

論文

초소수성 전기 분무 마이크로 추진 장치 및 마이크로 추력 측정

이영종*, 유용훈*, Si Bui Quang Tran*, 김상훈**, 박배호**, 변도영*

Study on super-hydrophobic electro-spray micro thruster and measurement of micro scale thrust

Young-Jong Lee*, Yong-Hoon Yoo*, Si Bui Quang Tran*, Sang-Hoon Kim**, Bae-Ho Park** and Doyoung Buyn*

ABSTRACT

In this article, we fabricated polytetrafluoroethylene(PTFE) nozzle treated by ion beam, in order to fabricate polymer based electrospray micro thruster with super hydrophobic nozzle. To obtain the super hydrophobic surface, PTFE surface is treated by argon and oxygen plasma treatment process. The optimal condition is investigated argon and oxygen flow rate as well as the applied energy level for the treatment process. Fabricated nozzle was evaluated by measuring contact angle, and the surface morphology was examined by using scanning electron microscope(SEM) and atomic force microscope(AFM). We observe that jetting becomes more stable and repeatable on the treated nozzle. And to evaluate performance of fabricated nozzle, we measure micro scale thrust using a cantilever and a nozzle treated by ion beam laser displacement sensor.

초 록

이 논문은 폴리머 기반의 전기 분무 장치를 만들기 위하여 이온빔 장치를 통하여 초소수성으로 가공된 polytetrafluoroethylene(PTFE) 노즐을 사용하였다. 초소수성 표면을 만들기 위하여, PTFE 표면은 Ar과 O₂를 이용한 이온빔 공정 장치를 사용하였다. 최적의 표면 공정 조건은 Ar과 O₂ 유량 및 에너지 단위를 변화시켜 얻을 수 있었다. 공정된 노즐의 표면 특성을 분석하기 위하여 접촉각 측정을 수행하였고, 표면의 형태적 분석을 위해 scanning electron microscope(SEM) 그리고 atomic force microscope(AFM) 측정을 하였다. 초소수성으로 공정된 노즐을 사용함으로써 보다 안정적이고 반복적인 전기 분무가 가능함을 확인 하였으며, 공정된 노즐의 성능을 평가하기 위하여 외팔보와 이온빔으로 표면 처리된 노즐 그리고 레이저 변위센서를 이용하여 마이크로 스케일의 추력을 측정하였다.

Key Words : Micro Thruster(마이크로 추력기), Thrust Measurement(추력 측정), Super-hydrophobic(초소수성), Ion beam Treatment(이온빔 공정)

1. 서 론

† 2008년 9월 8일 접수 ~ 2009년 1월 22일 심사완료

* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
교신저자, E-mail : dybyun@konkuk.ac.kr
서울특별시 광진구 화양동 1번지

** 건국대학교 물리학과

Electro-hydrodynamic spraying 또는 electrospray의 방법들은 최근 mass spectrometry [1-3] printing 기술 [4-6] 그리고 biological microarray [7] 등의 분야에 중요한 연구 주제로

연구되고 있으며, 전기분무(electrospray)의 방법을 이용하여 매우 작은 액적의 분사가 가능해짐에 따라 그의 응용 분야는 매우 다양하게 발전되고 있다.

캐필라리를 통과하는 액적의 유량과 전기장의 영향을 받아 형성된 메니스커스는 Taylor-cone의 형태로 변하게 되며, 이렇게 형성된 메니스커스의 끝 부분에서 마이크로 이하의 스케일로 액적이 분사되는 콘젯 분무(cone-jet spraying) 현상은, 액적분사의 안정성과 효율의 측면에서 단점을 갖고 있는 기존의 액적 분사 방법인 열기포(thermal bubble) 또는 피에조 방식을 대체할 방법으로 제안되고 있다.

이러한 전기분무를 이용한 잉크젯을 이용한 직접 인쇄 기술은 기존의 기술인 리소그래피를 대신하여 전기 회로의 구성 그리고 전기 전도도를 가진 폴리머 물질을 가공하기 위한 방법으로 연구되고 있다.

