

잉크젯 프린팅에서 해상력에 관한 컴퓨터 시뮬레이션 연구

이지은[†], 윤종태, 구철희

[†]부경대학교 대학원 인쇄공학과, 부경대학교 공과대학 인쇄정보공학과
(2010년 1월 8일 접수, 2010년 2월 5일 최종 수정본 접수)

A Study on the Simulation of the Resolution for Ink-Jet Printing

Ji Eun Lee[†], Jong-Tae Youn, Chul-Whoi Koo

[†]Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate School, Pukyong National University,
Dept. of Graphic Arts Information, College of Engineering, Pukyong National University
(Received 8 January 2010, in final from 5 February 2010)

Abstract

Ink-jet is part of the non impact printing that shooting the ink drop from the nozzle to paper. It is very silence and express good color. There are two types of printing that continuous and drop on demand. But drop on demand process is becoming the mainstream. these days, LCD, PDP is passed more than semiconductor industry. And we expect organic EL, FED as a next display. But product equipment, main component and technology have a gap between an advanced country and us nevertheless physical development. Expecially, previous process part is depended on imports. Ink-jet printing technology that there isn't complicated photo lithography process is attracted, so ink-jet printing resolution is more embossed. But there were not many of ink-jet resolution thesis but ink-jet head or nozzle. Because, to out of the ink from the nozzle is unseeable and hard to experiment.

Therefore this thesis was experimented and simulated how can ink-jet printer improved resolution by flow-3d simulation package program.

Keyword : ink-jet printing, continuous, drop on demand, resolution, simulation

1. 서 론

국내 및 해외에 다양한 인쇄 기술이 보급되어 있는 상황에서 잉크젯 기술은 1990년대 후반부터 제도에 올랐다. 잉크젯은 비접촉성 인쇄 기술의 하나로 인쇄 표면에 잉크 방울들을 투사해 전자적으로 조정하기 때문에 여러 가지 장점들이 있다. 원하는 양을 원하는 때 제작 가능하고 2,400dpi이상의 높은 해상도를 가지며 잉크 방울의 크기를 조절하여 보다 정확한 이미지인 그레이 스케일 이미지를 얻을 수 있다. 따라서 사진과 같은 이미지를 만들 수 있다. 또한 기존의 붓을 이용한 디자인에 비해 높은 해상도의 이미지를 손쉽게 만들 수 있으므로 그래픽 디자인에 대한 적용 범위를 확장할 수 있다. 그리고 카트리지에 저장되어 있는 잉크를 이미지에 필요한 양만큼 소비하기 때문에 생산비 절감에 유리하다. 이는 코팅 기술이 가지고 있는 원료의 소모를 획기적으로 개선할 수 있다. 또한 코팅 방법과는 달리 기판에 영향을 주지 않는다. 거칠거나 민감한 모든 종류의 표면 위에 인쇄가 가능하며, 1분당 100,000라인의 인쇄 속도로 고속 처리에 적합하다. 현재 잉크젯 프린터의 성능을 평가하는 방법 중에 가장 기본적인 것은 해상도이다. 그렇기 때문에 인쇄물의 해상도에서는 dpi가 무척 중요하다. dpi는 dot per inch의 약자로 1인치당 찍은 점의 수이다. dpi는 인쇄물의 해상력을 결정하는 단위이다. 예를 들어 300dpi는 1인치에 300개의 점을 찍는 밀도로 잉크 점을 찍어 인쇄를 한다는 뜻이다. 당연히 dpi는 숫자가 클수록 인쇄물이 더 정교해진다. 그러나 제조업체에 따라 출력 dpi 수가 다르며 요구되는 최적의 해상도도 프린터 엔진의 특성에 따라 다르다. 일반적인 인쇄물은 200dpi면 좋은 품질이며, 300dpi를 넘으면 매우 우수한 품질이 된다. 우리가 일상생활에서 보는 대부분의 인쇄물은 100~300dpi 정도를 사용한다. 잉크젯 프린터에 1,440dpi라고 쓰여 있는 것은 dot의 실질적인 것을 말하는 것이 아니라, 이상적인 종이에 잉크 방울을 뿌려 구현할 수 있는 이론상의 수치이다. 종이에 작은 잉크 입자들을 뿌려 번지게 하는 방법으로 인해, 표시된 해상력만큼 재현하지 못하는 경우가 많다. 따라서 실제로는 600dpi 잉크젯 프린터라고 해도 인쇄소에서 300dpi로 출력한 것보다 품질이 떨어지기도 한다. 그러므로 좋은 품질을 얻기 위해서는 목표로 한 해상력 보다 높게 인쇄해야 하는데 그러기 위해서는 잉크젯의 해상력에 관한 연구가 필수적이다. 잉크젯에서는 주로 헤드와 노즐에 관한 연구들이 많이 있지만,¹⁻⁹⁾ 본 논문에서는 잉크젯의 해상력에 관한 연구를 하고자 한다.

