

다중물리 유체역학 연구실 Multi-physics Nano Fluidics Laboratory

변도영
성균관대학교 기계공학과

1. 서론

마이크로, 나노 분야의 연구는 실생활에 접목되는 기술들이 더 이상 거시적인 분야에만 국한되지 않게 되면서 미시적인 마이크로, 나노 분야의 주목과 관심이 대두된 이래로 지금까지 꾸준히 그 영역과 분야를 확장해가고 있다. 이러한 연구 동향은 기존의 각 연구 분야에만 국한되지 않고 생물학, 화학, 물리학, 전자공학 등 다양한 학제간의 활발한 융합 연구를 촉진시키고 있으며, 새로운 연구 분야를 개척하며 실생활에까지 광범위하게 이용되고 있다. 또한 마이크로, 나노 분야에서는 여러 요인들에 의해 기존 물리 현상에서는 보이지 않던 많은 흥미로운 현상들이 나타나므로, 이러한 현상을 이해하고 이용하기 위해서는 많은 과학적, 기술적 이슈들에 대한 활발한 연구 개발이 필요한 실정이다.

본 연구실에서는 마이크로, 나노 크기의 유체역학을 포함한 다중 물리를 기반으로 나타나는 현상을 이해하고, 그 응용 시스템을 개발함과 동시에 요구되는 핵심 기술들을 개발하고 있다. 세부적으로는 (1) 전기수력학적 (Electrohydrodynamic, EHD) 프린팅 및 마이크로-나노 소자 연구, (2) 표면 탄성파(Surface Acoustic Wave, SAW)를 이용한 마이크로/나노 유체의 이해 및 제어 연구, (3) 표면 습윤성/에너지 제어를 통한 유체 현상학적 이해 연구가 있다. 특히 전기수력학적 젯 프린팅에 관해서는 기존 잉크젯 프린팅에서 나타났던 가용 점도 범위의 한계, 선평 등의 한계를 극복하고 나노 스케일의 패터닝이 가능한 기술을 개발하였으며, 이를 다양한 소재와 EHD 인쇄전자 공정을 접목하여 여러 분야의 응용 소자 제작 및 평가 연구를 활발히 진행해오고 있다. 또한 표면 탄성파를 이용, 탄성과 영향으로 인한 미립화 및 진동하는 마이크로 사이즈의 유체역학적인 현상을 이해하고, 이를 응용하여 균일한 입자를 도포할 수 있

는 스프레이 코팅 연구를 진행하고 있다. 마지막으로 표면 습윤성 및 표면 에너지 제어를 통한 액적과 계면의 젖음 및 충돌 연구를 진행하고 있다. 이처럼 본 연구실은 프린팅 뿐만 아니라 다양한 다중물리적 유체역학 현상 연구들을 수행하며, 국내외 우수한 연구그룹과의 지속적인 협력 연구를 통하여 다학제간의 융합을 지향하고 있다.

2. 연구 내용 소개

1. 전기수력학적 (Electrohydrodynamic, EHD) 프린팅 및 마이크로-나노 소자 연구

1.1 전기수력학적 젯 프린팅 (Electrohydrodynamic Jet Printing) 연구 및 유체역학적 현상 메커니즘 이해

기존 잉크젯은 열팽창과 압전 소자를 이용한 토출 방식을 사용해왔으며, 이러한 방식들은 유체의 특성 및 노즐 직경의 한계 등으로 인하여 제한된 범위에서 사용이 가능하다. 하지만 전기수력학적 젯 프린팅은 노즐 액적 끝단의 메니스커스(Meniscus)에서 정전기력을 이용하여 액적을 토출시키는 방식을 이용하므로, 노즐 사이즈에 국한되지 않고 마이크로부터 나노 크기까지 패턴 구현이 가능하다. 또한 저점도부터 고점도까지 점성도 선택의 폭이 크기 때문에 물질 선택에 대한 자유도가 크다는 장점이 있다. 노즐 사이즈에 비례하여 액적의 사이즈가 작게 스케일 가능하므로, MEMS 공정을 통해 마이크 사이즈의 노즐을 제작하고 작동 전압/펄스에 따른 액적 사이즈 및 토출 현상을 관찰함으로써, 마이크로 사이즈의 작은 노즐에서도 균일한 사이즈의 액적이 토출 되는지를 평가하였다.⁽¹⁾ 이러한 액적 토출은 작동되는 전압의 종류(AC/DC)와 펄스에 따라 연속적인 젯 형태로 토출되기도 하며, 일정한 Frequency를 갖는 액적이 토출된다. 따라서 작동 전압과 펄스에 따른 프린팅 현상을 관찰하고 피드백 시스템을 도입하여 이를