한편 전기 분무 장치의 노즐과 노즐 표면 및 형상에 대한 연구 또한 진행 되고 있다[8-11]. 초소수성 표면의 특징 및 공정에 관한 연구도 진행 되고 있는데 액적과 표면의 접촉각이 150° 이상인 경우 표면은 초소수성의 성질을 띠게 되며, 이는 연꽃잎 효과와 관련된 생체모사 부분의 분야에서 활발한 연구가 진행 중이다[12]. 중력이 무시 될 정도의 작은 크기의 액적의 경우 초소수성 표면은 중력에 대한 영향보다 액적과 표면 사이의 표면장력에 더 큰 영향을 받으며, 이러한 초소수성 표면은 표면의 거칠기를 높이고 표면에너지를 낮춤으로써 만들어 질 수 있다.

지난 수십 년 간 폴리머 물질의 표면 특성 변화에 관한 연구는 꾸준히 이루어졌으며, 이러한 표면 특성 변화의 방법 중 이온빔 공정을 통한 표면 개질 변화 또는 플라즈마 공정에 의한 방법들은 폴리머의 종류와 특성에 크게 영향을 받지 않고 표면 특성의 제어가 가능하기 때문에 다양한 방법의 공정들이 연구되고 있다[13].

그 중 이온빔에 의한 표면 특성 변화로는 표면의 강도 변화, 화학적 특성 변화 그리고 친수성 및 소수성으로의 변화 등 다양한 특성을 나타낼 수 있도록 작용 하며, 이러한 폴리머 물질의 표면특성의 변화들 중 특히 표면개질을 소수성 또는 초소수성으로 바꾸는 부분은 미소유체 역학의 한 연구 분야로 활발한 연구가 진행 중이며 랩온칩(Lab-on-a-chip)의 액적 이송의 목적과 같은 응용 분야로의 발전되고 있다.

본 논문은 초소수성 노즐 표면을 공정하기 위하여 이온빔 장치를 이용하여 폴리머의 한 종류인 PTFE를 초소수성으로 공정 한 후 Ar과 O₂의

조성 및 가공 시간에 따른 접촉각의 변화를 측정 하였다. 그리고 이온빔을 이용하여 초소수성으로 PTFE 샘플을 공정하고, 레이저 가공장치 및 CNC 장비를 이용하여 polymethyl methacrylate(PMMA)로 챔버를 가공한 후 초소수성 PTFE 노즐 접착하여 초소수성을 갖는 전기 분무 장치를 만들어 작동 전압에 따른 메니스커스의 형상 변화 및 전기 분무 현상을 관찰하였고 이를 각각 소수성의 성질을 갖는 PTFE 노즐 그리고 친수성인 PMMA 노즐 표면의 경우와 비교 하였다. 그리고 추력 측정을 위하여 외팔보와 레이저 변위 센서를 이용하여 마이크로 단위의 추력 측정기를 구성 한 후 추력을 측정하였다.

II. 실험방법

2.1 이온빔 공정 장치 및 접촉각 측정 장치

PTFE의 샘플을 초소수성으로 공정하기 위하여 Ar과 O₂를 이용한 이온빔 공정 장치를 이용하였으며, 유량 및 작동 전압을 다르게 하여 두 가지 경우의 조건으로 공정을 진행 하였다. 그리고 이온빔 표면 처리 시간을 다양하게 변화 시키면서 표면 처리를 진행 하였다. 이온빔 공정 장치의 개요도는 다음과 같다.

