

# 열형 롤-임프린트를 이용한 미세유체소자 채널 형성 Fabrication of Microfluidics Channel using Thermal Roll-Imprinting Process

\*유종수<sup>1</sup>, 윤성만<sup>1</sup>, 김동수<sup>1</sup>, 김희연<sup>2</sup>, #조정대<sup>1</sup>

\*J. S. Yu<sup>1</sup>, S. M. Yoon<sup>1</sup>, D. S. Kim<sup>1</sup>, H. Y. Kim<sup>2</sup>, #Jeongdai. Jo(micro@kimm.re.kr)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 한국기계연구원, <sup>2</sup> 나노융합센터

Key words : Thermal roll-imprinting, Microfluidics channel

## 1. 서론

MEMS(micro-electro mechanical system) 기술을 기반으로 발전된 미세유체소자(microfluidic)는 1 mm 보다 작은 미세크기(microscale) 혹은 중간크기(mesoscale)에서 유체의 거동을 비롯한 이동현상을 연구하는 물리, 화학, 공학, 생명기술을 망라한 새로운 학제적 학문 분야이며[1], 현재는 미세제작법(microfabrication), 경질미세가공(hard micromachining), 연질미세가공(soft micromachining) 등 크게 3 가지 방법을 사용하여 제작하고 있다[2]. 하지만 기존의 미세유체소자의 제작은 대부분 실리콘이나 유리 기반의 MEMS 공정인 박막증착(thin-film deposition), 리소그래피(lithography), 식각(etching) 등을 포함하고 있어 소자의 제작이 어려울 뿐만 아니라 시간이 오래 걸리고 많은 공정수로 인한 소자의 변형이 생기기 쉬운 단점을 갖고 있다. 또한 이러한 문제점들을 극복하기 위해 근래에는 PDMS(polydimethylsiloxane)나 예비중합체(prepolymer)를 이용한 나노임프린팅(nanoimprinting), 핫엠보싱(hot embossing) 등의 소프트 리소그래피(soft lithography) 방법들이 사용되고 있으나 감광액(photoresist)의 사용이 불가피하고 구조물의 재료, 크기와 밀도에 제한이 있다는 단점과 저가 대량생산이 불가능하다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기존의 미세유체소자 제작법의 단점들을 보완하기 위해 저가 대량생산적 측면을 고려해 웹 이송을 통한 롤-임프린팅(Roll-imprinting) 방법을 적용 하였으며, 유연성(flexible) 있는 플라스틱 필름을 기관으로 사용하여 패턴 마스크가 장착되어 있는 프린팅 롤(printing roll)에 직접적으로 열과 압력을 인가하여 기관에 각인(imprinting) 함으로서 미세유체소자의 패턴들을 제작하였다.

## 2. Microfluidics Channel 형성

미세유체소자를 제작하기 위한 열형 롤-임프린팅은 패턴 마스크를 부착한 임프린팅 롤에 열을 가하고 일정 압력으로 기관을 눌러 직접적으로 채널을 형성하는 방법으로 웹 이송과 물을 이용해 연속 프린팅 공정이 가능하게 하였고 실험에 사용된 기관은 PC(Polycarbonate), PEN(Polyethylenaphthalate), PET(Polyethyleneterephthalate)의 유연성 플라스틱 필름을 사용 하였으며 그 특성은 Table. 1 와 같다.

Table 1 Characteristics of plastic substrate

	Maximum Processing Temperature(°C)	Available Thickness (µm)	CTE (ppm/C)	Low Processing Temperature High Optical Quality
PC	< 120°C	200 µm	20~50	
PEN	< 150°C	200 µm	10~20	
PET	< 140°C	188 µm	20~30	

열형 롤-임프린팅 공정에 사용된 패턴 마스크는 전주도 금공정을 통해 평탄도를 균일하게 유지한 두께 200µm의 유연성 마스크이며, 선 폭(line width) 1~100µm 와 깊이(depth)10µm 를 갖는 선형(line type) 실험용 마스크와 일반적인 미세유체소자 채널형태로 주입구 부분 40µm 사형부분

110µm 의 선 폭과 깊이 15µm 를 갖는 마스크를 각각 설계하여 제작하였다.

