

◆ 특집 ◆ 자연모사공학을 위한 정밀가공기술

초발수 곡면표면 실리콘 사출금형성형기술

Silicone Injection Mold & Molding Technology for Super-hydrophobic Curved Surface

이성희<sup>1,✉</sup>, 강정진<sup>2</sup>, 이종원<sup>1</sup>, 홍석관<sup>2</sup>, 고종수<sup>3</sup>, 이제훈<sup>4</sup>, 노지환<sup>4</sup>  
Sung-Hee Lee<sup>1,✉</sup>, Jeong Jin Kang<sup>2</sup>, Jong-Won Lee<sup>1</sup>, Seok-Kwan Hong<sup>2</sup>, Jong Soo Ko<sup>3</sup>, Jae-Hoon Lee<sup>4</sup>  
and Jiwhan Noh<sup>4</sup>

1 한국생산기술연구원 금형기술센터 (Molds & Dies Technology Center, KITECH)

2 한국생산기술연구원 미래융합연구그룹 (Advanced Convergent Technology R&D Group, KITECH)

3 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

4 한국기계연구원 광응용기계연구실 (Dept. of High Density Energy Beam Processing, KIMM)

✉ Corresponding author: birdlee@kitech.re.kr, Tel: 032-624-4701)

Manuscript received: 2011.11.14 / Accepted: 2011.11.24

*In this study, silicone injection molding technology with curved thermoplastic insert was developed to produce super-hydrophobic surface. Thermoplastic insert part and injection mold design of base plastic cover were performed to produce cost effective hydrophobic surface part. An optimization process of part thickness for thermoplastic insert part was performed with transient thermal analysis under silicone over-molding process condition. Structural thermal analysis of silicone injection mold was also performed to obtain uniform temperature condition on the surface of micro-patterned mold core. Super-hydrophobic surface for the silicone injection molded part with thermoplastic insert could be verified from the measurement of contact angle. It was shown that the averaged contact angle was over 140°.*

Key Words: Liquid Silicone (액상실리콘), Injection Mold (사출금형), Curved Thermoplastic Insert (곡면열가소성 인서트), Degree of Cure (경화도), Over-molding (오버몰딩)

기호설명

CTE = coefficient of thermal expansion  
 $C_p$  = specific heat  
 $\rho$  = density  
 $k$  = thermal conductivity  
 $\nu$  = Poisson's ratio  
 $P$  = point of measurement  
 $q$  = heat flux  
 $t_b$  = thickness of base insert part  
 $t_s$  = thickness of silicone part  
 $T_{int}$  = initial temperature

1. 서론

액상실리콘수지(liquid silicone resin, LSR)는 사출 성형측면에서 고유동성이 확보된 수지이며, 내열성, 전기적 특성, 내습성, 내수성, 내약품성, 내후성 및 난연성의 특징을 갖는 수지이다. 특히 우수한 절연 및 내구특성으로 인해 오래 전부터 사용되어 왔으며, 전기, 전자, 자동차, 의료, 스포츠 및 여러 산업분야에서 응용범위가 계속적으로 확대되고 있는 실정이다. 단 재료가 일부 용도에 대하여 대응하지 못하는 점이 있고 다른 고무에 비해 고가라는 결점도 있어 금형기술에 대한 활발한 연구

가 진행되지 못하고 있는 실정이지만, 최근 전자 부품에서 초기 응력이 파손에 미치는 영향에 대한 연구,<sup>1</sup> 연료전지에서의 밀봉 재료로 사용시 사용수명에 대한 연구<sup>2</sup> 등이 계속적으로 진행되고 있다. 한편 본 연구와 같이 액상실리콘수지를 사용하여 초발수 특성 표면을 생성하기 위한 연구는 1997년 Barthlott and Neinhuis<sup>3</sup>의 연꽃잎 미세 돌기들이 초발수 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 근간으로 한다. 이러한 현상은 1940년대 이미 Cassie와 Baxter 그리고 Wenzel에 의해 예시되었으며, 최근 들어 많은 연구자들에 의해 여러 방법으로 연구가 진행되고 있다.<sup>4,6</sup> 또한 낮은 표면장력을 갖는 소재(PDMS)를 이용한 다양한 초발수 관련 연구들이 진행되었다.<sup>7-9</sup>

따라서 본 연구에서는 가격경쟁력이 확보된 열가소성(thermoplastic) 수지를 인서트로 사용한 두께 500 μm, 면적 50x50mm의 박막 LSR 곡면 인서트 사출금형기술에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 플라스틱 인서트 부품에 대한 부품설계, 금형설계 및 사출성형실험을 수행하며, 성형된 플라스틱 부품을 인서트로 사용하여 초발수 곡면 표면을 갖는 실리콘 복합사출성형을 위한 금형설계, 사출성형 및 초발수 특성 평가 시험을 수행하고자 한다.

