

# • 특집 • 나노마이크로기술의 최근 연구동향

## 마이크로 핫엠보싱 최신 연구 동향

### Recent Research Trend of Micro Hot-Embossing

이승현<sup>1</sup>, 조정대<sup>1</sup>, 김광영<sup>1</sup>, 최영만<sup>2,#</sup>  
Seung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Jeongdai Jo<sup>1</sup>, Kwang-Young Kim<sup>1</sup>, and Young-Man Choi<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 인쇄전자연구소 (Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials)  
<sup>2</sup> 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)  
# Corresponding Author / E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-2342  
ORCID : 0000-0002-9754-0307

KEYWORDS: Hot embossing (핫엠보싱), Thermal imprinting (열형 각인), Micro patterning (마이크로 패터닝), Patterning mold (패터닝 금형)

*Micro hot-embossing is a powerful tool in the agile additive manufacturing industry. Its applications include optical components, micro-fluidic devices, MEMS, hydrophobic/hydrophilic surfaces, and energy harvesting devices. To overcome a drawback of low-process speed, the R2R process has been innovated, with novel embossing mechanisms and process optimization. Also, new materials beyond thermoplastic polymers have been applied to develop new devices, or enhance device performance. This review surveys recent progress in micro hot-embossing technology, in terms of new mold fabrication process, process innovation, and various applications.*

Manuscript received: August 16, 2018 / Revised: September 28, 2018 / Accepted: September 28, 2018

#### 1. 서론

마이크로 핫엠보싱(Micro Hot-Embossing) 기술<sup>1</sup>은 열가소성 고분자 기판이나 열경화성 수지에 적절한 열과 압력을 가하여 금형의 미세한 마이크로/나노 패턴의 복제가 가능한 기술로서, 기존의 반도체 기술에 기반한 노광/에칭 공정, UV (Ultraviolet) 나노/마이크로 임프린팅, 인쇄전자 기술과 함께 나노/마이크로 형상의 패터닝을 위한 기술 중 하나이다.

마이크로 핫엠보싱 공정은 금형과 기판에 열을 가하여 온도를 높이는 공정, 나노/마이크로 패턴을 각인(Embossing)하는 공정, 금형과 기판을 식히면서 이형(Demolding)하는 공정으로 구분되는데, 온도 상승 구간에서는 응력의 집중을 통하여 최대 열변형을 유발시키고 온도 하강 구간에서는 잔류응력 완화를 통하여 각인된 패턴의 복원을 최소화해야 좋은 각인률을 얻을 수 있다.

각인 공정에서의 각인률은 가압률에 의한 압력, 각인속도, 온도에 의한 기판 또는 레진의 점탄성 및 각인되는 패턴의 기하학

적 형상에 의해 영향을 받게 되며, 유리전이온도 이상으로 가열되어 점성 유체와 같은 성질을 가지게 된 기판 또는 레진이 금형의 마이크로/나노 패턴 속을 채우는데 걸리는 시간 (Filling Time)에 의해 각인 공정에서의 최대 공정 속도가 결정되게 된다.

마이크로 핫엠보싱은 다른 패터닝 공정에 비하여 공정이 간단하고 정밀한 패턴의 복제가 용이하며 롤 금형을 이용한 대량 생산 공정에 적합하다. 반면, 마이크로 핫엠보싱 기술의 단점으로는 공정 속도가 느리고 금형 제작이 어렵다는 것이다. 열전달에 의해 열가소성 고분자 기판이나 열경화성 레진을 유리전이 온도 이상으로 가열시키는 공정의 특성 상 충분한 열전달 시간을 필요로 하며 이로 인하여 공정 속도의 한계가 존재하게 된다. 이를 극복하기 위하여, 롤 형태의 금형과 연속공급되는 기판을 사용하는 롤 투롤(R2R) 핫엠보싱 기술<sup>2-6</sup>을 적용한 생산속도의 향상 및 패터닝 속도 향상을 위한 다양한 공정 혁신이 이루어지고 있다. 마이크로 핫엠보싱 금형은 주로 반도체 공정으로 제작된 실리콘 마스터를 사용하거나 이로부터 복제된 금속 금형을 사용하는데, 이러

한 금형제작 과정은 생산공정이 복잡하고 생산단가가 높다는 단점이 있다. 또한 공정에 따라 금형과 기판 사이에 공기 또는 기화한 용제에 의한 기포가 갇히는 문제로 인해 패턴에 불량을 일으키는 경우가 있다. 따라서 금형에 의한 불량을 줄이고 금형 제작 공정을 혁신하는 연구 또한 필수적이다.

마이크로 핫엠보싱의 응용분야 또한 마이크로 렌즈 어레이와 같은 광학 부품, 의료/생명공학 소자, MEMS 등 다양하게 발전되어 왔으며, 이러한 응용소자에 적합한 패턴링을 위하여 폴리머 기판 이외에 다양한 산화물 레진, 나노/마이크로 입자가 포함된 기능성 재료 등에 적용하여 새로운 기능성을 가지게 하거나 기존 소자의 성능을 향상시키는 노력들이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 마이크로 핫엠보싱 기술의 최신 연구동향을 살펴보고자 한다. 최근 5년간의 연구동향을 분석함에 있어 크게 금형 제작 기술, 핫엠보싱 공정 기술 및 응용분야로 나누어 핵심적 기술의 내용을 요약하고 이들의 발전 방향에 대해 토론하고자 한다.

## 2. 마이크로 핫엠보싱 금형 제작 기술

### 2.1 공기 투과성 금형

마이크로 핫엠보싱이나 나노임프린팅 공정 시에는 Fig. 1에서 보는 것처럼 금형과 대상 재료 사이에 공기가 갇히거나 대상 재료에 포함된 용제 등이 기화되어 패턴의 형상에 결함을 일으키는 경우가 많이 발생한다. 이를 해결하기 위한 방안으로써, 최근 공기 투과성 금형(Air Permeable Mold)<sup>7-9</sup>이 제안되었다.

