

공압 핫프레스를 이용한 마이크로 폴리카보네이트 성형에 관한 연구

여창영*, 박태현**.#

*경남대학교 기계융합공학부, **경남대학교 기계공학부

A Study on Polycarbonate Microfabrication Using a Pneumatic Hot Press

Changyeong Yeo*, Taehyun Park**.#

*School of Mechanical Convergence Engineering, KYUNGNAM UNIV,

**School of Mechanical Engineering, KYUNGNAM UNIV.

(Received 24 January 2021; received in revised form 15 March 2021; accepted 19 March 2021)

ABSTRACT

Thermoplastic microfluidic devices are used in BioMEMS for medical and biotechnology applications, such as gene extraction, DNA analysis, and virus detection. In this research, a simple fabrication protocol with a commercially available pneumatic hot press is proposed and demonstrated for polycarbonate microfluidic devices. Microfluidic channels with a width of 200 μm and a height of 10 μm were designed and machined onto a brass plate as a mold insert using a CNC milling machine. The resulting microfluidic channels on the mold insert were assessed and found to have an actual width of 198 μm and a height of $10 \pm 0.25 \mu\text{m}$. The microfluidic channels were replicated on a polycarbonate sheet using the proposed replication technique at 146°C for 20 minutes under a constant load of 2400 kgf. The devices were then naturally cooled to 100°C while maintaining the same pressure. It was found that the microchannels were successfully replicated in the polycarbonate, with a width of 198 μm and a height of 10.07 μm . The proposed replication technique thus offers the rapid mass production of high-quality microfluidic devices at a low cost with a process that, unlike conventional photolithography systems, does not require expensive equipment.

Key Words : Microfluidic Devices(미세유체장치), Micro Polymer Fabrication(폴리머 성형), Pneumatic Hot Press Machine(공압 핫프레스), Polycarbonate(폴리카보네이트)

1. 서 론

미국, 유럽, 일본 등 선진국들은 이미 바이오 산업 분야에 큰 투자를 통한 앞선 연구를 하고 있으며 미래 생명 공학 분야의 핵심으로 BioMEMS 기

술을 주목하고 있다. 초정밀 공정 기술을 이용하여 마이크로 크기의 장치를 만드는 것을 의미하는 MEMS 기술과 Bio가 결합하여 의료 및 생명 공학 분야에 적용하는 분야가 BioMEMS이다¹⁻²⁾. 이러한 BioMEMS 기술을 활용하여 제작된 마이크로 미세 유체장치는 생체 내에서 발생하는 미세한 신호를 빠르고 정확하게 분석할 수 있고, 유체 1 μL 의 샘플을 이용하여 유전자 추출, DNA, 바이러스, 세포 등의 상태를 확인하고 질병을 진단 할 수 있다³⁻⁴⁾.

Corresponding Author : taehyun@kyungnam.ac.kr

Tel: +82-55-249-2615, Fax: +82-505-999-2160

본 논문은 2021년 여창영의 석사학위논문을 바탕으로 작성되었음.

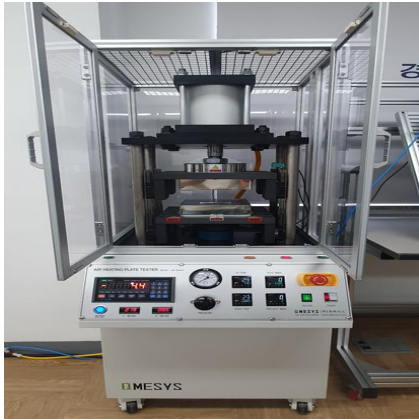


Fig. 1 Pneumatic hot press machine

미세유체장치의 재료로는 유리나 실리콘, PDMS, 열가소성 폴리머 등 다양한 공정 방법과 우수한 광학적 특성을 가진 재질을 이용하여 제작되었다. 하지만 유리나 실리콘은 공정이 복잡하며 생산 비용이 높아 일회용 장치를 만드는 데에는 경제성과 대량생산의 측면에서 적합하지 않았다^[5]. 이에 비하여 열가소성 폴리머는 비교적 간단한 공정과 저렴한 비용으로 미세유체장치의 제작이 가능하며 대량 생산에 적합하다^[6-9]. 열가소성 폴리머란 열을 가했을 때 유동성을 가지며 온도를 충분히 낮추면 다시 고체 상태로 돌아가는 고분자 물질로 가공성이 우수하다. 또한, 열가소성 폴리머는 우수한 광학적 특성과 높은 투명성 그리고 무독성의 특성으로 분석 유체의 오염을 피할 수 있고 유리전이온도에서 다양한 디자인으로 쉽게 성형이 가능하다는 장점이 있다^[10-11].