고온 및 고압 실험이 가능한 열형 롤-임프린팅 장비의 구성도는 Fig 1 과 같다. Fig 1(a)는 웹 이송장치로서 플라스틱 필름 롤을 공압 고정축(air shaft)에 장착할 수 있게 되어 있으며 일정한 장력(tension)을 제어하여 웹 이송을 한다. Fig 1(b)는 플라스틱 필름 전용 정전기 방지장치(HAUG IONIZER)와 UV 표면 처리 장치(UV surface treatment system)로 구성되어 있으며 Fig 1(c)의 열형 임프린팅 롤은 유연성 마스크를 장착할 수 있는 클릭기어(click gear) 타입으로 두 개의 서로 다른 마스크를 장착할 수 있고, 롤 내부에 장착되어 있는 3 개의 열선에 의해 200°C까지 온도 조절이 가능하다. 또한 롤에 장착된 두 개의 실린더는 스텝모터(steping motor)를 사용하여 좌우 압력을 500kgf 까지 조절 가능하게 설계 되어 있으며 하부에는 가압 롤(impression roll)로 구성된다. 그리고 Fig 1(d)는 전용 공압 냉각 시스템(air cooling system)으로 이루어져 있다.

미세유체소자의 패턴 제작 공정은 실험에 사용된 플라스틱 필름 롤을 임프린트 롤의 프린팅 속도인 10rpm 에 맞춰 토오크 모터(torque motor)의 속도를 10%로 제어해 공정 시간 동안 동일 장력으로 연속공정이 가능하게 웹 이송한 후 UV 표면 처리된 플라스틱 필름의 표면은 친수성(hydrophilic)을 갖는 안정된 상태를 유지하였고 표면의 저분자 중합체(oligomer)의 형성을 억제하여 플라스틱 필름 패턴 형성 공정 시 발생하는 결함(defect)을 줄여 주었다.

표면 전처리 공정을 거친 플라스틱 필름은 전주도금으로 형성한 마스크가 부착된 임프린트 롤과 가압 롤 사이를 통과하게 되며, 각인이 가능한 온도(30~110°C)를 가열된 상부 임프린트 롤을 하부 가압 롤과 맞닿도록 하고 일정한 압력(190~400kgf)을 인가하여 눌러주면서 물을 정해진 속도로 회전하며 플라스틱 필름에 패턴을 성형하였다. 패턴 각인 공정 시 특정 압력과 온도를 받아 형성된 패턴이 공정 후 수축과 팽창을 동시에 하는 플라스틱 필름의 특성상 발생할 수 있는 탄성력 또는 복원력 등의 패턴 변형을 막기 위해 공압 냉각 시스템을 이용하여 급냉시켜 열형 임프린팅으로 형성된 패턴 들이 그 형상을 유지될 수 있도록 하였다. 이렇게 형성된 미세유체소자 채널들은 주입구(injection hole)를 만들어준 후 전용 코팅 필름을 이용한 라미네이팅(laminating)을 거쳐 하나의 유체거동분석 센서(microseparator sensor)를 만들어 보았으며 저점도 잉크(low viscosity ink)를 이용해 주입실험을 하였다.