본 연구의 목적은 FLOW-3D 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 액적의 비산 모양을 시뮬레이션 함으로서 해상력에 대한 예측을 하기 위한 것이다. 잉크 방울의 크기가 해상력에 미친다는 것을 알고, 잉크의 물성을 변화시켜가며 액적을 줄이기 위한 시뮬레이션을 하였다.

2. 이 론

2-1. 무차원수

무차원수는 물리계를 묘사하는 수이며 일반적으로 몇 개의 차원을 가진 수 또는 차원이 없는 수를 조합해서 얻는, 전체적으로 무차원이 되는 수를 말한다. 무차원수는 닮음의 개념과 결부되어 있으며, 두 계가 기하학적 또는 역학적으로 닮음이기 위한 조건을 준다. 다른 시스템 내에게 무차원수에 의해 동일하게 기술될 수 있다면 그 계는 동등하다고 볼 수 있다.

Table 1은 다양한 무차원수의 정의에 대해 나타내고 있다. 노즐 내부에서 잉크의 거동은 원통형 관내부에서의 유체의 흐름으로 단순화시킬 수 있으며 이는 레이놀즈수와 모세관수의 조합을 통하여 설명할 수 있다.¹⁰⁾

Table 1. Dimensionless Number

Dimensionless Number	Meaning
Archimedes Number	Motion of Fluids due to Density Difference
Capillary Number	Fluid Flow influenced by Surface Tension
Deborah Number	Rheology of Viscoelastic Fluids
Ekman Number	Frictional(Viscous) Forces in Geophysics
Knudsen Number	Continuum Approximation in Fluids
Laplace Number	Free Convection with immiscible Fluids
Reynolds Number	Characterizing the Flow Behaviour (Laminar or Turbulent)
Webber Number	Characterization of Multiphase Flow with Strongly bended Surfaces
Friction Number	Fluid Flow
Weissenberg Number	Viscoelastic Flows

2-1-1. Reynolds Number 이론

레이놀즈수는 Navier-Stokes 방정식을 무차원화 하는 과정에서 유도되는 무차원 상수로서 유체가 가지는 관성력(inertia force)과 점성력(viscous force)의 비를 나타내며 유동하는 유체 내에 물체를 놓거나 관속을 유체가 흐를 때에 그 흐름의 상태를 특징짓는 수치이다. 흐름을 연구하는 데 중요한 것으로, 이 값이 작을 때는 흐름이 규칙적인 층류가 되지만, 어떤 값 이상이 되면 난류가 된다. 유속이 느린(유량이 작은) 경우, 즉 Re 값이

작은 영역에서는 유체의 점성력이 우세하게 되어 유체는 물체 주위에 층류(laminar)의 형태를 띠고 흐르며, 유체가 관내의 축을 따라 층을 이루면서 평행하게 흐르는데, 이런 유동을 층류 유동 또는 점성 유동이라 한다. 임크가 임계 속도(critical velocity)를 넘으면, 즉 Re 값이 큰 영역에서는 관성력이 우세하여 유체는 요동치는 난류(turbulent) 형태로 흐른다. 유체는 소용돌이(와류)를 이루면서 흐르기 때문에 관 전체에 임크가 퍼질 때의 흐름을 난류 유동(turbulence flow)이라 하고, 유체의 입자는 주 유동 방향을 가로지르는 불규칙한 운동을 하며 불규칙한 형태로 유체 입자들끼리 혼합되는 형상을 갖는다. 층류와 난류의 중간에는 전이 구역(transition)이 존재하게 되는데 그 때의 애매한 흐름 상태를 전이 영역 흐름 상태라고도 한다. 층류의 파괴로부터 전역이 난류로 성장되는 기간의 유동을 전이 유동이라 하며, 층류와 난류의 전환이 일어난다. 즉, 전이(=천이)유동이 일어나는 영역. $2000 < Re < 4000$ 의 영역에서 유체는 층류와 난류의 중간 형태로 해석된다.

