

# Aerosol을 이용한 Direct-Write 시스템에서 침착된 입자의 형상예측 모델에 관한 연구

박준정,<sup>1</sup> 백성구,<sup>2</sup> 리광훈<sup>\*3</sup>

## DEVELOPMENT OF PREDICTION MODEL OF THE SHAPE OF DEPOSITED PARTICLES APPLIED FOR AEROSOL BASED DIRECT-WRITE TECHNOLOGY

Jun Jung Park,<sup>1</sup> Seong Gu Baek<sup>2</sup> and Gwang Hoon Rhee<sup>\*3</sup>

*Direct Write Technologies are being utilized in various industrial fields such as antennas, engineered structures, sensors and tissue engineering. With Direct Write Technologies, producing features have the mesoscale range, from 1 to 100 microns. One form of the Direct Write Technologies is based on aerosol dynamics. The shape of deposited aerosols determine the form of products in the Direct Write Technology based on aerosol dynamics. To predict shape of deposited aerosol, a prediction model is created. In this study, we estimated Line-Width and Line-Thickness from the prediction model. Results of prediction model is valid from comparison with experimental results.*

**Key Words :** 다이렉트 라이트 테크놀로지(DWT), 선폭(Line-width), 선두께(Line-thickness), 예측 모델(Prediction Model), 입자(Aerosol)

### 1. 서 론

현재 MEMS 공정에서 후막(thick film)공정과 박막(thin film)공정이 주로 사용되고 있다. 그러나 후막공정은 100mm 이하의 공정에서는 적용하기 힘들며, 박막공정은 공정과정이 복잡하고 생산단가가 높다는 단점을 지닌다[1]. 따라서 최근에는 박막공정보다는 생산단가가 저렴하며 후막공정보다는 더 정밀하게 가공할 수 있는 방법인 Direct-Write Technology(DWT)가 주목 받고 있다[2,3].

Direct-Write Technology에는 에어로졸(aerosol)을 이용하는 방법과 레이저(laser)를 이용하는 방법이 있다. 레이저를 이용하게 되면 에어로졸을 이용한 Direct-Write Technology보다 고해상도의 부품을 생산할 수 있으나 현재까지 산업현장에서 사용되고 있지는 않다[4]. 따라서 본 연구에서는 산업현장에

서 이용 중인 에어로졸을 이용한 Direct-Write Technology를 해석대상으로 선정하여 전산해석을 수행하였으며 해석된 결과를 토대로 침착된 Droplet의 형상을 예측하는 방법에 관한 방법론적인 연구를 수행하였다.

에어로졸을 이용한 Direct-Write Technology는 10mm 정도의 공정까지 가능하며[3], 다양한 재료의 기판에도 침착이 가능하고 낮은 온도의 기판에 역시 침착이 가능하기 때문에 공정에 들어가는 비용을 절감할 수 있다[1,5]. 그러나 이처럼 다양한 장점을 지닌 에어로졸을 이용한 Direct-Write Technology를 산업현장에 적용하기 위해서는 보다 정밀한 공정이 필요하며 정밀한 공정을 위해서는 droplet이 침착된 형태를 예측하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 침착된 Droplet의 2차원 단면형상을 예측하는 방법론을 개발하였고, 개발된 방법론의 타당성을 검증하기 위하여 실험결과에 나타난 선폭(line-width)과 선두께(line-thickness)를 비교하여 본 연구에서 개발된 방법론의 타당성에 관해 살펴보았다.

침착된 droplet의 2차원 단면형태를 예측하기 위해서는 우선적으로 에어로졸을 이용한 Direct-Write 시스템 내부의 유동현상 및 droplet의 거동의 해석이 필요하며 이러한 내부유동현상 및 입자의 거동을 전산해석을 통해 알아보았고 전산해

접수일: 2007년 7월 4일, 심사완료일: 2007년 11월 12일.