2. 공압 핫프레스 제어

본 연구에서는 공압 핫프레스를 사용하여 Polycarbonate(PC)에 마이크로 미세유체장치를 성형하였다. 공압 핫프레스는 Qmesys사의 공압 핫프레스(QM40AS, Korea)를 사용했으며 공압 실린더를 사용하여 위에서 아래로 실린더 로드와 프레스를 통하여 힘을 전달하는 방식이다. 본 공압 핫프레스의 실린더 내경은 200 mm이며, 2.5 마력의 에어 컴프레서를 이용해 공기를 주입했을 때 최대 힘은

2800 kgf이다. 핫플레이트 하부에 고정밀 로드셀이 장착되어 있어 ± 0.1 kgf의 미세 힘 조절이 가능하고 상부와 하부의 히팅 플레이트에는 K-type의 temperature sensor가 부착되어 있어 안정적이고 작은 편차의 온도 유지가 가능하다. 또한, 4 Columns LM Guidance 레일을 사용하였고 이 레일은 가압 플레이트간의 발란스 ± 0.02 mm의 정밀도로 샘플 면적에 동일한 압력을 가할 수 있다. 전자식 하중 제어로 인해 균일하고 얇은 두께의 샘플을 성형하기에 적합한 장비이다.

3. Micro Mold 제작

마이크로 몰드는 재질은 UNIST(울산과학기술대 학교)의 ROBONANO α -0/B(FANUC사의 초정밀 나노 가공기)를 이용하여 황동으로 제작되었다. 마이크로 몰드의 제작 조건은 공구 이송속도 50 mm/min, 회전수 12,000 rpm이며, Face Cutting을 위해 end mill $\varnothing 20$, 황삭공구 $\varnothing 0.7$, 정삭공구 $\varnothing 0.12$ 의 공구를 사용해 마이크로채널의 너비 200 μm 인 구조물들을 가공했다.

마이크로 몰드는 중앙 주입구에 유체를 주입하여 외곽의 배출구로 마이크로채널이 이어지게 디자인했다. 모든 마이크로 구조물의 높이는 마이크로 채널의 바닥면을 기준으로 10 μm 로 동일하다. 마이크로 PC의 성형 후 나노 필름과의 열접합 면으로 사용되어 질 나노필터 구조물의 너비는 200 μm 이며 샘플 유체가 흐르는 마이크로채널의 너비는 200 μm 로 제작되었다. 또한, 마이크로 구조물의 외각에는 접합력 향상을 위해 넓은 열접합 면적을 만들었다.

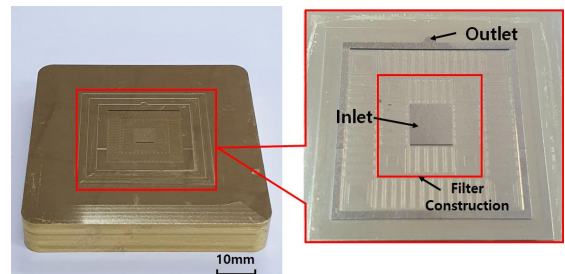


Fig. 2 Brass micro mold

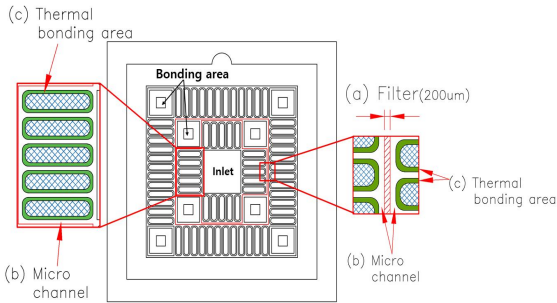


Fig. 3 Micro mold design for thermal bonding

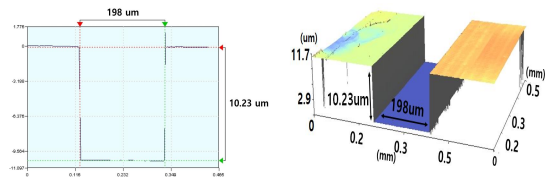


Fig. 4 Cross-sectional view of and three-dimensional view of nano filter area on the micro mold