이온빔 공정 시간에 따른 샘플의 접촉각 변화를 측정하기 위하여 X-Y 스테이지와 CCD카메라를 그리고 마이크로 렌즈를 이용하여 접촉각 측정 시스템을 구성 한 후 마이크로 피펫(Witeg) 이용하여 증류수(deionize water)의 액적 체적을 2μl로 고정 시킨 후 접촉각 측정을 실험하였다. 그리고 공정 후 시간에 따른 표면특성 변화에 의한 접촉각 변화를 관찰하기 위하여 샘플을 상온의 조건에서 2개월에 걸쳐 접촉각 측정을 반복

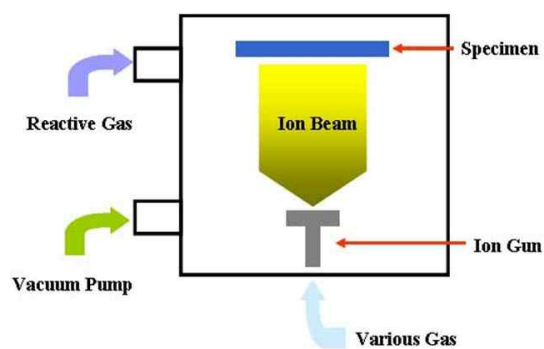


Fig. 1. Schematic of ion beam treatment and the picture of the equipment

실험 하였다. 이온빔 공정에 따른 표면의 거칠기 변화를 확인하기 위하여 SEM 및 AFM(Atomic Force Microscope)를 이용하여 샘플의 표면 형태적 변화를 관찰 하였다.

2.2 초소수성 PTFE 노즐 전기 분무 추진 장치

PMMA를 이용한 전기 분무 장치를 가공하기 위하여 두께 8 mm의 PMMA를 레이저 가공장치로 가로 3 cm 세로 3 cm로 공정 한 후 CNC 장치를 이용하여 직경 3.2 mm의 챔버를 가공 하였다. 그 위에 노즐 부분을 만들기 위하여 초소수성으로 공정 된 PTFE를 CNC 가공장치를 이용하여 직경 700 μm의 노즐을 가공 한 후, 에폭시 본드를 이용하여 접착한 후 메니스커스의 형상 변화 및 전기 분무 실험을 실시하였다. (+)전극은 직경 0.25 mm의 전선을 이용하여 챔버 안에 삽입 하였고, (-)전극은 두께 200 μm의 알루미늄을 이용하여, 고전압 공급 장치에 연결 하였다.

작동 유체는 D.I water 50 %, 메탄올(CH₃OH) 49%, 그리고 아세톤(CH₃COCH₃) 1 %의 혼합 용액을 사용 하였고, 이 혼합 용액을 챔버로 공급하기 위하여 너트 및 테플론 튜브를 전기 분무 장치에 연결하여, 실린지 펌프(Harvard, BS4 70-2213 Pump 11 Pico Plus)로 5 μl/min의 일정한 유량으로 공급 하였다. 초소수성 PTFE 노즐 전기 분무 추진 장치의 개요도는 다음과 같다.

2.3 추력 측정 장치

추력 측정을 위한 전기 분무 추진 장치를 외팔보(cantilever beam)에 연결하고, 추력에 따른 외팔보의 변위를 레이저 변위 측정 장치(LK-G85, Keyence)를 이용하여 변위를 측정 하였다. 이때 전기 분무 추진 장치의 메니스커스 변화 및 전기 분무 되는 형상을 관찰하기 위하여 CCD 카메라를 설치하였다. 마이크로 추력 측정 장치의 개요도는 다음과 같다.

마이크로 추진 장치의 추력이 발생하면 그에 대한 반발력으로 추력과 반대되는 힘이 작용하게

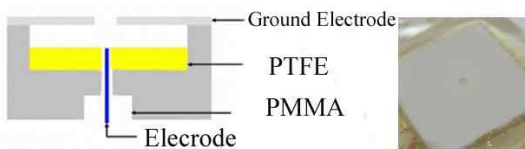


Fig. 2. Schematic of electro-spray device

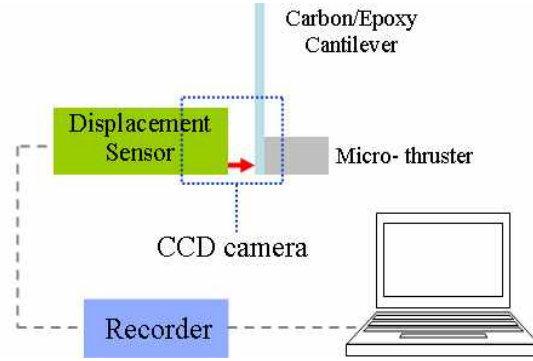


Fig. 3. Schematic of thrust measurement

되며, 이러한 추력의 크기의 범위는 mN~μN의 범위의 힘이 발생 되게 된다.

