

◆ 특집 ◆ 3D 프린팅 기술의 응용

## 나노스케일 3 차원 프린팅 시스템을 위한 정렬 알고리즘

### Alignment Algorithm for Nano-scale Three-dimensional Printing System

장기환<sup>1</sup>, 이현택<sup>1</sup>, 김충수<sup>1</sup>, 추원식<sup>2</sup>, 안성훈<sup>1,2,✉</sup>  
Ki-Hwan Jang<sup>1</sup>, Hyun-Taek Lee<sup>1</sup>, Chung-Soo Kim<sup>1</sup>, Won-Shik Chu<sup>2</sup>, and Sung-Hoon Ahn<sup>1,2,✉</sup>

1 서울대학교 기계항공공학부 (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University)

2 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 (Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University)

✉ Corresponding author: ahnsh@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-7110

Manuscript received: 2014.9.23 / Revised: 2014.11.7 / Accepted: 2014.11.14

*Hybrid manufacturing technology has been advanced to overcome limitations due to traditional fabrication methods. To fabricate a micro/nano-scale structure, various manufacturing technologies such as lithography and etching were attempted. Since these manufacturing processes are limited by their materials, temperature and features, it is necessary to develop a new three-dimensional (3D) printing method. A novel nano-scale 3D printing system was developed consisting of the Nano-Particle Deposition System (NPDS) and the Focused Ion Beam (FIB) to overcome these limitations. By repeating deposition and machining processes, it was possible to fabricate micro/nano-scale 3D structures with various metals and ceramics. Since each process works in different chambers, a transfer process is required. In this research, nano-scale 3D printing system was briefly explained and an alignment algorithm for nano-scale 3D printing system was developed. Implementing the algorithm leads to an accepted error margin of 0.5% by compensating error in rotational, horizontal, and vertical axes.*

Key Words: Nano-scale 3D Printing (나노스케일 3D 프린팅), Micro/Nano-scale structuring (마이크로/나노스케일 구조제작), Alignment Algorithm (정렬 알고리즘), NPDS (나노입자적층시스템), FIB (집속이온빔)

#### 1. 서론

최근 마이크로/나노스케일(micro/nano-scale) 구조 제작에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 리소그래피(lithography)를 이용한 미세전자기계 시스템(Microelectromechanical Systems, MEMS) 제작방법 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. 이 제작방법은 한 층 한 층(layer-by-layer) 제작하

여 구조를 완성한다. 한 층을 제작하기 위해서는 목표 형상 재료 적층, 마스크 층(mask-layer) 적층, 마스크 패터닝(mask-patterning), 마스크 제작을 위한 에칭(etching), 목표 형상 제작을 위한 마스크를 이용한 에칭, 마스크 제거 등 여러 단계의 공정을 거치게 된다. 따라서 이를 반복하여 마이크로/나노스케일 3차원(three-dimensional, 3D) 구조를 제작하는 경우 구조의 수와는 상관없이 복잡한 가공 공

정을 거쳐야 한다. 이로 인해 시제품제작 (Prototyping)에 있어 많은 시간과 비용이 필요하게 되는 어려움이 있었다.

이러한 MEMS 제작방법을 이용한 마이크로/나노스케일 3차원 구조의 시제품제작 한계를 극복하기 위해 다양한 공정들이 연구되고 있다. 특히, 두 가지 이상의 공정을 융합함으로써 정밀도와 가공성을 향상하는 하이브리드(hybrid) 공정이 활발히 연구되고 있다.<sup>1-7</sup> 이러한 연구 결과 중 하나로 나노입자적층시스템(Nano-Particle Deposition System, NPDS)과 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB)을 통합한 나노스케일 3차원 프린팅 시스템이 Fig. 1과 같이 제안되었다.<sup>8</sup> 본 시스템으로 한 층을 제작하기 위해서는 NPDS의 적층과 FIB의 가공, 두 단계 공정이 필요하여 MEMS 제작방법에 비해 전체 공정이 간단하다.