Fig. 3은 마이크로 몰드의 CAD 설계도로 나타난 것이다. 필터 구조물(a)과 유체가 흐르는 마이크로 채널(b), 상부의 필름과 접합되는 열접합면(c)을 나타냈다. Fig. 4는 마이크로 몰드의 필터 구조물 크기를 나노 측정기(나노 시스템즈사의 NV-P1010)을 이용하여 측정했다. 필터의 설계 너비인 200 μm 에 비해 최대 2 μm 의 오차가 발생했으며 설계 높이 10 μm 에 비해 최대 0.25 μm 의 오차로 제작된 것을 확인할 수 있다.

4. 실험 과정

마이크로 PC 성형을 준비 단계로 PC를 황동 몰드의 크기(40 x 40 mm)에 맞춰 재단하고 강제 대류 오븐을 이용하여 어닐링(Annealing)한다. 어닐링은 폴리머 내부의 일정한 조직 구조를 얻어서 결정화도를 높여 내부 응력을 완화시켜 크랙을 줄여주며 성형성을 향상시킨다. 본 실험에서 사용된 PC는 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 이상 어닐링을 실시하였다.

마이크로 PC 구조물을 성형하기 위해서는 핫프레스의 상부와 하부의 플레이트와 3 mm 유리 판 2개, 황동 몰드를 예열한다.

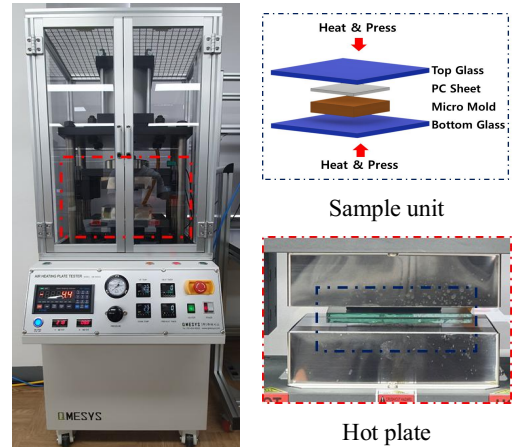


Fig. 5 Glass plates, micro mold, and PC assembled specimen inserted into hot press

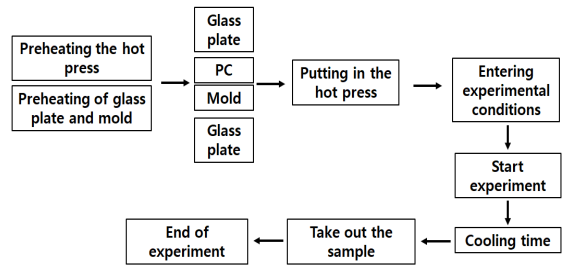


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental process

예열 온도는 PC의 유리전이온도 150 $^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도인 146 $^{\circ}\text{C}$ 로 예열한다. 예열이 완료 되면 Fig. 5의 사진과 같이 하부 유리판, 황동 몰드, PC, 상부 유리판 순으로 겹쳐서 핫플레이트 중앙에 투입한다. 마지막으로 핫프레스에 온도, 압력, 가압 시간을 입력하고 실험을 진행한다. 입력한 가압 시간이 종료되면 핫프레스의 Heat 전원을 끄고 압력을 유지한 채로 100 $^{\circ}\text{C}$ 까지 자연 냉각시킨다.

Fig. 6은 마이크로 PC 성형 실험 과정을 다이어그램으로 간략하게 나타낸 것이며 실험 조건들을 달리하며 최적의 마이크로 PC 성형 조건을 도출하였다.

Fig. 7은 온도 측정기 CENTER 309 THERMOMETER (기기 정확도는 $\pm 0.3\% \text{ rdg} + 1^{\circ}\text{C}$)를 이용해 PC 성형 실험 중 플레이트의 온도를 측정한 그래프이다.