2-1-2. Reynolds 방정식

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \dots\dots\dots(1)$$

V는 유체의 유속[m/s]이고, ν 는 유체의 동점성 계수[m²/s]이며 ρ 는 유체의 밀도[kg/m³], D는 관로 직경[m]이며 μ 는 점성 계수[N/m²]이다. 층류는 $Re < 2,100$, 천이 영역은 $2,100 < Re < 4,100$, 난류는 $4,100 < Re$ 이다. 상임계 속도(upper critical velocity)는 층류에서 난류로 천이할 때의 유속이고, 하임계 속도(lower critical velocity)는 난류에서 속도를 줄이면 다시 층류로 되돌아 갈 때의 속도(하임계 Reynolds수=2,320)를 말한다.

2-1-3. Capillary Number 이론

하나의 액체와 기체 사이, 또는 두 개의 비혼합성 액체 사이의 표면에 작용하는 점성력과 표면 장력의 상대 효과(상대 효과값)이다.

$$Ca = \frac{\mu V}{\gamma} \dots\dots\dots(2)$$

이 때 μ 는 점도(viscosity)이고, V는 속도이며, γ 는 표면 장력(surface tension)이다.

2-2. 시뮬레이션

시뮬레이션은 복잡한 문제를 해석하기 위해서 실제와 비슷한 상태를 수식 등으로 만들어 모의적으로 연산을 되풀이하여 그 특성을 파악하는 일을 말한다.

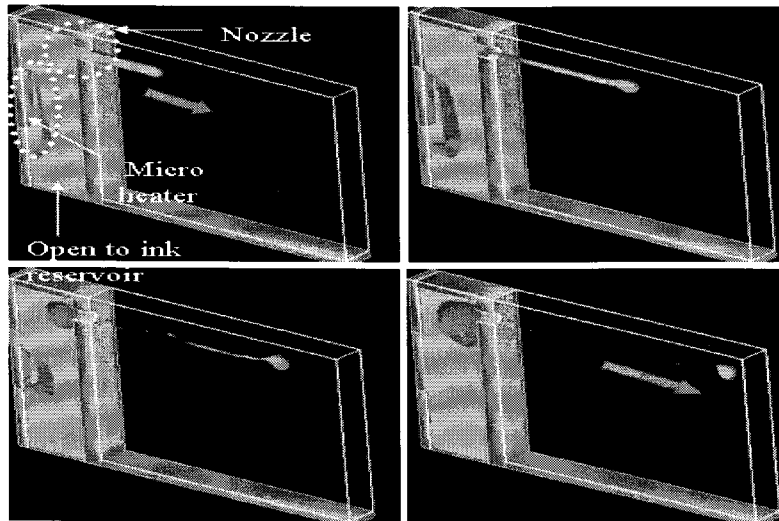


Figure 1. Simulation of the bubble jet printing by FLOW-3D.

즉, 실제 또는 가상의 동적 시스템 모형을 컴퓨터를 사용하여 연구하는 것을 말하며 모의실험 또는 모사라고도 한다. 시뮬레이션은 이미 많은 분야에서 널리 사용되고 있으며 그 종류도 여러 가지가 있다. 특히 FLOW-3D 프로그램은 자유 표면 해석의 정확도가 높고 수년간의 경험을 바탕으로 Figure 1과 같은 다양한 물리 모델을 간편하고 신속하게 해석할 수 있는 프로그램이다. 대부분의 해석 모델 형상의 격자를 10분 안에 완성할 수 있고 사용자 인터페이스가 직관적이기 때문에, 매우 복잡한 해석 모델이더라도 30분이면 해석의 전처리 과정을 충분히 마무리 할 수 있다.¹¹⁾

3. 실험

시뮬레이션을 하기 위해서 Table 2와 같은 순서에 따라서 프로그램에 나와 있는 설정 값들을 맞춰주어야 한다. 시뮬레이션의 물리적 특성은 표면 장력, 점도이며, 잉크의 유동을 알기 위해서 난류 또는 층류의 이론적 모델을 기반으로 하였다.

Table 2는 모사할 잉크젯 모델의 기본 설정 값들을 나타낸 것이고, Figure 2와 같이 해석 모델 형상을 만들어 잉크젯을 모사하였다.