**2. 초발수 부품 설계 및 금형제작**

**2.1 대면적(50x50mm) 초발수 곡면 설계**

본 연구를 수행하기 위해서는 일차적으로 플라스틱 인서트 부품에 대한 설계가 필요하게 된다. 플라스틱 인서트는 상대적으로 수지비용이 고가이면서 구조적으로 유연한 실리콘 수지를 보완하기 위한 부품이다. 가능한 한 최종부품에서 많은 부피를 차지하도록 설계하는 것이 경제적이거나, 실리콘 수지와와의 결합성을 고려하여 주의 깊게 설계할 필요가 있다. 본 연구에서 설계된 플라스틱 인서트 부품 형상을 Fig. 1에 제시하였다. 플라스틱 인서트의 전체 두께는 1mm이며, 초발수 표면 구현을 위한 실리콘 오버몰딩부 두께는 다음절에서 최적화 공정을 거쳐 두께 500 μm로 결정되게 된다. 또한 액상실리콘수지 오버 몰딩부 두께가 500 μm인 경우에 대한 게이트 위치 변화에 따른 사출성형 충전 특성변화 결과를 Fig. 1에서 같이 보여주고 있다. 제품의 외관상 플라스틱 인서트 부품의 외각에 핀포인트 형태로 게이트를 설계하는 것이 바람직하나, 중심부 두께의 박막 특성으로 인해

유동정체 현상이 발생됨을 확인할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 유동거리가 짧게 되도록 게이트를 설치하는 것이 필요하여, 그림에서와 같이 중앙에 게이트를 설계하여 완전한 유동이 발생할 수 있도록 하였다. 이때 사용된 수지는 제일모직 PC LB1020이다.

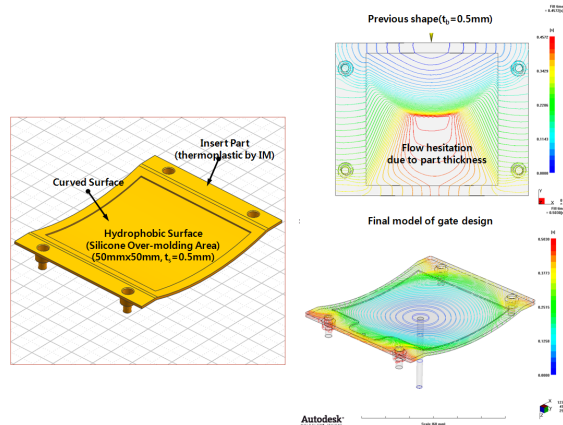


Fig. 1 Designed shape of thermoplastic insert part for silicone injection over-molding (tb=500 μm, ts=500 μm) and effect of gate location on filling pattern for thermoplastic insert part

한편 플라스틱 인서트는 일반 금형강 재료에 비해 매우 낮은 열전도 특성으로 인해, 액상실리콘 수지가 금형으로 유입시 금형의 열전달을 방해하는 절연물질로 작용할 수 있게 되므로, 액상실리콘 수지의 안정적인 경화 및 생산성을 확보하기 위해서는 플라스틱 인서트의 두께에 대한 최적화가 필요하다. Fig. 2에서는 액상실리콘 인서트 사출성형과정에서 발생할 수 있는 금형, 플라스틱 인서트 및 실리콘 수지 사이의 열전도 개념도를 보여주고 있다. 열가소성 플라스틱 인서트의 두께 변화에 따른 액상실리콘 수지와 인서트가 접하는 부분에 대한 온도 변화 특성을 얻기 위해 사출유동전용 프로그램인 Moldflow™, AMI 2011을 사용하여 반응성형(reactive molding) 해석을 수행하였으며, 반응점도모델과 Kamal 모델이 사용되었다. 이때 해석은 평판 인서트 모델에 대해 해석을 진행하였으며, 인서트 부품표면에 오버 몰딩되는 액상실리콘수지는 다우코닝의 SILASTIC 9280/50E이다. 해석에 사용된 열가소성 플라스틱 인서트의 기계적 물성치는 Table 1에 제시하였다.

