유염색은 전 세계적으로 매우 큰 시장이나, 염료를 사용하여 섬유염색을 수행하는 기존 인쇄 공정의 경우 염료의 손실 및 환경오염의 문제점을 갖고 있다. 기존 공정들의 경우 섬유 인쇄 시 전처리 및 후처리 공정이 필요하고 이들 공정에서 폐수가 발생하게 된다. 이런 문제점들의 해결방안으로 전처리 및 후처리 공정이 필요없고 잉크를 효율적으로 사용할 수 있는 잉크젯 프린팅 기법을 섬유염색 기술에 적용하려는 노력이 진행 중이다. 섬유인쇄를 위해 잉크젯 프린터를 사용할 경우 안료를 사용하기 때문에 잉크는 액체 상에 고체입자가 분산되어 있는 서스펜션 상태로 존재한다. 분자역학 모사 기법과 유사한 Stokesian 역학 모사 방법을 사용한 전산모사를 통해 외부에서 가해진 압력구배에 의해 노즐 관에 흐르는 분산잉크 중의 입자 분포 및 속도 분포 변화를 살펴보았다. 전산모사결과 입자의 부피분율이 낮을수록, 평균 무차원 서스펜션 속도가 낮을수록, 노즐 관과 입자 크기 사이의 비(H/a)가 클수록 입자들의 분포가 상당히 균일한 것으로 나타났다. 따라서 잉크젯 프린팅 기법을 사용하여 섬유인쇄를 수행하는 경우, 노즐 관의 유속을 작게 하고 노즐 관과 입자 사이의 크기 비를 크게 해야 균일한 인쇄 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT : Textile printing prints around twenty billion linear meters of textile each year. Rotary and flat bed screen printing requires pre and post treatments, leading to the loss of dyes and the environmental problems due to effluents. Digital ink jet printing can offer a solution to the existing problems, especially the environmental problems, in addition to its flexibility.

Pigments are used as a dispersion inks in the digital inkjet textile printing. Molecular dynamic simulation like Stokesian dynamic simulation was employed to simulate the behavior of pigments and velocity distribution under the pressure driven flow in the printer nozzle. The simulation shows that the particle distribution in the flow are uniform if particle volume fraction is low, the ratio of nozzle and particle diameter is large, and the dimensionless average suspension velocity is low.

1. 서 론

섬유염색은 전 세계적으로 연간 23,000 km²를 염색하는 매우 큰 시장이다[1]. 현재 섬유 염색의 90% 이상이 로터리나 평면상(flat bed) 인쇄 공정에 의해 수행되고 있다. 1960년대에 Stork에 의해 로터리 스크린 공정이 도입된 이후, 섬유염색 기술은 거의 변하지 않고 있다. 따라서 아직도 각 디자인에 대해 프린팅 마스크를 제작해야 하며, 이 과정이 높은 가격과 많은 제작시간을 필요로 하고 있어 제품을 빨리 생산하거나 소규모 물량을 생산해야 하는 경우에 문제점으로 대두된다. 로터리 인쇄기의 평균 인쇄 길이는 1989년 4500 미터에서 1994년 3500미터로 감소하였으며, 계속적으로 감소하고 있는 추세여서 로터리 인쇄기가 더 이상 가격 경쟁력을 갖지 못하는 정도에 접근하고 있는 중이다. 전 세계적으로 섬유인쇄공정에서 발생하는 평균 불량률은 거의 8%에 달하고 있으며, 불량률의 주원인은 섬유 질 문제, 공정시작 시 손실, 염료의 문제, 스크린(screen) 문제 등이 있다. 이 중 섬유 질 문제는 모든 인쇄 장치에 적용되는 것이나, 다른 문제점들의 경우는 기존의 로터리나 평면상 인쇄 공정의 문제점으로 발생하는 것이다 [1-2].

염료를 사용하여 섬유염색을 수행하는 기존 로터리나 평면상 인쇄 공정의 경우 섬유의 전처리 및 후처리 공정이 추가로 필요하며, 또한 전형적인 경화 작업이 필요하다. 기존 공정의 경우 일반적으로 섬유염색 후 염색된 섬유의 세척이 필요하며, 이 과정에서 사용된 염료의 30%정도가 세척액과 함께 손실되게 된다. 따라서 염료의 비효율적인 사용이라는 문제점뿐만 아니라 추가로 발생하는 폐수처리의 문제

점을 갖고 있다[2-4].

이와 같은 기존 섬유염색 공정들의 단점들(생산의 유연성 결여, 환경 오염, 용매 및 용수의 과 사용, 넓은 장치 공간 필요, 염색 배치(batch)마다 상이한 색감도 등)의 해결을 위한 방안으로 잉크젯 프린팅 기법을 섬유염색 기술에 응용하는 기술이 최근 많은 관심을 끌고 있다. 잉크젯 프린터를 사용한 섬유염색 방법은 상단 기간동안 관심을 가져온 연구 주제였으며[1-6], 수년동안 섬유인쇄를 위한 잉크젯 프린터를 개발하려는 노력이 진행돼 왔다. 잉크젯 프린팅 기법을 섬유 염색에 사용하는 경우 다양한 종류의 색의 배합을 구현할 수 있을 뿐만 아니라 항상 원하는 색상을 필요시마다 재현할 수 있는 장점을 지니게 된다. 또한 잉크젯 프린팅 기법의 도입에 의해 소량 다품종의 염색이 가능하여, 최근 국내 외적으로 대두되는 개별적인 개성구현, 즉 나 혼자만의 패션 욕구를 충족시킬 수 있는 방안으로 향후 염색 및 의류업계에 지대한 파장을 미칠 것으로 사료된다[3]. 더욱이 잉크젯 프린팅 기법을 섬유염색에의 도입은 기존 공정들에서 필요한 전처리 및 후처리 공정을 사용하지 않아, 용매 및 세척수 사용의 최소화로 기존의 염색공정의 문제점인 환경오염 문제를 해결할 수 있어, 환경오염 문제가 심각한 염색공정을 환경 친화적인 청정공정으로 대체할 수 있는 방안으로 대두되고 있다[2].