1 학생회원, 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

2 정회원, 삼성전자(주) 생산기술연구소

3 정회원, 서울시립대학교 기계정보공학과

\* Corresponding author, E-mail: ghrhee@uos.ac.kr

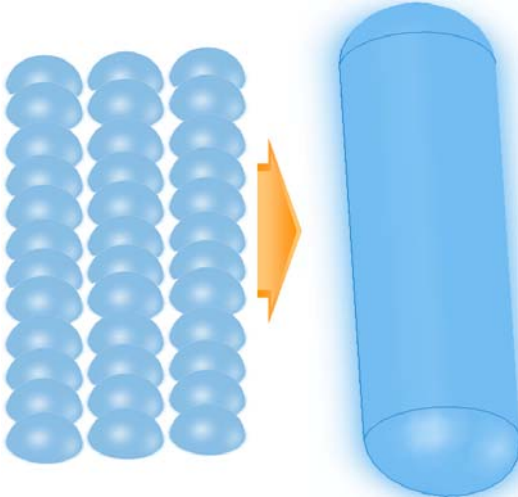


Fig. 1 Transformation of a number of deposited droplet

석을 위해서는 상용 열 유체해석 프로그램인 CFD-ACE를 사용하였다.

## 2. 형상에측 모델 및 전산해석 방법

### 2.1 형상에측모델

Droplet이 쌓이는 기관은 일정한 속도로 이동한다. 따라서 실제로는 Fig. 1의 좌측 그림처럼 droplet 각각이 아닌 우측 그림과 같이 하나의 선의 형태로 나타나게 된다. 따라서 droplet이 기관에 쌓이게 되면 그 단면의 모양과 선폭은 이송 방향에 따라 일정하다고 할 수 있다. 실험을 통해서도 입자가 쌓이는 형태는 알아 낼 수 있지만 실제로 기관에 점착되는 혹은 노즐로부터 나오는 droplet의 개수를 정확하게 알아낼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)을 통해 입구로부터 나오는 입자의 수를 실제로 쌓이는 droplet의 양과 같도록 조정하였다. 식 (1)을 살펴보면 좌변은 기관에 점착된 입자의 실제 부피를 나타낸 값이며 우변은 입구에서 유입되는 droplet 각각의 부피의 총합을 표시한 식이다. 본 연구에서는 좌변과 우변의 일치시킴으로 인해서 실제로 기관에 쌓이는 양과 형상에측모델에서 이용하는 droplet의 양을 동일하게 일치시켰다.

$$Vol_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D_i}{2} \right)^3 \quad (1)$$

n = Number of Particle  
 D<sub>i</sub> = Diameter of Particle  
 Vol<sub>tot</sub> = Total Volume

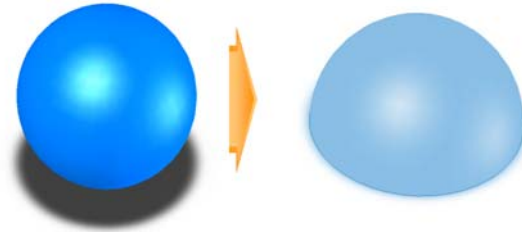


Fig. 2 Shape of deposited droplet

구 모양을 지닌 하나의 입자가 기관에 침착되면 그 모양은 Fig. 2와 같이 반구 형태로 변한다고 가정 할 수 있다. 그러나 침착된 입자의 형태를 정확한 반구로는 볼 수 없기 때문에 본 연구에서는 단면의 모양을 타원으로 가정하였고 타원의 장축 및 단축( $r_1, r_2$ )을 침착되기 전 입자의 직경의 함수로 표시하면 식 (2)와같이 표시할 수 있다. 본 연구에서 적용한 장축과 단축의 길이인  $r_1$ 과  $r_2$ 는 각각 입자의 직경에 비례하는 함수로서 나타내었으며 각각의 수치는 실험값 및 식 (2)에 나타난 관계식을 통해 선정하였고 그 값은 각각  $r_1=0.4167D$   $r_2=0.7746D$  이다.

$$r_1 r_2^2 = \frac{D^3}{4} \quad (2)$$

D = Particle Diameter  
 r<sub>1</sub> = Maximum Height  
 r<sub>2</sub> = Wetted radius