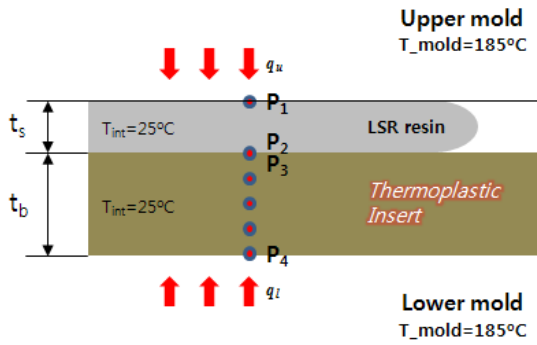


Fig. 2 Schematic diagram of LSR injection over- molding on thermoplastic insert part

Table 1 Mechanical properties of thermoplastic insert

Properties	Value	Unit
Density( $\rho$ )	1.288	g/cm <sup>3</sup>
Specific heat(Cp)	1,717	J/kg °C
Thermal conductivity(k)	0.23	W/m °C
Elastic modulus(E)	2,280	MPa
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.417	-
Coefficient of thermal expansion(CTE)	7.3e-05	1/°C

액상실리콘 수지가 오버몰딩될 플라스틱 인서트 부품의 두께 변화에 따른 인서트 상부의 과도 온도 변화결과를 Fig. 3 에 제시하였다. 액상실리콘의 수지 온도는 23 도, 금형온도는 185 도, 충전시간은 0.5 초로 일정하게 한 후 인서트 모델의 두께 변화(0.3~1.5mm)에 따른 액상실리콘수지와 접촉하게 되는 인서트 상부 중앙의 온도변화 결과를 보여주고 있다. 결과에서 보듯이 일정온도에 도달하기 위해서는 인서트 모델의 두께가 얇은 것이 좋으나, 0.3mm 와 같이 너무 얇게 되면 인서트 부품 자체의 사출성형이 매우 어렵게 된다. 그러나 두께가 1mm 이상인 경우는 금형온도에 도달되는데 15 초 이상이 소요되므로 생산성 측면에서는 불리하게 작용될 수 있다.

한편 Fig. 4 에서는 각 인서트 두께변화에 대한 액상실리콘수지의 금형과 접촉하는 상부면과 플라스틱 인서트와 접촉하는 하부면 중 모델의 중앙부분에서의 시간변화에 따른 경화도(degree of cure)를 보여주고 있다. 실리콘 수지의 상부는 185 도 금형면과 직접 접촉하게 되므로 인서트의 두께에 상관없이 일정한 경화도 경향을 보이나, 하부면의 경우는 플라스틱 인서트 두께의 증가에 따라 경화도가 지연됨을 볼 수 있다.

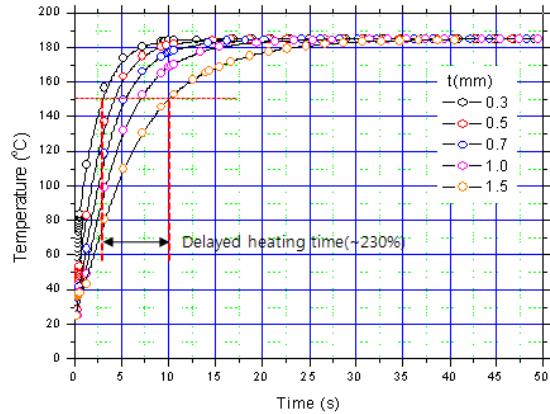


Fig. 3 Effect of thermoplastic insert part thickness on variation of transient temperature for the top surface of insert part at global center point