Demko 등<sup>7</sup>은 PMP (Poly(4-Methyl-2-Pentene))를 이용하여 수백 나노미터 크기의 고분자와 나노입자-패턴을 구현하였다. PMP는 기체 투과성을 가지면서도 기계적 강도, 화학적 안정성 및 광학적 투과도가 높아 마이크로 핫엠보싱 및 인쇄용 금형으로 사용되고 있다. PMP의 고분자 사슬 사이의 공극을 통하여 기화된 용제를 빼냄으로써 패턴 내의 기포 갇힘 현상을 제거하고 높은 정밀도의 패턴을 형성하였다.

Nakajima 등<sup>8</sup>은 HPC (Hydroxypropyl Cellulose) 기반의 바이오매스 재료를 이용하여 기체 투과성의 금형을 제작하여 1 μm의 선폭을 가지는 패턴을 구현하였다. HPC에 열 가교성의 2-Isocyanatoethyl Methacrylate를 첨가하여 실리콘 마스터 금형으로부터 열중합된 금형을 제작하였다. 제작된 금형은 경화 온도에 따라 산소 투과도(Oxygen Gas Permeability)가 감소하였는데, 이는 경화 온도가 높을수록 중합이 많이 일어나 폴리머 사이의 공극이 작아지기 때문이다.

Takei 등<sup>9</sup>은 Cyclodextrin 기반의 다공성 금형과 Biodegradable Polylactide 레진을 이용하여 핫엠보싱 공정으로 150 nm의 나노 패턴을 성형하는 데 성공하였다. Fig. 2와 같이 기판 위에 접착레이어를 코팅하고 Polylactide 레진을 다공성 금형을 이용하여 열과 압력을 주게 되면 레진에 포함된 Dichloromethane이 기화되는데, 기화된 Dichloromethane은 다공성금형을 통해 배출됨으로써

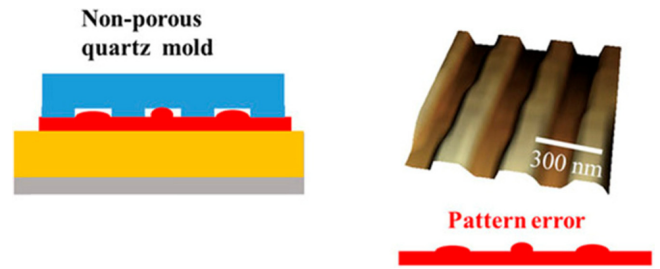


Fig. 1 Pattern failure in thermal nanoimprint lithography carried out using non-gas permeable quartz mold. Reproduced under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

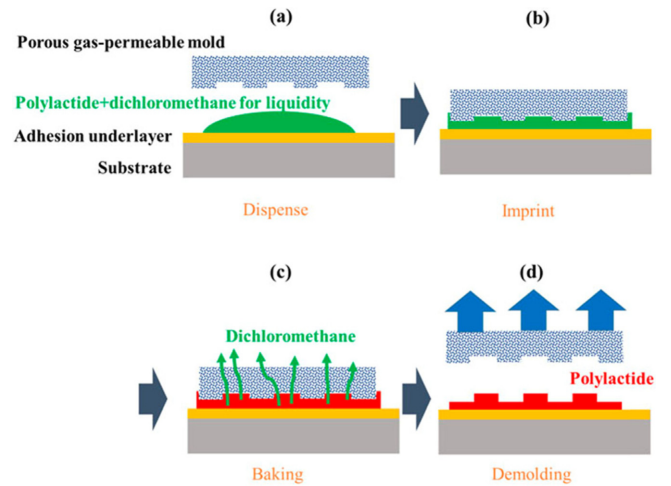


Fig. 2 Schematic of imprinting of polylactide and dichloromethane solution by thermal nanoimprint lithography using porous cyclodextrin-based gas-permeable mold. Reproduced under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

Polylactide의 모서리가 둥글어지는 Round Loss 현상이나 불량 없이 패턴을 제작할 수 있다.

### 2.2 2광자 중합을 이용한 3차원 패턴 금형

일반적으로 마이크로 핫엠보싱에 사용되는 금형은 주로 리소그래피와 식각 공정으로 제작된 실리콘 마스터로부터 복제되는데, 실리콘 기판과 식각 공정의 특성상 제작 가능한 형상은 매우 제한적이다. 특히, 매우 정밀한 형상이나 높은 중횡비를 가지는 양각 패턴은 기존의 방법으로는 제작이 어렵다.<sup>11</sup> 레이저를 이용한 LDW (Laser Direct Writing) 방법은 3차원의 형상을 자유롭게 형성할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 광경화성 레진에 레이저 빔을 3차원적으로 스캔하여 레이저 빔의 초점에 조사된 일정한 부피(Voxel)에서만 레지스트의 교합을 일으켜 고체화된 패턴을 형성한다. 하지만 광원 및 광학계의 한계로 인하여 구현 가능한 Laser Spot의 크기는 수 μm보다 작아질 수 없어 일반적인 LDW는 이 보다 작은 패턴의 형성이 어렵다.

반면, 2광자 중합(Two-Photon Polymerization) LDW<sup>10,11</sup>는 실

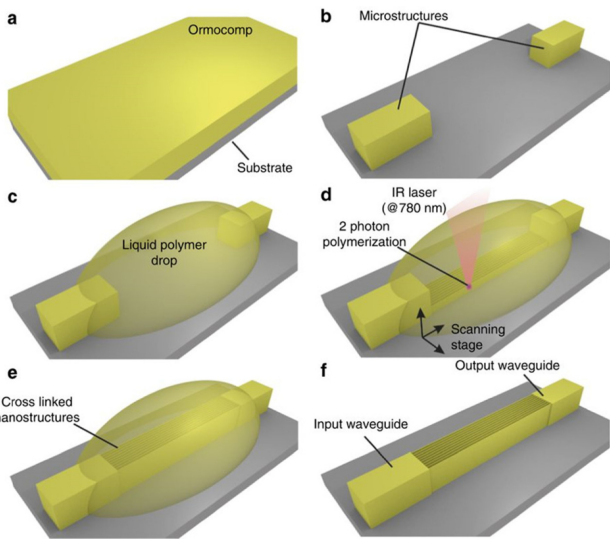


Fig. 3 Schematic representation of UV photolithography (PL) and 2PP direct laser write (DWL) process for master fabrication. (a) Spin coating of OrmoComp. (b) UV-PL to form micro-sized structures. (c) Deposition of a polymer liquid drop on the region of interest. (d) DWL by 2PP to form the (e) nanostructures. (f) Wet development of the nanostructures to remove non-crosslinked material. Reproduced under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

제로 UV 경화에 필요한 빛의 파장보다 더 긴 파장(낮은 에너지)의 레이저를 사용하여, 조사한 레이저의 강도가 일정 이상이 되는 초점영역에서 낮은 에너지를 가지는 2개의 광자를 동시에 흡수하여 UV 레지스트가 경화되는 현상을 이용한 것으로 일반적인 LDW보다 훨씬 높은 해상도를 달성할 수 있다.