나노스케일 3차원 프린팅 시스템은 적층 공정과 가공 공정이 분리되어 있고 각각 독립된 챔버(chamber)와 독립된 스테이지(stage)를 갖는다. 이러한 시스템 특성으로 인해 공정 사이에 각 챔버로 이동하고 스테이지에 물리적으로 장착되는 이송과정이 있다. 이 과정에서 최대 이백 마이크로미터( $\mu\text{m}$ )의 위치 오차가 발생한다. 한 층 제작을 반복하여 3차원 구조를 제작할 때, 이 오차로 인하여 Fig. 2와 같이 층별 패턴 간의 오버레이(overlay) 오차가 발생하게 된다. 이 오차가 공정의 정밀도보다 크면 시스템 정밀도가 공정이 아닌 위치 오차에 의해 결정된다. 따라서 위치 오차를 각 공정 정밀도 수준까지 줄이기 위한 정렬 알고리즘(alignment algorithm)이 필요하다. 기존의 MEMS 제작방법에서는 한 층에 여러 패턴을 순차적으로 가공하거나 여러 층에 패턴링을 할 때 오버레이 오차가 발생하였고 이를 줄이기 위하여 다양한 정렬 알고리즘이 제안되었다. MEMS 제작방법에서는 가공 영역을 이미징(imaging) 할 수 없어 대다수의 알고리즘에서는 가공 영역과 별개의 이미징 영역이 있었다. 이 이미징 영역에 정렬 마크를 제작하고 이를 이미징하여 정렬을 하였다. 이를 위해 공정이 복잡한 MEMS 제작방법이나 추가적인 가공 공정을 이용하여 정렬 마크를 제작했고 이미징을 위한 추가적인 이미징 장치를 사용했다.<sup>9-15</sup>

본 논문에서는 다양한 금속, 세라믹을 이용하여 다양한 마이크로/나노스케일의 3차원 형상 제작이 가능한 나노스케일 3차원 프린팅 시스템을 간략히 설명한다. 그리고 시스템을 구성하는 공정

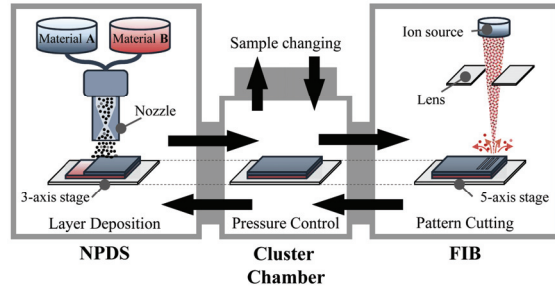


Fig. 1 Schematic diagram of nanoscale 3D printing system

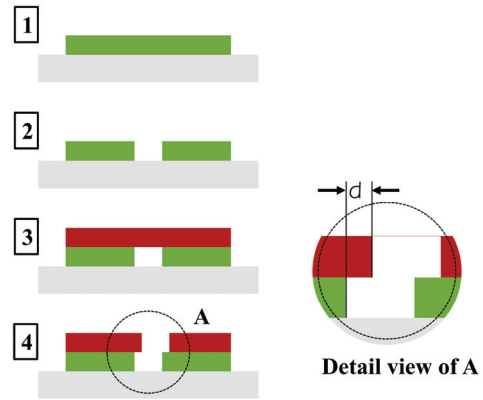


Fig. 2 Overlay error between layers

들의 정밀도 수준을 고려하고 FIB가 가지는 가공 기능과 이미징 기능을 이용하여 단순한 새로운 정렬 알고리즘을 제안하였다. 그리고 알고리즘의 정렬 결과를 실험적으로 확인하였다.

## 2. 나노스케일 3차원 프린팅 시스템

나노스케일 3차원 프린팅 시스템에서 적층 공정으로 사용되는 NPDS는 마이크로/나노스케일의 입자를 분사하여 수~수십 밀리미터(mm) 수준의 영역에 적층하는 건식 직접 적층 시스템이다. 재료별 용매와 바인더(binder)가 필요한 습식 적층 공정의 재료 선택 한계를 극복하여 다양한 금속과 세라믹을 적층할 수 있다. 또한 열처리 등의 추가적인 공정이 필요하지 않은 실온(room temperature) 직접 적층 공정으로 공정이 단순하고 공정 과정에서 재료의 변성이 적다.<sup>16</sup>