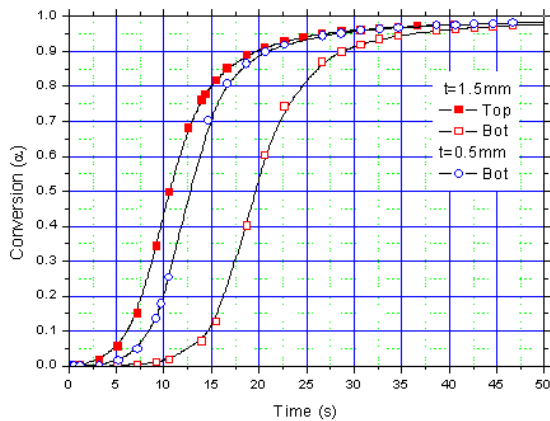


Fig. 4 Effect of thermoplastic insert part thickness on the conversion of liquid silicone rubber top and bottom surfaces

본 모델의 경우 취출이 가능한 경화도를 0.5 로 가정할 때 인서트의 두께가 0.3mm 인 경우도 상부 대비 약 2 초의 지연이 발생되고, 두께가 가장 두꺼운 1.5mm 인 경우는 약 8 초 이상의 경화도 지연이 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 지연 결과는 실리콘 성형부의 두께 방향 불균일 경화를 발생시켜 최종성형품의 품질에 영향을 미칠 수 있으므로, 인서트의 사출성형성을 고려하여 최소화 하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

## 2.2 대면적 곡면 초발수 금형코어 가공

초발수 곡면코어의 가공을 위해 레이저 미세가공기술<sup>10</sup>을 적용하였다. 미세 형상의 네크워크 구

조를 이용해서 초발수성을 더욱 향상시키는 방법으로 미세 메쉬 구조<sup>11</sup> 등 여러 가지가 제안되어 왔는데 본 연구에서는 레이저에 의한 미세 가공 특성을 고려하여 줄무늬형(stripe-type)의 미세 패턴을 곡면코어 상에 가공하였다. 레이저 미세 가공 선폭은 10 μm이며 가공면적은 50x50mm<sup>2</sup>이다. 곡면 가공을 위한 다이내믹 포커싱 범위는 3mm 이며, 레이저 파워 안정도는 2%/hr 이다. 이 때 레이저 파워 안정화를 위하여, 레이저 빔의 일부에 대한 측정치가 일정하게 유지되도록 레이저 파워를 피드백 제어하는 방식이 적용되었다. 일차적으로 대상코어의 곡면을 키포컬 방식을 이용하여 측정 후 측정된 곡면 데이터를 이용하여 폭이 10 μm 마이크로 그루브 패턴 가공이 가능하였으며, 그 결과를 Fig. 5 에 제시하였다.

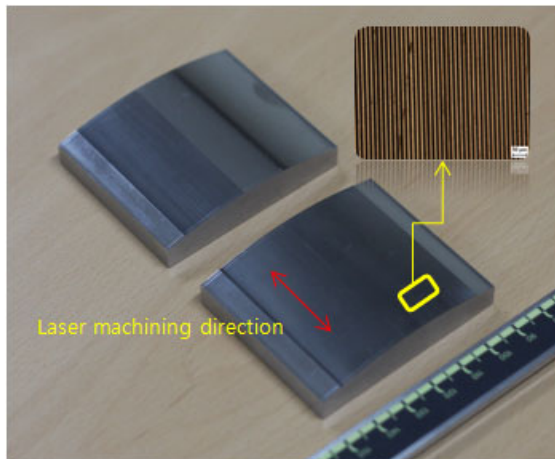


Fig. 5 Laser machined surface of core block and result of micro pattern

본 패턴가공에 사용된 레이저 파워는 10mW, 반복률 400kHz, 사용된 파장은 355nm 이며, 시편이 송속도는 100mm/sec, 반복 가공횟수 25 회이다. 대상 면적에 총 2,500 개의 미세 그루브가 가공되었다.

### 2.3 초발수 실리콘 금형설계 및 제작

앞 절의 결과들을 기초로 플라스틱 인서트 적용될 수 있는 실리콘 금형설계를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6(a)에 제시하였다. 금형은 2 캐비티 금형구조로 설계되었다. 본 금형의 설계에서 가장 중요시 된 부분 중의 하나가 금형의 온도측면이며,

3D 로 설계된 금형을 사용하여 금형의 온도분포를 파악하기 위한 열해석을 수행하였다. 해석의 대표적인 결과를 Fig. 6(b)에 제시하였으며, 해석을 통해 편차 6°C이내의 히터 설계가 가능하였다.