식 (2)에서  $r_1$ 은 침착된 droplet의 높이라고 할 수 있으며  $r_2$ 는 쌓인 선폭에 연관된 침착된 droplet의 반경이라고 할 수 있다. 이렇게 정의된  $r_1$ 과  $r_2$ 를 이용하여 침착된 한 지점에서의 최대 높이를 타원의 방정식을 이용하여 나타내면 식 (3)과 같이 표현된다. 그러나 일반적으로 입의의 위치 X<sub>r</sub>에서의 높이는 가운데 높이인 H<sub>max</sub>라고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 평균높이인 H를 Fig. 3(c)에 표시된 넓이의 평균으로부터 구했으며 그 관계식을 식 (4)에 표시하였다.

$$\frac{(x_r - x_i)^2}{r_2^2} + \frac{H_{max}^2}{r_1^2} = 1 \quad (3)$$

$$H_{max} = \frac{r_1}{r_2} \sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2}$$

$$H \times 2 \sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2} = \frac{1}{2} \pi H_{max} \sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2} \quad (4)$$

$$H = \frac{\pi}{4} \frac{r_1}{r_2} \sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2}$$

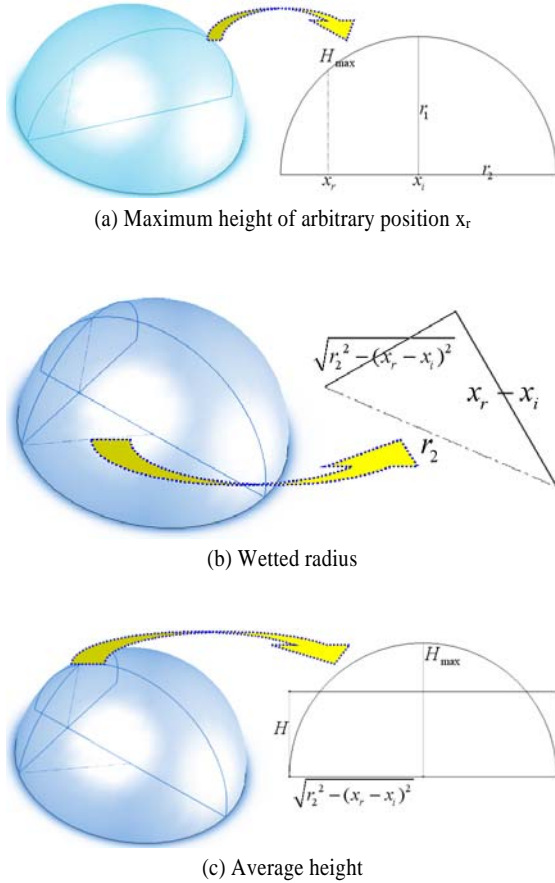


Fig. 3 Modeling of average height

식 (4)에서 얻어진 관계식은 기관의 이동을 고려하지 않은 관계식이다. 그러나 실제기관은 이동하기 때문에 기관의 이동에 따른 입자하나가 전체 선풍에 미치는 영향에 관한 관계식을 정의하여야 하며 그 관계식을 식 (5)에 표시하였으며 식 (5)에 표시된  $s$ 는 기관의 이송속도를 나타낸다. 이와 같은 관계식들을 정리해 보면 최종적으로  $n$ 개의 입자가 침착되었을 때 단면의 높이  $y_r$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{H} &= \frac{\pi}{4} \frac{r_1}{r_2} \sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2} \times \frac{2\sqrt{r_2^2 - (x_r - x_i)^2}}{s} \quad (5) \\ &= \frac{\pi}{2s} \frac{r_1}{r_2} (r_2^2 - (x_r - x_i)^2) \end{aligned}$$

$$y_r = \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{2s} \frac{r_1}{r_2} (r_2^2 - (x_r - x_i)^2) \quad (6)$$

## 2.2 지배방정식

시스템 내부의 공기의 유동현상을 알아보기 위해 전산해석을 이용하였으며 전산해석에 사용된 일반적인 3차원 비정상상태 비압축성 유체에 관한 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다[6].