초기 점도나 밀도값 등은 FLOW-3D 매뉴얼을 참고하였고, 유체를 잉크로만 하므로, one-fluid와 ink-jet pressure driven 모델을 적용시켰다. 잉크젯 액적의 크기를 줄이기 위해서 표면 장력, 밀도, 노즐의 직경 등을 변화시켰으며 변화 값을 비교, 관찰하였다.

Table 2. A Type of the Model Value

General	Set up a Finish Time and Unit of Liquid
Physics	Set up a Various Physical Model
Fluids	Set up a Fluids
Meshing-Geometry	Make a Analytical Model Shape and Divide a Lattice
Boundaries	Set up a Boundary Condition on the Diagram
Initial	Set up an Initial Condition
Output	Set up a Method to Check the Result after Analysis
Numerics	Set up an Initial Time Step and Solver Option

Table 3. Condition of Simulation

Finish Time	5 sec
Physics	Surface Tension, Viscosity and Turbulence
Viscosity	0.333 gm/cm/s
Density	1.0 gm/cm ³
Surface Tension Coefficient	1 gm/s ²
Contact Angle	90°
Pressure	40 gm/cm/s ²

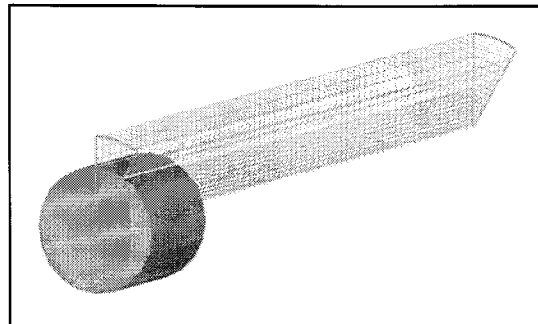


Figure 2. Schematic diagram of ink jet pressure driven model.

4. 결과 및 고찰

4-1. 표면 장력에 대한 해상력의 변화

표면 장력에 따른 잉크 지름의 변화를 확인한 결과 Table 4와 같이 표면 장력이 높아

질수록 잉크의 지름이 줄어들었다.

Table 4. Surface Tension and Diameter of Ink

Surface Tension (gm/s ²)	Diameter of Ink (pl)
1.0	2.2
1.5	2.2
2.0	2.0
2.5	2.0
3.0	1.9
3.5	1.9
4.0	1.8
4.5	1.9
5.0	1.8

Figure 4와 같이 잉크 방울의 모양이 상하로 길어졌으며 속력이 떨어졌다. 표면 장력의 값을 줄일수록 난류가 되고 잉크 방울의 모양이 제대로 나오지 않아 올바른 이미지 재현을 할 수 없으므로, 표면 장력을 높였을 때의 값만 나타내었다. 또한 pressure contour의 색이 다름으로 잉크 방울에 가해지는 압력이 달라졌음을 알 수 있었다. 붉은 색에 가까워질수록 압력이 더 많이 걸린다는 의미이며, 표면 장력을 높인 잉크 방울에 더 많은 압력이 걸린다는 것을 알 수 있었다.

따라서 빠져나오는 잉크의 양이 줄어들므로 해서 액적이 작아짐을 알 수 있었다. 잉크 방울의 크기가 작아짐으로 해서 해상력이 더 향상될 것이라 생각된다. 이 때 잉크 방울의 지름은 Figure 3과 같이 두었고, Figure 5는 표면 장력의 변화에 따른 잉크의 지름을 표로 나타낸 것이다.

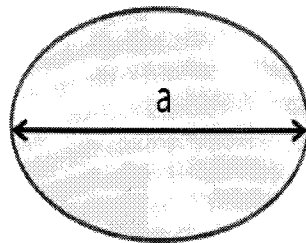


Figure 3. Diameter of ink.