$$F = (3EI/l^3)D \tag{1}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{2}$$

마이크로 추진 장치에서 발생하는 추력에 따른 외팔보의 변위를 관계식으로 나타내면 식 (1) 및 식(2)와 같다. b는 가로, h는 두께, l은 길이, E는 영 계수(Young's modulus), I는 면적관성모멘트(Area moment of inertia), 그리고 D는 변위를 나타낸다.

카본/에폭시(Carbon/Epoxy)(Young's modulus=231.2 Gpa)로 제작된 외팔보는 두께 100μm, 가로 10mm, 세로 115mm의 치수로써,

$$F = 0.380D \tag{3}$$

의 값으로 추력이 계산된다.

따라서 추력의 반발력에 따른 변위를 기록하고, 식 (3)을 이용하여 추력을 계산하였다.

III. 실험 결과

3.1 초소수성 PTFE 노즐 접촉각 측정 결과 및 SEM 그리고 AFM 결과

그림 4는 PTFE 샘플을 각각의 이온빔 공정 조건 Case 1(Ar 2 sccm, O₂ 3 sccm and 1.0 kev)과 Case 2(Ar 2 sccm, O₂ 2 sccm and 1.5 kev)으로 표면 처리를 진행한 후 초기 접촉각 측정을 위하여 2 μl의 증류수를 표면 처리 된 PTFE 샘플들 표면 위에 떨어뜨리고 CCD 카메라를 이용하여 사진을 찍은 사진이다.

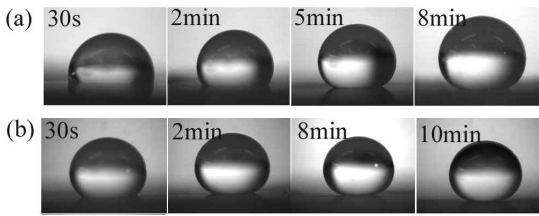


Fig. 4. Images of initial contact angle (a) Case 1, (b) Case 2

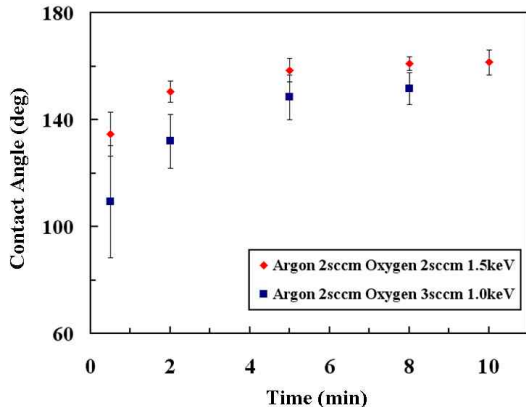


Fig. 5. Ion beam treatment results

접촉각 측정의 결과 Case 1의 경우 표면처리 30초 후 D.I water의 접촉각은 115°, 2분 후의 접촉각은 140°, 5분 후 접촉각은 150° 그리고 8분 후 접촉각은 155°로 측정 되었다.

Case 2의 경우 표면처리 30초 후의 접촉각은 135°, 2분 후 접촉각은 150°, 5분 후 접촉각은 158°, 8분 후 접촉각은 161° 그리고 10분 후 접촉각은 161°로 측정 되었다.