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla u_i \right) = \rho g_i - \nabla P + \mu \nabla^2 u_i \quad (8)$$

기체의 유동에 따라 움직이는 입자의 거동은 Lagrangian 관점에서 예측하였으며 방정식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다 [7].

$$\begin{aligned} m_p \frac{dV_p}{dt} &= \frac{1}{2} \rho A_p C_D (U - V_p) |U - V_p| \quad (9) \\ &\quad - \text{Vol}_p \nabla P + m_p g \end{aligned}$$

식 (9)에서 표시된  $m_p$ 는 droplet의 무게를 나타내고  $V_p$ 는 droplet의 속도를 나타내며  $C_D$ 는 항력계수를 나타낸다. 그리고  $\rho$ ,  $U$ ,  $P$ 는 각각 기체의 밀도, 속도, 압력을 의미한다. 그리고  $A_p$ 는 droplet의 표면적을 나타내고  $\text{Vol}_p$ 은 droplet의 부피,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다. 위 식으로부터 살펴보면 droplet의 운동은 droplet의 가속도 및 droplet에 가해지는 항력 그리고 중력, 압력차에 의해 나타나는 힘으로 이루어져있다. 식 (9)에 나타나는 항력계수는 지는 droplet의 국부 레이놀즈(Reynolds)수에 의해 결정되며 여기서 국부 레이놀즈수는 식 (10)과 같이 정의되며 레이놀즈수에 따라 변화되는 항력계수는 식 (11)과 같이 정의된다[7].

$$Re = \frac{\rho |U - V_p| d_p}{\mu} \quad (10)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 1 < Re < 10^3 \\ 0.44 & 10^3 < Re \end{cases} \quad (11)$$

본 연구에 적용된 전산해석 방법에 대하여 간략히 설명을 하면, 지배방정식에 대한 차분화는 유한 체적법(FVM), 대류항의 처리는 상류차분도식을 이용하였고 압력항의 처리는 SIMPLE알고리즘을 이용하였다[6].

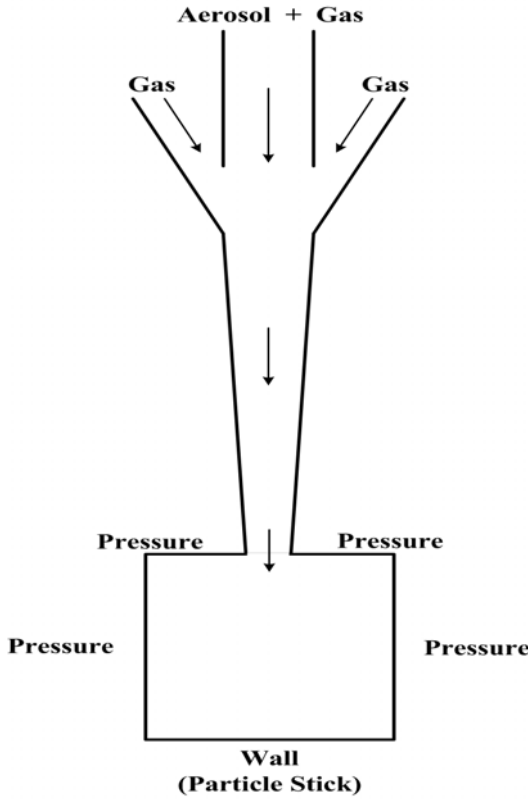


Fig. 4 Schematic diagram and boundary condition

### 2.3 형상예측모델의 적용대상

Fig. 4는 본 연구에서 전산해석 대상으로 선정된 시스템 내부의 형상 및 유동의 형태를 개략적으로 표시한 그림이다. 에어로졸은 중앙의 노즐을 통해 유입되며 양옆으로 가스가 에어로졸을 한군데로 모아주는 형태를 보이고 있는 것을 나타내는 그림이다.