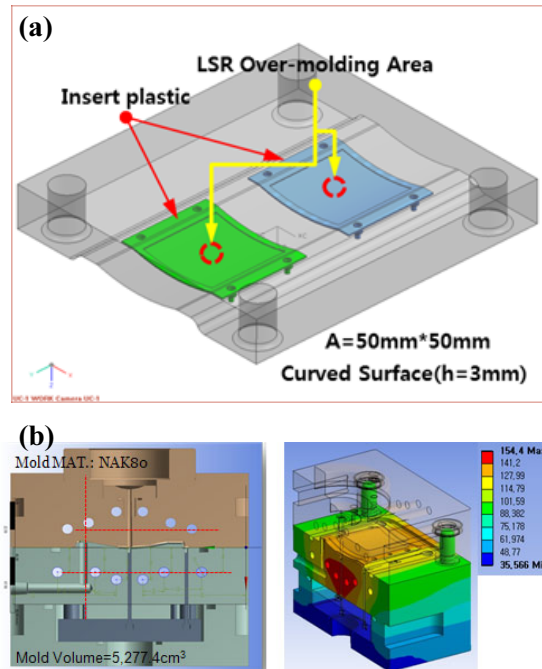


Fig. 6 Designed silicone injection mold with curved thermoplastic insert and result of thermal analysis for silicone injection mold with cartridge heater; (a) Layout of core block, (b) Heater cartridge layout and thermal response

### 3. 초발수 사출성형 및 접촉각

설계 제작된 플라스틱 인서트 사출금형 및 복합 곡면 실리콘 인서트 사출금형을 이용하여 사출 성형실험을 수행하였으며, 사출 성형된 시편을 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7(a)는 PC 로 성형된 플라스틱 인서트 시편으로 두께 500 μm의 실리콘 수지가 주입되어 완전히 결합된 시편을 보여주고 있다. 한편 사출성형된 Fig. 7(a)의 표면을 SEM 을 이용하여 미세측정을 수행하였으며, 표면 형상을 Fig. 7(b)에 제시하였다. 미세 표면에 대한 음각은 금형에 레이저 가공을 통해 제작되었으며, 그림에서 보듯이 레이저 가공특성에 따른 미세 표면 형상이 전사되어 있음을 확인할 수 있었다.

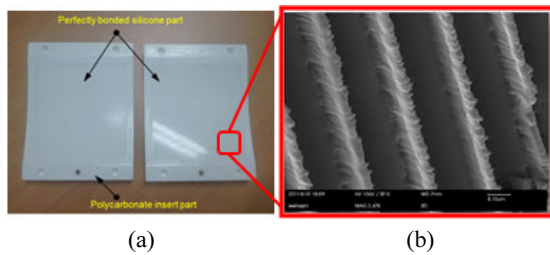


Fig. 7 Silicone over-molded specimen and SEM image of replicated micro-pattern

또한 이러한 표면이 초발수 특성을 나타내는지 확인하기 위해 접촉각 측정을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8 에 제시하였다. 제시된 결과는 Fig. 7(a)의 시편에 대해 9 개 지점의 평균 접촉각과 대표적인 접촉각 측정 결과이다. 성형된 2 캐비티 시편에 대해 평균 접촉각 143.84 도와 142.86 도를 얻을 수 있었다. 또한 표준편차는 각각 6.13 도와 6.26 도를 보이고 있다.

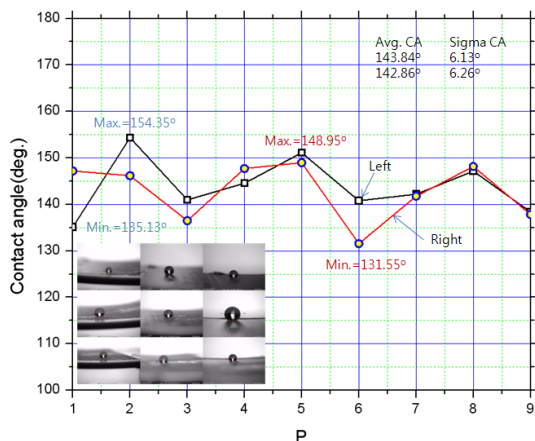


Fig. 8 Contact angle vs. measured position number and image of contact angle

#### 4. 결론

본 연구에서는 초발수 표면 구현을 위한 액상 실리콘의 인서트 사출금형기술에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 대면적(50mmx50mm) 곡면 플라스틱 인서트에 대한 부품설계, 금형설계, 금형제작 및 사출성형 실험을 수행하였고, 성형된 플라스틱 인서트 적용이 가능한 초발수 표면 구현용 복합 곡면 실리콘 사출금형설계, 제작 및 성형실험을 수행하였다. 인서트 부품의 설계에서는 500