Chidambaram과 Kirchner<sup>11</sup>는 UV 경화성 PDMS (Polydimethylsiloxane)에 780 nm의 레이저를 이용하여 2광자 중합으로 50 μm 직경의 마이크로 렌즈의 오목한 금형형상을 제작하고 PMMA (Poly(Methyl Methacrylate)) 레진을 이용하여 다시 금형을 복제하여 500 nm의 날카로운 팁을 가지는 금형을 제작하였다. Cadarso 등<sup>10</sup>은 Fig. 3에서 보는 것처럼 포토 리소그래피로 형성된 마이크로구조 사이에 UV 레지스트를 드롭한 후 780 nm의 레이저 광원과 2광자 중합을 이용하여 높이 9.8 μm, 폭 350 nm의 나노구조를 형성하였다.

2.3 직접 패턴링에 의한 금형

롤 임프린팅을 이용한 대형 소자의 제작을 위해서는 이음매가 없는 원통 실린더의 제작이 필수적인데, 이를 위해 원통 실린더 상에 직접 양각 패턴을 형성하는 기술도 많이 주목 받고 있다. 최근 레이저 간섭 기술을 이용하여 Ni 원통 금형을 직접 가공하여 2.8 μm선폭의 패턴을 형성하는 연구<sup>5</sup>가 발표되었다.

그 외에 3D 프린팅 기술의 발전에 따라 이를 이용한 금형 제작도 연구되고 있다. 3D 프린팅 기술의 발달로 프린팅된 금속재료의 강도와 패턴의 정밀도가 나날이 높아지고 있는 점을 고려할 때, 3D 프린팅에 의한 금형 제작은 더욱 주목 받을 것으로 기대

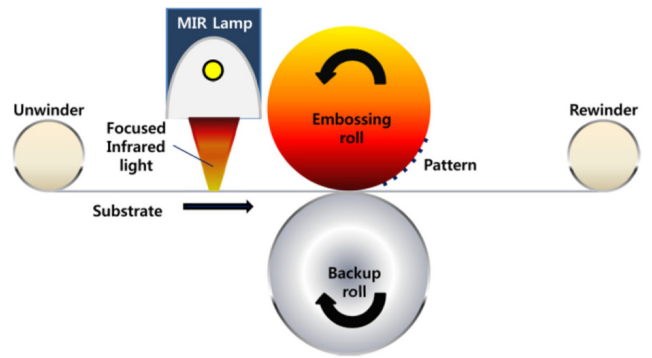


Fig. 4 Schematic diagram of the roll-to-roll hot embossing system using a focused infrared light

된다. Lin<sup>12</sup>는 400 μm × 500 μm의 마이크로 채널의 금형을 금속 3D 프린팅을 이용하여 제작하였는데, 재료로는 0.25 wt%의 Boron Nitride 파우더가 함유된 Stainless Steel 파우더를 사용하여, 인쇄된 패턴의 밀도와 표면조도를 향상시킬 수 있었다.

3. 공정 기술

3.1 Preheating 기술

롤투롤 또는 연속 마이크로 핫엠보싱 기술이 발전됨에 따라 공정 속도를 높이면서도 패턴의 형상을 유지하고 열에 의한 기관 변형을 최소화하는 노력이 이루어져 왔는데, 그 중 대표적인 방법이 Preheating 방법이다. 공정속도가 빨라질수록 가열된 엠보싱 롤에 접촉하는 시간이 짧아져 패턴의 깊이가 얇아지고 각인률이 감소하게 되는데,<sup>5</sup> Preheating은 엠보싱 롤에 기관이 진입하기 전에 기관의 온도를 유리전이 온도 가까이 높임으로서 높은 공정속도에서도 패턴의 깊이를 증가시키게 된다.

2013년 김동성 교수 연구팀<sup>13</sup>에서는 R2F 핫엠보싱 장치에 할로겐 램프를 이용한 Preheating을 적용하여 Cyclic Olefin Copolymer (COC), Polycarbonate (PC), Polymethylmethacrylate (PMMA), and Polystyrene (PS)의 기관에서 마이크로유체 소자를 제작하였다. Preheating을 적용한 경우, 각인율이 15 - 50% 향상되었으며, 200 μm 이상의 깊이를 가지는 마이크로유체 소자의 제작에도 성공하였다. 2015년 한국기계연구원 김세영 박사 연구팀<sup>14</sup>에서는 적외선 램프를 R2R 핫엠보싱 장치에 적용하여 Preheating에 따른 패턴의 형상을 분석하였다.

2017년 한국기계연구원 조정대 박사 연구팀<sup>15</sup>에서는 Fig. 4와 같이 투명기관의 Preheating을 위하여 집속된 적외선 광원을 이용하였다. 집속된 광원은 기관의 폭방향으로 균일한 세기의 적외선 라인빔의 조사가 가능하고, 짧은 시간에 기관을 예열할 수 있다. 이 연구에서는 기관의 예열에 있어 NIR(근적외선)에 비해 MIR(중적외선)이 보다 효과적인 광원이며, 가열된 물을 사용하는 것과 동일한 효과를 가진다는 점을 확인하였다.