## 3. 실험 및 결과

미세유체소자 채널을 유연성 플라스틱 필름을 이용해 열형 롤-임프린팅으로 제작함에 있어 온도와 압력을 변화시켜 미세 패턴을 형성하고자 실험하였고 PEN, PET 플라스틱 필름으로 수행한 선행 실험 조건과 PC 플라스틱 필름으로 수행한 공정 조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 의 공정 조건으로 실험한 결과, 주입구 부분 40µm, 사형부분 110µm 로 설계된 마스크와 동일한 패턴을 각인 할 수 있었으며, 각인된 패턴 깊이는 13µm 로 70% 이상의 성형율을 보이는 미세 패턴을 얻을 수 있었다. Fig 2

는 공정 온도와 압력을 일정하게 했을 때 실험에 사용한 각 플라스틱 필름의 프린팅 특성을 나타낸 그림으로서 깊이 10 $\mu\text{m}$  실험용 마스크에서 PEN 플라스틱 필름은 1.552 $\mu\text{m}$ , PET 플라스틱 필름은 4.085 $\mu\text{m}$  로 각각 각인되었으며, 상대적으로 열팽창계수(CTE)가 큰 PC 플라스틱 필름이 7.549 $\mu\text{m}$ 로 프린팅 되어 가장 좋은 각인 특성을 보였고 열팽창계수가 작은 PEN 플라스틱 필름이 가장 적은 변화를 보였다.

Fig 3(a)는 실험용 마스크에 PET 플라스틱 필름을 사용하여 공정 온도를 40 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시키면서 프린팅 특성을 확인한 결과로서 상온에서 실험 했을 때 보다 물의 온도를 점점 올려주어 실험한 결과 0.438 $\mu\text{m}$ ~4.083 $\mu\text{m}$ 로 형성되는 패턴의 깊이가 선형적으로 증가함을 보였고 100 $^{\circ}\text{C}$  이상의 공정온도에서는 3.637 $\mu\text{m}$ 로 더 이상 패턴형성에 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 이는 플라스틱 필름의 최대 변형율에 의존적인 것으로 보인다. Fig3(b)는 (a)의 온도실험 결과에서 가장 좋은 공정 온도(90 $^{\circ}\text{C}$ )를 기준으로 압력을 190/200~380/400kgf 까지 변화시키면서 실험한 결과 그래프로서 공정상 평탄도를 유지하기 위해 좌 우 압력을 각각 조절하였으며 압력이 증가할수록 패턴의 깊이가 2.201 $\mu\text{m}$ ~4.083 $\mu\text{m}$ 로 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

Fig 4(a)는 실험용 마스크로 선행 실험한 결과를 토대로 각인 특성이 가장 좋은 PC 필름에 열형 롤-임프린팅을 통해 미세유체소자에 형성된 채널을 보인 것이며, Fig 4(b)는 제작된 채널에 주입구 부분을 형성하고 전용 필름을 이용한 라미네이팅 방법으로 열압착(thermocompression bonding)한 후 저점도 잉크를 이용하여 미세유체소자의 유체 거동을 실험하였다.

Table 2 The Condition of thermal roll-imprinting for microfluidics channel.

Substrate	Processing Temperature( $^{\circ}\text{C}$ )	Processing Pressure(kgf)	Processing Speed(rpm)
PEN	30~90	190/200~285/300	5~20
PET	30~110	190/200~380/400	5~30
PC	90	380/400	10

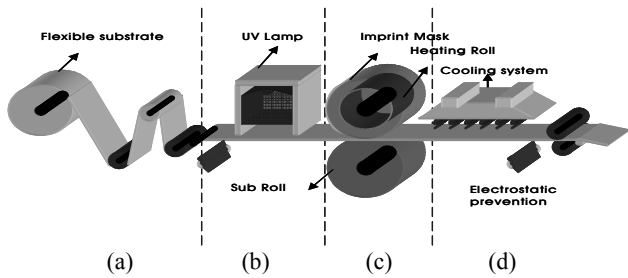


Fig. 1 Schematic of thermal roll-imprinting for microfluidics channel: (a) web transfer unit of plastic film, (b) UV surface treatment unit, (c) thermal imprinting roll unit, (d) cooling unit.