μm급 박막 실리콘의 경화를 위한 플라스틱 두께의 최적화가 가장 중요하였으며, 실리콘 금형에서는 대면적의 실리콘 수지가 균일한 경화가 발생될 수 있도록 하기 위한 금형내 히터 설계가 가장 중요하였다. 플라스틱 인서트를 사용한 대면적 곡면 실리콘 사출성형 실험을 통해 이중의 소재가 완전히 접착된 초발수 표면을 갖는 부품성형이 가능하였으며, 접촉각 측정을 통해 평균 140 도 이상의 접촉각 특성을 갖는 부품성형이 가능하였다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 초발수표면 미세패턴 사출성형 기술개발(Project No. KC000610), 국가플랫폼 기술개발사업(3/3)및 2011 년도 한국생산기술연구원 산업계 연계형 플랫폼형 과제(JA110033)에 의해 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Yuanxiang, Z., Jianyi, W., Haihang, C., Qiong, N., Qinghua, S. and Yunshan, W., "The influence of pre-stressing on breakdown characteristics in liquid silicone rubber," Journal of Electrostatics, Vol. 67, No. 2-3, pp. 422-425, 2009.
2. Tong, C., Lin, C. W., Chien, C. H., Chao, Y. J. and Van Zee, J. W., "Service life estimation of liquid silicone rubber seals in polymer electrolyte membrane fuel cell environment," Journal of Power Sources, Vol. 196, No. 3, pp. 1216-1221, 2011.
3. Barthlott, W. and Neinhuis, C., "Purity of the Sacred Lotus, or escape from contamination in biological surfaces," Planta, Vol. 202, No. 1, pp. 1-8, 1997.
4. Onda, T., Shibuichi, S., Satoh, N. and Tsuji, K., "Super-water-repellent fractal surfaces," Langmuir, Vol. 12, No. 9, pp. 2125-2127, 1996.
5. Tadanaga, K., Katata, N. and Minami, T., "Super-Water-Repellent Al2O3 Coating Films with High Transparency," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 80, No. 4, pp. 1040-1042, 1997.
6. Bico, J., Marzolin, C. and Quéré, D., "Pearl Drops," Europhysics Lett. Vol. 47, No. 2, pp. 220-226, 1999.
7. Khorasani, M. T., Mirzadeh, H. and Kermani, Z., "Wettability of porous polydimethylsiloxane surface:

- morphology study,” *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 242, No. 3-4, pp. 339-345, 2005.
8. Jin, M. H., Feng, X. J., Xi, J. M., Zhai, J., Cho, K. W., Feng, L. and Jiang, L., “Superhydrophobic PDMS surface with ultra-low adhesive force,” *Macromol. Rapid Commun.*, Vol. 26, No. 22, pp. 1805-1809, 2005.
  9. Sun, M. H., Luo, C. X., Xu, L. P., Ji, H., Qi, O. Y., Yu, D. P. and Chen, Y., “Artificial lotus leaf by nanocasting,” *Langmuir*, Vol. 21, No. 19, pp. 8978-8981, 2005.
  10. Noh, J. W., Lee, J. H., Na, S. J., Lim, H. E. and Jung, D. H., “Fabrication of Hierarchically Micro- and Nano-structured Mold Surfaces Using Laser Ablation for Mass Production of Superhydrophobic Surfaces,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, No. 10, Paper No. 106502, 2010.
  11. Lee, S. M., Oh, D. J., Jung, I. D., Bae, K. M., Jung, P. G., Chung, K. H., Cho, S. J. and Ko, J. S., “Fabrication of Nickel Micromesh Sheets and Evaluation of their Water-repellent and Water-proof Abilities,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 3, pp. 161-166, 2009.