적외선광에 의한 예열방법은 비접촉 방식으로 오염이나 유지

보수면에서 우수하나 대응 가능한 기관 폭에 한계가 있다. 롤투롤 연속 공정에 있어서 가장 간단한 방법은 Preheating을 위한 별도의 가열 롤을 사용하는 방법이다. Hainan 대학의 Jian 등<sup>16</sup>은 1200 mm 폭의 기관에 롤투롤 핫엠보싱 공정을 이용하여 회절격자를 형성하였는데, Preheating 롤과 Cooling 롤을 엠보싱 롤의 전/후에 설치하여 32 m/min의 공정속도에서 1  $\mu\text{m}$ 의 회절격자 패턴을 얻을 수 있었다. SIMTech의 Shan 등<sup>6</sup>은 Seamless 벨트를 이용하여 금형과 기관의 접촉 시간을 증가시킴으로써 Preheating 성능을 좀 더 향상시키고자 하였으며, 상하이 교통대의 Peng 등<sup>4</sup>은 3개의 가열롤과 적외선 램프를 이용한 Preheating Unit을 사용하고, 벨트로 이루어진 형상 유지 유닛(Shape Preserving Unit)을 적용하여 공정속도가 빨라질 때에도 패턴의 형상이 유지됨을 보여주었다.

### 3.2 핫엠보싱 공정 해석 기술

마이크로 핫엠보싱 공정에서 각인물을 향상시키기 위해서는 온도에 따라 변화하는 열가소성 기관의 점성 및 이로 인한 유동성에 대한 이해가 필수적이다. 특히 롤투롤 핫엠보싱과 같은 높은 공정속도에서 유리전이온도 이상으로 가열되어 유동성을 가지게 된 기관/레진이 마이크로/나노 패턴 내부를 빈틈없이 채우기 위한 필요한 압력, 속도, 온도 등의 공정 변수를 결정하기 위해서는 고분자 레진이 가지는 점탄성(Viscoelastic) 특성을 고려한 유동특성에 대한 연구들이 필요하다. 또한 각인 후 온도가 내려감에 따라 기관의 수축 및 복원으로 인한 형상 변화 최소화 및 이형 공정에서의 패턴 변형을 최소화 하기 위하여 표면처리, 냉각공정 등을 통한 이형공정 최적화 연구도 수행되고 있다.

Deng 등<sup>17</sup>은 Poly-Vinyl Chloride PVC 필름을 이용한 롤투롤 핫 엠보싱 공정에서의 열과 압력을 가하였을 때의 열변형 및 이형 공정에서의 수축 및 복원에 대하여 기관 재료의 점탄성을 고려한 3차원 유한요소해석(FEM)을 수행하였다. 기관의 점탄성 물성을 적용하기 위하여 Generalized Maxwell 모델에 기반한 선형 점탄성 모델을 사용하였으며 Williams-Landel-Ferry (WLF) 방정식을 통해 온도에 따른 점탄성 특성을 시간에 대한 영향으로 변환하여 적용하였다. 이를 통해 핫 엠보싱 공정에서의 온도, 응력 분포 등을 수치해석을 통해 분석하고 온도에 따른 각인 깊이 등을 실험결과와 비교 분석하였다. 특히, 각인 시 기관의 변형을 일으키게 되는 Creep Strain은 온도에 민감하며 온도가 유리전이온도 이상으로 상승하더라도 최대 변형이 일어나기까지 시간지연이 발생하는 것을 보여주었다. 또한 이형공정 후에는 수축 및 복원으로 인하여 최대 각인 깊이가 감소하는 것을 확인하였는데 추가적인 냉각공정을 통하여 이러한 수축/복원되는 비율을 줄일 수 있으며 이러한 효과는 각인 온도가 높을수록 보다 효과적임을 보여주었다.

Cheng 등<sup>18</sup> 역시 Generalized Maxwell 모델을 이용하여 PS, PMMA, PC 등의 기관의 열변형에 따른 점탄성을 고려한 3차원 수치해석을 수행하여 기관의 종류, 패턴의 형상 등에 따른 각인물 영향 등을 분석하였으며 수치해석결과가 실제 실험결과와 잘 일

치하는 것을 보여주었다.

Omar 등<sup>19</sup>은 이형 공정에서 기관과 금형 간의 분리에 필요한 힘을 최소화하기 위하여 이형공정에 작용하는 다양한 접착력, 마찰력 및 변형현상에 대한 해석모델을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 각인 공정에서 가하는 압력이 이형 공정에도 크게 영향을 끼치게 되는데, 압력이 증가할수록 접촉면적의 증가로 인하여 접착력이 증가하는 반면 열응력의 감소로 인해 마찰력은 감소함을 보여주었다. 이로 인하여 마찰력이 지배적인 저온 공정에서는 압력이 증가할수록 이형에 필요한 힘이 감소하고, 접착력이 지배적인 고온 공정에서는 압력이 증가할수록 이형에 필요한 힘이 증가하는 현상을 설명하였다.

### 3.3 신 공정 기술

이 절에서는 최근 마이크로 핫엠보싱 기술에 적용된 몇 가지 흥미로운 시도들에 대해 소개하고자 한다.

첫번째는 폴리이미드(Polyimide) 필름에 마이크로 핫엠보싱을 적용하기 위한 시도이다. 폴리이미드 필름은 내열성이 좋고 기계적인 물성이 좋아 유연소자의 기관으로서 많은 주목을 받고 있다. 하지만 높은 유리전이 온도를 가지고 있어 마이크로 핫엠보싱 기술로 성형이 어려운 기관 중의 하나이다. 일본 AIST 윤성원 박사 연구팀<sup>20</sup>에서는 광경화제가 포함된 Soluble Block Copolymer Polyimide (SBC-PI)를 이용하여 130도의 저온에서 핫엠보싱 후 UV 경화를 통하여 118 nm 폭과 6.5의 종횡비를 가지는 패턴을 형성하는데 성공하였다.