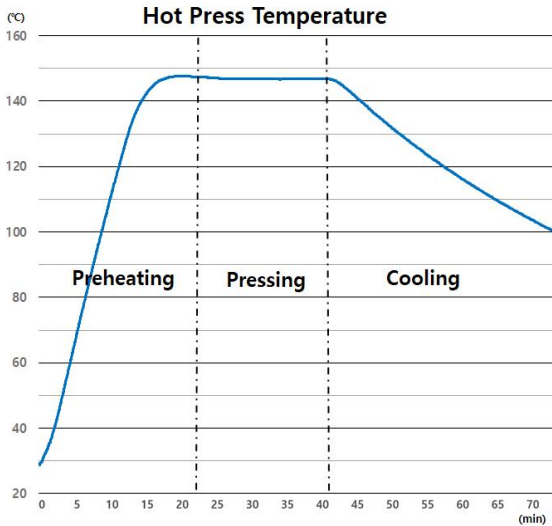


Fig. 7 Graph of hot press machine temperature

가압 구간 설정 온도에서 Overshoot 현상이 나타난 후 점차 설정 온도 값에 수렴하게 된다. 성형을 위한 가압공정은 온도가 안정화가 된 후 진행 하였다.

5. 실험 결과

상용화된 공압 핫프레스를 이용하여 시간, 압력, 온도 등 실험 조건을 변경하며 마이크로 폴리머 칩을 제작했다. 실험 온도 조건에 따라 폴리머의 성형 결과가 크게 달라졌다. 따라서 PC의 유리전이온도 150°C를 기준으로 실험을 진행하며 압력과 시간 조건을 변경하며 실험을 진행했다.

먼저, Fig. 8은 150°C와 160°C에서 성형을 진행한 폴리머 샘플 사진이다. 150°C 이상의 온도에서 실험을 진행했을 때 다량의 기포가 발생하고 160°C에서는 기포(Air bubble)와 크랙(Crack)이 동시에 발생했다.

Fig. 9와 Fig. 10을 보게 되면 유리전이온도보다 낮은 130°C에서는 구조물의 형상이 성형되지 않았으며 140°C에서는 구조물의 예상 높이인 10 μm보다 작은 약 5 μm의 높이로 PC가 성형 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 140~150°C 사이의 온도에서 최적의 조건을 찾는 실험을 진행했다.

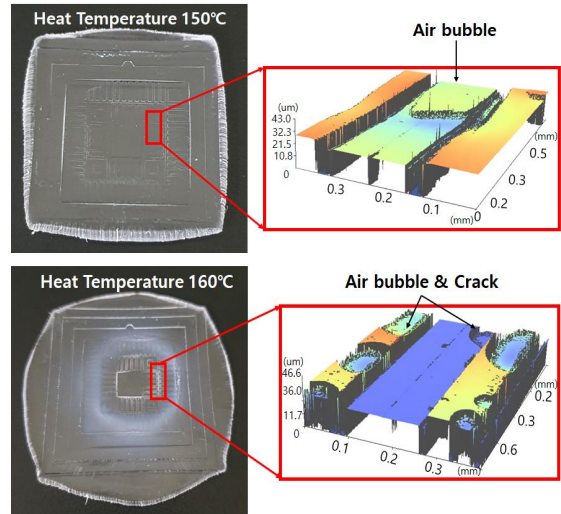


Fig. 8 Polymers with bubbles and cracks at high temperatures

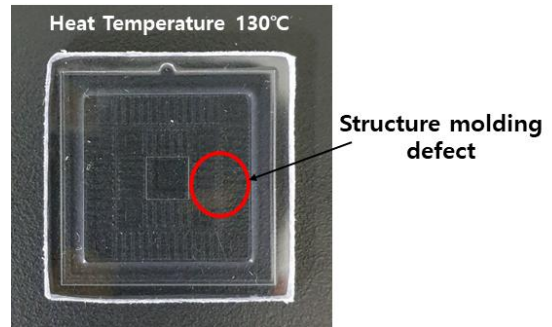


Fig. 9 Micro PC fabrication results at 130°C

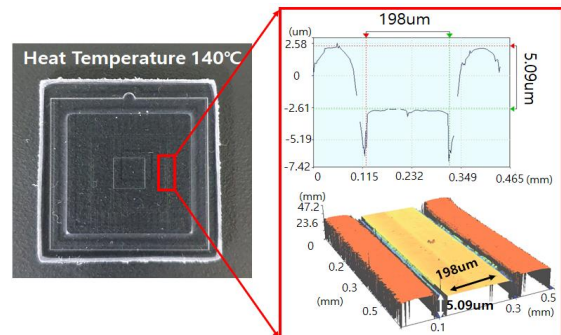


Fig. 10 Micro PC fabrication results at 140°C and nano filter area

Table 1 Result of the height and width at the nano filter area

Temperature	130℃	140℃	150℃	160℃	145℃	146℃
Height(10 μm)	X	5.09 μm	10.7 μm	10.5 μm	10.43 μm	10.07 μm
Width(200 μm)	X	198 μm	207 μm	217 μm	198 μm	198 μm
Result	Molding defect	Defect of height	Air bubble	Air bubble & Crack	Defect of height	Good

