

Focused Infrared Light를 이용한 롤투롤 핫엠보싱

Focused-Infrared-Light Assisted Roll-to-Roll Hot Embossing

조정대¹, 김우섭¹, 김광영¹, 최영만^{2,#}

Jeongdai Jo¹, Wooseop Kim¹, Kwang-Young Kim¹, and Young-Man Choi^{2,#}

¹ 한국기계연구원 인쇄전자연구실 (Department of Printed Electronics, Korea Institute of Machinery and Materials)

² 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

Corresponding Author / E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-2342, FAX: +82-31-219-1611

KEYWORDS: Hot embossing (핫엠보싱), Imprinting (임프린팅), Infrared (적외선)

Hot embossing techniques are used to engrave patterns on plastic substrates. Roll based hot embossing uses a heated roll for a continuous process. A heated roll with relief patterns is impressed on a preheated plastic substrate. Then, the substrate is cooled down quickly to prevent thermal shrinkage. The roll speed is normally very slow to ensure substrate temperature increase up to the glass transition temperature. In this paper, we propose a noncontact preheating technique using focused infrared light. The infrared light is focused as a line beam on a plastic substrate using an elliptical mirror just before entering the hot embossing roll. The mid range infrared light efficiently raises the substrate temperature. For preliminary tests, substrate deformation and temperature changes were monitored according to substrate speed. The experiments show that the proposed technique is a good possibility for high speed hot embossing.

Manuscript received: October 10, 2016 / Revised: December 22, 2016 / Accepted: January 2, 2017

1. 서론

핫엠보싱은 열가소성 수지와 금형을 이용하여 제품을 생산하는 기법으로, 패키징 산업, 전자 부품 산업에 널리 사용되고 있다. 이 중에서도 최근 마이크로 핫엠보싱 기술은¹ 마이크로미터 또는 그 이하의 패턴을 플라스틱 기판 위에 형성할 수 있는 기술로서 미소유체 소자(Microfluidic Device),² 홀로그램,³ 마이크로렌즈 어레이 시트⁴ 등에 사용되고 있다. 핫엠보싱을 이용한 생산 공정은 생산성 향상을 위해 롤투롤(Roll-to-Roll)로 연속적으로 기판이 공급되는 구조를 가지는 경우가 많으며, 롤투롤 핫엠보싱은 예열(Preheating), 엠보싱(Embossing), 냉각(Cooling) 과정을 거치게 된다. 가열된 엠보싱 롤에 의해 기판을 유리 전이 온도(Glass Transition Temperature)까지 상승시키기에는 접촉시간이 짧기 때문에 예열 과정을 통하여 유리 전이 온도 근처까지 상승시킨 다음 엠보싱하게 된다. 따라서 예열과정은 더 깊은 각인 깊이(Embossed Depth)를 얻을 수 있게 한다.⁵

예열을 위한 방법은 가열롤의 접촉,⁶ 유체,⁷ 세라믹 히터,^{5,8} 자외선(UV),⁹ 적외선(Infrared)^{10,11} 등의 방법이 사용되고 있다. 가열

롤에 접촉시키는 방법은 기판에 직접적으로 전도를 통하여 열을 전달하는 방법으로 효율이 좋지만 별도의 가열롤을 사용하거나 롤의 온도를 유리전이온도 이상으로 높게 유지해야 할 필요가 있다. 유체를 이용하는 방법도 좋은 열전달 효율을 가지나 롤투롤로 구성하기에는 그 구조가 복잡하다. 비접촉으로 가열하는 방법인 세라믹 히터나 광원은 기판에 접촉이나 오염이 없이 가열할 수 있는데, 이 중에서 세라믹 히터를 이용하는 방법은 원적외선(Far Infrared)과 대류에 의한 열전달을 이용하나 열효율이 낮고 균일도 확보가 쉽지 않다. 자외선 광원을 이용하는 방법은 균일한 조사가 가능하지만 낮은 광 에너지 때문에 큰 전력의 UV 램프가 필요하고 자외선에 의한 기판의 손상이 발생할 가능성이 있다. 마지막으로 적외선을 이용하는 방법은 구조가 간단하고 복사열을 직접 전달하여 열전달 효율이 높다.