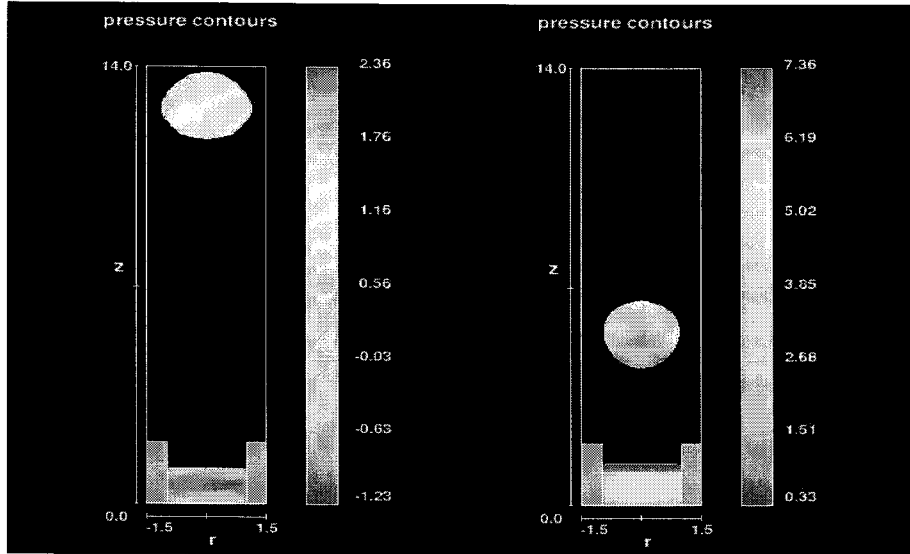


Figure 4. Result of simulation by changing surface tension.

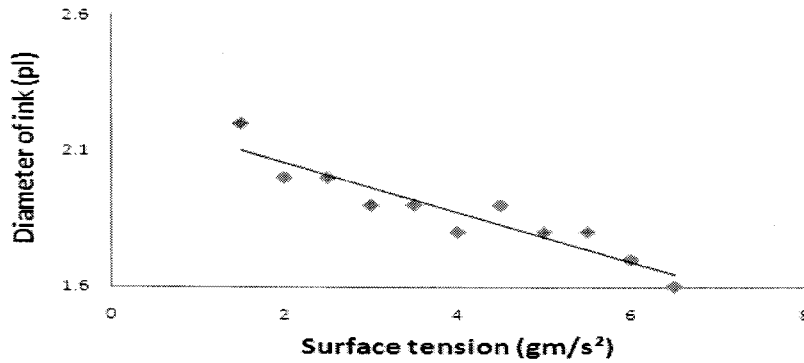


Figure 5. Diameter of ink according to surface tension.

4-2. 밀도에 대한 해상력의 변화

밀도를 변화시켜가면서 해상력의 변화를 측정해 보았다. 먼저 밀도를 줄였을 때는 잉크가 거의 물처럼 빠져나가는 난류 현상을 보였다. Table 5와 같이 밀도를 높여주면, 잉크의 지름이 줄어든다는 것을 알 수 있었다. Figure 6에서 알 수 있듯이 밀도를 높였을 때 잉크 방울의 모양은 변화를 주기 전과 별다른 차이를 보이지 않았다. 또한 표면 장력의 실험과 같이 속력이 떨어졌고, 나오는 잉크의 양이 줄어들므로 해서 액적이 작아짐을 알 수 있었다. 잉크 방울이 받는 압력은 값을 변화시키기 전과 거의 동일하였다.

Figure 7에서 잉크 방울의 크기가 작아짐으로 해서 해상력이 더 높아질 것이라 예상할 수 있었다.

Table 5. Density and Diameter of Ink

Density(gm/cm ³)	Diameter of Ink(pl)
1.0	2.2
1.2	2.2
1.4	2.1
1.6	2.0
1.8	1.9
2.0	1.9
2.2	1.8
2.4	1.8
2.6	1.7
2.8	1.6
3.0	1.6
3.2	1.5
3.4	1.4
3.6	1.4
3.8	1.4
4.0	1.3
4.2	1.2

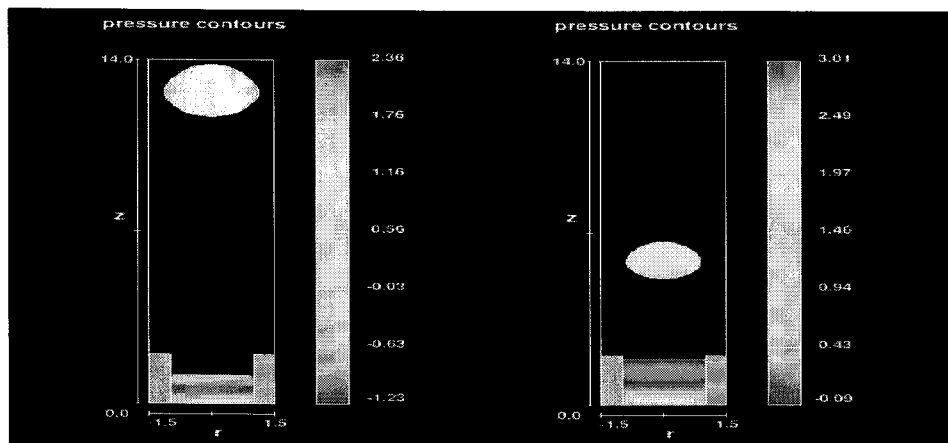


Figure 6. Result of simulation by changing density.