Fig. 11은 플레이트 온도 145℃, 가압시간 20 min, 압력 14.7 MPa의 조건으로 성형을 진행했다. 필터 구조물의 높이와 너비는 마이크로 황동 몰드의 크기와 유사하게 성형이 되었지만 외곽의 구조물 형상이 성형 되지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 앞선 조건에서 성형 온도를 1℃ 올려 146℃, 가압시간 20 min, 하중 14.7 MPa로 진행했다. 그리고 가압시간(20 min)이 끝난 후 100℃까지 자연 냉각하여 PC 샘플을 배출했다. 이후 성형된 PC 샘플을 나노 측정기(NV-P1010(나노 시스템즈))로 높이를 측정한 결과 필터의 높이가 10.43 μm, 너비가 198 μm로 몰드의 구조물 크기와 동일하게 성형이 되었으며 구조물의 형상도 우수하게 성형이 된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 13은 나노 패턴을 성형한 PC 필름과 마이크로 구조물을 열접합한 것이다. 필터 구조물 위로 나노 패턴이 열접합되고 유로를 통해 유체를 흘러 보내면 나노 패턴에 의해 유체 속의 바이러스와 박테리아가 걸출에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

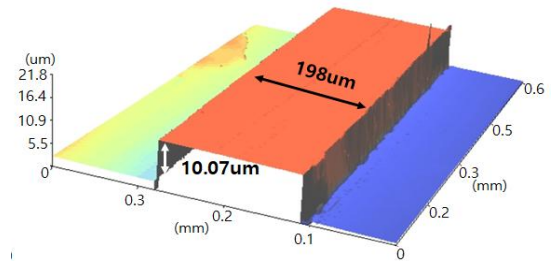
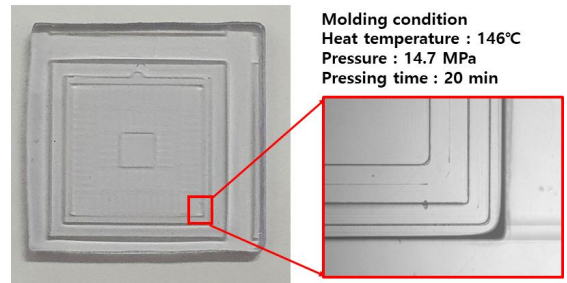