Result Image	Condition	Result of pattern depth
	PET 380(L)/400(R)kg 90 $^{\circ}\text{C}$ 10rpm 10 $\mu\text{m}$ mask	4.083 $\mu\text{m}$
	PEN 380(L)/400(R)kg 90 $^{\circ}\text{C}$ 10rpm 10 $\mu\text{m}$ mask	1.552 $\mu\text{m}$
	PC 380(L)/400(R)kg 90 $^{\circ}\text{C}$ 10rpm 10 $\mu\text{m}$ mask	7.549 $\mu\text{m}$

Fig. 2 Result of thermal roll-imprinting test for plastic films.

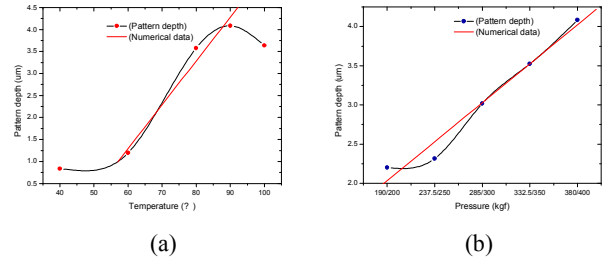


Fig. 3 Variation characteristics of imprinted pattern depth versus: (a) temperature and (b) pressure.

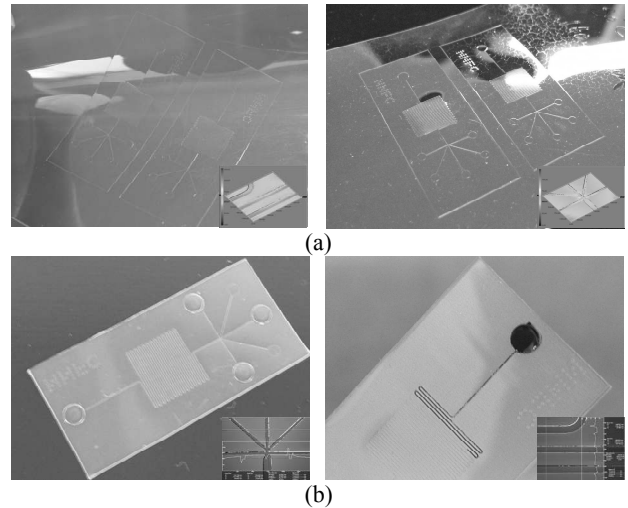


Fig. 4 Fabrication of microfluidics devices: (a) fine pattern channel and (b) testing of the flow of low viscosity ink.

#### 4. 결론

MEMS 기반의 미세유체소자를 유연성 플라스틱 필름과 열형 롤-임프린팅으로 간단하게 채널을 형성하였으며 설계된 마스크와 일정한 선풍을 갖고 깊이 또한 70%이상의 성형율과 최대 13 $\mu\text{m}$ 의 각인 깊이를 갖는 미세 패턴을 롤-임프린팅을 통해 연속 공정이 가능하게 하였고, 기존의 방법보다 공정 수(process step)를 현저히 줄일 수 있었으며, 상온 공정으로 소자의 변형을 막을 수 있었다. (90 $^{\circ}\text{C}$ 에서 수행됨) 앞으로 열형 롤-임프린팅 공정의 정밀도, 소자로 제작될 재료들의 특성, 열압착 기술과 표면처리 기술 등을 개선한다면 미래에 발전할 micro total analysis system (mTAS) 등에 저가격 대량 생산이라는 큰 장점을 갖고 많은 사용이 가능하리라 판단된다.

#### 후기

본 연구는 산업기술연구회의 기본사업으로 수행되었으며, 나노융합센터 뎀스바이오 팀 김희연 박사님의 도움으로 진행되었습니다.

#### 참고문헌

1. D.H. Kim, "Microfluidic Systems: State of the Art" Korean Chem. Eng. Res., Vol. 42, 375-386, 2004.
2. Whitesides, G. M., Ostuni, E., Takayama, S., Jiang, X. and Ingber, D. E., "Soft Lithography in Biology and Biochemistry," Annu Rev. Biomed. Eng., 3, 335-373. 2001.