이 논문에서는 롤투롤 핫엠보싱 기술에 있어서 기판의 변형을 최소화하는 동시에 엠보싱 속도를 높이기 위하여, 집속된 중적외선광(Focused Mid-Range Infrared Light, FIL)을 이용하여 기판을 예열하는 방법을 제안한다. 중적외선광은 플라스틱 기판에 효율적으로 열에너지를 전달할 수 있다. FIL은 선형 적외선 램프와

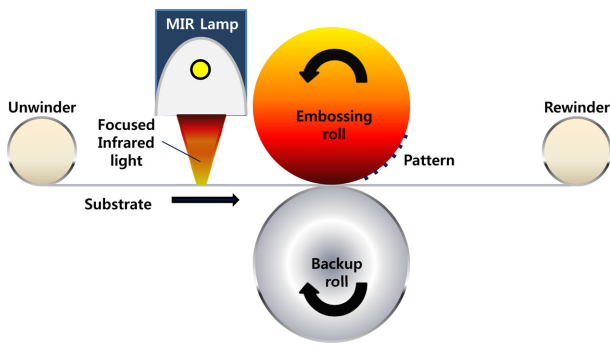


Fig. 1 Schematic diagram of the roll-to-roll hot embossing system using a focused infrared light

금속 타원경(Elliptic Mirror)으로 구성되며, 엠보싱 롤 바로 전에 라인빔을 기판에 집광하여 기판이 적절한 온도에 도달할 수 있도록 한다. 이 방법은 가열되는 Footprint를 줄이고, 짧은 시간에 온도를 상승시킬 수 있는 장점이 있다.

2. Experimental Setup

2.1 롤투롤 핫엠보싱 시스템

Fig. 1은 제안된 롤투롤 핫엠보싱 시스템을 보여준다. 엠보싱 롤은 표면에 마이크로 사이즈의 양각 패턴을 가지고 있으며, 20 - 200°C로 온도를 조절할 수 있다. Unwinder에서 공급된 기판은 FIL에 의해 예열되고 엠보싱 롤과 백업롤을 통과하면서 압력과 열을 받아 엠보싱된다. 압력은 롤의 좌우에서 서보모터에 의해 0 - 300 kgf까지 조절될 수 있다. 이후 기판은 자연 냉각 또는 강제 냉각된 후 Rewinder 롤에 되감김된다.

FIL은 선형 적외선 램프와 연마된 알루미늄 타원경으로 구성되며, 램프의 주변과 타원경은 수냉으로 냉각된다. FIL로부터 나온 적외선은 타원경에 의해 기판상에 라인빔으로 집광된다. FIL은 최대한 엠보싱 롤에 가까이 설치되어야 하나 램프의 구조상 두 롤이 접촉하는 닙(Nip)으로부터 약 100 mm 떨어진 위치에 설치된다.

2.2 Focused Infrared Light

효율적인 예열을 위해서는 적외선의 복사에너지의 흡수율이 중요하다. 일반적으로 적외선 램프는 Near-Range IR (NIR), Mid-Range IR (MIR)의 2 종류가 사용된다. NIR은 약 1.1 μm의 파장에서 최대에너지를 가지고 MIR은 약 1.8 μm에서 최대에너지를 가진다. Fig. 2는 PET 2종과 PEN 1종에 대해 흡광도를 측정할 것이다. PET와 PEN 모두 2.2 μm 이상에서 흡광도가 증가하며, 그 이하에서는 적외선광의 흡수가 매우 적다. 따라서 PET, PEN과 같은 기판을 가열하기 위해서는 MIR이 NIR에 비해 효율적이라고 할 수 있다. 이를 검증하기 위하여 MIR, NIR 두 광원에 의해 PEN Film이 시간에 따라 온도가 어떻게 변하는지 실험한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. NIR의 경우에 PEN Film은 Reference의 온도와 5도 이내로 거의 상승하지 않지만, MIR의 경우