두 번째 기술은 Oscillatory Shear Forming<sup>21</sup>이라고 불리는 기술로서, 유리전이 온도보다 낮은 온도에서 마이크로 핫엠보싱으로 우수한 패턴 형상을 얻기 위한 방법이다. 롤투롤 생산에서는 유리전이 온도보다 높은 공정온도는 기관의 변형을 초래해 장력이나 패턴의 결함을 일으킬 수 있어 기관의 온도 제어는 큰 이슈 중 하나이다. 이 연구에서는 금형과 기관이 압착될 때, 압착력이 가해지는 방향의 수직 방향으로 피에조 소자를 이용하여 금형을 진동시킴으로써 높은 품질의 패턴을 얻을 수 있음을 보였다. 진동의 크기는 최소 패턴 폭의 5 - 10%이며 진동 주파수는 10 kHz로 PMMA 필름에서 유리전이온도보다 35도나 낮은 온도에서도 패턴의 성형이 가능하고, 진동시간이 늘어남에 따라 깊이도 깊어져 잔류막(Residual Layer)의 두께를 크게 줄일 수 있다고 설명하였다. 이와 비슷한 기술로 Impact-Type 핫엠보싱 기술<sup>22</sup>도 최근 소개되었는데, 도트 프린터와 같이 미세한 프로브를 가열된 기관에 타격하여 패턴을 형성하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 핫엠보싱을 위한 금형을 제작할 필요 없이 다양한 패턴을 자유롭게 형성할 수 있다는 점이 가장 큰 장점으로, 앞으로 다양한 프로브의 형상, 프로브 가열 방식 연구를 통해 더 발전될 가능성이 커 보인다.

## 4. 응용 사례

최근 마이크로 핫엠보싱은 기관에 특정한 형상이나 텍스처만

Table 1 Applications in recent micro hot-embossing studies

Applications	Type	Fabrication tool	Feature geometry	Feature size		Aspect ratio	Materials	Ref
				Lateral (μm)	Height (μm)			
TCE	Hard	R2R	Mesh	10	3.5	0.35	PEN	23
	Hard	R2R	Mesh	0.4	0.05-0.1	0.125-0.25	PC	24
TFT	Soft	P2P	TFT	20	-	-	Oxide gel	25
Optical components – Light extraction	Soft	P2P	Pillar array	0.5	1.6	3.2	ZnO-nanoparticle-dispersed resin	26
	Soft	P2P	Hole array	0.23	0.14	0.61	Perovskite	27
	Soft	P2P	Hole array	0.3	0.3	1	PMMA	28
	Soft	P2P	Hole array	0.3	0.22	0.73	Hydroxypropyl cellulose	29
	Hard	P2P	Line	0.3	0.066	0.22	PMMA	30
Optical components – Grating	Soft	P2P	Line	0.25	0.04-0.165	0.16-0.6	Oxide resist	31
	Soft	P2P	Line	16	0.6	0.038	Thermoplastic polyurethane	32
	Hard	P2P	Line	1	40	40	Metal foil(Au-Sn)	33
	Soft	P2P	Line	0.625	0.4	0.64	PMMA with nanoparticles	34
Optical components – Anti-reflection	Soft	P2P	Checker board	0.36	0.29	0.8	poly(benzyl methacrylate) (PBMA),	35
Optical components – SPR-based sensor	Soft	P2P	Pillar array	0.23	0.15	0.65	PMMA	36
Optical components – Alignment layer of liquid crystal	Hard	P2P	Line	0.65	0.57	0.88	PI	37
Super-hydrophobic surface	Hard	P2P	Micro structures	4.55 ~ 35.88 (Ra)	-	-	PLA/ HDPE, PVC	38
	Hard	P2P	Pillar array	14	35	2.5	PffBT4T-2OD	39
Triboelectric nanogenerator	Hard	P2P	Wave (AAO)	0.5	0.16	0.32	FEP	40
	Hard	P2P	Micro particle (SiC)	10-24	-	-	Nylon, FEP	41

을 만드는 기술에서 진화하여 투명전극,<sup>23,24</sup> 반도체소자,<sup>25</sup> 광학소자,<sup>26-37</sup> 초발수 필름,<sup>38,39</sup> 에너지소자<sup>40,41</sup> 등의 다양한 스마트 디바이스에 응용되고 있다.

Table 1에 최근 마이크로 핫엠보싱이 적용된 응용사례에 대해 정리하였다. 일정한 강도 이상을 가지며 미리 제작된 기판을 사용하는 경우는 Hard Type으로, 공정 중에 레진 등을 이용하여 기판 또는 박막을 형성하는 경우는 Soft Type으로 분류하였다.

투명전극(TCE, Transparent Conductive Electrode)은 최근 더욱 주목받고 있는 접는 디스플레이 등에 적용될 수 있는 핵심기술로서 폴리머 기판에 금속 재료를 마이크로/나노 사이즈로 메시 형태로 패터닝함으로써 전기 저항성과 유연성을 확보하는 방법이 연구되고 있다. 마이크로 핫 엠보싱을 이용하여 기판에 음각 패턴을 형성한 후 여기에 금속 잉크를 채워 투명전극을 형성하면 높은 투과도와 적절한 전도도를 얻을 수 있다.<sup>23,24</sup>

용액 공정을 이용한 박막 트랜지스터(TFT, Thin-Film Transistor)의 제작은 고비용의 포토리소그래피 공정을 탈피하기 위하여 다양한 인쇄기법이 연구되었는데, 최근 마이크로 핫엠보싱 기술과 산화물 젤(Oxide Gel)의 열가소성을 이용하여 패턴을 형성하는 기법이 제안되었다.<sup>25</sup> 이 기법은 양각 금형에 의해 열과 압력이 가해진 부분만을 경화하고 그 외 부분은 Dry Etching 공정으로 제거하는 방법을 사용하여, 전공정을 용액공정으로 TFT를 제작하는 데 성공하였다.