FIB는 고전압을 이용해 가속된 이온을 집속시켜 이용하는 초정밀 공정으로 마이크로/나노스케일 연구에 다양하게 적용되고 있으며, 본 시스템

에서는 가공 공정으로 활용된다. FIB 는 대다수의 고체 상태 물질을 이미징 할 수 있으며 가공 할 수 있어 NPDS 와 마찬가지로 다양한 금속과 세라믹 사용이 가능하다. FIB 의 가공 공정 또한 추가적인 전/후처리 공정이 필요 없는 실은 직접 가공 공정이다.<sup>17</sup>

나노스케일 3차원 프린팅 시스템은 두 공정을 통합함으로써 다양한 시너지(synergy) 효과를 얻을 수 있다. 우선 다양한 금속과 세라믹을 이용한 다양한 마이크로/나노스케일 3차원 형상 제작이 가능하다. 또한, 추가가공 공정이 없는 실온에서 작동하는 시스템으로 전체 공정이 단순하고 제작과정에서 재료의 변성이 적어 구조를 제작하고 이를 적용분야에 활용하는데 있어 유리하다.

### 3. 실험

앞에서 언급된 바와 같이 나노스케일 3차원 프린팅 시스템에는 이송과정이 있고 이 이송과정에서 최대 이백 마이크로미터의 위치 오차가 발생한다. 정밀한 공정을 위해서는 이 오차를 각 공정 수준까지 줄여야 한다. NPDS 는 수~수십 밀리미터 수준의 넓은 영역에 적층 공정을 수행하기 때문에 광학 카메라를 이용한 정렬로 적층 공정 수준까지 정밀도를 줄이는 것이 가능하다. 하지만 FIB 로 가공 가능한 최소 선 폭은 약 백 나노미터(nm)로 수십 나노미터 수준의 위치 오차 정밀도를 가지는 정렬 알고리즘이 필요하다. FIB 는 가공 공정 이외에 이미징 기능을 가지고 있어 정렬 알고리즘을 위해 필요한 정렬 마크를 직접 제작 및 이미징이 가능하다. 따라서 정렬 알고리즘은 수십 나노미터 수준의 정밀도를 요구하는 FIB 에서 사용되도록 개발되었고 FIB 의 가공 기능과 이미징 기능을 이용한다.

#### 3.1 정렬 알고리즘

FIB 에서 사용되도록 개발된 정렬 알고리즘은 Fig. 3과 같다. 이 알고리즘은 이송과정에서 발생하는 오차의 종류 중 회전오차와 수평, 수직오차를 보정한다. 회전오차를 보정하지 않고 수평, 수직 방향으로 이동을 하면 수평, 수직오차가 추가로 발생하게 된다. 따라서 우선 회전오차를 측정하여 보정한다.