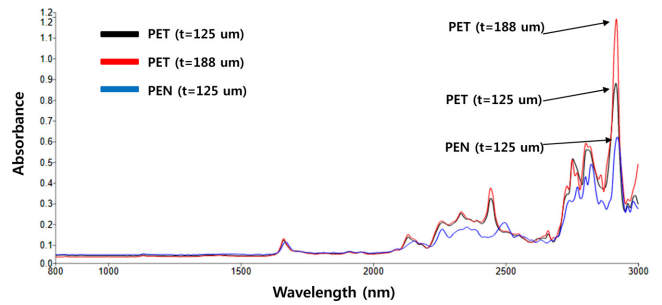


Fig. 2 Light absorbance of plastic films

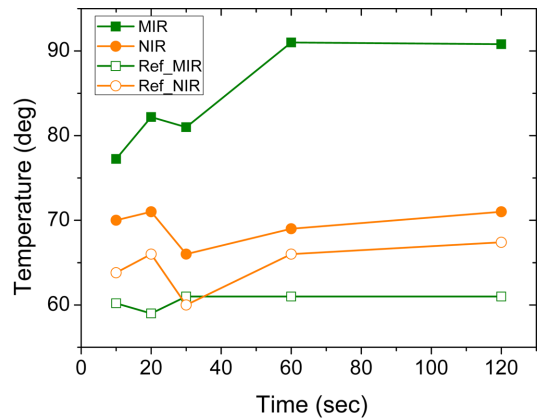


Fig. 3 Heating trends of MIR and NIR heater

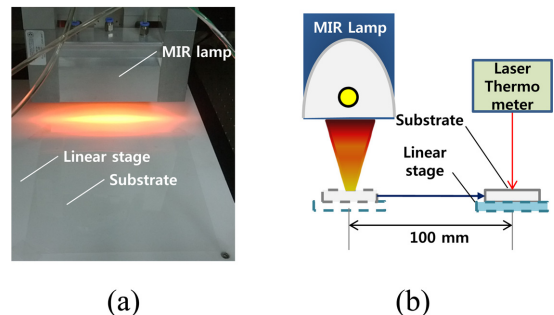


Fig. 4 Experimental setup for measurement of preheated temperature and level of deformation: (a) Photograph of the setup, (b) Schematic diagram for measurement

Reference 온도와 비교하여 시간이 갈수록 온도가 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 NIR의 경우는 광에너지를 거의 흡수하지 못해 온도 상승이 제한적이지만, MIR에 의해서는 기판이 중적외선 흡수 파장대에 의해 광에너지를 흡수하여 온도가 상승하기 때문이다.

3. 실험결과

3.1 FIL에 의한 온도변화 및 변형

기판이 연속적으로 이송될 때, FIL에 의해 온도 상승과 기판의 변형 정도를 평가하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 꾸미고

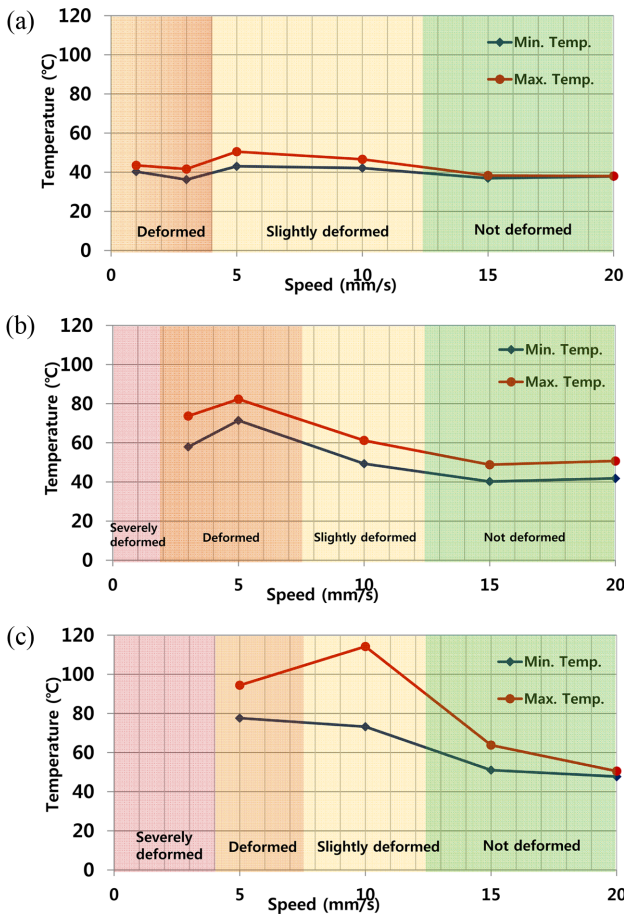


Fig. 5 Preheated temperature and deformation of the substrate, PET A for infrared power of (a) 60%, (b) 80%, (c) 100%

실험을 진행하였다. 기관은 선형스테이지 상에서 일정한 속도로 이동하면서, FIL을 통과하고, 통과 후 100 mm 지점의 온도를 적외선 레이저 온도센서(835-T1, Testo)를 이용하여 측정하였다. 기관은 두께 188 μm 의 PET A (O321E1, Mitsubishi)와 두께 125 μm 의 PET B (Melinex ST504, Dupont Teijin)을 사용하였다. FIL에 사용된 램프는 색온도 1600 K의 증적외선 램프(106656-006, Research Inc.)가 사용되었다. 타원경의 초점간 거리는 약 100 mm이며, 타원경에 의한 라인빔의 폭은 약 5 mm이다.