본 연구에서의 경계조건을 살펴보면 유동이 유입되는 부분에서는 일정 유량 경계조건을 적용하였고 가스와 에어로졸이 유입되는 부분간의 유량비는 1:2.15로 설정하였으며 노즐에서 유입되는 에어로졸은 실제로 실험에서 사용한 3~9 $\mu\text{m}$ 사이의 입자를 1 $\mu\text{m}$ 간격으로 고르게 분사하였다. 그리고 해석영역으로 설정된 출구부분에서의 외기영역을 각각 0Pa로서 일정 압력경계조건을 설정하였으며 기판은 벽(wall)경계조건으로 입자가 100% 달라붙는 경계조건으로 설정하였다. 본 연구에서는 보다 효율적인 해석을 위해 전체적인 유동장을 해석한 후 Lagrangian 관점에서의 표현된 방정식을 이용하여 에어로졸 입자들의 속도 및 위치 등을 계산하였다. 그러나 이러한 방정식을 통한 해석은 에어로졸 입자들의 궤적이나 크기에 관한 정보는 알 수 있으나 실제로 필요한 정보인 최종적으로 기판

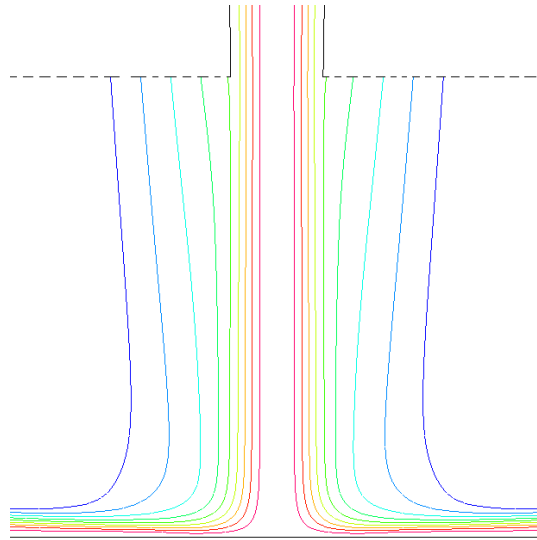


Fig. 5 Streamline around substrate

에 쌓인 선폭 및 단면의 모양은 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이렇게 얻어진 droplet의 정보를 토대로 최종적으로 기판에 쌓인 선폭 및 단면의 모양 등을 예측하였다.

## 3. 형상예측 모델의 타당성 검증

### 3.1 유동장 및 입자의 위치에 관한 해석

Droplet이 쌓이는 형태 및 선폭을 확인하기 위해서는 우선 유동장 해석 및 droplet의 궤적이 계산되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기본적인 유동장 해석 및 입자의 방정식을 통해 Droplet이 침착되는 위치에 관해 알아보았다.

Fig. 5은 노즐(nozzle)과 기판 사이에서의 유선을 나타낸 그림이다. 그림으로부터 젯(jet)유동의 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 우선 노즐을 통해 분사된 유체는 대부분 기판을 향하고 기판에 유체가 부딪힘으로서 정체점(stagnation point)이 발생하게 되고 정체점 이후에는 유동이 급격하게 꺾이는 것을 볼 수 있으며 또한 정체점에서 외부로 유동이 흐름에 따라 경계층이 성장하는 것 역시 유선을 표시한 그림을 통해 확인할 수 있다. 그리고 주변 압력과 정체점에서의 압력차가 크게 발생하게 때문에 주변에서 기판을 향해 유동이 들어오는 것 역시 유선의 모양을 통해 확인할 수 있다.

본 연구에서는 개발된 형상예측 모델의 타당성을 검증하기 위해 우선 3~9 $\mu\text{m}$ 사이의 입자를 1 $\mu\text{m}$ 단위로 균일하게 분포시킨 상태로 해석을 수행하였고 기판과 노즐간의 간격은 1mm~6mm로 변경시키면서 전산해석을 수행하여 droplet이 침착되는 위치에 관해 알아보았다. Fig. 6은 droplet의 크기 및