제어하고자 하는 연구가 진행되었다.⁽²⁾ 이 밖에도 패턴 형성 시 패턴 방향으로 실버 나노 와이어를 배열하기 위한 Meniscus의 유동 가시화 및 분석 연구⁽³⁾, 잉크 점도 조성 과 기관 특성에 따른 고 종횡비(High aspect ratio) 패턴 제작 연구⁽⁴⁾, 패턴 선폭을 줄이기 위한 동축 가스를 이용한 젯 프린팅 연구 등이 이뤄져 왔으며 향후 다양한 물질의 물성에 따라 나타나는 다양한 현상을 제어하기 위한 이해 및 분석 연구가 지속될 예정이다.

1.2 전기수력학적 기반의 스프레이 코팅 연구 및 유체역학적 현상 메커니즘 이해

일반적으로 박막을 코팅하는 방법은 E-beam Evaporation 과 Sputtering 과 같은 건식 코팅. Spray를 이용한 습식 코팅이 있다. 습식 코팅은 균일하게 제어된 액적을 이용하기 때문에 박막의 두께 조절이 용이하다는 이점이 있으며, 대면적 박막 코팅 분야에서 대두되어 왔다. 또한 습식 코팅을 위한 종래의 액적 분무 기술은 공기를 이용한 액적의 미립화가 주로 사용되었으나, 미세 액적을 얻기 위한 큰 공기역학적 힘이 필요하다는 단점이 있다. 이에 대한 해결 방안으로 공기 유동 대신 전기력을 이용하는 전기 분무(Electrospray) 방식이 제안되었으며, 이는 많은 박막 코팅 분야에 적극적인 관심을 불러왔다. Electrospray에서는 공기역학적인 힘 없이 작은 전기력으로

로도 미세 액적이 형성되며, 이러한 미세 액적은 전하를 띠고 있기 때문에 전기장을 따라 분무되게 된다. 그리하여 본 연구에서는 이러한 전기분무 방식과 유전체 마스크(Dielectric mask)를 이용한 전기력 집중 분무(Electro-focusing spray) 연구를 진행하였으며, 이 연구를 통해 Electro-focusing spray로도 미세 선폭 확보가 가능함을 확인하였다.

한편, 전기 분무는 작은 전기력으로도 미세 액적을 형성할 수 있지만, 대면적 기관의 코팅에 필요한 액체 공급유량 수준을 못 미치는 등 낮은 도포 능력의 한계를 보여왔다. 그리하여 본 연구실에서는 균일한 박막 형성을 위해 공기 분무(Air spray)와 Electrospray의 각 장점을 모두 취할 수 있는 공기 압력과 전기장이 접목된 Hybrid 액적 분무 (Air-assisted electrospray)에 관한 연구를 시행하였으며, 전기장과 공기 압력에 따라 분무되는 형상이 달라짐을 가시화를 통해 관찰 이를 정량적으로 분석하였다. 또한 이 분무 방식을 통해 실버 나노 와이어 (Silver nano-wire, AgNW) 박막 코팅에서 대전된 나노 와이어 액적이 기관에 선 도포된 AgNW와 만나게 되면 순간적인 전류가 흐르게 되고 이에 따라 줄열가열(Joule Heating) 현상이 일어나 일반적인 다른 습식 코팅 방식에 비해 박막의 면 저항(Sheet Resistance)이 현저히 낮아짐을 각 코팅 방식의 Sheet Resistance 측정과 평가를 통해 확인할 수 있었다.⁽⁵⁾