Fig. 5는 PET A에 대해 이동 속도(1, 3, 5, 10, 15, 20 mm/s)와 램프파워(60, 80, 100%)에 따른 기관온도와 변형 정도를 도시한 결과이다. 60%의 램프파워에서는 저속에서나 고속에서나 최대 온도가 약 50°C로 충분한 에너지의 공급이 이루어지지 않고 있다. 저속에서는 에너지의 공급은 충분하지만 100 mm를 이동하는 시간이 길어 냉각되므로 온도가 낮아지며, 고속에서는 냉각효과는 줄어들지만 공급에너지가 적어 온도가 낮은 것으로 생각된다.

램프의 파워를 80%로 높이면, 에너지의 공급이 증가하고 최종적인 열에너지가 최대가 되는 속도는 약 5 mm/s이 된다. 이 때, 전체적으로 온도는 상승 하지만 저속에서 기관이 심각하게 변형된다. 램프의 파워를 100%로 높이면, 최종적인 열에너지가 최대가 되는 속도는 약 10 mm/s이 되고 이 때의 온도는 PET A의 유리 전이 온도에 근접하게 된다. 하지만 기관의 변형을 고려하면,

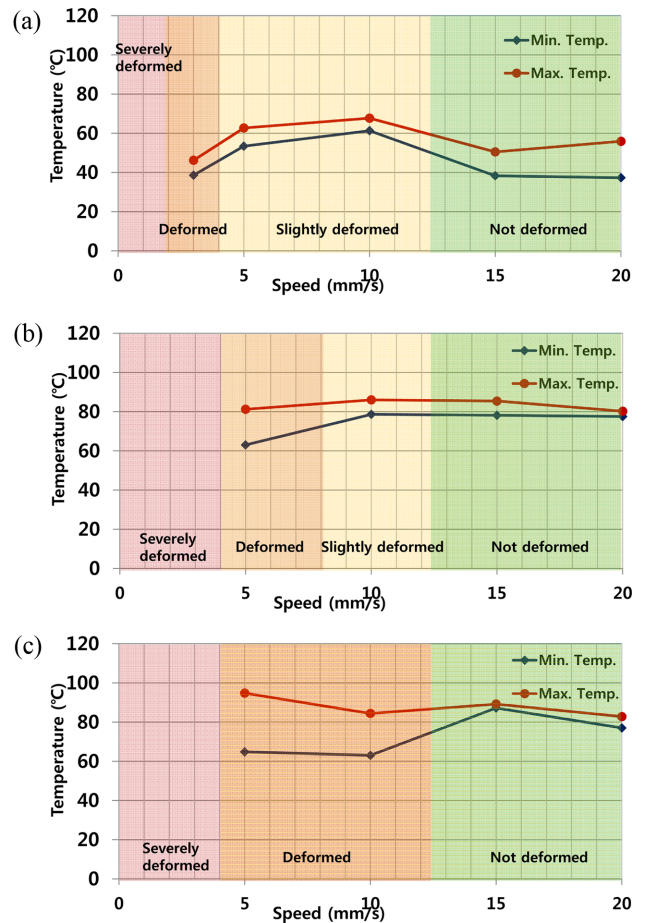


Fig. 6 Preheated temperature and deformation of the substrate, PET B for infrared power of (a) 60%, (b) 80%, (c) 100%

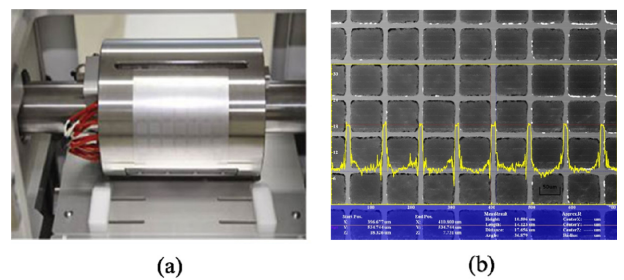


Fig. 7 Experimental setup for hot embossing: (a) Hot embossing system, (b) Mask pattern

10 mm/s에서는 다소 변형이 발생하므로 변형을 최소화하는 조건을 10 mm/s 보다 높은 속도가 적합할 것으로 생각된다. Fig. 6은 PET B에 대한 실험결과이다. PET B는 PET A에 비해 두께가 얇은 기관으로서 온도 상승폭이 크다. PET B의 경우, 램프 파워 80% 이상 속도 10 mm/s 이상에서 적합한 예열 성능을 얻을 것으로 기대할 수 있다.