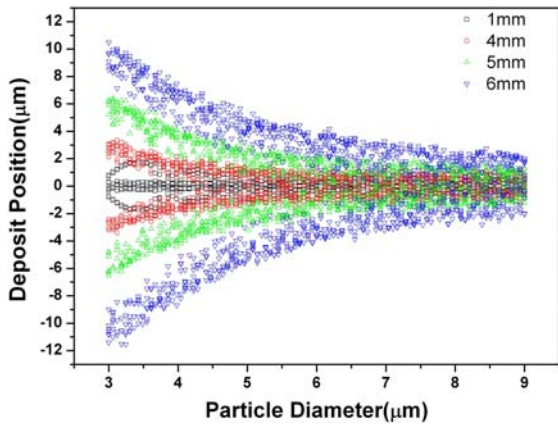


Fig. 6 Deposited position with particle diameter and distance of substrate

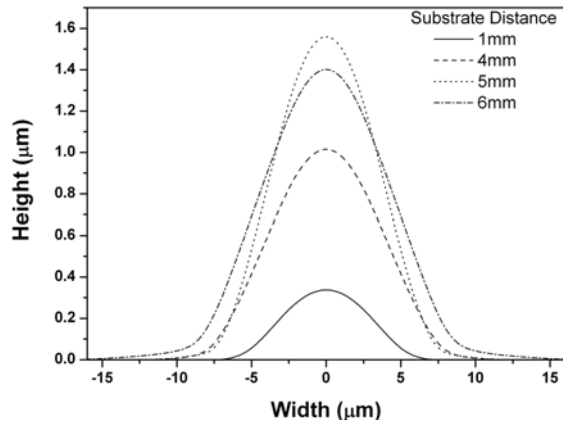


Fig. 7 Sectional diagram with distance of substrate

기관과 노즐간격에 따른 droplet의 침착된 위치를 나타낸 그림으로서 그림으로부터 droplet의 크기가 클수록 가운데로 쌓이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 노즐과 기관사이의 간격에 따른 해석 결과 droplet의 크기가 큰 경우에는 큰 차이가 없으나 droplet의 크기가 작은 경우에는 간격이 넓어질수록 더 멀리 쌓이는 것을 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다. 본 연구에서는 위의 정보를 토대로 형상예측 모델을 이용하여 기관에 쌓이는 선폭 및 단면의 형상에 관해 알아보았다.

### 3.2 형상예측 모델의 타당성 검증

Fig. 6으로부터 얻어진 droplet의 침착된 위치와 크기에 관한 정보를 식 (5)에 대입하면 하나의 droplet이 침착됐을 때 나타나는 평균높이인  $H$ 를 알 수 있다. 그리고  $H$ 를 기관의 이송속도로 나누면 한개의 입자가 기관전체에 단위시간동안 미치는 영향을 알 수 있다. Fig. 6으로부터 얻은 droplet의 크기 및 위치 정보를 식 (6)에 대입하면 주어진 위치  $x_r$ 에서 그 지점의 높이인  $y_r$ 를 예측 할 수 있으며 이렇게 얻어진 각 지점에서의 높이정보를 그래프로 표현하면 Fig. 7을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 Fig. 7을 살펴보면 기관과 노즐간의 간격이 멀어질수록 쌓이는 에어로졸의 양이 많아지고 선폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 일정한 동력을 지닌 펌프는 유동저항이 증가하게 되면 토출할 수 있는 유량이 줄어들게 되며 기관과 노즐사이의 간격이 넓어지면 노즐에서 걸리는 저항의 양이 줄어들게 되며 이에 따라 입구에서 토출되는 유량이 많아지게 된다.

본 연구에서는 이렇게 적용한 형상예측 모델의 타당성을 검증하기 위해 형상예측 모델로부터 얻어진 선폭 과 두께를 실험결과와 비교하여 보았으며 그 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에