그림 5는 표면 처리 시간에 따른 접촉각 변화를 나타낸 그래프이다. 접촉각 측정결과 표면 처리 시간이 증가 할수록 PTFE 샘플의 표면은 초소수성 성질이 증가 하였다. 그리고 Case 2의 경우 표면 처리 8분과 10분 후의 접촉각의 차이가 크게 나타나지 않는 결과를 통하여 일정 시간 이상이 되면 접촉각의 포화 현상이 발생하게 되는 것을 확인 하였다. 이로써 이온빔 공정을 통한 표면의 거칠기가 증가 하더라도 그에 따른 접촉각의 변화는 일정 거칠기 이상이 되면 큰 변화를 나타내지 않음을 확인 하였다.

이온빔 공정을 통한 표면 거칠기의 변화에 따른 접촉각 증가는 이온빔 공정이 진행됨에 따라 샘플의 표면 거칠기가 증가하게 되고 표면에는 나노 스케일의 구조물이 형성 된다. 이러한 구조

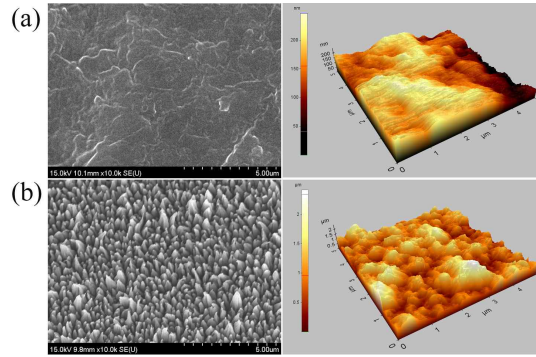


Fig. 6. SEM and AFM results. (a) PTFE, (b) Treated PTFE(Case 2, 10min)

물의 영향으로 액적과 표면의 접촉 면적이 줄어들게 된다. 이로써 액적과 표면의 접촉 면적에 의한 표면 에너지는 줄어들게 되고 액적의 표면장력의 영향이 더 크게 작용하게 되어 액적의 접촉각이 증가하게 된다.

공정 후 시간이 지남에 따른 샘플의 표면 특성 변화를 관찰하기 위하여 두 달 이상의 접촉각 측정 결과 Case 1의 경우 모든 공정 시간 조건에서 접촉각은 초기 접촉각 103°에 가까워지는 것으로 나타났으나, Case 2의 경우 표면 처리 시간 8분 이상의 샘플에서는 접촉각이 크게 변하지 않았으며 초소수성 성질을 유지 하는 것을 확인 하였다. 따라서 최적의 초소수성 표면 공정 조건을 얻을 수 있었다.

표면처리를 하기 전의 PTFE 샘플과 이온빔으로 표면 처리 한 PTFE 샘플의 표면 거칠기를 비교하기 위하여 SEM 및 AFM(cut-off length : 5 μm)의 측정 결과, 표면 처리 전의 PTFE 샘플의 경우 나노 스케일의 구조물을 관찰 할 수 없었으나, Case 2의 조건으로 표면 처리 10분 후의 샘플에서는 이온빔의 영향으로 평균 너비는 200 nm 이하 그리고 높이는 1.2 μm 이하의 나노 스케일의 구조물이 형성 된 것을 확인 하였다.

3.2 초소수성 PTFE 노즐 전기 분무 장치

다음으로 PMMA 노즐과 PTFE 노즐 그리고 이온빔으로 표면 처리된 PTFE 노즐에서 전기 분무를 과정을 수행 함으로써, 초기 메니스커스의 작동전압의 범위 화 및 작동 전압에 따른 초기 메니스커스 형상 변화를 비교 하였다.

PMMA 노즐의 경우 3300 V에서 4600 V의 작동전압 범위를 가지며, PTFE 노즐의 경우 3200 V에서 5000 V의 작동전압에서 전기 분무 현상이 발생 되었다. PMMA 노즐과 PTFE 노즐은 작동