Fig. 12 Micro PC fabrication results at 146℃ and nano filter area

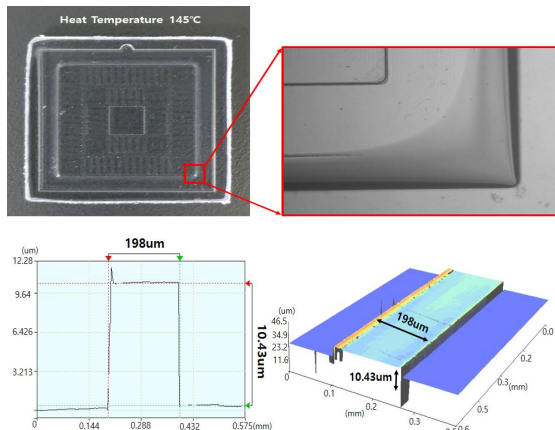


Fig. 11 Micro PC fabrication results at 145℃ and nano filter area

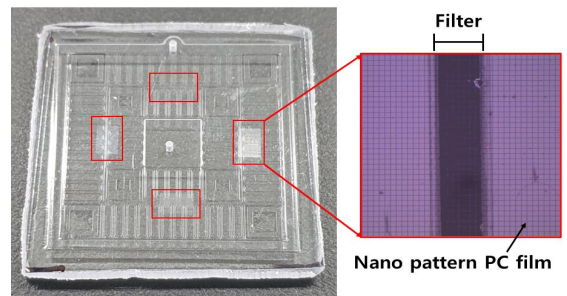


Fig. 13 Thermal bonding of micro & nano PC

6. 결론

본 연구는 상용화된 공압 핫프레스를 이용해

열가소성 재질인 PC(Polycarbonate)를 마이크로 구조물로 성형하기 위해 온도, 압력, 가압시간 등 최적의 조건을 찾기 위한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 3 mm의 PC 칩 성형은 핫프레스의 온도, 압력, 가압시간에 따라 성형 결과가 달라졌다. PC의 유리전이온도 150°C 이상의 온도에서 PC 성형 시에는 샘플에 크랙과 기포가 발생하였고, 140°C 이하의 온도에서는 구조물의 형상 성형이 되지 않았다. 또한 공압 핫프레스의 낮은 압력과 짧은 가압시간에서는 구조물의 높이 크기가 성형되지 않았다.
2. 온도를 기준으로 압력과 가압 시간 조건을 변경하며 실험을 진행 하였고 PC 성형의 최적 조건인 온도 146°C, 압력 14.7 MPa, 가압시간 20 min을 찾을 수 있었다. 이 조건에서의 성형은 기포나 크랙이 발생하지 않았으며 마이크로 몰드 형상으로 PC 성형이 이루어졌다.
3. 미세유체장치는 정밀한 분석 및 순수성을 요구하는 작업에 사용되는 특성으로 인해 생산 비용이 낮아야하며 대량생산이 가능해야한다. 본 연구에서는 상용화된 장비의 사용으로 비교적 저렴하고 복잡하지 않은 방법으로 PC의 마이크로 성형을 할 수 있었다.
4. 이후 실험으로는 폴리머 열접합을 통해 마이크로 폴리머 칩과 나노 폴리머 필름을 접합하여 유로와 구조물의 붕괴 및 손상 없이 열접합을 진행할 예정이다.

따라서 지속적인 미세유체장치의 연구를 통해 미세하고 정밀한 구조물 형상의 성형을 이루어내고 박테리아 및 바이러스 검출과 빠르고 정확한 분석이 가능한 미세유체장치를 제작할 수 있을 것이다.

후 기

“이 연구결과물은 2018학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임”

REFERENCES

1. Kang, J. Y. and Kim, T. S., “Nanobiosensor/chip reserch trend,” Electrical and electronic materials, Vol 17, No. 4, pp. 5-15, 2004.
2. Kim, Y. K., Oh, B. K. and Choi, J. W., “Planning Special: Nano Biosensor Technology Development; Nano Biochip Technology Development Trend,” Industrial Chemistry Outlook, Vol. 9, No. 2, pp. 19-27, 2006.
3. Becker, H., & Gärtner, C. “Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems,” Analytical and Bioanalytical Chemistry, Vol. 390, No. 1, pp. 89-111, 2007.
4. Velten, T., Ruf, H. H., Barrow, D., Aspragathos, N., Lazarou, P., Erik Jung, Wackerle, M. “Packaging of bio-MEMS: strategies, technologies, and applications,” IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 28, No. 4, pp. 533-546. 2005.
5. Lee, N. E., “A microfluidic channel for lab-on-a-chip using PDMS and a study of reaction with organic solvents,” A Thesis for a master, Sungkyunkwan University, Republic of korea, 2012.
6. Hogan, B. T., Dyakov, S. A., Brennan, L. J., Younesy, S., Perova, T. S., Gun'ko, Y. K., ... Baldycheva, A. “Dynamic in-situ sensing of fluid-dispersed 2D materials integrated on microfluidic Si chip. Scientific Reports,” Scientific reports, Vol. 7, No. 1, 2017.
7. Kim, J. K., Choi, S. H. and Go, S. H., “Improved of Mechanical Properties and Functionalization of Polycarbonate by Adding Carbon Materials,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 10, pp. 59-67, 2020.
8. Park, D. J., “A Study on Polymer Thermal Bonding System Using Boiling Point Control Chamber,” A Thesis for a master, Kyungnam University, Republic of Korea, 2016.

9. Li, Y., Wang, Z., Ou, L. M. L., & Yu, H.-Z. "DNA Detection on Plastic: Surface Activation Protocol To Convert Polycarbonate Substrates to Biochip Platforms. Analytical Chemistry," Analytical Chemistry, Vol. 79, No. 2, 426 - 433, 2007.
10. Han, C. M. and Lee, B. K, "Effect of Processing Parameters in Surface Machining of Plastic Materials," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 109~116, 2016.
11. Cai, Z., Chen, H., Chen, B., & Huang, C. "A gravity driven micro flow injection wetting film extraction system on a polycarbonate chip," Talanta, Vol. 68, No. 3, pp. 895 - 901, 2006.