섬유 염색을 위해 잉크젯 프린팅 기법이 사용될 경우, 사용되는 하드웨어는 기존의 종이를 인쇄하는 잉크젯 프린터와 거의 유사하며, 단지 인쇄 대상체로 폭이 넓은 섬유를 사용해야 하기 때문에 장치가 좀 더 크다는 차이점이 있다. 또한 기존 섬유염색 공정에서 필연적으로 사용되어 환경오염 및 추

가 장치설비를 야기 시켰던 물 사용 후처리 공정을 제거하기 위해, 섬유인쇄를 위한 잉크젯 프린팅 기법에서는 인쇄 잉크로 안료를 기본으로 한 잉크를 사용하게 된다. 따라서 기존 공정의 환경오염 문제를 해결할 수 있을 뿐만이 아니라 장치의 크기가 크게 줄어드는 장점을 지니게 된다.

섬유인쇄를 위한 잉크젯 프린터 잉크로 안료를 사용하기 때문에 기존 종이를 인쇄하기 위해 잉크젯 프린터에서 의해 사용되는 잉크와는 달리 용액 중에 고체 입자(안료)들이 분산되어 있는 분산잉크를 사용하게 된다. 분산잉크는 액체 상에 고체입자가 분산되어 있는 서스펜션 상태로 두 상(two phase)이 공존하는 상태이다. 이에 따라 잉크가 분배될 때 노즐 관에서의 유체 흐름 형상, 노즐 끝 부분에서의 잉크 방울 형성 및 잉크 방울의 안정성, 잉크 방울의 크기 등이 액상만으로 된 잉크를 사용할 경우와는 상당히 다른 현상을 보이게 된다. 또한 분산잉크가 노즐을 통과하기 위해 노즐 입구에서 단면적의 축소(contraction)될 때 염료들 사이의 상관관계가 증가하여 염료들의 집합(aggregation)에 의한 노즐 막힘(clogging) 현상이 발생하는 문제점과, 염료들의 집합에 기인한 형성된 잉크 방울마다의 염료농도 변화로 인해 균일한 섬유 인쇄를 저해하게 되는 문제점이 생기게 된다. 따라서 노즐 관에서의 입자흐름에 대한 고찰이 필요하다. 일반적으로 섬유인쇄에 사용되는 분산잉크 중의 안료입자의 크기는 250nm 이하이며, 분산 잉크중의 입자의 농도는 대략 2 - 20 wt%이다 [5-6].

잉크젯 프린터를 사용하여 섬유 인쇄를 수행하는 경우 섬유에 인쇄되는 색상의 선명성이 중요하게 되며, 이것은 노즐 관에서 분사되는 액적 중에 안료입자의 분포에 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 노즐 관을 통해 흐르는 분산 잉크 중의 입자 분포 및 속도분포의 고찰에 의해 잉크젯 프린팅 기법을 이용한 효과적인 섬유인쇄 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 분자역학(molecular dynamic) 모사 기법과 유사한 Stokesian 역학 모사 방법[7-11]을 사용한 전산모사를 통해 노즐 관에 흐르는 분산 잉크 중의 입자 분포 및 속도 분포 변화를 살펴보았다. 잉크젯 프린팅 기법에서 분산잉크는 노즐 관을

통해 외부에서 가해진 압력구배에 의해 흐르는 압력구배 흐름이며, 따라서 본 연구에서는 압력구배 흐름에서의 분산 잉크의 노즐 관에서의 흐름에 대해 연구하였다.

2. 모델링 및 전산모사 방법

모델링을 위해 분산잉크를 점도 η 와 밀도 ρ 를 지닌 뉴턴 유체 중에 고체 입자가 분산되어 있는 시스템으로 구성하였다. 고체입자는 구형이고 모두 똑같은 지름 a 를 지니고 있는 것으로 가정하였다. 유체에 대한 운동 방정식은 비압축성이고 일정한 물성을 지닌 유체에 대해 적용하는 Navier-Stokes 식에 의해 주어지나, 유체 중에 분산된 입자들의 운동에 대한 식은 다음 형태로 나타내질 수 있다[7-11].