최근 실시된 가장 많은 응용연구 분야 중 하나는 광학부품의 제작에 관한 연구로 다양한 태양광발전소자, 디스플레이, LED, 레이저 등의 능동광학소자에서 광추출 효율을 높이는 광학구조를 형성하는 것이다. 고려대학교 이현 교수 연구팀<sup>26</sup>에서는 GaN 기반의 LED에 ZnO 나노파티클 레진으로 고종횡비(3.2)를 가지는 500 nm직경의 나노기둥 배열을 형성하여 광추출 효율을 19.6%

향상시켰다고 보고하였다. 이 외에도 다양한 광학재료 등에 적용이 되었는데, Pourdavoud 등<sup>27</sup>은 레이저에 필요한 발진기 (Resonator) 구조를 기관이 아닌 Organo-Metal Halide Perovskite 박막에 마이크로 핫엠보싱으로 200 nm 직경의 홀(Hole) 배열로 직접 형성하여, 재결정화와 표면 평활효과가 동시에 일어나게 하였다. Chen 등<sup>28</sup>은 플라스틱 형광체(Plastic Scintillator)에 나노 홀 패턴을 형성하여 광추출 효율을 64%까지 향상시킬 수 있었다. 가장 최근에는 Hydroxypropyl Cellulose에 나노 홀 패턴을 형성하여, 생체적합성과 생분해성을 가지는 Plasmonic Crystal Film이 제안되었다.<sup>29</sup>

또 다른 광학부품으로는 Optical Grating이 있다. 수백 나노미터에서 수십 마이크로미터의 라인 패턴을 가지는 Optical Grating은 최근 PMMA<sup>30</sup>와 같은 광학적으로 투명한 폴리머 이외에도 Oxide Resist,<sup>31</sup> Thermoplastic Polyurethane,<sup>32</sup> Metal Foil,<sup>33</sup> Nanoparticle<sup>34</sup> 등 다양한 재료에 적용되었다.

그 이외의 광학 부품으로 Anti-Reflection 구조를 형성하여 OPV (Organic Photovoltaic)의 효율을 높이거나,<sup>35</sup> 나노기동 배열을 엠보싱하여 굴절율을 측정하는 센서<sup>36</sup>에 적용한 연구도 있었으며, PI 필름에 Line 패턴을 형성하여 액정의 분극 방향을 조절<sup>37</sup>하는 데 사용되기도 하였다.

초발수 필름은 생활 및 여러 산업적 필요가 큰 응용분야이다. Toosi<sup>38</sup> 등은 펄초레이저 가공을 통하여 다양한 표면 형상의 스테인레스 금형을 만들고 이를 핫엠보싱 공정으로 HDPE, PLA, PVC 등의 기관에 패턴을 형성하고 160° 이상의 접촉각을 가지는 초발수 표면을 제작하였다. 또한 Lv 등<sup>39</sup>은 마이크로 핫엠보싱 공정과 Electrohydrodynamic Patterning (EHDP)를 결합하여 초발수성과 초친수성이 조절가능한 고중형비의 나노구조를 개발하였다.

마지막으로 최근 에너지 하베스팅 소자로 주목받고 있는 Triboelectric Nanogenerator (TEG) 분야에도 마이크로 핫엠보싱이 적용되고 있다. TEG는 일함수가 다른 두 개의 재료를 접촉 또는 마찰시킬 때, 발생하는 전하와 그 전하의 상대적인 운동에 의해서 전류를 생성하는 에너지 하베스팅 소자이다. 마찰되는 표면의 접촉면을 증가시킬수록 발생하는 전력의 크기가 커지기 때문에, 접촉면에 다양한 나노패턴을 형성하는 연구가 이루어져 왔다. 2015년 포항공대 김동성교수 연구팀<sup>40</sup>은 Fluorinated Ethylene Propylene (FEP) 기관에 AAO Nano Mold를 이용하여 나노패턴을 형성하고 이로부터, 11 mW/m<sup>2</sup>의 전력을 생산할 수 있는 TEG를 보고하였고, 2018년에는 FEP 표면에 마이크로 파티클을 이용한 금형으로부터 핫엠보싱을 이용하여 마이크로 패턴을 형성하고 이로부터 30 V의 전압과 7.5 mA/m<sup>2</sup>의 출력을 가지는 TEG<sup>41</sup>가 발표되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 최근 5년 간의 마이크로 핫엠보싱 기술의 동향

에 대해서 알아보았다. 마이크로 핫엠보싱의 응용분야는 기존에 널리 사용되었던 마이크로 렌즈, 단순 광학 패턴, 마이크로유체 소자 제작에서 투명전극, 광학소자, 초발수필름, 에너지 발전 소자 등 다양한 응용분야로 확장되고 있다. 특히, 산화물 나노파티클, 페로브스카이트, 바이오매스 등 새로운 기능성 재료를 이용하여 마이크로/나노 크기의 패턴 구조를 형성함으로써 기존의 소자의 성능을 개선하는 데 큰 역할을 하고 있다.

또한, 마이크로 핫엠보싱의 단점을 극복하기 위하여 다양한 공정 개선의 연구도 이루어지고 있다. 패턴의 명확성을 확보하기 위하여 기존 공정에서 수치해석 모델과 실험 모델을 이용하여 각인/이형 공정 최적화를 수행하고, 공기 투과성 금형, Preheating 등의 새로운 공정 기법이 다양하게 시도되고 있다. 금형 제작의 용이성을 위하여 금속 3D 프린팅, 이광자 중합 Laser Direct Writing의 기법이 연구되기도 하였다.

향후 마이크로 핫엠보싱 기술은 산업적으로 유용하게 적용될 것으로 생각된다. 특히, 마이크로 핫엠보싱 방식의 투명전극은 폴더블 디스플레이용 터치스크린 등에 적용이 가능하며, 광추출층은 태양광 패널 및 대형 디스플레이의 효율을 개선하고 수명을 연장하는 데 기여할 수 있다. SPR 센서기술은 새로운 진단기기에, 그리고 대량생산에 적합한 핫엠보싱된 초발수 필름은 건축 및 농수산업에 상용화될 가능성이 클 것으로 예상된다.

마이크로 핫엠보싱은 공정이 단순하고 연속공정에 유리하므로 기능성 재료를 이용한 새로운 소자의 개발에 더 널리 사용될 것으로 생각되며, 공정의 개선을 통해 생산성과 패턴의 명확성을 향상시킬 수 있다면 앞서 설명한 다양한 응용제품의 양산화를 앞당기는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 아주대학교의 2018 교내연구 지원사업과 한국기계연구원의 2018년도 주요사업 및 산업통상자원부 산업기술혁신사업(N0002310)의 지원 하에 이루어졌습니다.