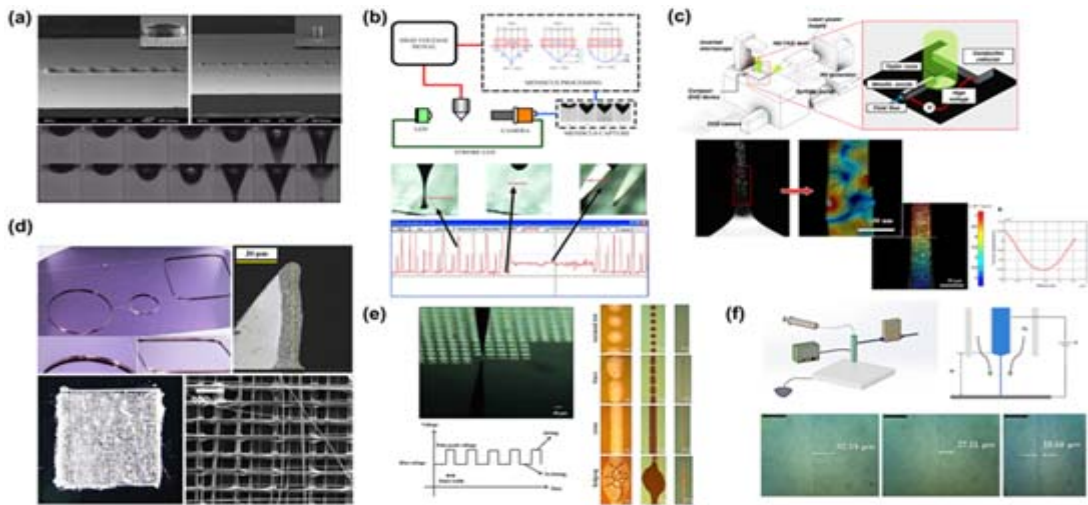


Fig. 1. 전기수력학적 (Electrohydrodynamic, EHD)젯 시스템 개발 및 유체역학적 현상 메커니즘 연구; (a) MEMS 공정을 통한 노즐 제작과 토출 형상 연구,⁽¹⁾ (b) 자동 전압과 피드백 시스템을 통한 메니스커스 제어 연구,⁽²⁾ (c) EHD젯 프린팅을 이용한 Nanowire의 Alignment 및 Meniscus 가시화 연구,⁽³⁾ (d) EHD젯프린팅을 이용한 고종횡비 구조 패턴 제작 연구,⁽⁴⁾ (e) 자동 전압 및 펄스 제어를 통한 Drop-on-demand (DOD) 프린팅 연구, (f) 동축 가스를 이용한 전기수력학적 젯 프린팅 메커니즘 연구

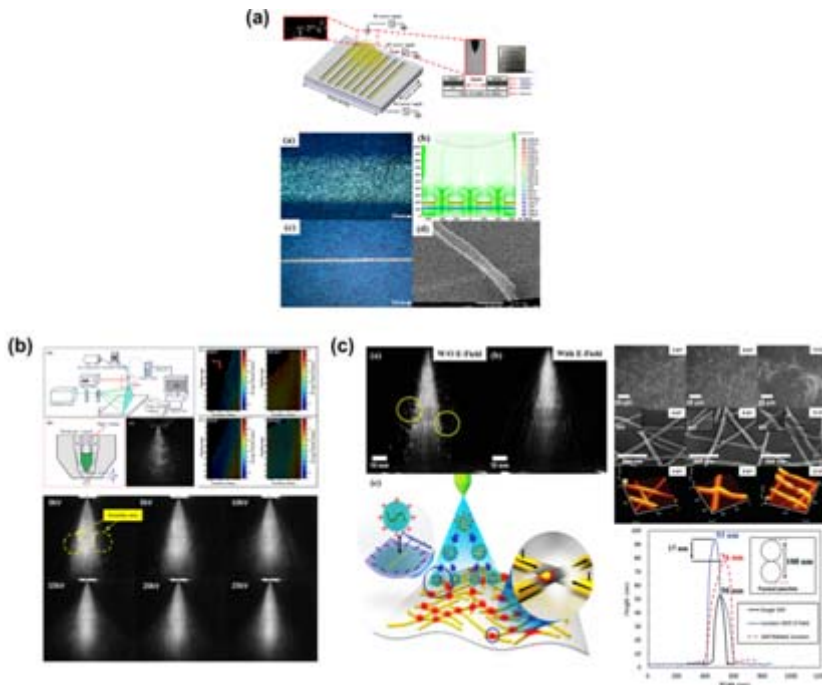


Fig. 2. 전기수력학 기반의 스프레이 코팅 연구; (a) 유전체 마스크와 전기력 집중 분무를 통한 미세 선폴 구현 연구, (b) 공기 압력과 전기장이 접목된 Hybrid 액적 분무 연구, (c) 공기 압력과 전기장 기반의 Hybrid 액적 분무 연구에서의 줄열 가열(Joule Heating) 현상 연구⁽⁵⁾