3.2 핫엠보싱 테스트

이 절에서는 Fig. 7(a)에 도시한 물투를 핫 엠보싱 장치를 이용하여 FIL에 의한 예열과 핫 엠보싱 테스트를 수행하였다. 핫

Table 1 Pattern depth according to infrared lamp power and speed (PET A)

Power (%)	Roll speed (mm/s)	Pattern depth (μm)			Damage
		Roll temp. ($^{\circ}\text{C}$)			
		20	40	60	
0	15	2.38 (Roll 100 $^{\circ}\text{C}$)			X
60	5	0.23	0.73	1.20	X
80	5	0.38	0.81	2.41	O
80	10	0.42	0.82	1.08	X
100	10	0.26	1.21	1.92	O
100	15	0.43	1.14	1.69	X

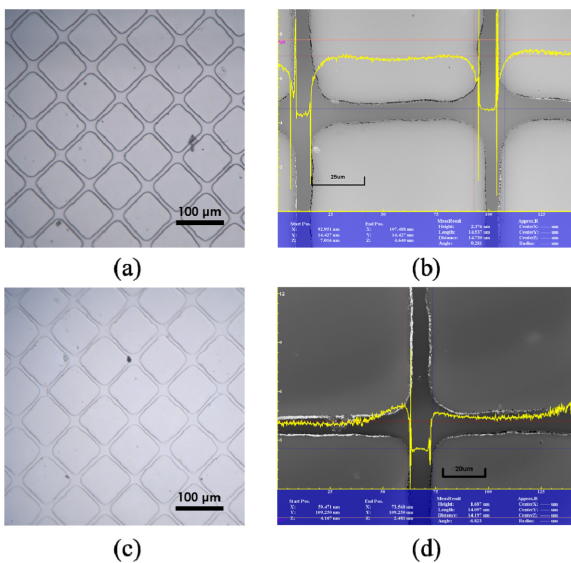


Fig. 8 Embossed patterns: (a) Microscope image, (b) Confocal image in case of no preheating (Roll temperature 100 $^{\circ}\text{C}$), (c) Microscope image, (d) Confocal image in case of FIR preheating (100% power, 15 mm/s speed)

엠보싱을 위한 마스크는 SUS 기판 상에 니켈 도금법으로 제작하였으며, Fig. 7(b)에 도시된 것처럼 선폭은 약 15 μm , 선 간격은 70 μm , 높이는 약 10 μm 인 메쉬 패턴을 가지고 있다. 기판은 변형에 좀 더 강한 PET A를 사용하여 테스트하였으며, 압력은 500 kgf로 하였다. FIL에 의한 예열 효과를 확인하기 위하여 예열 조건인 램프 파워와 기판 속도를 바꾸면서 실험하였고, 각 예열 조건에서 엠보싱 롤을 20 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 경우에 대하여 각인 깊이를 측정하였다. 각인 깊이는 Laser Confocal Microscope (OPTELICSR C130, Lasertec)을 이용하여 측정되었다.

Table 1에 엠보싱 실험결과를 나타하였다. 먼저 FIL을 사용하지 않고 엠보싱 롤을 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하고 기판 속도 15 mm/s로 하였을 경우는 약 2.38 μm 의 깊이를 얻을 수 있다(Figs. 8(a)와 8(b)). 마스크의 패턴 높이는 약 10 μm 이지만 선 간격이 넓지 않으므로 엠보싱되는 깊이는 크지 않다. 램프 파워 80%, 이상 속도를 10 mm/s로 실험한 경우는 약간의 기판의 변형이 존재하지만 롤을 60 $^{\circ}\text{C}$ 정도로만 가열해도 롤을 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 경우와

비슷한 각인 깊이를 가질 수 있다. 램프 파워 100%, 이상 속도를 15 mm/s로 한 경우는 롤을 60 $^{\circ}\text{C}$ 정도로만 가열해도 롤을 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 경우의 70%에 해당하는 깊이(Fig. 8(d))로 기판의 변형없이 엠보싱할 수 있다. 이 경우의 엠보싱된 패턴의 형상은 Fig. 8(c)와 같으며 깊이 외의 형상은 거의 Fig. 8(a)와 동일함을 알 수 있다.