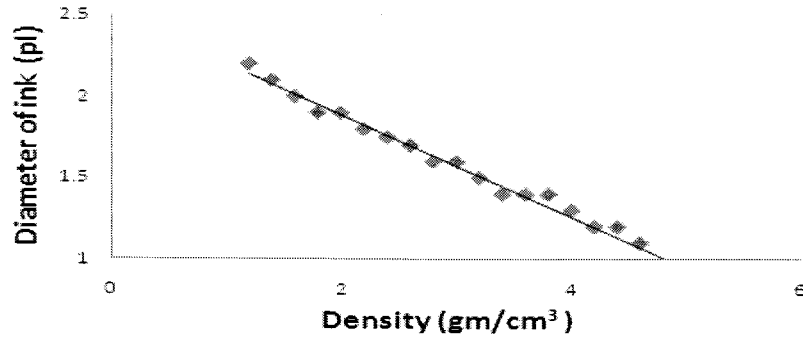


Figure 7. Diameter of ink according to density.

4-3. 노즐의 직경에 대한 해상력의 변화

노즐의 직경을 변화시켜가며 해상력의 변화를 확인한 결과 Table 6과 같이 직경을 좁혀 주면, 잉크의 지름이 조금씩 줄어들고, Figure 8에서 나타난 것처럼 잉크 방울의 모양이 구가 되었다. 또한 노즐의 크기가 줄어들어 노즐로 가해지는 압력이 커지기 때문에 잉크 젯에 있는 잉크의 압력이 커졌으며, 속력이 줄어들었다.

Figure 9는 노즐에서 도출되는 잉크 방울의 크기가 작아짐으로서 해상력이 더 높아질 수 있는 것을 예측할 수 있다.

Table 6. Nozzle Diameter and Diameter of Ink

Nozzle Diameter(nm)	Diameter of Ink(pl)
0.9	2.2
0.8	2.0
0.7	1.6
0.6	1.4
0.5	1.2
0.4	1.1
0.3	1.0
0.2	1.0

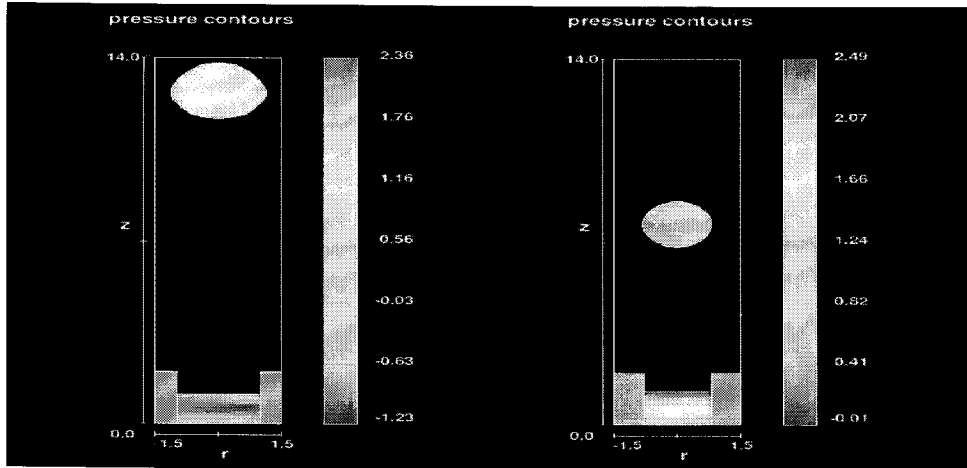


Figure 8. Result of simulation by changing nozzle diameter.