1.3 전기수력학적 프린팅 시스템을 이용한 응용 소자 개발 (OPV, 투명전극, 메타물질)

앞서 언급한 것과 같이 본 연구실은 전기수력학을 이용한 젯 프린팅 및 스프레이 박막 코팅에 관한 다중물리 및 유체학적 해석 연구와 제어 연구를 정성적 및 정량적으로 수행하였다. 이러한 젯 프린팅 및 스프레이 박막 코팅 현상에 대한 해석 및 이해는 패턴의 선폴 또는 형상, 박막의 두께를 보다 쉽게 제어할 수 있는 이점을 가져다 주었다. 이를 기반으로 투명 메탈 전극과 이를 이용한 Heater를 제작하고 균일한 Ag dot array, 3차원 층 메타물질, 전계 효과 트랜지스터, Stretchable strain 센서 등 다양한 소자를 제작하고 평가하는 연구를 진행하였다.⁽⁶⁻¹¹⁾ 이처럼 사용되는 액체의 점성, 표면장력, 유전율 등과 같은 다양한 물성 및 전기장 내 반응하는 현상에 대한 이해를 바탕으로한 다각적인 접근 방식으로 다양한 소자를 제작하고 평가하였으며, 앞으로도 이에 대한 연구를 지속하고자 한다.

2. 표면 탄성파(Surface Acoustic Wave)를 이용한 마이크로/나노 유체의 이해 및 제어 연구

표면 탄성파 (Surface Acoustic Wave, SAW)는 매질의 표면 근처에서 에너지가 집중되어 전달되는 파를 의미한다. 이때 깊이 방향으로의 한 파장 거리에 90% 이상 에너지가 집중되고 그 이상에서는 거의 사라지기 때문에 이러한 특성을 바탕으로 경박단소, 고 신뢰, 고속, 저전력소비 등의 장점을 나타내고 있다. 따라서 이러한 장점들로 인해 SAW는 통신기기뿐만 아니라 다양한 분야에서 각광을 받고 있다. 한편, 유체역학적 관점에서도 저전력으로 미세유체(Microfluidic) 또는 유체 내의 입자를 제어할 수 있다는 관점에서 SAW 는 매우 다양한 유체역학적 제어 연구에 이용되고 있다. SAW 소자는 압전기판 위에 만들어진 빗살형 전극의 변환기(Inter-Digitated Transducer, IDT)로 구성되어 있으며, 이 IDT 구조와 간격에 따라 사용 가능한 주파수 범위가 달라지기 때문에 응용 분야가 매우 다양하며 그 기능성 또한 폭넓다.