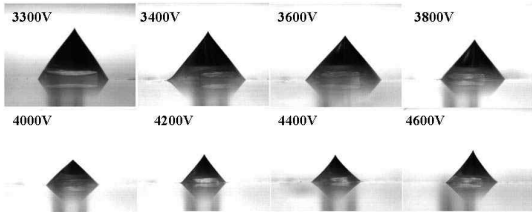


Fig. 7. Electro spray on nozzle. Jetting images through nozzles on flat PMMA

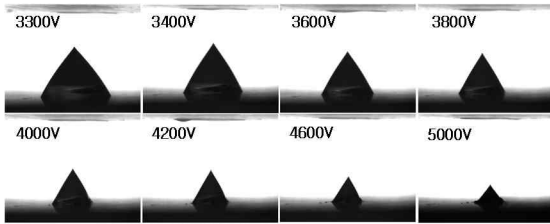


Fig. 8. Electro spray on nozzle. Jetting images through nozzles on flat PTFE

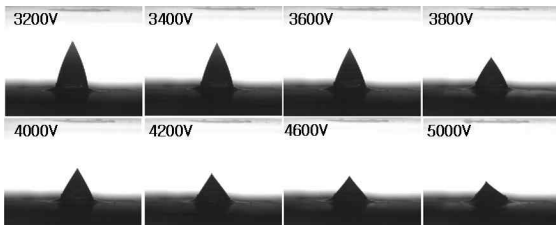


Fig. 9. Electro spray on nozzle. Jetting images through nozzles on treated PTFE

전압이 낮은 경우 메니스커스의 형상은 노즐의 지름보다 넓어지는 overflow 현상을 보였다. 특히 PMMA 노즐의 경우 작동 전압에 따른 초기 메니스커스의 형상 역시 불안정 하게 되었으며, 위의 두 가지 노즐 모두 몇 번의 전기 분무 현상 후 브레이크다운이 발생하였다.

그러나 이온빔을 통하여 초소수성으로 공정한 PTFE 노즐의 경우 낮은 작동 전압에서도 초기 메니스커스의 형상은 노즐 너비와 같은 크기를 나타냈으며 안정적인 전기 분무를 하였으며, 반복적인 제팅을 하여도 메니스커스가 안정됨을 확인 하였다.

3.3 초소수성 PTFE 노즐 추력 측정 결과

그림 10는 추력 측정 장치의 보정 결과 및 초소수성으로 공정한 PTFE 노즐의 추력 측정 결과이다. 그림 3의 추력 측정 장치의 보정을 위하여

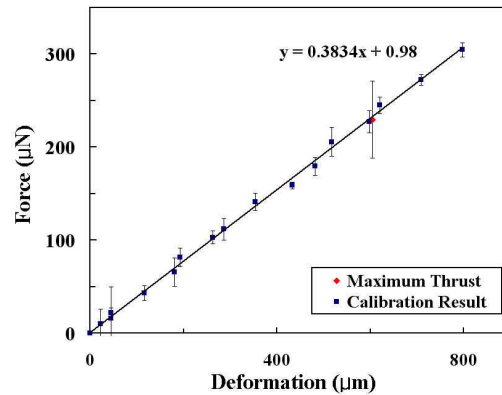


Fig. 10. Calibration result and Maximum thrust of treated PTFE nozzle

분동을 이용하여 보정 값을 얻었으며, 선형 보간 결과 변위를 계산하기 위한 식 (3)의 값과 1%의 오차 범위를 나타냈다.

추력장치는 작동 전압 3.7 kV에서 평균 추력 229 µN을 얻었으며, 3.8 kV 이상의 작동전압에서는 전기 분무의 형태가 변하여 추력이 감소하였다. 이러한 추력 감소가 발생하는 원인으로서는 전기 분무 형태가 변하게 되면서 작동유체가 multi-jet 형태로 분무되어 작은 jet의 형태로 (-) 전극을 통과하기 때문에 이에 따른 반발력이 감소하는 경향을 보이게 된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 노즐 표면을 초소수성으로 공정한 PTFE 폴리머 기반의 전기 분무 마이크로 추력 장치를 제안하고, 공정된 표면의 접촉각 측정 및 SEM과 AFM을 통한 표면 분석을 수행하였다. 초소수성 표면으로 공정된 노즐의 경우 표면의 마이크로 구조물의 영향으로 전기 분무 시 작동 유체의 메니스커스가 안정되고 효과적인 분무가 가능함을 확인하였다. 마이크로 추력 측정을 위하여 카본/에폭시(carbon/epoxy) 외팔보와 레이저 변위 측정기를 이용한 마이크로 추력 측정 장치를 이용하여 공정된 마이크로 추력기의 추력을 측정 한 결과 작동 전압 3.7 kV에서 평균 추력 229 µN의 추력이 발생하였다.