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F}_H + \mathbf{F}_P + \mathbf{F}_B \quad (1)$$

식 (1)에서 \mathbf{u} 는 고려되는 N 개의 입자들에 대한 이동속도로 $3N$ 개의 차원을 갖고 있는 컬럼 벡터이다. 입자와 유체 속도들은 입자표면에서 입자와 유체의 속도가 같다는 조건(sticking condition)에 의해 상관관계가 이루어진다. \mathbf{M} 은 질량관성(inertial term) 매트릭스, \mathbf{F}_H , \mathbf{F}_P , \mathbf{F}_B 들은 각각 유체역학(hydrodynamic), 비유체역학(non-hydrodynamic) 및 Brownian 힘을 나타낸다. 여기서는 Stoke's 법칙의 영역 ($Re \ll 1$)을 만족시킨다는 조건하에 질량관성 항목을 무시하였고, 압력구배에 의한 흐름조건에 의해 유체역학 힘의 영향이 Brownian 힘에 비해 상대적으로 상당히 크다고 가정하여 Brownian 힘을 무시하였다. 이와 같은 경우 식 (1)은 다음과 같이 단순화될 수 있다[7].

$$\mathbf{F}_H + \mathbf{F}_P = 0. \quad (2)$$

유체역학 힘은 다음과 같이 주어진다[7-9].

$$\mathbf{F}_H = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) + \mathbf{G} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{R} 은 전체 저항(grand resistance) 매트릭

스, \mathbf{G} 는 전단저항(shear resistant) 매트릭스, \mathbf{u}^∞ 는 평균 서스펜션 속도, \mathbf{E} 는 스트레인 텐서(strain tensor)이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^\infty - \mathbf{R}^{-1} \cdot (\mathbf{F}_p + \mathbf{G} \cdot \mathbf{E}) \quad (4)$$

저항 매트릭스 대신에 흐름(mobility) 매트릭스를 사용하여 식을 다시 나타내면 아래와 같다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^\infty - \frac{1}{\eta} \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}_p - \mathbf{g} \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{A} 는 전체흐름(grand mobility) 매트릭스, \mathbf{g} 는 전단흐름(shear mobility) 매트릭스이다

흐름 매트릭스는 두 개의 입자들 사이의 상관관계를 풀어놓은 근을 사용하였다. 즉 입자들 사이의 거리가 가까운 경우에는 윤활(lubrication) 힘에 의해 얻어진 근을, 입자들 사이의 거리가 먼 경우에는 원거리(far-field) 근을 사용하였다[12]. 전체 입자들의 영향은 pairwise addition 방법에 의해 구하였으며, neighbor list를 사용하여 계산 시간을 단축하였다[10]. 비유체역학 힘은 주로 입자들의 상관관계에 의해서 발생하며 쌍 사이의 근거리 반타력을 나타내는 다음의 Derjaguin-London-Vervey-Overbeck(DLVO) 식을 사용하였다[9].

$$\mathbf{F}_p = F_o \frac{\kappa e^{-\kappa h}}{1 - e^{-\kappa h}} \mathbf{e}_r \quad (6)$$

여기서 $F_o \kappa$ 는 반타력의 크기, κ 는 이중층(double layer) 두께의 역수, h 는 입자중심 사이의 간격, \mathbf{e}_r 은 두 입자사이의 단위 벡터이다. 아래에 결과들은 $\kappa a = \kappa^* = 100$ 인 경우에 대해서 전산모사를 수행하여 얻어진 결과들이다.

식 (5)는 입자지름 a 와 반타력의 크기 $F_o \kappa$ 를 scale factor로 이용하여 무차원화 되었다. 즉, 속도는 $F_o \kappa / 3 \pi \eta a$, 전체 흐름 매트릭스는 $1/a$, 전단흐름 매

트릭스는 a , 스트레인 텐서는 $F_o \kappa / 3 \pi \eta a^2$ 로 무차원화 되었다. 무차원화에 의해 얻어진 식은 아래와 같다.

$$\frac{d\mathbf{r}_i^*}{dt^*} = \mathbf{u}_i^* = \mathbf{u}^{*\infty} - 3\pi \mathbf{A}_{ij}^* \cdot \mathbf{F}_{p,ij}^* - \mathbf{g}_{ij}^* \cdot \mathbf{E}_i^* \quad (7)$$

위 식에서 $*$ 는 무차원 변수를, ij 는 i 입자와 j 입자 사이의 상관관계를 나타낸다.

외부에서 가해진 압력구배에 의해 노즐 관을 통해 흐르는 분산 잉크의 흐름을 관찰하기 위해, 그림 1에서 나타낸 것과 같이 두 평판사이로 압력에 의해 서스펜션이 관을 통해 흘러가는 경우에 대해 전산모사를 수행하였다. 이 경우 식 (7)과 관련된 각 무차원 변수들은 다음과 같다:

$$\mathbf{u}_i^{*\infty} = 1.5 u_{avg}^* \left[1 - \frac{z_i^{*2}}{(L_z^*/2)^2} \right] \mathbf{e}_z \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{p,ij}^* = \frac{e^{-\kappa^* h^*}}{1 - e^{-\kappa^* h^*}} \mathbf{e}_r \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_i^* = -1.5 u_{avg}^* \frac{z_i^*}{(L_z^*/2)^2} (\mathbf{e}_x \mathbf{e}_z + \mathbf{e}_z \mathbf{e}_x) \quad (10)$$

$$\text{여기서 } u_{avg}^* = 3\pi \eta a / F_o \kappa \quad (11)$$

$$h^* = r_{ij}^* - 1.0, \quad (12)$$

$$r_{ij}^* = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (z_j - z_i)^2} / a. \quad (13)$$

전산모사는 정지된 유체에 외부에서 압력이 가해져 분산잉크가 흐르기 시작하는 경우에 대해 전산모사를 수행하였다. 즉,

$$\mathbf{u}^{*\infty} = 0, \quad t \leq 0$$

$$\mathbf{u}^{*\infty} = 1.5 u_{avg}^* \left[1 - \frac{z^{*2}}{(L_z^*/2)^2} \right] \mathbf{e}_z, \quad t > 0 \quad (14)$$

식 (7) - (14)들은 두개의 평판 사이($z^* = L_z^*/2$)와 주기적 경계(periodic boundary)들에($x^* = L_x^*/2$, $y^* = L_y^*/2$) 의해 정해진 공간 내에 존재하는 N 개의 입자들에 의해 역학 모사 방법에 의해 풀었다.