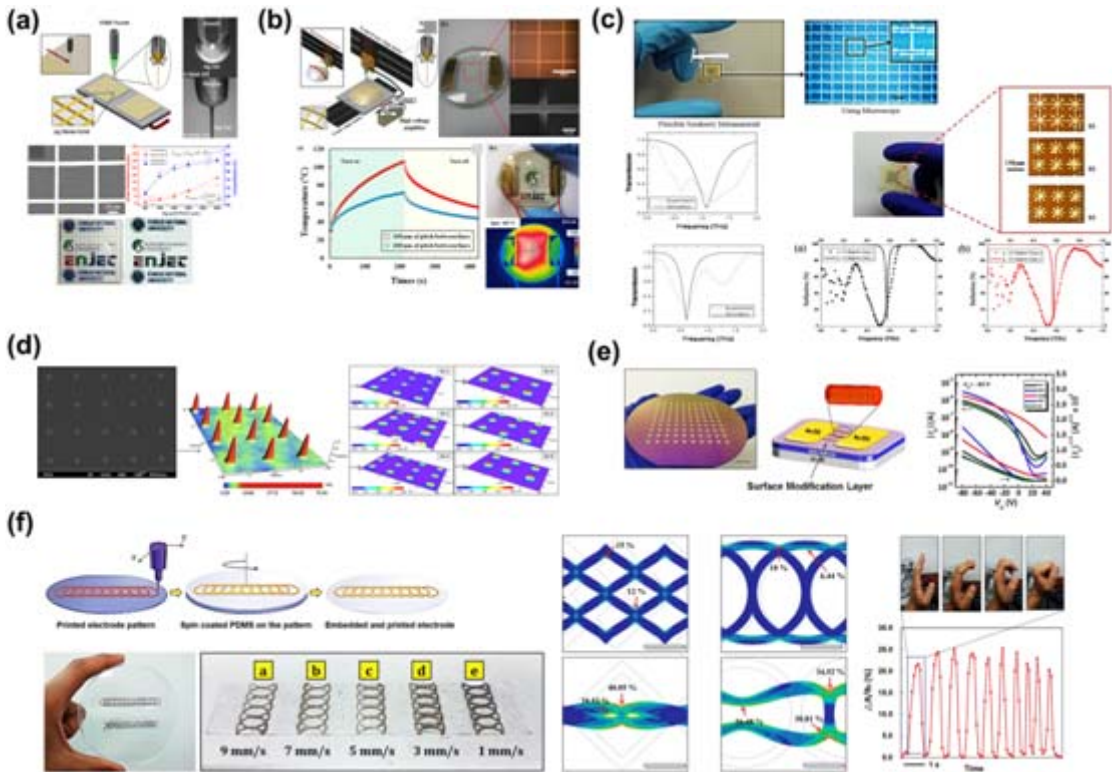


Fig. 3. 전기수력학적 젯 프린팅을 이용한 응용 소자 개발 연구 1; (a) Ag 그리드를 이용한 투명 금속 전극 구현 연구,⁽⁶⁾ (b) Ag투명 금속 전극을 이용한 3차원 곡면 Heating 소자 구현 연구,⁽⁷⁾ (c) 3차원 복합층 메타물질 설계 연구,⁽⁹⁾ (d) Drop-on-Demand공정을 이용한 다양한 기판 위의 Ag Dot array 제작 연구,⁽⁸⁾ (e) EHD젯 프린팅을 이용한 Poly(3-hexylthiophene) 전계 효과 트랜지스터 제작 연구,⁽¹⁰⁾ (f) EHD젯 프린팅을 이용한 Ring 및 Diamond 모양의 Stretchable strain sensor 제작 연구⁽¹¹⁾

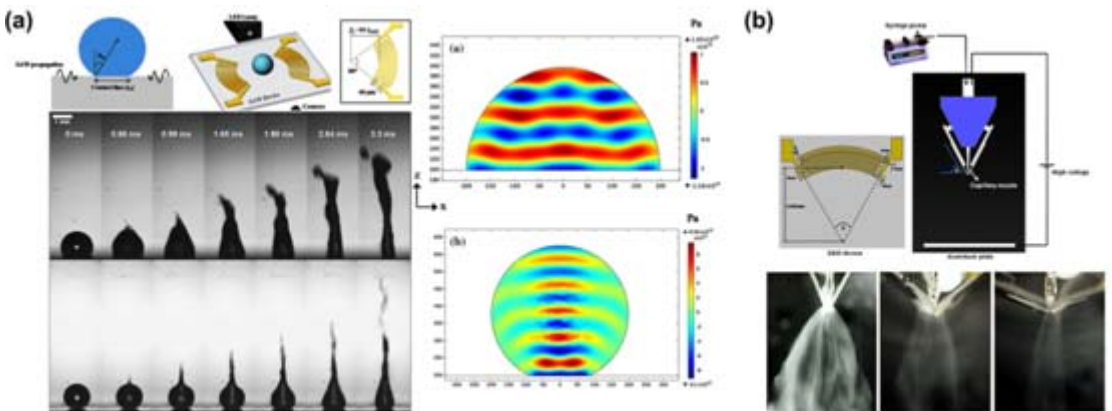


Fig. 4. 표면 탄성파(Surface Acoustic Wave, SAW)를 이용한 액적 분무 제어 연구; (a) 소수성 및 초소수성 위의 SAW를 이용한 Atomization/Nebulization 분석 연구,⁽¹²⁾ (b) SAW를 이용한 Hybrid spray 시스템 연구

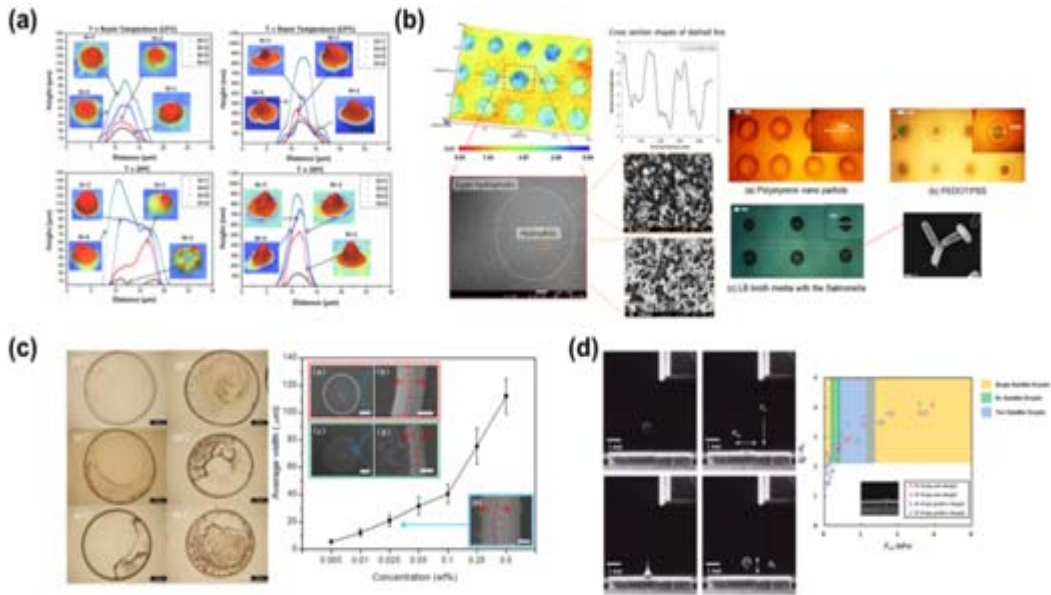


Fig. 5. 표면 습윤성/표면 에너지에 따른 유체 현상학적 이해 및 제어 연구; (a) 기판의 습윤성과 온도에 따른 Ag dot의 형상학적 관찰 연구, (b) EHD 프린팅을 통한 초소수성 표면의 선택적 친수성 개질 연구, (c) 표면 습윤성과 액적 농도에 따른 Coffee-ring 현상 제어 연구, (d) 초소수성 표면의 대전된 액적 충돌 연구

본 연구실은 이러한 SAW를 이용하여, 초소수성 및 소수성 표면의 무화(Atomization) 또는 분무(Nebulization) 현상에 대해 연구하였고, 이를 노즐 시스템에 적용하여 hybrid spray 시스템과 그 응용 소자 제작에 관한 연구를 지속하고 있다.⁽¹²⁾ 비록 지금까지는 Atomization 또는 Nebulization에 대한 중심으로 연구된 측면이 있지만, 앞서 언급한 바와 같이 SAW는 저전력 및 고속으로 유체나 입자의 제어가 가능하기 때문에 향후 마이크로 채널 내의 다양한 입자나 유동을 분석 및 제어하기 위한 방향으로 본 연구실에서 연구를 지속하고자 한다.

3. 표면 습윤성/에너지에 따른 유체 현상학적 이해 및 제어 연구

3.1 표면 습윤성/에너지 제어를 통한 유체역학적 도포 현상 연구

일반적으로 액적이 기판과 만날 때 액적이 가지고 있는 관성력, 표면 장력, 점성도와 같은 액적의 특성 뿐만 아니라 표면 습윤성 및 표면 에너지 또한 충돌 후 일어나는 일련적인 현상과 최종 도포 현상에 지대한 영향을 끼친다. 이러한 현상은 균일하고 미세한 선풍을 원하는 프린팅 분