후 기

본 연구는 국방 MEMS 연구센터 사업과 국가 지정연구실사업(R0A-2007-000-20012-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Fenn J. B., Mann M., Meng C. K., Wong S. K., Whitehouse C., "Electrospray Ionization for Mass Spectrometry of Large Biomolecules", *Science*, Vol. 246, 1989, pp.64~71.
- 2) Yuan C. H. and Shiea J., "Sequential Electrospray Analysis Using Sharp-Tip Channels Fabricated on a Plastic Chip", *Analytical Chemistry*, Vol. 73, Mar. 2001, pp.1080~1083.
- 3) Kim J. S. and Knapp D. R., "Microfabricated PDMS Multichannel Emitter for Electrospray Ionization Mass Spectrometry", *Journal of American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 12, Apr. 2001, pp. 463~469.
- 4) Park J. U., Hardy M., Kang S. J., Barton K., Adair K., Mukhopadhyay D. K., Lee C. Y., Strano M. S., Alleyne A. G., Georgiadis J. G., Ferreira P. M., and Rogers J. A., *Nature Materials*, 2007, pp. 6782-6789.
- 5) Lee S., Byun D., Jung D., Choi J., Kim Y., Yang J. H., Son S. U., Tran S. B. Q., and Ko H. S., "Pole-type Ground Electrode in Nozzle for Electrostatic Field Induced Drop-on-demand Inkjet Head", *Sensors and Actuators A Sensors and Actuators A*, Vol. 141, 2008, pp. 506 - 514.
- 6) Lee D. Y., Shin Y. S., Park S. E., Yu T. U., and Hwang J., *Applied Physics Letters*, Vol. 90, 2007.
- 7) Paine M. D., Alexander M. S., Smith K. L., Wang M., and Stark J. P. W., "Controlled Electrospray Pulsation for Deposition of Femtoliter Fluid Droplets onto Surfaces", *Journal of Aerosol Science*, 2007, pp. 38315~38324.
- 8) Lee S. H., Byun D. Y., Ko H. S., Kim Y., Yang J. H., Han S. J., Son S. U. and Oh J. T., "Electrostatic Droplet Ejector with Monolithic Fabrication of nozzle", *Nanotech* 2005, May 2005.
- 9) Byun D., Budiono, Yang J. H., and Lee S. H., "Effect of Surface Wettability on Flow Instability in Micro-channel", *IEEE International Conference on Mechatronics(ICM2005)*, July 2005.
- 10) Wang Y. X., Cooper J. W., Lee C. S. and DeVoe D. L., "Efficient Electrospray Ionization from Polymer Microchannels using Integrated Hydrophobic Membranes", *Lab on a Chip*, Apr. 2004, pp. 363~367.
- 11) 이영중, 변도영, 양지혜, 이석환, 김용재, 고훈서, "기둥 구조 전극을 내재하는 노즐을 이용한 정전 분무 마이크로 추진기관" *한국항공우주학회지*, 제 35권 제 12호, Dec. 2007, pp. 1115~1120.
- 12) Patankar N. A., "On the Modeling of Hydrophobic Contact Angles on Rough Surfaces", *Langmuir*, Vol. 19, 2003, pp. 1249~1253.
- 13) Yoon E. S., Yang S. H., Kong H. and Kim K. H., "The Effect of Topography on Water Wetting and Micro/Nano Tribological Characteristics of Polymeric Surfaces", *Tribology Letters*, Vol. 15, No. 2, Aug. 2003.