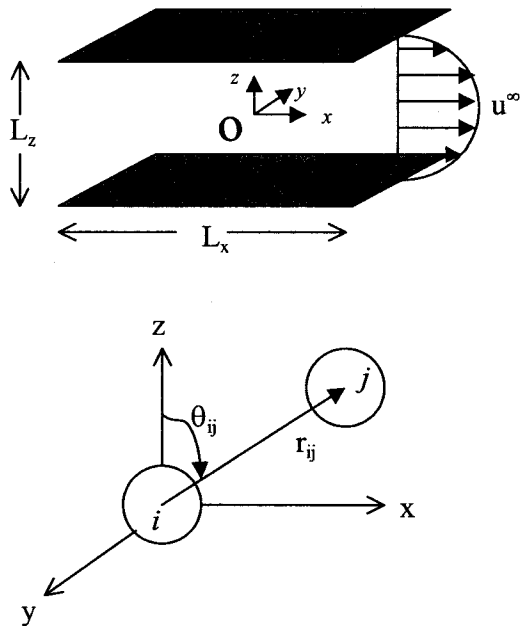


Fig. 1. Schematic diagrams showing the geometries of the pressure driven suspension and sphere pairs.

전산모사는 모든 입자들이 한 층의 입자 층으로 형성시켜($y^* = \text{일정}$), 이차원($x - z$ 평면)에 대해 수행하였다. 입자들은 초기에 무작위적으로 배열이 되었으며, 식 (7) - (14)들은 4차의 Runge-Kutta방법에 의해 각 입자에 대해 적분하였다. 이 때 무차원 적분 시간은 $\Delta t^* \leq 10^{-3}$ 을 사용하였다. 각 입자들에 작용하는 힘들은 cutoff 반지름 ($rc^* = Lz^*/2$) 안에 존재하는 경우에 대하여 계산되었고, 계산 시간을 줄이기 위해 neighbor 목록을 neighbor 목록 cutoff 반지름 $rl^* = rc^* + 0.2$ 를 사용하였다[13].

3. 결과 및 토의

2차원 상에서 외부에서 가해진 압력구배에 의한 노즐 관내에서의 분산잉크의 흐름에 대한 전산모사는 입자 수(N)가 50 개인 경우에 대해 수행하였다. 초기 입자 분포들은 무작위 배열에 의해 얻어진 입자 분포들을 사용하였으며, 이 입자 분포들을 식 (7) - (14)들을 사용하여 시간에 따라 적분하여 입자 분포 및 속도 분포 변화를 관찰하였다. 식 (7) (14)들에 나타났듯이 전산모사의 변수들은 입자의 부피분율

(ϕ), 입자와 노즐 관사이의 크기 비(H/a) 및 평균 서스펜션 속도 u_{avg}^* 등이며, 이들 변수 변화에 따른 노즐 관을 통해 흐르는 분산 잉크 흐름 중에서의 입자의 분포 및 속도 분포 변화들을 관찰하였다.

일반적으로 잉크젯 프린터를 이용한 섬유염색에 사용되는 분산잉크 중의 입자 조성은 2 - 15 wt% 정도이나, 염색의 선명도를 향상시키기 위해서는 10 wt% 정도의 입자 조성을 지니고 있는 분산잉크를 사용한다. 즉 분산잉크 중의 입자 조성이 상당히 높아, 노즐 관내에 가해진 압력구배에 의해 분산잉크 흐름 중에 입자들 사이의 상관관계가 발생하여 노즐 관내의 입자 분포가 변화하게 된다. 이것은 섬유염색 시 색의 선명도에 변화를 줄 수가 있다. 따라서 여기서는 입자 조성이 상대적으로 높은 경우에 대해 전산모사를 수행하였으며, 전산모사에 이용된 입자 조성은 7 - 32 vol %인 경우에 대해 수행하였다.

또한 분산잉크 중의 입자 크기가 잉크젯에 의한 섬유 염색의 질에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 최대 허용 입자크기는 대략 250nm 정도이다. 분산 잉크가 잉크젯 프린터에 사용되는 경우 분산잉크 중의 입자분포 및 속도분포가 노즐크기와 입자크기 사이의 비(H/a)의 함수이며, 여기서는 분산 잉크 흐름 시 입자들의 상관관계가 입자들의 분포에 미치는 영향을 확연하게 보기 위해서 노즐과 입자 크기 사이의 비를 변화시키면서 전산 모사를 수행하였다.