아뿐만 아니라 박막 코팅 등 다양한 분야에서 액적 도포 제어의 필요성 요구와 함께 꾸준한 연구가 지속되고 있다. 본 연구실은 프린팅 시 표면 습윤성과 기판의 온도가 Ag dot의 도포 형상에 어떤 영향을 끼치는 지에 대한 연구를 정성적으로 수행하였다.⁽⁸⁾ 또한 초소수성 표면 위의 EHD 프린팅을 통한 선택적인 친수성 표면 개질을 진행하고 폴리스티렌 나노 입자 수용액, PEDOT:PSS 잉크, Salmonella 박테리아 배양액과 같은 타겟 물질을 도포 및 평가함으로써 그 응용 가능성을 살펴보았다. 한편, 액적이 기판에 도포되었을 때 기판의 습윤성, 표면 에너지, 액적의 농도에 따라 액적 중심의 증발 속도와 끝단(Periphery)의 증발 속도가 달라지게 되고 이는 곧 액체 내부의 Capillary flow를 야기하며, 결과적으로 링 모양으로 입자가 쌓이는 Coffee-ring 현상을 일으킨다. 따라서 이러한 현상학적 원리를 기반으로 AgNW 용액의 농도와 기판의 습윤성을 제어하여 균일한 Ring 모양의 전극을 제작하는 연구도 진행하고 있다. 이렇게 습윤성 및 표면 에너지에 따라 나타나는 현상을 이해하고 이를 제어하는 연구는 후에 다양한 응용 소자를 제작함에 있어 액적을 제어하는데 도움을 줄 것으로 기대되기 때문에 끊임없는 열린 시각으로 자연 현상부터 인위적인 현상까지 다양하게 탐구하고 그것을 응용하고자 하는 방향으로 지속될 것이다.

3.2 액적 물성과 표면 습윤성 및 형상학적 특징에 따른 마이크로 액적 충돌 연구

앞서 언급한 도포 현상 연구는 액적이 최종적으로 도포 되는 현상에 초점을 맞추는데 반해, 본 연구의 목표는 액적의 물성(점성, 표면장력 등)과 관성, 표면의 습윤성 및 형상학적 특징에 따라 충돌 후 나타나는 퍼짐, 수축, 점핑 등과 같은 일련적인 2차 현상들을 분석하고 이해하는데 있다. 이러한 충돌 연구는 자가세척, 응축 열전달, 빙결 방지 등 다양한 응용 분야에서 중요하게 이용되는 현상들이며, 그 응용 분야 및 조건이 점점 더 다양해지고 있기 때문에 이를 제어하기 위한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. EHD 프린팅에서는 노즐로부터 대전된 액적이 토출되므로, 일반적인 경우에 비해 그 충돌 및 퍼짐 현상이 달라지며, 기관에 잔여 잔여 전하가 남아있을 시에는 그 현상이 더욱 더 달라지는 현상을 프린팅 공정을 통해 확인하였다. 그리하여 대전된 액적과 표면 전하가 액적 충돌과 그 일련적인 현상에 어떠한 영향을 주는지 이해하기 위해 초소수성 기관위의 대전된 입자 충돌 연구와 기관의 전하 유무에 따른 점핑 현상을 관찰하였다. 실험과 정량적인 분석을 통하여 대전된 액적이 전하가 존재하는 기관에 떨어졌을 시에, 그 반발력에 의해 점핑 높이가 더 높아짐을 확인하였다. 이러한 응용 분야에 외에도 자연에서 관찰할 수 있는 표면 습윤성 및 다양한 형상학적 특징에 따른 액적 충돌 연구를 진행하고 있으며, 이 또한 물리적인 현상을 이해하는 연구이지만 후에 다양한 액적을 제어하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

4. 맺음말

현대 사회는 더 이상 거시적인 것만을 이해하고 분석하는 것만으로는 이를 제어할 수가 없다. 이제는 그 거시적인 것들 또한 미시적인 것들로 구성되기 때문에 작고 정교한 것을 이해함으로써 큰 것을 제어하고 이해할 수 있게 되었다. 또한 마이크로, 나노 크기의 미시적인 분야에서 나타나는 많은 물리적, 화학적 현상은 매크로 이상의 거시적 분야와는 다른 현상들을 보이는 것들이 많다. 이러한 이유로 다양한 분야에서 새롭고 많은 관심을 받고 있으며, 그와 동시에 새로운 미시적인 분야들이 지금 이 순간에도 개척되고 있다. 따라서 새로운 분야에 대한 현상을 이해하고 이를 응용하기 위해서는 다학제간 융합이 필요하며 보다 열린 시각으로 다양한 방향에서 접근하려는 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구실은 열유체학적 지식을 기반으로 다양한 연구진들과 다학제적 접근을 통하여 나노 및 마

이크로 현상을 이해하고 그와 관련된 시스템 기술을 개발하고자 노력하고 있다.

REFERENCE

- 1) Si Bui Quang Tran, Doyoung Byun a, Vu Dat Nguyen, Hadi Teguh Yudistira, Myoung Jong Yu, Kyun Ho Lee and Jaeuk U. Kim, 2010, "Polymer-based electrospray device with multiple nozzles to minimize end effect phenomenon", J. Electrostatics, Vol. 68, pp.138-144
- 2) Trung Kien Nguyen, Vu Dat Nguyen, Baekhoon Seong, Nguyen Hoang, Jungkeun Park and Doyoung Byun, 2014, "Control and improvement of jet stability by monitoring liquid meniscus in electrospray and electrohydrodynamic jet", J. Aerosol Sci., Vol. 71, pp.29-39
- 3) Hyungdong Lee, Baekhoon Seong, Jihoon Kim, Yonghee Jang and Doyoung Byun, 2014, "Direct Alignment and Patterning of Silver Nanowires by Electrohydrodynamic Jet Printing", Small, Vol. 10, pp.3918-3922
- 4) Yonghee Jang, Indra Hartarto Tambunan, Hyowon Tak, Vu Dat Nguyen, TaeSam Kang and Doyoung Byun, 2013, "Non-contact printing of high aspect ratio Ag electrodes for polycrystalline silicone solar cell with electrohydrodynamic jet printing", Appl. Phys. Lett., Vol. 102, Issue 123901
- 5) Baekhoon Seong, Ilkyeong Chae, Hyungdong Lee, Vu Dat Nguyen and Doyoung Byun, 2015, "Spontaneous self-welding of silver nanowire networks", Phys. Chem. Chem. Phys., Vol. 2015, pp.7629-7633
- 6) Yonghee Jang, Jihoon Kim and Doyoung Byun, 2013, "Invisible metal-grid transparent electrode prepared by electrohydrodynamic (EHD) jet printing", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, Issue 1551063
- 7) Baekhoon Seong, Hyunwoong Yoo, Vu Dat Nguyen, Yonghee Jang, Changkook Ryu and Doyoung Byun, 2014, "Metal-mesh based transparent electrode on a 3-D curved surface by electrohydrodynamic jet printing", J. Micromech.

- Microeng., Vol. 24, Issue 097002
- 8) Fariza Dian Prasetyo, Hadi Teguh Yudistira, Vu Dat Nguyen and Doyoung Byun, 2013, "Ag dot morphologies printed using electrohydrodynamic (EHD) jet printing based on a drop-on-demand (DOD) operation", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 23, Issue 095028
 - 9) Hadi Teguh Yudistira, Ayodya Pradhipta Tenggara, Vu Dat Nguyen, Teun Teun Kim, Fariza Dian Prasetyo, Choon-gi Choi, Muhan Choi, and Doyoung Byun, 2013, "Fabrication of terahertz metamaterial with high refractive index using high-resolution electrohydrodynamic jet printing", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 103, Issue 211106
 - 10) Yong Jin Jeong, Hyungdong Lee, Byoung-Sun Lee, Seonuk Park, Hadi Teguh Yudistira, Chwee-Lin Choong, Jong-Jin Park, Chan Eon Park, and Doyoung Byun, 2014, "Directly Drawn Poly (3-hexylthiophene) Field-Effect Transistors by Electrohydrodynamic Jet Printing: Improving Performance with Surface Modification", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 6, pp. 10736-10743
 - 11) Hyungdong Lee, Baekhoon Seong, Hyungpil Moon and Doyoung Byun, 2015, "Directly printed stretchable strain sensor based on ring and diamond shaped silver nanowire electrodes", *RSC Adv.*, Vol. 5, pp.28379-28384
 - 12) Marten Darmawan and Doyoung Byun, 2015, "Focused surface acoustic wave induced jet formation on superhydrophobic surfaces", *Microfluid Nanofluid*, Vol. 18, pp. 1107-11