이 결과는 롤의 온도를 100 $^{\circ}\text{C}$ 이상으로 가열하지 않고도 FIL을 통한 예열을 통해 각인 깊이를 확보할 수 있음을 말해주며, 동일한 온도의 롤을 사용할 경우에는 각인 깊이를 더 크게 하거나 기판 속도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

4. 결론

앞으로의 마이크로 핫 엠보싱에서는 패턴의 사이즈가 서브 마이크로미터 수준으로 감소하고 생산성 향상을 위해 대면적인 패턴이 적용될 것이다. 기존의 롤을 직접 가열하는 방식의 핫 엠보싱은 롤의 높은 온도에 따른 기계적인 변형을 야기하여 균일도 및 패턴 위치 정밀도에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 예열을 통하여 롤의 온도를 낮추거나 속도를 높이는 방향의 연구가 진행될 것으로 보인다.

이 논문에서는 롤투를 핫엠보싱 공정에 있어서 새로운 예열방법인 Focused Infrared Light를 제안하였다. 기판의 예열에 있어서는 중적외선(MIR)이 효과적인 광원임을 밝히고, 예열조건의 기초적인 조합에 따른 핫엠보싱 실험을 통해서 FIL을 이용한 예열방법이 엠보싱 롤만을 가열하는 경우에 근접한 각인 깊이를 가짐을 확인하였다.

추후 좀 더 분석적인 공정연구를 통하여 FIL 예열이 패턴의 정밀도 및 균일도에 미치는 영향과 엠보싱 속도 향상을 위한 최적의 예열조건을 알아보고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2016학년도 아주대학교 정찰연구비와와 한국기계연구원 2016주요사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Peng, L., Deng, Y., Yi, P., and Lai, X., "Micro Hot Embossing of Thermoplastic Polymers: A Review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 24, No. 1, Paper No. 013001, 2013.
- Focke, M., Kosse, D., Müller, C., Reinecke, H., Zengerle, R., et al., "Lab-on-a-Foil: Microfluidics on Thin and Flexible Films," *Lab on a Chip*, Vol. 10, No. 11, pp. 1365-1386, 2010.
- Xie, D., Chang, X., Shu, X., Wang, Y., Ding, H., et al., "Rapid Fabrication of Thermoplastic Polymer Refractive Microlens

- Array Using Contactless Hot Embossing Technology,” *Optics Express*, Vol. 23, No. 4, pp. 5154-5166, 2015.
4. Leech, P. and Lee, R., “Hot Embossing of Grating-Based Optically Variable Images in Thermoplastic Acrylic Lacquer,” *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 12, pp. 4428-4434, 2007.
 5. Yeo, L. P., Ng, S. H., Wang, Z., Wang, Z., and De Rooij, N. F., “Micro-Fabrication of Polymeric Devices Using Hot Roller Embossing,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, No. 4, pp. 933-936, 2009.
 6. Liedert, R., Amundsen, L. K., Hokkanen, A., Mäki, M., Aittakorpi, A., et al., “Disposable Roll-to-Roll Hot Embossed Electrophoresis Chip for Detection of Antibiotic Resistance Gene Meca in Bacteria,” *Lab on a Chip*, Vol. 12, No. 2, pp. 333-339, 2012.
 7. Chang, J.-H. and Yang, S.-Y., “Development of Fluid-Based Heating and Pressing Systems for Micro Hot Embossing,” *Microsystem Technologies*, Vol. 11, No. 6, pp. 396-403, 2005.
 8. Liu, S. J., Huang, C. C., and Liao, C. T., “Continuous Infrared Assisted Double Sided Roll to Roll Embossing of Flexible Polymer Substrates,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 52, No. 7, pp. 1395-1401, 2012.
 9. Fagan, M. D., Kim, B. H., and Yao, D., “A Novel Process for Continuous Thermal Embossing of Large Area Nanopatterns onto Polymer Films,” *Advances in Polymer Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 246-256, 2009.
 10. Lu, C., Juang, Y. J., Lee, L. J., Grewell, D., and Benatar, A., “Analysis of Laser/Ir Assisted Microembossing,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 45, No. 5, pp. 661-668, 2005.
 11. 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.