그림 2는 압력구배가 $t^* = 0$ 에 주어진 경우, 시간에 따른 입자분포와 노즐 관 벽면에 미치는 힘의 변화를 나타내는 전형적인 결과이다. 이 결과는 $H/a = 20$, $\phi = 31.4\%$, $u_{avg}^* = 1.0$ 인 경우에 대해 초기에 무작위적으로 배열된 입자 분포에 대해 전산 모사를 수행해 얻은 결과이다. 그림 2에 나타났듯이 초기에 무작위적으로 배열되어 있던 입자들이 압력구배가 주어짐에 의해 움직이며 시간에 따라 입자들의 배열이 변화하게 된다. 시간에 따른 입자분포를 자세히 살펴보면 시간이 경과함에 따라 입자들이 벽면에서부터 멀어지면서 대부분의 입자들이 관의 중심부로 모이는 현상을 보이고 있음을 관찰할 수 있다. 압력구배에 의해 흐름이 주워지는 경우 벽면 근처에서 전단속도(shear rate)가 가장 크게 되며 관의 중심부에서는 전단속도가 0이 되게 된다.

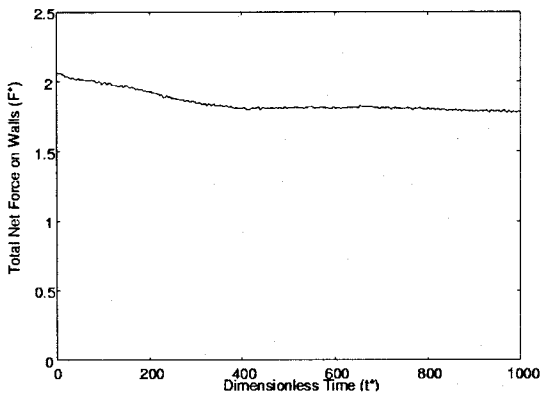
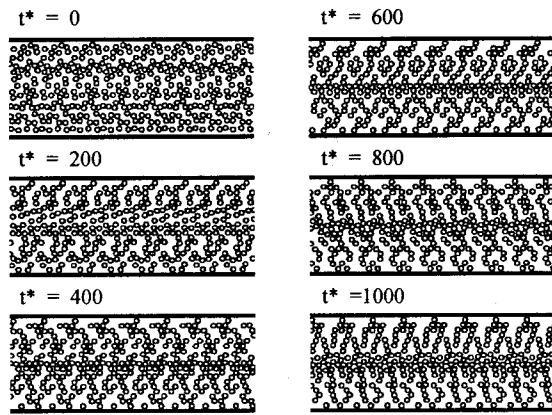


Fig. 2. Particle configurations and total net force on the wall as a function of time for the pressure driven suspension flow ($\phi = 31.4\%$, $H/a = 20$, $u_{avg}^* = 1.0$, $N = 50$).

따라서 입자들이 전단속도가 높은 지역을 피해 상대적으로 전단속도가 적은 지역으로 모이게 되는 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 입자들이 압력구배 흐름에서 관의 중심부로 모임에 의해 상대적으로 관 벽면 주위에는 입자들의 농도가 적어지게 되며, 따라서 벽면에 미치는 힘도 감소하게 될 것이다. 그림 2의 아래 그림은 노즐 관 벽면에 미치는 무차원 힘의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림에서 나타났듯이 시간 변화에 따른 벽면에 미치는 힘의 변화를 관찰하면 시간이 증가함에 따라 벽면에 미치는 힘의 크기가 감소함을 보여 주고 있다. 이것은 위에 설명한 바와 같이 노즐 벽면에 입자들의 농도가 시간이 증가함에 따라 감소하여 발생하는 것이다.

이와 같은 전형적인 결과로부터 분산잉크 또는 서스펜션이 압력구배하에서 흐르는 경우 입자들의

분포가 변화하게 된다는 것을 알 수가 있으며, 이와 같은 입자들의 관 중심부로의 밀집현상은 잉크젯 프린팅 기법을 사용한 섬유인쇄에 적용할 경우 인쇄된 섬유의 색의 선명도 및 밝기에 영향을 미치게 된다. 따라서 각 변수들의 변화에 따른 노즐 관내에서의 입자분포를 관찰할 필요성이 있다.

그림 3은 입자들의 관 중심부에서의 평균 위치가 시간과 입자 조성에 따라 변화하는 것을 나타낸 그림이다. 이 결과는 $H/a = 20$, $u_{avg}^* = 1.0$ 인 경우에 대해 초기에 무작위적으로 배열된 여러 입자 조성들의 분포에 대해 전산모사를 수행해 얻은 결과들이다. 평균 위치는 관의 중심으로부터 모든 입자들의 수직 거리를 평균 낸 값으로, 이 수치가 적다는 것은 입자들이 관의 중심부에 밀집되어 있다는 것을 나타낸다.

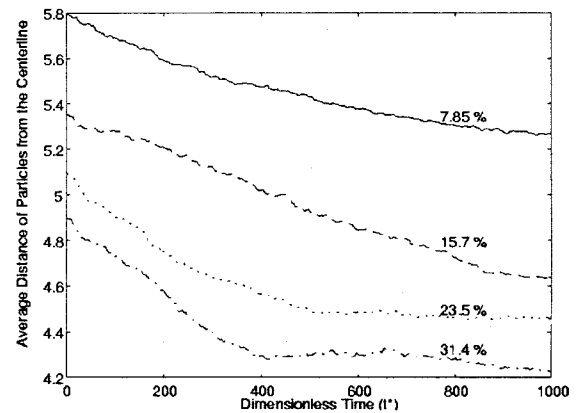


Fig. 3. Average distance of particles from the centerline as a function of time for several particle concentrations ($H/a = 20$, $u_{avg}^* = 1.0$, $N = 50$).

그림 3에 나타났듯이 시간이 경과함에 따라 평균입자거리는 모든 입자 조성들에 대해 감소하는 경향을 보여 주고 있어, 사용된 모든 입자 조성들에 대해 압력구배 흐름에 있어 입자들이 관의 중심부로 이동하고 있음을 나타내고 있다. 또한 초기 입자조성이 높을수록 입자들이 더욱 관의 중심부로 밀집되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 입자조성이 높은 경우 입자들 사이의 상관관계의 증가로 인해 상대적으로 전단속도가 적은 지역인 관 중심부로 입자들이 이동하여 발생하는 것으로 보인다.

그림 4는 그림 3의 결과 경우의 $t^* = 1000$ 에서의 서스펜션의 속도분포를 나타낸 것이다. 실선으로 나타낸 것은 뉴-턴 유체의 압력구배 흐름에서의 속도 분포를 나타내며, 나머지 선들은 서로 다른 입자조성을 지닌 서스펜션의 속도분포를 나타내고 있다. 그림 4에 나타났듯이 서스펜션의 입자조성이 증가함에 따라 서스펜션의 속도분포가 좀 더 균등해지는(flat profile) 것으로 나타났다. 즉, 입자 조성이 증가할수록 서스펜션의 속도 분포가 플러그(plug) 흐름의 형태로 변화하는 것으로 나타났다. 이것은 입자들이 관의 중심부로 모임에 의해 속도 분포가 납작해지는 것으로 보인다. 따라서 입자 조성이 높을수록 서스펜션 내의 입자 분포가 비균일해짐을 알 수 있다.

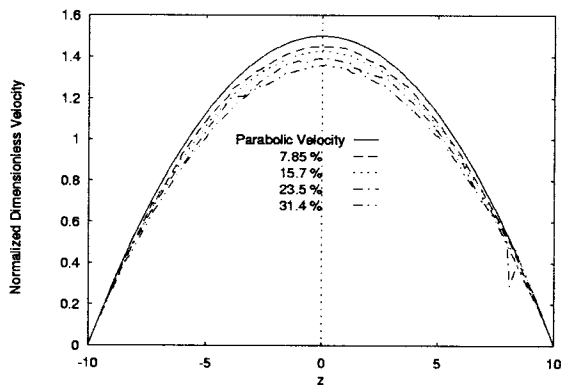
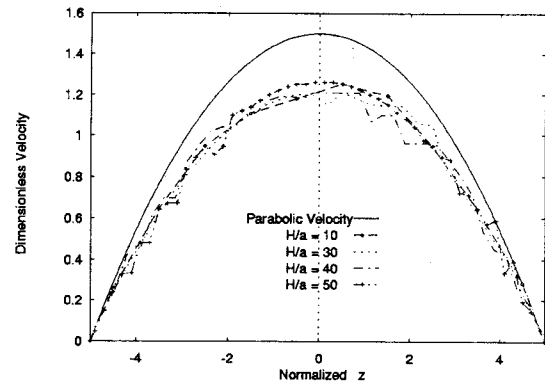
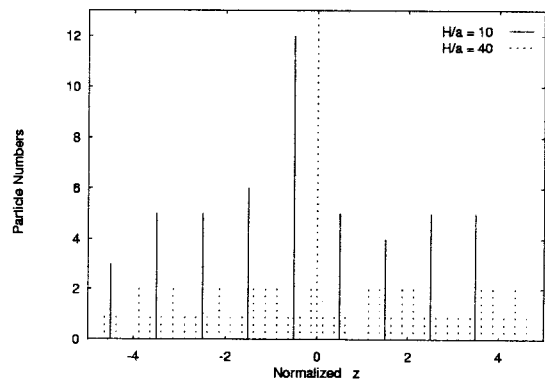


Fig. 4. Velocity profiles for several particle concentrations ($H/a = 20$, $u_{avg}^* = 1.0$, $N = 50$).

그림 5는 노즐관과 입자 크기 사이의 비(H/a)가 변화할 때의 서스펜션의 속도 분포와 입자분포를 나타낸 것이다. 이 결과는 $\phi = 15.74\%$, $u_{avg}^* = 1.0$ 인 경우에 대해 초기에 무작위적으로 배열된 입자 분포에 대해 전산 모사를 수행해 얻은 결과이다. 그림 5 (a)에 나타났듯이 모든 H/a 의 비율에 대해 속도 분포가 뉴-턴 유체에 비해 서스펜션의 속도분포가 납작해지는 것으로 나타났으며, 비교한 노즐 관과 입자 크기 비에 따라서는 속도분포가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 그림 5 (b)에 나타난 것과 같이 노즐의 흐름에 수직한 축에 따른 입자 분포를 살펴보면 비슷한 속도 분포 하에서도 상당히 다른 입자 분포를 나타냄을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. Velocity profiles and particle distributions for several H/a ratios ($\phi = 15.7\%$, $u_{avg}^* = 1.0$, $N = 50$).

그림 5 (b)에서와 같이 $H/a = 10$ 인 경우에 입자의 분포가 노즐의 중앙부에 집중되어있어 노즐의 중앙부에 50개의 입자 중 12개가 몰려있음을 알 수 있다. 이와는 대조적으로 $H/a = 40$ 인 경우에는 입자들이 상대적으로 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 즉, H/a 의 비가 클수록 입자의 분포가 상대적으로 균일해져서 잉크젯 프린팅 기법을 이용한 섬유 염색을 수행할 경우 $H/a = 40$ 보다 크게 수행하여야 할 것으로 사료된다.

그림 6은 노즐관과 입자 사이의 크기 비가 일정한 경우에 평균 무차원 서스펜션 속도가 입자 분포 변화에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 이 결과는 $H/a = 20$, $\phi = 15.7\%$ 인 경우에 대해 초기에 무작위적으로 배열된 입자 분포에 대해 전산 모사를 수행해 얻은 결과이다. 그림 6에서 나타난 바와 같이

평균 무차원 서스펜션 속도가 증가할수록 입자들 사이의 상관관계 증가로 인해 입자들이 노즐 관 중심부로 심하게 이동하는 것이 관찰되고 있다. 무차원 평균 서스펜션 속도가 0.1 보다 적은 경우에는 입자의 분포가 시간 경과에 따라 거의 변화하지않아 입자 분포가 상대적으로 균일함을 알 수 있다. 반면 무차원 평균 서스펜션 속도가 5이상인 경우에는 시간에 따라 입자들이 급격하게 노즐 관의 중심부로 이동함을 보인다. 무차원 평균 서스펜션 속도가 1인 경우에는 그 중간의 성격을 보이고 있다.

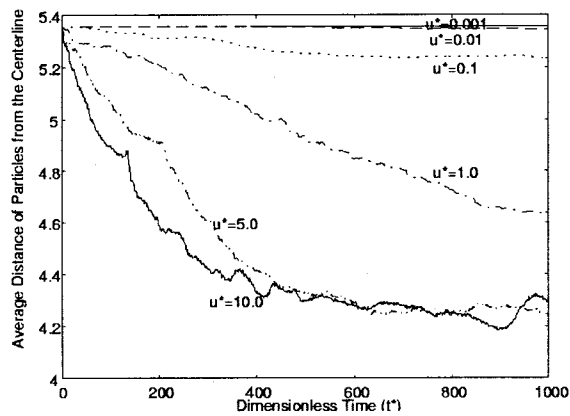
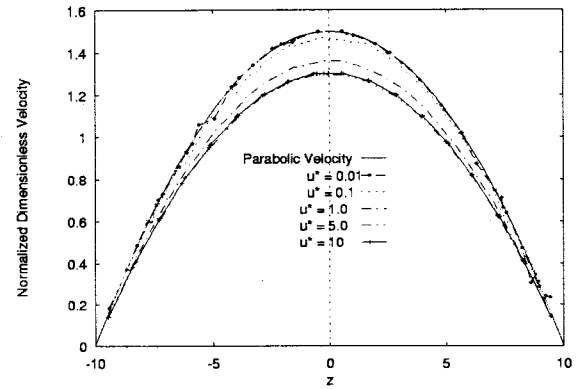
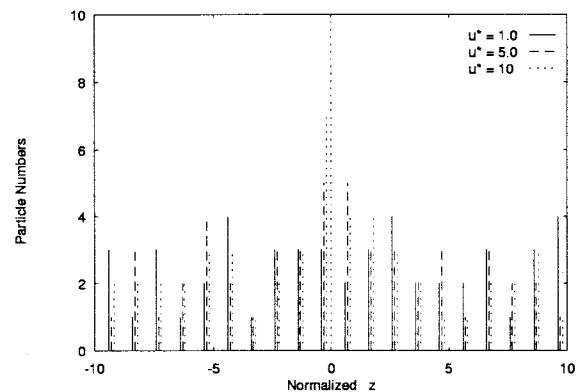


Figure 6. Average distance of particles from the centerline for various dimensionless average bulk velocity ($\phi = 15.7\%$, $H/a = 20$, $N = 50$).

그림 6의 결과로부터 무차원 서스펜션 속도가 0.1 보다 적은 경우에는 입자들의 고르게 분포되어 있어 섬유 인쇄에 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 반면 무차원 서스펜션 속도가 1 보다 큰 경우에는 속도분포 및 입자분포를 살펴보아야 할 필요가 있다. 따라서 무차원 평균 서스펜션 속도 변화에 따른 속도 분포와 입자 분포를 관찰하여 좀 더 자세히 살펴 보았다. 그림 7 (a) 및 (b)는 무차원 평균 서스펜션 속도 변화에 따른 속도 분포(그림 7 (a))와 입자 분포(그림 7 (b))를 나타낸 것이다. 그림 6에서 보여준 바와 같은 경향을 나타내는지 속도 분포를 살펴보면 무차원 평균 서스펜션 속도가 0.1 보다 적은 경우에는 뉴-턴 유체의 속도 분포와 거의 유사한 속도 분포를 보여 주고 있어 입자의 분포가 균일함을 알 수가 있다.



(a)



(b)

Figure 7. Velocity profiles and particle distributions for various dimensionless average bulk velocity ($\phi = 15.7\%$, $H/a = 20$, $N = 50$).

무차원 평균 서스펜션 속도가 5보다 큰 경우에는 속도 분포가 상당히 납작해지는 경향을 보이고 있으며, 그림 6에서 나타난 바와 같이 무차원 평균 속도가 5 및 10인 경우 같은 정상 상태에 도달하는 것으로 나타난 것과 동일하게 거의 동일한 속도 분포를 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

그림 7 (b)는 여러 종류의 무차원 평균 속도에 따른 입자 분포를 나타낸 것이다. 무차원 평균 속도가 1보다 적은 경우에는 입자 분포가 균일한 것으로 나타나 대표적으로 무차원 평균 속도가 1인 경우를 기준으로 무차원 평균 속도가 5 및 10인 경우에 입자 분포를 나타내었다. 그림 7(b)에서 나타났듯이 무차원 평균 속도가 증가할수록 입자가 관 중심부에 밀집하는 것을 알 수가 있다. 그러나 평균 속도가 1

인 경우에는 속도분포가 상당히 납작해졌음에도 불구하고 입자 분포는 균일한 것으로 나타나 입자 분포가 속도 분포에 비해 덜 민감한 것으로 나타났다.

4. 결 론

분자역학 모사 기법과 유사한 Stokesian 역학 모사 방법을 사용한 전산모사를 통해 외부에서 가해진 압력구배에 의해 노즐 관에 흐르는 분산잉크 중의 입자 분포 및 속도 분포 변화를 살펴보았다. 입자 및 속도분포에 영향을 미치는 변수들은 입자의 부피 분율 (ϕ), 입자와 노즐 관사이의 크기 비율(H/a) 및 평균 무차원 서스펜션 속도 $uavg^*$ 등이다. 모든 경우에 있어 시간에 따른 입자분포를 자세히 살펴보면 시간에 따라 입자들이 벽면에서부터 멀어지면서 대부분의 입자들이 관의 중심부로 모이는 현상이 관찰되었다. 즉 입자들이 전단속도가 높은 지역을 피해 상대적으로 전단속도가 적은 지역으로 모이게 되는 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 입자들이 압력구배 흐름에서 관의 중심부로 모임에 의해 상대적으로 관 벽면 주위에는 입자들의 농도가 적어지게 되며, 따라서 벽면에 미치는 힘도 감소하였다.

전산모사를 통해 입자의 부피 분율을 변화해 실험을 한 결과 입자의 부피 분율이 낮을수록 균일한 입자 분포가 형성되는 것으로 관찰되었다. 그러나 입자 부피 분율이 낮은 경우 섬유염색의 선명도가 떨어지므로, 섬유인쇄 시의 적절한 선명도의 유지를 위해 적절한 입자 부피 분율을 유지해야 하며, 따라서 여기서는 선명한 섬유 인쇄시 수행될 수 있는 입자 분율 ($\phi = 15.7\%$)에서 균일한 입자분포가 이루어지는 조건을 조사하였다. 그 결과 평균 무차원 서스펜션 속도가 낮을수록, 노즐 관과 입자 크기 사이의 비 (H/a)가 클수록 입자들의 분포가 균일한 것으로 나타났다. 따라서 잉크제트 프린팅 기법을 사용하여 섬유인쇄를 수행하는 경우, 노즐 관에의 유속을 작게 하고, 노즐 관과 입자 사이의 크기 비를 크게 해야 균일한 인쇄 성능을 얻을 수 있으며, 이를 위해서는 미세한 입자의 안료를 사용해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 산업자원부의 산업기반기술 개발사업의 연구비로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Hunting, B., Derby, S., and Puffer, R.: Thermal Ink Jet Printing of Textiles Recent Progress in Ink Jet Technologies II, IS&T, Springfield, 568 (1999).
- Creagh-Dexter, L.: Speculation on Digital Textile Printing with PZT Printheads Recent Progress in Ink Jet Technologies II, IS&T, Springfield, 574 (1999).
- Ray, A.: Challenge of Digital Ink Jet Pigment Textile Printing Recent Progress in Ink Jet Technologies II, IS&T, Springfield, 545 (1999).
- Ray, A.: Pigment Printings Role in Ink Jet Textile Printing Recent Progress in Ink Jet Technologies II, IS&T, Springfield, 559 (1999).
- Stefanini, J. Ph. : Ink Jet Tehcnology for Textile Printing 17th IFVTCC Congress, June 5, Vienna, 89 (1996).
- Matsumoto, K and Anzai, H.: Dispersed Dye Ink for Ink Jet Textile Printing IS&Ts 1999 PICs Conference, 112 (1999).
- Brady, J. F. and Bossis, G.: Stokesian Dynamics Ann. Rev. Fluid Mech. 20, 111 (1988).
- Bossis, G. and Brady, J. F.: Dynamic Simulation od Sheared Suspensions. I. General Method J. Chem. Phys. 80, 5141 (1984).
- Toivakka, M. O. and Eklund, D. E. : Prediction of Suspension Rheology through Particle Motion Simulation Tappi Journal 79, 211 (1996).
- Kim, Y.D., Choi, G. J., Sim, S. J. and Cho, Y. S.: Electrorheological Suspensions of Two Polarizable Particles Korean J. Chem. Eng. 16, 338 (1999).

11. Nott, P. R. and Brady, J. F.: Pressure-Driven Flow of Suspensions: Simulation and Theory *J. Fluid Mech.* 275, 157 (1994).
12. Kim, S. and Karrila, S. J.: *Microhydrodynamics: Principles and Selected Applications* Butterworth-Heinemann, Stoneham (1991).
13. Allen, M. P. and Tildesley, D. J.: *Computer Simulation of Liquids* Clarendon Press, Oxford (1987).