한편 Fig. 4와 같이 정렬 알고리즘에 사용되는 마크는 세 개로 Ref1-1, Ref1-2, Ref2 이고 서로 간

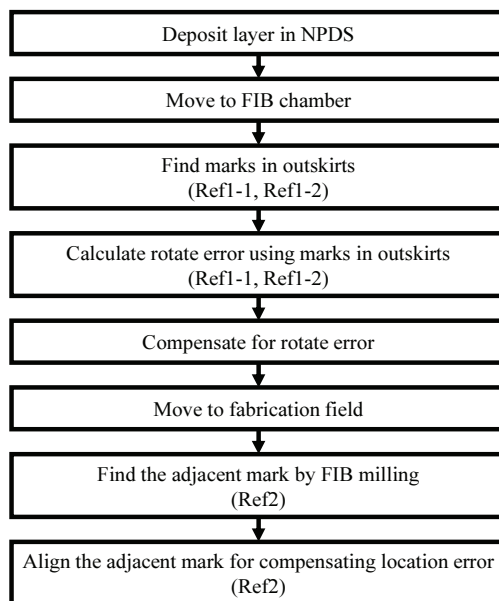


Fig. 3 Alignment algorithm

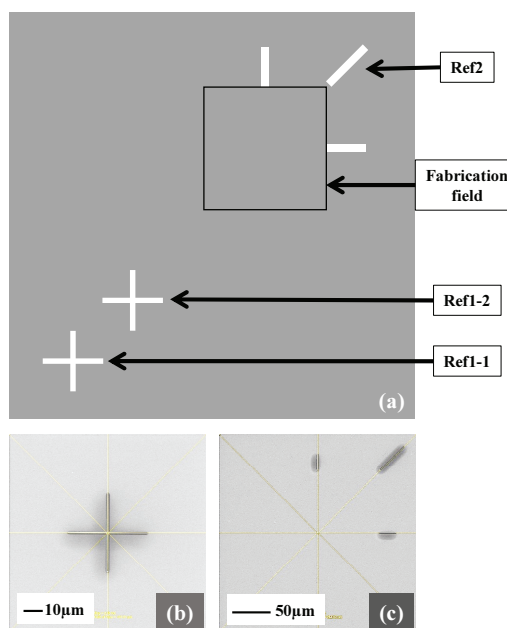


Fig. 4 (a) Alignment marks on sample (b) Shape of alignment marks Ref1-1 and Ref1-2 (c) Shape of alignment mark Ref2

의 상대적 위치는 목표구조물의 크기, 재료별 적층 특성을 고려하여 마크를 가공할 때 결정한다. 각 마크들은 약 칠백 나노미터 폭의 선들로 이루

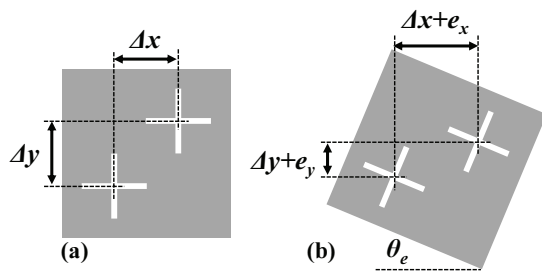


Fig. 5 Distance between Ref1-1 and Ref1-2 (a) without rotate error (b) with rotate error( $\theta_e$ )

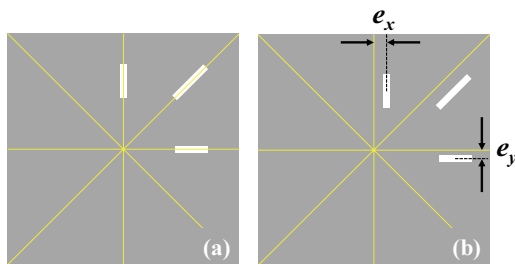


Fig. 6 (a) Aligned Ref2 (b) Not aligned Ref2

어져있다. 따라서 저배율에서 정렬 마크가 매우 얇게 보이고 정렬을 위해 기준선과 겹치도록 마크를 위치시키기 쉽다. Ref1-1, Ref1-2 는 Fig. 5와 같이 회전오차가 있는 경우 상대적 위치가  $(\Delta x, \Delta y)$ 에서  $(\Delta x + e_x, \Delta y + e_y)$ 로 바뀌는 것을 이용하여 회전오차를 계산하고 보정하는데 사용된다. Ref2 는 Fig. 6와 같이 수평, 수직오차  $e_x, e_y$  를 측정하고 보정하는데 사용된다. Ref1-1, Ref1-2 는 가공영역과 떨어져 있어 적층 공정 후에도 이미징이 가능하지만 Ref2 는 가공영역에 인접하여 적층 공정 후에는 적층물에 덮여 이미징이 가능하지 않다. 이를 해결하기 위해 회전오차를 보정한 뒤 마크들 간의 상대적 위치를 이용하여 Ref2 로 이동하고 FIB의 가공 공정을 이용해 적층물을 가공하여 Ref2 를 찾아낸다. 그 이후 이를 이미징하여 수평, 수직오차를 보정하게 된다.