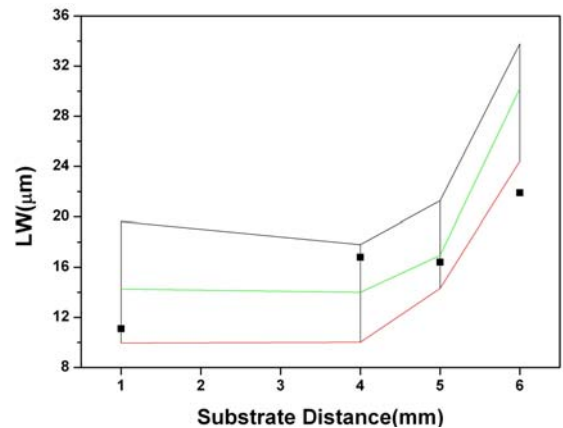


Fig. 8 Comparison of Line Width with experiment and computational results

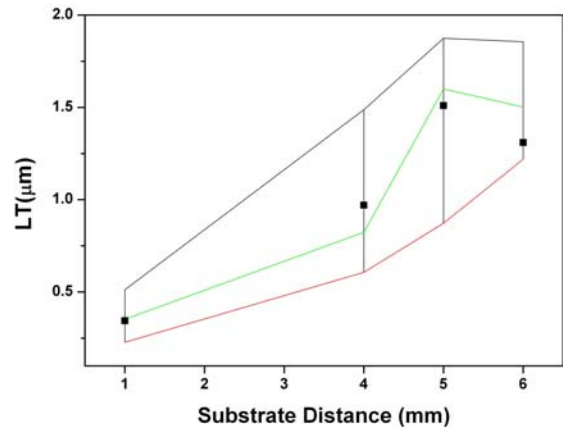


Fig. 9 Comparison of Line Thickness with experiment and computational results

각각 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9는 실험값과 해석결과를 비교한 그림으로서 해석결과는 사각형 형태의 기호로 표현하였으며 실험결과는 총 11번의 실험을 수행한 결과로서 Fig. 8과 Fig. 9에는 최솟값 최댓값과 평균값을 각각 나타내었다. 그림으로부터 실험값과 해석결과를 확인 할 수 있으며 본 연구에서 적용한 형상예측 모델이 실험결과의 오차 범위 내에 포함되어 있는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이송되는 기관에 침착되는 droplet이 형성하는 형상을 예측할 수 있는 방법론을 개발하였다. 상용유체해석 프로그램인 CFD-ACE를 이용하여 Aerosol-jet 내부의 유동장을 축대칭 2차원으로 해석하고 유동장을 기준으로 Lagrangian 관점에서 유도된 입자방정식을 이용하여 droplet의 궤적 및 침착된 위치정보를 얻어냈다. 계산으로부터 얻어진 droplet이 침착된 위치정보 및 droplet의 크기를 개발된 방법론에 적용한 결과 droplet의 단면의 모양은 노즐과 기관간의 거리 그리고 droplet의 크기에 의해 크게 좌우되는 것을 확인 할 수 있었으며 방법론으로부터 얻어진 선두계 및 선폭을 실험결과와 비교한 결과 오차범위 내에서 일치 하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 기관에 침착되는 droplet이 형성하는 형상을 예측하는 방법론은 타당하다고 할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] Michael, J.R., Bruce H.K. and Marcelino E., "Maskless deposition technology targets passive embedded components."
- [2] 2004, Valery, M., "Electrical resistance of laser sintered Direct-Write deposited materials for microelectronic applications," *International Microelectronics and packaging society*, Vol.1, pp.261-268.
- [3] 2002, Marquez, G.J., Renn, M.J. and Miller, W.D., "Aerosol-Based Direct-Write of biological materials for biomedical applications," *Material research symposium proceedings*, pp.343-349.
- [4] 2000, Odde, D.J. and Renn, M.J., "Lager-Guide Direct-Writing of living cells," *Biotechnology and Bioengineering*, pp.312-318.
- [5] 2005, Martin, H., Mike, R. and Mike, K., "5th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics," pp.53-57.
- [6] 1980, Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York McGraw-Hill.
- [7] 1993, Berry, R.A., Gibeling, H.J. and DeJong, F.J., "Multidimensional Calculation of Two-Phase Flow in a Spray-Forming Nozzle Using Eulerian-Lagrangian Analysis," *ASME Fluids Engineering Conf.*, Paper No.93-FE-1.