## REFERENCES

1. M. Worgull, "Hot Embossing - Modeling and Process Simulation," William Andrew, pp. 179-225, 2009.
2. Velten, T., Bauerfeld, F., Schuck, H., Scherbaum, S., Landesberger, C., et al., "Roll-to-Roll Hot Embossing of Microstructures," *Microsystem Technologies*, Vol. 17, No. 4, pp. 619-627, 2011.
3. Chang, C.-Y. and Tsai, M.-H., "Development of a Continuous Roll-to-Roll Processing System for Mass Production of Plastic Optical Film," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 25, No. 12, Paper No. 125014, 2015.
4. Peng, L., Wu, H., Shu, Y., Yi, P., Deng, Y., et al., "Roll-to-Roll

- Hot Embossing System with Shape Preserving Mechanism for the Large-Area Fabrication of Microstructures,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 87, No. 10, Paper No. 105120, 2016.
5. Rank, A., Lang, V., and Lasagni, A. F., “High Speed Roll to Roll Hot Embossing of Micrometer and Sub Micrometer Structures Using Seamless Direct Laser Interference Patterning Treated Sleeves,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 19, No. 11, pp. 1-8, 2017.
  6. Shan, X., Chen, S., Mohahidin, M. B., and Wei, J., “Development of a Roll-to-Roll Thermal Imprinting System with Seamless Belt-Type Template,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 087001, 2017.
  7. Demko, M. T., Cheng, J. C., and Pisano, A. P., “Rigid, Vapor-Permeable Poly (4-Methyl-2-Pentyne) Templates for High Resolution Patterning of Nanoparticles and Polymers,” *ACS Nano*, Vol. 6, No. 8, pp. 6890-6896, 2012.
  8. Nakajima, S., Takei, S., Zhou, Z., Maki, H., Sugahara, K., et al., “Development of Nanoimprint Lithography Template Materials Using Biomass,” *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 189-193, 2016.
  9. Takei, S. and Hanabata, M., “High-Resolution Nanopatterning of Biodegradable Polylactide by Thermal Nanoimprint Lithography Using Gas Permeable Mold,” *AIP Advances*, Vol. 7, No. 3, Paper No. 035110, 2017.
  10. Cadarso, V. J., Chidambaram, N., Jacot-Descombes, L., and Schiff, H., “High-Aspect-Ratio Nanoimprint Process Chains,” *Microsystems & Nanoengineering*, Vol. 3, p. 17017, 2017.
  11. Chidambaram, N., Kirchner, R., Altana, M., and Schiff, H., “High Fidelity 3D Thermal Nanoimprint with UV Curable Polydimethyl Siloxane Stamps,” *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 34, No. 6, Paper No. 06K401, 2016.
  12. Lin, T.-Y., Do, T., Kwon, P., and Lillehoj, P. B., “3D Printed Metal Molds for Hot Embossing Plastic Microfluidic Devices,” *Lab on a Chip*, Vol. 17, No. 2, pp. 241-247, 2017.
  13. Jeong, H., La, M., Park, S. J., and Kim, D. S., “Roll-to-Flat Texturing System with Infrared Preheating for Manufacturing a Microfluidic Device,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 107, pp. 10-16, 2013.
  14. Kim, S., Son, Y., Park, H., Kim, B., and Yun, D., “Effects of Preheating and Cooling Durations on Roll-to-Roll Hot Embossing,” *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 21, No. 1, pp. 164-171, 2015.
  15. Jo, J., Kim, W., Kim, K.-Y., and Choi, Y.-M., “Focused-Infrared-Light Assisted Roll-to-Roll Hot Embossing,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 199-203, 2017.
  16. Jiang, M., Lin, S., Jiang, W., and Pan, N., “Hot Embossing Holographic Images in BOPP Shrink Films Through Large-Area Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography,” *Applied Surface Science*, Vol. 311, No. pp. 101-106, 2014.
  17. Deng, Y., Yi, P., Peng, L., Lai, X., and Lin, Z., “Flow Behavior of Polymers During the Roll-to-Roll Hot Embossing Process,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 25, No. 6, Paper No. 065004, 2015.
  18. Cheng, G., Sahli, M., Gelin, J.-C., and Barriere, T., “Physical Modelling, Numerical Simulation and Experimental Investigation of Microfluidic Devices with Amorphous Thermoplastic Polymers Using a Hot Embossing Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 229, pp. 36-53, 2016.
  19. Omar, F., Brousseau, E., Elkaseer, A., Kolew, A., Prokopovich, P., et al., “Development and Experimental Validation of an Analytical Model to Predict the Demoulding Force in Hot Embossing,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 24, No. 5, Paper No. 055007, 2014.
  20. Suzuki, K., Youn, S.-W., Hiroshima, H., and Takagi, H., “Nano-Patterning on Soluble Block Copolymer Polyimide by Nanoimprint,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 8, pp. 1-4, 2015.
  21. Brazil, O., Usov, V., Pethica, J. B., and Cross, G. L., “Large Area Thermal Nanoimprint Below the Glass Transition Temperature Via Small Amplitude Oscillatory Shear Forming,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 182, No. pp. 35-41, 2017.
  22. Yun, D., Kim, J., Kim, M., Kim, D. Y., Kwon, J., et al., “Impact Print-Type Hot Embossing Process Technology,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 20, No. 9, Paper No. 1800386, 2018.
  23. Yu, J.-S., Jung, G. H., Jo, J., Kim, J. S., Kim, J. W., et al., “Transparent Conductive Film with Printable Embedded Patterns for Organic Solar Cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 109, pp. 142-147, 2013.
  24. Kim, G., Shin, J.-H., Choi, H.-J., and Lee, H., “Fabrication of Transparent and Flexible Ag Three-Dimensional Mesh Electrode by Thermal Roll-to-Roll Imprint Lithography,” *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 16, No. 9, p. 2500, 2014.
  25. Hirose, D., Koyama, H., Fukada, K., Murakami, Y., Satou, K., et al., “All Solution Printed Oxide Thin-Film Transistors by Direct Thermal Nanoimprinting for Use in Active Matrix Arrays,” *Physica Status Solidi(A)*, Vol. 214, No. 1, Paper No. 1600397, 2017.
  26. Byeon, K.-J., Cho, J.-Y., Jo, H.-B., and Lee, H., “Fabrication of High-Brightness GaN-Based Light-Emitting Diodes Via Thermal Nanoimprinting of ZnO-Nanoparticle-Dispersed Resin,” *Applied Surface Science*, Vol. 346, pp. 354-360, 2015.
  27. Pourdavoud, N., Wang, S., Mayer, A., Hu, T., Chen, Y., et al., “Photonic Nanostructures Patterned by Thermal Nanoimprint Directly into Organo Metal Halide Perovskites,” *Advanced Materials*, Vol. 29, No. 12, pp. 1-6, 2017.
  28. Chen, X., Liu, B., Wu, Q., Zhu, Z., Zhu, J., et al., “Enhanced Light Extraction of Plastic Scintillator Using Large-Area Photonic Crystal Structures Fabricated by Hot Embossing,” *Optics Express*, Vol. 26, No. 9, pp. 11438-11446, 2018.