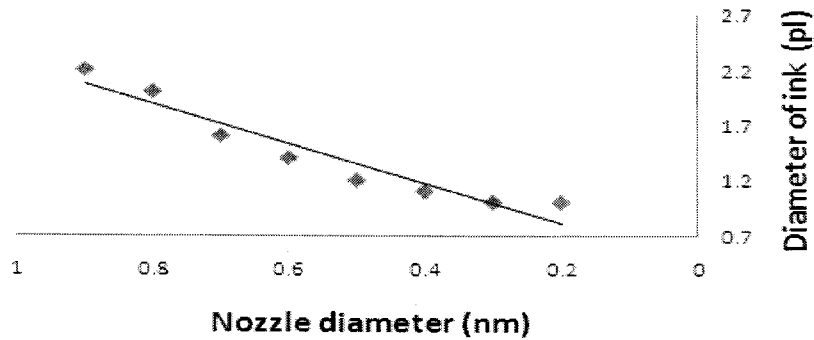


Figure 9. Diameter of ink according to nozzle diameter.

5. 결론

본 연구는 잉크젯의 해상력을 높이기 위해서 FLOW-3D라는 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실험한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시각적으로 확인할 수 없었던 잉크젯 잉크의 유동 모습과 도출 현상을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

2. 잉크 방울의 크기를 줄일 수 있다면, 1인치 안에 들어갈 수 있는 점의 수가 많아지게 되므로 해상력이 좋아질 수 있음을 확인하였다.
3. 시뮬레이션을 이용하여 잉크젯 인쇄에서 해상력에 관한 실험이 용이함을 알 수 있었다.

눈에 보이지 않는 잉크젯 인쇄를 시뮬레이션을 통해서 잉크젯의 조건들을 변화시켜주며 결과물을 도출할 수 있었다. 실험적 결과물은 없지만, 시뮬레이션의 결과를 가지고 직접 실험을 해본다면 시뮬레이션을 통해서 도출한 결과물과 거의 동일할 것으로 예상된다. 이 방법을 시각적으로 확인이 어려운 실험이나, 직접적인 실험이 어려운 현장에 사용함으로써 간편하고 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

- 1) P. H. Shin, J. O. Sung and S. J. Lee, On the Characteristics of the Droplet Formation from an Inkjet Nozzle Driven by a Piezoelectric Actuator, *The Korean Society of Visualization*, **6**, pp. 47~52 (2008).
- 2) M. K. Kim, J. Y. Hwang, S. H. Lee, K. T. Kang and H. S. Kang, Phase Matching of Pressure Wave in a Drop on demand Inkjet Print Head, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **25(9)**, pp. 116~125 (2008).
- 3) W. C. Sim, S. J. Park, Y. J. Kim, C. S. Park, Y. S. Yoo, J. W. Joung and Y. S. Oh, Performance Analysis of the Industrial Inkjet Printing Head Using 1D Lumped Model, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **24(11)**, pp. 101~107 (2007).
- 4) W. H. Lee, J. S. Kim, D. S. Kim and M. C. Lee, Three Dimensional Printing Process Using Ink Jet Technology, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **28(8)**, pp. 33~38 (2006).
- 5) K. S. Kwon and J. H. Myong, Experimental Study on the Relationship between Ink Droplet Volume and Inkjet Waveform, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **26(4)**, pp. 141~145 (2009).
- 6) J. H. Byun, D. S. Seo, Y. M. Choi, H. J. Chang, K. J. Kong, J. O. Lee and B. H. Ryu, Fabrication of Silver Micro Lines by Ink-Jet Method, *The Korean Journal of Ceramics*, **41(10)**, pp. 788~791 (2004).
- 7) C. R. Yoon, H. J. Oh, N. H. Lee, Guo Yupeng, W. J. Lee, K. S. Park and S. J.

- Kim, Preparation of Ultra-Thin Transparent TiO₂ Coated Film by Ink-Jet Printing Method, *The Korean Institute of Surface Engineering*, **40(4)**, pp. 190~196 (2007).
- 8) S. S. Kim, D. S. Kim, W. H. Lee, D. Y. Shin and C. H. Kim, Ink-jet Printing Technology for Paradigm Shift in Mass Production, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **23(8)**, pp. 15~21 (2006).
- 9) D. Y. Shin, W. H. Lee, T. G. Kang and D. S. Kim, Challenging issues of Piezo Drop-On-Demand Ink-Jet Printing Technology, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **23(8)**, pp. 7~14 (2006).
- 10) Vance Bergeron, Daniel Bonn, Jean Yves Martin & Louis Vovelle, "Controlling droplet deposition with polymer additives", *NATURE*, **405**, pp. 773 (2000).
- 11) 김윤정, "Flow-3D를 활용한 유체유동 해석", *CAD&Graphics*, pp. 166~171 (2007).