### 3.2 정렬 오차 측정

정렬 알고리즘의 정렬 오차 측정을 위하여 FIB로 실리콘 기판 위에 정렬 마크들을 가공하고 이미징되는 영역 중심에 오차 측정용 점을 가공하였다. 그 이후 이송과정을 진행한 후 정렬 알고리즘을 적용하였다. Fig. 7와 같이 정렬 이후 이미징되

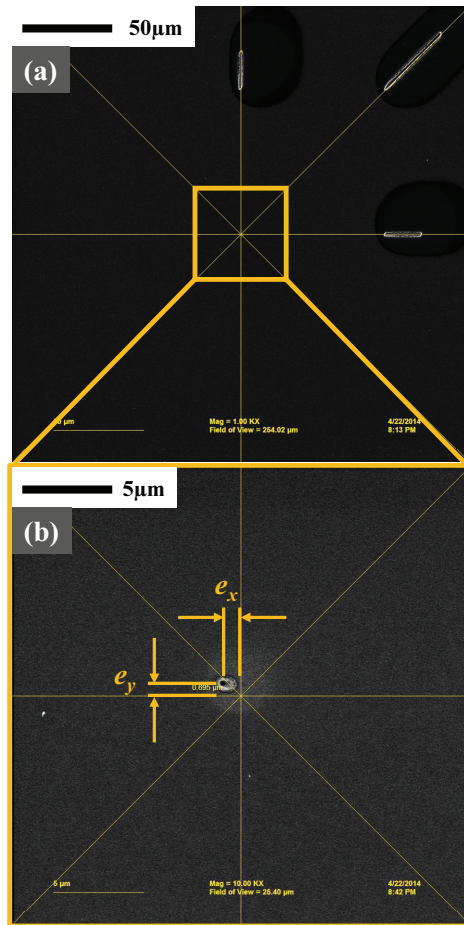


Fig. 7 Process flow chart for measuring alignment error (a) Aligning using alignment algorithm (b) Measuring alignment error of hole from center

는 영역의 중심에서 오차 측정용 점의  $x$  축 방향 정렬 오차  $e_x$  와  $y$  축 방향 정렬 오차  $e_y$  를 측정하였다.

실험은 총 10번 수행되었으며 기준점의  $x, y$  축 정렬 오차인  $e_x$  와  $e_y$  를 이용하여 가공영역의 중심에서 기준점까지의 거리를 계산하였다.

### 4. 결과

실험 결과 Table 1과 같이 정렬 오차 평균은 0.371  $\mu\text{m}$ , 표준편차는 0.177  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 기존 정렬 알고리즘이 적용되지 않은 시스템의 이송과정에서 발생한 위치 오차 평균은 62.05  $\mu\text{m}$ , 표준편차는 67.16  $\mu\text{m}$ 이었다. 정렬 오차가 기존 오차의

Table 1 Comparison of measured location error

	Without Alignment	With Alignment
Average	62.05 $\mu\text{m}$	0.371 $\mu\text{m}$
Standard Deviation	67.16 $\mu\text{m}$	0.177 $\mu\text{m}$

0.5 % 수준으로 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한 기존의 위치 오차의 경우 수 마이크로미터에서 최대 이백 마이크로미터까지 넓은 범위에서 측정되었다. 이로 인해 위치 오차 평균과 표준편차가 비슷하였고 위치 오차 예측이 불가능하였다. 이에 반해 정렬 알고리즘을 적용한 후 측정된 정렬 오차는 좁은 범위에서 측정되며 95 %의 확률로 0.481  $\mu\text{m}$  이내임을 예측할 수 있다.

### 5. 결론

나노스케일 3차원 프린팅 시스템은 다양한 금속, 세라믹을 이용한 다양한 마이크로/나노스케일 3차원 구조를 제작할 수 있으며 공정이 단순하고 공정 과정에서 재료의 변성이 적다. 하지만 독립적으로 구성된 각 공정을 순차적으로 수행하기 위해 이송과정이 필요하며, 이 과정에서 발생하는 위치 오차는 정밀한 구조제작을 위해 해결되어야 한다. 본 연구를 통해 제안된 정렬 알고리즘은 시스템의 특성을 고려하여 FIB 에 적용되며 FIB 의 가공 기능과 이미징 기능으로 정렬을 수행하여 비용과 시간이 절약된다.

개발된 정렬 알고리즘을 통해 이송과정에서 생기는 위치 오차가 크게 개선되었지만 FIB 의 가공 공정 정밀도에 비해 아직 수준이 낮다. 따라서 정렬 마크의 모양 및 깊이, 알고리즘 개선 연구를 통해 추가적으로 정밀도를 향상시킬 필요가 있다.

### 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 2014년도 BK21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2010-0029227).

### REFERENCES

1. Chu, W. S., Kim, C. S., Lee, H. T., Choi, J. O., Park, J. I., et al., "Hybrid Manufacturing in Micro/Nano

scale: A Review," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 1 No. 1, pp. 75-92, 2014.

2. Nau, B., Roderburg, A., and Klocke, F., "Ramp-up of Hybrid Manufacturing Technologies," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 313-316, 2011.

3. Kozak, J. and Rajurkar, K. P., "Hybrid Machining Process Evaluation and Eevelopment," *Proc. of 2<sup>nd</sup> International conference on machining and measurements of sculptured surfaces*, pp. 20-22, 2000.

4. Lauwers, B., Klocke, F., and Klink, A., "Advanced Manufacturing through the Implementation of Hybrid and Media Assisted Processes," *International Chemnitz Manufacturing Colloquium*, Vol. 54, pp. 205-220, 2010.

5. Dandekar, C. R., Shin, Y. C., and Barnes, J., "Machinability Improvement of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and Hybrid Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 2, pp. 174-182, 2010.

6. Molian, R., Neumann, C., Shrotriya, P., and Molian, P., "Novel Laser/Water-Jet Hybrid Manufacturing Process for Cutting Ceramics," *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 1008.1-1008.11, 2008.

7. Ko, S. H., Chung, J., Pan, H., Grigoropoulos, C. P., and Poulikakos, D., "Fabrication of Multilayer Passive and Active Electric Components on Polymer using Inkjet Printing and Low Temperature Laser Processing," *Sensors and Actuators a-Physical*, Vol. 134, No. 1, pp. 161-168, 2007.

8. Ahn, S. H., Chun, D. M., and Kim, C. S., "Nanoscale Hybrid Manufacturing Process by Nano Particle Deposition System (NPDS) and Focused Ion Beam (FIB)," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 583-586, 2011.

9. Mühlberger, M., Bergmair, I., Schwinger, W., Gmainer, M., Schöftner, R., et al., "A Moiré Method for High Accuracy Alignment in Nanoimprint Lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, No. 5, pp. 925-927, 2007.

10. Tang, M. J., Xie, H. M., Zhu, J. G., Chen, P. W., Zhang, Q. M., and Li, X. J., "A New Moiré Grating Fabrication Technique using Hot Embossing Lithography," *Applied Mechanics and Materials*, Vol.

- 83, pp. 7-12, 2011.
11. Picciotto, C., Gao, J., Yu, Z., and Wu, W., "Alignment for Imprint Lithography using nDSE and Shallow Molds," *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 25, Paper No. 255304, 2009.
  12. Tang, M., Xie, H., Zhu, J., Li, X., and Li, Y., "Study of Moiré Grating Fabrication on Metal Samples using Nanoimprint Lithography," *Optics express*, Vol. 20, No. 3, pp. 2942-2955, 2012.
  13. Cho, Y., Kwon, S., Seo, J. W., Kim, J. G., Cho, J. W., et al., "Development of Large Area Nano Imprint Technology by Step and Repeat Process and Pattern Stitching Technique," *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, No. 12, pp. 2417-2422, 2009.
  14. Shao, J., Ding, Y., Tian, H., Li, X., Li, X., and Liu, H., "Digital Moiré Fringe Measurement Method for Alignment in Imprint Lithography," *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 2, pp. 446-451, 2012.
  15. Mühlberger, M., Schwinger, W., Gmainer, M., Schöftner, R., Glinsner, T., et al., "High Precision Alignment in Multi-Layer NanoImprint Lithography," *Proc. of PHYSICS OF SEMICONDUCTORS: 28<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors-ICPS 2006*, Vol. 893, No. 1, pp. 1495-1496, 2007.
  16. Chun, D. M., Choi, J. O., Lee, C. S., Kanno, I., Kotera, H., and Ahn, S. H., "Nano-particle Deposition System (NPDS): Low Energy Solvent-free Dry Spray Process for Direct Patterning of Metals and Ceramics at Room Temperature," *Int. J. of Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1107-1112, 2012.
  17. Kim, C. S., Ahn, S. H., and Jang, D. Y., "Review: Development in Micro/Nanoscale Fabrication by Focused Ion Beams," *Vacuum*, Vol. 86, No. 8, pp. 1014-1035, 2012.