29. Espinha, A., Dore, C., Matricardi, C., Alonso, M. I., Goñi, A. R., et al., "Hydroxypropyl Cellulose Photonic Architectures by Soft Nanoimprinting Lithography," *Nature Photonics*, Vol.12, pp.343-348, 2018.
30. Khaleque, T., Svavarsson, H. G., and Magnusson, R., "Fabrication of Resonant Patterns using Thermal Nano-Imprint Lithography for Thin-Film Photovoltaic Applications," *Optics Express*, Vol. 21, No. 104, pp. A631-A641, 2013.
31. Dinachali, S. S., Saifullah, M. S., Ganesan, R., Thian, E. S., and He, C., "A Universal Scheme for Patterning of Oxides Via Thermal Nanoimprint Lithography," *Advanced Functional Materials*, Vol. 23, No. 17, pp. 2201-2211, 2013.
32. Schauer, S., Meier, T., Reinhard, M., Röhrig, M., Schneider, M., et al., "Tunable Diffractive Optical Elements Based on Shape-Memory Polymers Fabricated Via Hot Embossing," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, No. 14, pp. 9423-9430, 2016.
33. Romano, L., Vila-Comamala, J., Kagias, M., Vogelsang, K., Schiff, H., et al., "High Aspect Ratio Metal Microcasting by Hot Embossing for X-Ray Optics Fabrication," *Microelectronic Engineering*, Vol. 176, pp. 6-10, 2017.
34. Hauser, H., Herter, B., Hofmann, C. L., Höhn, O., Kübler, V., et al., "Soft Thermal Nanoimprint of PMMA Doped with Upconverter Nanoparticles," *Microelectronic Engineering*, Vols. 187-188, pp. 154-159, 2018.
35. Kettle, J., Rees, A., Brousseau, E., and Horie, M., "Low-Temperature Thermal Nanoimprint Lithography of Anti-Reflective Structures for Flexible Low Band Gap Organic Solar Cells," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, No. 10, Paper No. 105102, 2013.
36. Yang, S.-C., Hou, J.-L., Finn, A., Kumar, A., Ge, Y., et al., "Synthesis of Multifunctional Plasmonic Nanopillar Array Using Soft Thermal Nanoimprint Lithography for Highly Sensitive Refractive Index Sensing," *Nanoscale*, Vol. 7, No. 13, pp. 5760-5766, 2015.
37. Siqing, S., Wu, H., and Takahara, A., "Molecular Reorientation of Polyimide Film Induced by Thermal Nanoimprint Lithography and Liquid Crystals Alignment on It," *Polymer*, Vol. 72, pp. 113-117, 2015.
38. Toosi, S. F., Moradi, S., Ebrahimi, M., and Hatzikiriakos, S. G., "Microfabrication of Polymeric Surfaces with Extreme Wettability Using Hot Embossing," *Applied Surface Science*, Vol. 378, pp. 426-434, 2016.
39. Lv, G., Liu, Y., Shao, J., Tian, H., and Yu, D., "Facile Fabrication of Electrohydrodynamic Micro/Nanostructures with High Aspect Ratio of a Conducting Polymer for Large Scale Superhydrophilic/Superhydrophobic Surfaces," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 303, No. 2, Paper No. 1700361, 2018.
40. Choi, D., Yoo, D., and Kim, D. S., "One Step Fabrication of Transparent and Flexible Nanotopographical Triboelectric Nanogenerators Via Thermal Nanoimprinting of Thermoplastic Fluoropolymers," *Advanced Materials*, Vol. 27, No. 45, pp. 7386-7394, 2015.
41. Saadatnia, Z., Esmailzadeh, E., and Naguib, H. E., "High Performance Triboelectric Nanogenerator by Hot Embossing on Self Assembled Micro Particles," *Advanced Engineering Materials*, Vol.1700957, pp. 1-9, 2018.

#### Seung-Hyun, Lee



received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering, from the department of Mechanical Engineering of the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea, in 2008. Now, he is a senior researcher in the department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials, His research interest is roll-to-roll printing, coating and patterning system.  
E-mail: shlee79@kimm.re.kr

#### Jeongdai Jo



received his Ph.D. degree in mechanical engineering from Tohoku University, Japan. Since 1996, he has been working with the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). He is currently a principal researcher at KIMM. His research interests include micro/nanoscale printing / coating / patterning and developing new fabrication process for organic and flexible devices.  
E-mail: micro @kimm.re.kr

#### Kwang-Young Kim



received his Ph.D. degree in mechanical engineering department from the Dong-A University, Republic of Korea in 1992. Now, he is a principal researcher in printed electronics department of the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). Since joining KIMM at 1981, he has been working on the machines and devices design for printing electronics. His interests include offset printing machines, OTFT, flexible display and sensors application for printed electronics devices.  
E-mail: kykim@kimm.re.kr

#### Young-Man Choi



received his Ph. D degree from the department of Mechanical Engineering of the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea, in 2008. He is now an assistant professor in Ajou University, Republic of Korea. His research interests include precision machine design and manufacturing process for printed electronics.  
E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr