

광조형법과 UV 포토리소그래피를 이용한 웨이브 마이크로펌프 미세 채널 제작

노병국[#], 김우식^{*}, 심광보^{**}

Fabrication of Micro-channels for Wave-Micropump Using Stereolithography and UV Photolithography

Byoung Gook Loh[#], Woosik Kim^{*} and Kwang Bo Shim^{**}

ABSTRACT

Micro-channels for a wave micropump have been fabricated using the Stereolithography and UV Photolithography. The micro-channel with a channel height of 500 μm was fabricated with stereolithography. UV photolithography was used for producing micro-channels with a channel length less than 100 μm . The fabrication process data including spinning rpm, pre-bake and post-bake time, and develop time for single layer and multiple layer 3D micro-structures using SU-8 photo resist are experimentally found. A film mask printed with a 40,000 dpi laser printer was used for UV lithography and micro-structures in the order of tens of micrometers in dimension were successfully fabricated.

Key Words : Micro-channel (마이크로채널), Micropump (마이크로펌프), Stereolithography (광조형법), UV Photolithography (자외선리소그래피), SU-8 Photo Resist (SU-8 포토레지스트)

1. 서론

최근 바이오 기술 중 중요한 한 영역으로 각광 받고 있는 분야로 랩온어칩(lab-on-a-chip)¹을 들 수 있다. 랩온어칩은 말 그대로 생물학, 화학 실험실의 구성요소를 미세화하여 하나의 칩 형태로 구현함으로써 실험실에서 행해지던 일련의 실험을 하나의 칩 상에서 수행할 수 있도록 해주는 칩을 말한다. 랩온어칩을 사용하면 미량의 생체 시료 및 시약을 사용함으로써 분석의 효율성 및 정확성을 증대할 수 있으며, 또한 하나의 단일 세포에 생물

학적 화학적 반응을 유발하여 그 결과를 검출할 수 있도록 하여 나노 바이오 기술의 발전에 중요한 역할을 할 도구로서 그 관심이 증대되고 있다. 랩온어칩 제작의 핵심기술은 칩 상에 다양한 실험 장치를 구현하기 위한 미세구조물의 제작기술과 제작된 생체 시료 및 시약의 반응을 유도 조절할 수 있는 미세 유동 조절 기술이다.

랩온어칩 미세 구조물의 제작 방법에는 크게 반도체 제작 방법을 이용하여 실리콘 위에 미세한 층(layer)을 적층하여 원하는 구조물을 제작하는 포토리소그래피² (Photolithography) 와 액체 상태의

☞ 접수일: 2007년 6월 19일; 게재승인일: 2007년 10월 1일

교신저자: 한성대학교 기계시스템공학과

E-mail: bgloh@hansung.ac.kr Tel. (02) 760-5865

* 한양대학교 나노공학과 대학원

** 한양대학교 신소재공학부

광경화성 수지(resin)에 레이저 빔을 조사하여 3 차원 구조물을 경화 적층하는 광조형법³ (Stereo lithography)이 있다. 반도체 공정 기술로서 시작된 포토리소그라피는 비약적인 발전을 거듭하여 수십 ~ 수백 나노미터 크기의 3 차원 미세구조물을 제작할 수 있는 다양한 방법이 개발되고 있으나 이는 대량생산에 적합한 방법으로 새로운 아이디어를 검증하는 소량의 시제품(prototype) 제작에는 고가의 비용 때문에 부적합하다. 소량의 미세 시제품 제작용의 기술로서 기계분야에서 주목을 받는 광조형법은 3 차원 구조물의 선조립(preassemble) 및 가공(machining)이 가능하고, 공정이 간단하고 공정 단가가 낮다는 장점을 가지고 있지만 적층에 따른 층(layer)간의 단차 오차 및 수십 마이크로 미터 이내의 구조물을 제작하는 데는 아직 어려움이 있다는 단점을 가지고 있다.⁴

미세유동 조절기술은 마이크로펌프⁵를 이용하여 마이크로 채널(channel)을 따라 극미세량의 유체를 기계적, 전기적 또는 화학적인 방법으로 이송하는 기술이다. 유체가 통과하는 채널의 크기가 수십 ~ 수백 마이크로미터 크기로 작아지면 채널의 마찰력이 유체의 흐름을 방해하는 지배적인 항력(drag force)이 되며 이를 극복하고 유체를 수송하기 위해서는 back pressure의 증가가 필요하다. 이는 마이크로 펌프의 물리적인 크기를 증가시켜 마이크로 펌프의 크기를 소형화하는데 걸림돌이 되어 왔다. 그러므로 마이크로 채널의 마찰저항을 획기적으로 감소시킬 수 있거나 혹은 마찰저항을 유체 이송에 항력이 아닌 구동력으로써 활용할 수 있다면 마이크로 펌프기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 미세채널 벽면의 마찰항력을 구동력으로 하는 웨이브마이크로펌프^{6,7}의 미세채널을 광조형법과 포토리소그라피를 이용하여 제작하였다.

2. 광조형법에 의한 미세 채널 제작

2.1 마이크로 채널 구성

광조형기의 제작 원리는 액상의 광경화(UV curing) 수지(resin) 상에 레이저를 조사하여 조사된 부분을 선택 경화 시키는 방법에 의해 전체 구조물을 층(layer) 단위로 제작하는 하는 것이다 (Fig. 1 참조). 수십 마이크로 미터의 층을 쌓아감에 따라 원하는 구조물이 제작된다. 웨이브 마이크로 펌프

는 Fig. 2 와 같이 유체 저장소(reservoir), 마이크로 채널(micro-channel), 마이크로 빔(micro-beam), 및 압전액추에이터(piezo-actuator:A, B)로 구성된다. 웨이브 마이크로 펌프의 본체(main body)는 광조형기 (Viper SI2 SLA system)를 사용하여 광경화 수지로 제작되었다.

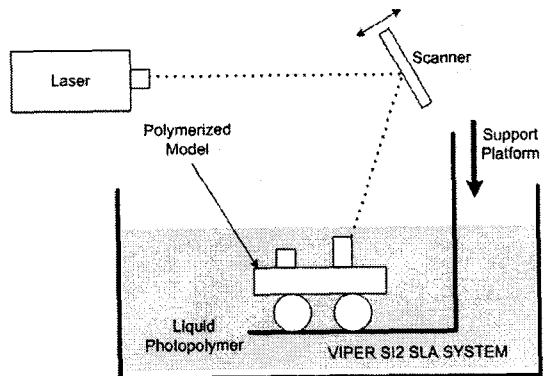


Fig. 1 Working principle of Stereolithography

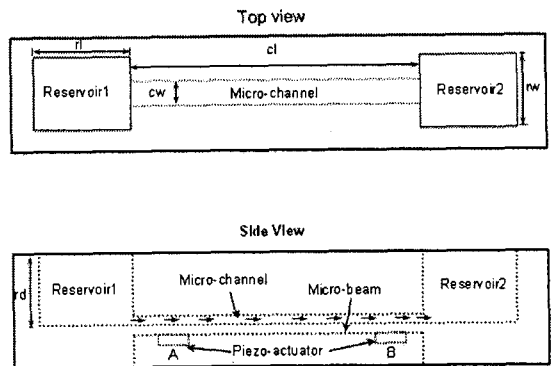


Fig. 2 Schematic view of micropump

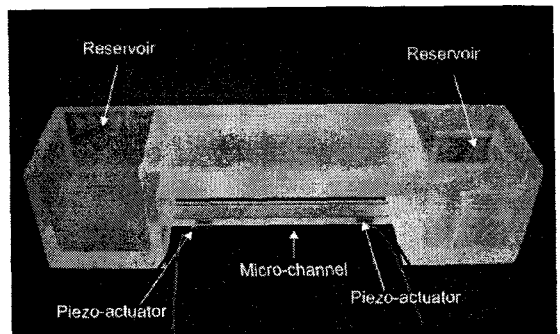


Fig. 3 Picture of micropump

광조형기(Viper SI2 SLA system)의 최소 적층 두께는 100 μm 이다. 광조형기를 이용한 마이크로 채널 제작에 있어서 문제점은 액상의 수지 내부에서 적층 방식으로 경화시켜 마이크로 채널을 제작하므로 제작 완료 후 마이크로 채널 내부에 경화되지 않은 수지(resin)가 존재한다는 점이며 이의 효율적인 제거 공정이 필요하다. 본 시스템 제작의 경우에는 유체 저장소(reservoir)의 일부를 절개하여 공기 분사기(air blower)를 이용하여 마이크로 채널 내의 비경화 수지 제거 후 절개부분을 에폭시 접합하였다. 광조형기를 사용한 마이크로 채널생성을 확인하기 위해 채널두께 500 μm , 250 μm , 100 μm 의 채널을 각각 제작하여 그 단면을 광학현미경을 사용하여 30 배 확대 촬영하였다. Fig. 4 는 그 결과를 나타낸다. 채널두께 500 μm , 250 μm 의 마이크로 채널이 생성되었음을 Fig. 4(a)와 (b)를 통해 확인할 수 있었으나 채널두께 100 μm 의 마이크로 채널의 경우 외형이 형성되었음을 Fig. 4(c)에서 확인할 수 있었으나 채널 내부의 비경화 수지의 제거 공정의 어려움으로 완벽한 형태의 마이크로 채널 형성에 성공하지 못하였다.

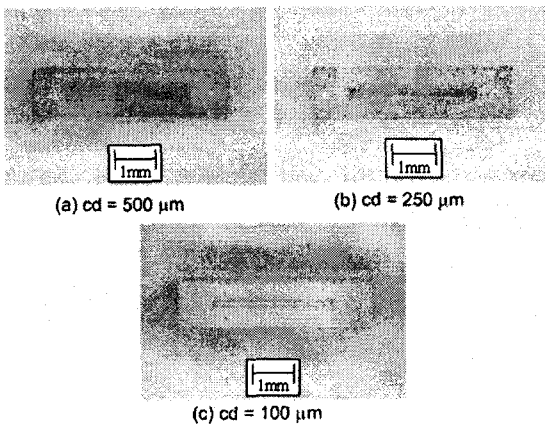


Fig. 4 Cross-sectional view of micro-channel

광조형기를 사용하여 제작한 마이크로 채널의 규격은 표 1 과 같다. 사용된 광경화 수지는 벨기에 Somos 사의 Watershed11120 이며 기계적인 물성치는 밀도: 1120 kg/m^3 , 탄성률(E): 2700 MPa 이다.

웨이브마이크로 펌프의 작동원리는 마이크로 채널의 벽면을 따라 진행파를 발생시켜 유체를 이송시킨다(Fig. 5 참조). 유체의 이송 속도는 미세

널 벽 면의 가진 주파수와 가진 진폭의 함수로 표현된다. 따라서 진동 진폭을 최대화 하는 것이 마이크로 채널 설계의 중요한 요소 중의 하나이며 마이크로 채널의 공진을 이용하는 것이 가장 효율적인 진동 진폭 증가 방법이다.

Table 1 Specification of micropump

	symbol	Unit:mm
Micro-channel length	cl	40
Micro-channel width	cw	5
Micro-channel depth	cd	0.5
Micro-beam thickness	bd	0.5
Reservoir length	rl	16
Reservoir width	rw	14
Reservoir depth	rd	6

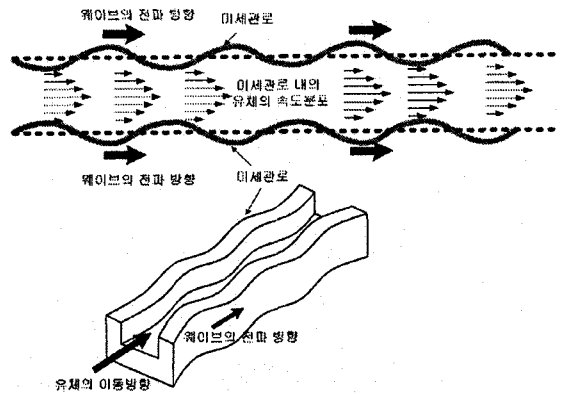


Fig. 5 Working principle of wave micropump

2.2 미세채널의 FEM 해석

상용 FEM 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하여 마이크로 채널의 공진주파수 및 모드를 해석하였으며 Table 2 에 초기 10 개의 공진주파수 및 모드가 정리되어있다. 첫 번째 공진주파수는 1632 Hz 이며 Fig. 6는 x 축을 기준으로 한 첫 번째 굴곡진동(bending vibration) 모드(mode shape)를 나타낸다 (Bending1-x). 마이크로 채널의 여러 형태의 진동 모드 중 웨이브 마이크로 펌프 구동에 가장 적합한 모드는 x 축을 기준으로 한 굴곡진동 모드이다. 마이크로 채널 밑 면에 장착되어 있는 압전 액추에이터에 정현파의 신호를 가진하여 실험적으로 얻은 첫 번째와 두 번째 굴곡진동의 공진 주파수

는 각각 1400 Hz 와 4200 Hz 이었다. 압전소자의 고주파 가진에 의한 발열로 5000 Hz 이상의 가진 주파수는 실험할 수 없었다.

Table 2 Natural frequencies and mode shapes of micro-channel: ANSYS simulation results

No.	Frequency, Hz	Mode shape
1	1633	Bending1-x
2	4371	Bending2-x
3	4812	Bending1-y
4	6748	Torsion1-z
5	8275	Bending3-x
6	11794	Bending2-y
7	13170	Bending4-x
8	13610	Torsion2-z
9	18965	Bending5-x
10	19512	Longitudinal1-y

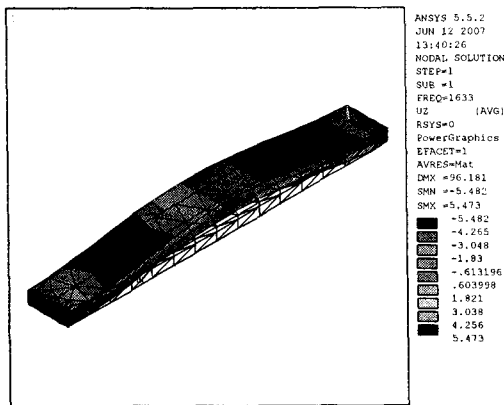


Fig. 6 1st Bending mode of micro-channel (ANSYS result)

3. UV 리소그래피를 이용한 미세채널 제작

전통적인 정밀 가공 방법으로는 복잡한 3 차원 마이크로 구조물(3D micro structure)의 제작에는 한계가 있다. 따라서 마이크로 3 차원 구조물을 제작하는 새로운 가공 기술로 마이크로 광조형법⁸ (Micro Stereolithography), 대반응이온식각법⁹ (Deep Reactive Ion Etching), 리가¹⁰ (LIGA process), 엑스선 리소그래피¹¹ (Deep X-ray Lithography), 그리고 자외

선리소그래피¹² (UV Lithograph)와 같은 방법들이 개발되었다. 마이크로 광조형법의 경우 복잡한 형태의 마이크로 구조물을 제작할 수 있지만 제작된 샘플의 표면이 거칠고 해상도가 뛰어나지 못하다. 리가(LIGA) 공정의 경우 정밀도가 높고 큰 가로세로비(aspect ratio)를 갖는 구조물도 제작이 가능하나 엑스레이(X-ray)를 사용해야 한다는 점에서 제한적이다. 위의 여러 방법과 비교할 때 자외선 리소그래피(UV lithography)는 만들 수 있는 형태에 제한은 있지만 다른 3 차원 미세구조물 제작방법에 비해 적은 공정과 저렴한 비용으로 여러 형태의 마이크로 구조물을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 네가티브 포토 레지스트 (Negative photo resist)인 SU-8¹³ 은 좋은 기계적 강도를 갖고 있고 가로세로비가 큰 미세 구조물도 제작할 수 있어 마이크로 플루이드 시스템(micro fluidic system)의 구동기(actuator)나 몰드(mold)로 광범위하게 사용되고 있다.

3.1 재료 및 기본설계 (Materials and design)

SU-8 네가티브 포토레지스트와 현상액(prolylene-glycol-monoether-acetate developer:PGMEA)은 마이크로캠 (Microchem Corp.:USA)사의 것을 사용하였다. 액상 PDMS 에폭시 수지는 다우플라스틱 (DOW Plastics:USA)사의 것을 사용했다. 단면 연마된 8 in. 실리콘 웨이퍼(Si wafer)는 엘지실트론(LG Siltron:Korea)사의 제품을 사용했다. 포토마스크(Photo mask)는 오토캐드(AutoCad 2006) 소프트웨어를 이용해서 제작하였고 마이크로텍(Micro-Tech: Korea)사의 포토플로터(photo plotter)를 이용해서 필름포토마스크(film photo mask)에 40,000 dpi의 해상도로 출력 하였다. 필름포토마스크는 기존의 리소그래피 공정에 사용하는 유리마스크 및 크롬마스크에 비해 저렴한 비용과 짧은 시간에 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

자외선 리소그래피를 이용하여 3 차원 미세 구조물을 제작하기 위해서는 여러 층의 멀티 레이어 (multi layer)로 층을 쌓아 올리는 방식으로 제작하여야 한다. PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용한 몰드(mold) 제작 시에는 단층 layer 만을 사용하였고 SU-8 으로 이루어진 3 차원 미세 채널 제작 시에는 여러 층의 마스크를 사용하여 멀티 레이어를 제작하였다. 미세 채널을 포함하는 전체 미세 구조물의 크기는 1cm x 2cm 이며 미세 구조물 안에

제작된 미세 채널의 크기는 10~300 μm로 다양하게 변화를 시켰다.

3.2 리소그래피 공정(photolithographic process)

3.2.1 단층 제작 공정 (single layer fabrication)

단층 제작 공정을 정리하면 다음과 같다. SU-8 포토 레지스트는 매우 강한 점도를 갖고 있기 때문에 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅 시 잘 퍼지지 않으며 용액 안에 많은 기포를 함유하고 있다. 따라서 SU-8 포토 레지스트의 연성점(softening point)인 45~60℃에서 열처리를 해줌으로써 SU-8의 점도를 낮추고 함유하고 있는 기체를 제거한다. SU-8 포토 레지스트를 스핀 코팅할 실리콘 웨이퍼를 가열한다. 가열 공정은 웨이퍼와 포토 레지스터 간의 균일한 결합에 도움이 된다. 가열된 웨이퍼 위에 점도 14,000 cst 의 SU-8 2050 포토 레지스트(코팅두께: 50~190 μm)를 스핀 코터(spin coater)를 이용해서 실리콘 웨이퍼 상에 코팅시킨다. 코팅 두께는 스핀 코터의 회전 수를 1000~3000 rpm 으로 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 코팅된 SU-8 을 열판(hot plate)을 이용해서 코팅 두께에 따라 65℃에서 3~5분 동안 프리베이크(pre-bake)후 95℃에서 6~30분 동안 소프트베이크(soft-bake) 한다. 패턴이 형성된 필름마스크를 실리콘 웨이퍼 위에 위치한 후 자외선 노광기(UV exposer)를 이용하여 320mJ/cm²의 에너지로 150 초 동안 노출(expose) 한 뒤 65℃에서 1분 간 프리베이크(pre-bake) 후 95℃에서 5~12분 간 코팅 두께에 따라 다시 한번 포스트익스포즈베이크(post expose bake)를 한다. 베이크 한 시편을 PGMEA 현상 용액으로 30 분간 현상(develop)한 후 무이온수(Deionized(DI) water)로 세척하고 질소 가스(N₂ gas)로 건조시킨다. 위와 같은 SU-8 단층 제작 공정은 Fig. 7에 순서대로 정리되어 있다.

Fig. 8은 단층 제작 공정에 의해 제작된 단층 구조물을 나타낸다. 스핀 코터의 회전수 증가에 따라 미세 채널의 높이가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 즉, 회전수 1000 rpm의 경우 채널 높이는 100 μm 이고 3000 rpm의 경우 채널 높이 50~60 μm로 회전수의 증가에 따른 채널 높이의 변화를 명확히 관찰할 수 있다. 미세 채널의 높이는 알파스텝(α-step)을 사용하여 측정하였다. Figs. 9~11은 단층 제작 공정에 의해 제작된 다양한 형태의 마이크로 채널을 나타낸다.

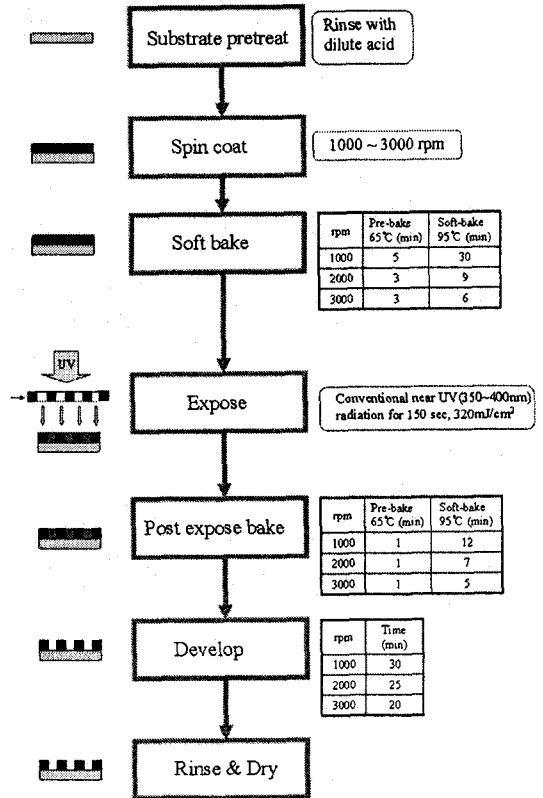


Fig. 7 Single layer fabrication process

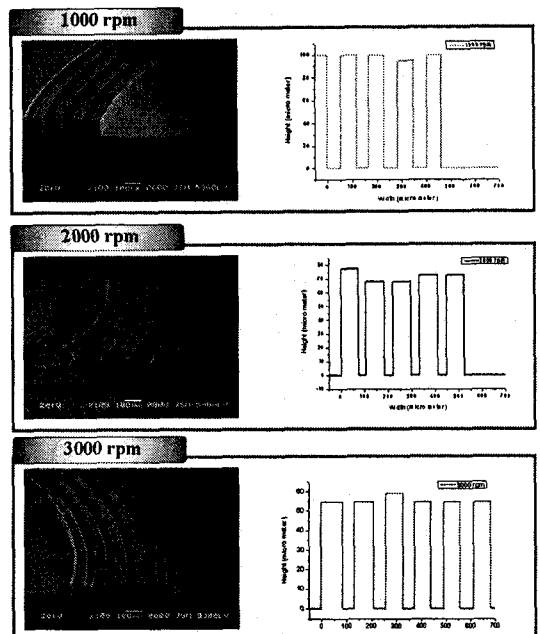


Fig. 8 SEM pictures of single layer micro-channels

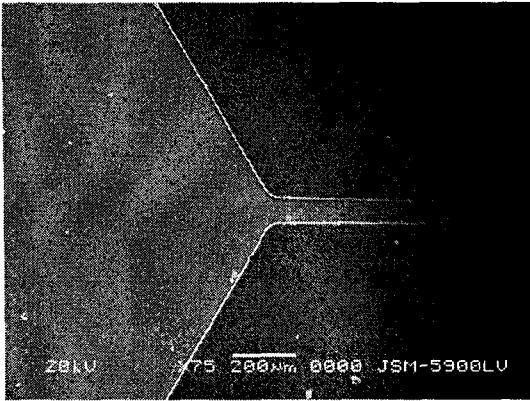


Fig. 9 SEM picture of single micro-channel

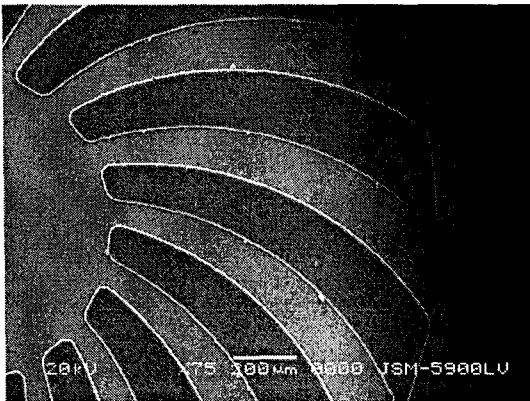


Fig. 10 SEM picture of curve micro-channels

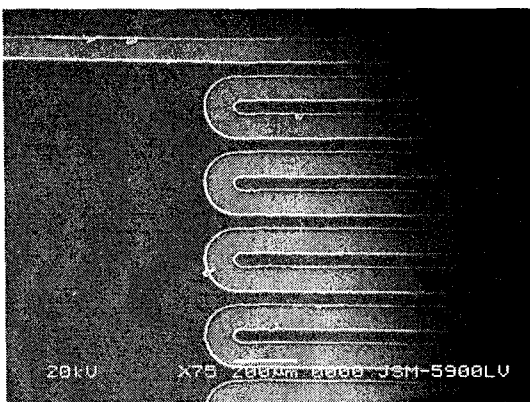


Fig. 11 SEM picture of serpentine micro-channel

3.2.2 복층 제작 공정(multi-layer fabrication)

SU-8 포토레지스터는 점도에 따라 스핀 코팅할 수 있는 최대 두께가 다르므로 복층의 구조물 제

작 시에는 다른 종류의 SU-8 레지스터를 조합하여 사용하여야 한다. SU-8 2010 은 코팅 두께 10~20 μm, 2050 은 50~190 μm, 2100 은 100~250 μm 의 코팅 두께를 가진다 3 차원 복층 구조의 경우 SU-8 2050 과 2100 을 격층으로 적층하여 제작하였다. 각 층 마다 스핀 코트, 소프트베이크, 노광, 포스트익스포즈베이크(hard bake)는 각 SU-8 의 특성에 맞게 시행착오(trial-and-error)법에 의해 조절하였고, 노광 시간(expose time)은 기 제작된 저층까지 자외선(UV) 광원이 침투하여 영향을 주지 않도록 150 초에서 20 초로 단축하였다. 현상(develop) 은 마지막 층까지 포스트익스포즈베이크가 끝난 뒤에 80 분 동안 초음파 진동조 (ultrasonicator) 에서 이루어 졌다(Fig. 12 참조). SU-8 2050 으로 마이크로 채널 형성 후 SU-8 2010 을 이용하여 채널커버(channel

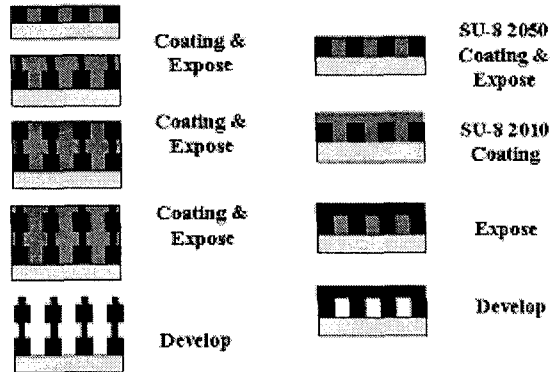


Fig. 12 Process of fabrication of multi-layer 3D microstructure

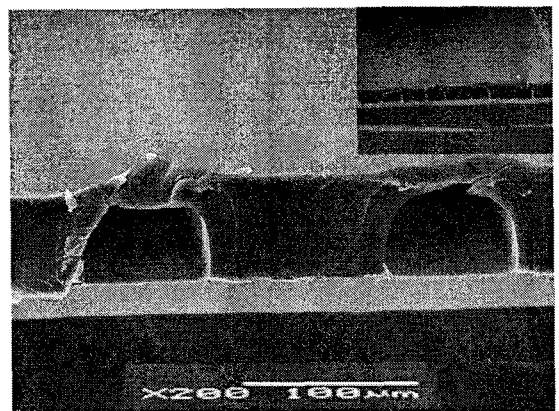


Fig. 13 Fabricated SU-8 micro-channels

cover)를 제작하여 SU-8 만으로 이루어진 3 차원 미세채널을 제작하였다(Fig. 13 참조). 자외선의 산란 현상으로 채널 경계부근에서 완벽한 직사각형 형태의 채널은 형성되지 않았으며 마이크로 채널 중 가장 얇은 부분인 윗 단에 약간의 크랙(crack) 이 관찰된다. 이는 초음파 진동조에서 세척 중 발생한 결함으로 추정된다.

SU-8 으로 제작된 3D 미세구조물은 PDMS 라는 폴리머를 이용하여 미세구조물을 대량 생산할 수 있는 몰드(mold)로도 활용될 수 있다는 장점을 가지고 있다. PDMS 에서 폴리머 미세구조물의 제작 과정은 Fig. 14 에 정리되어있다. Fig. 15 는 몰드로 사용된 SU-8 미세 구조물이며 SU-8 미세 구조물을 몰드로 사용하여 복제한 PDMS 폴리머 미세 구조물은 Fig. 16 과 같다.

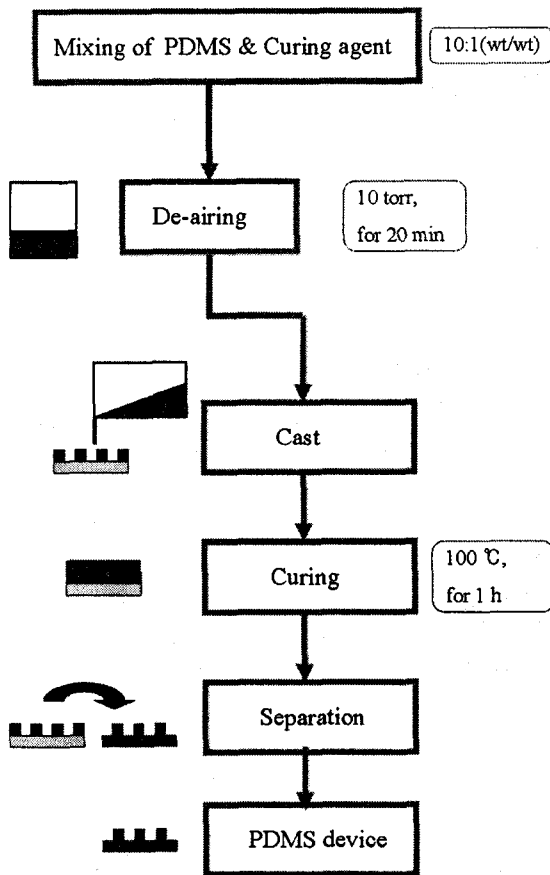


Fig. 14 Process of fabrication of PDMS replica

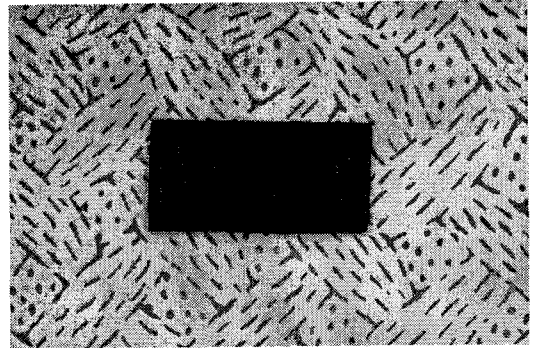


Fig. 15 Copper coated SU-8 3D micro-structure

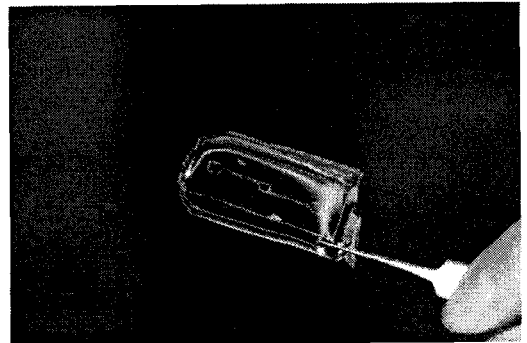


Fig. 16 Replicated PDMS 3D microstructure

4. 결론

광조형법과 자외선 리소그래피를 이용하여 웨 이브 마이크로 펌프의 미세 채널을 제작하였다. 광조형법은 채널 높이 500 μm 까지의 미세 채널 제작에 응용되었으며 그 이하의 크기를 갖는 미세 채널의 제작에는 자외선 리소그래피를 사용하였다. 광조형법으로 제작된 미세 채널(채널두께: 1.5 mm) 의 경우 채널 길이가 40 mm 이상으로 증가할 경 우 미세 채널의 정적 처짐(sag)이 관찰되었다. 또 한, FEM 해석 결과 가진 주파수 1.6 kHz 근방에서 공진에 의한 진동진폭의 증가가 가장 큼을 확인할 수 있었으며 이는 실험치(1.4 kHz)와도 잘 일치하 였다. 자외선 리소그래피의 경우 SU-8 포토 레지 스트를 사용한 미세구조물의 제작 최적 공정 조건 을 반복 실험에 의한 시행착오 방법을 거쳐 확립 하였다. 40,000dpi 의 해상도를 가지는 레이저프린 트로 제작된 필름마스크의 사용으로도 수십 마이 크로미터의 크기를 가지는 미세구조물의 제작은 성공적으로 가능함을 실험적으로 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005 년도 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-003-D00050).

참고문헌

1. Geschke, O., Klank, H. and Tellemann, P., "Microsystem Engineering of Lab-on-a-Chip Devices," Wiley-VCH, pp. 39-76, 2004.
2. Madou, J., "Fundamentals of MicroFabrication," CRC Press, pp. 1-14, 2002.
3. Chua, C. K., Leong, K. F. and Lim, C. S., "Rapid Prototyping," World Scientific, pp. 35-40, 2004.
4. Lee, Y. T., "Fabrication of the liquid analyzer using micro-stereolithography technology," Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 14, No. 12, pp. 994-1000, 2001.
5. Francis, E. H., "Microfluidics and BioMems Applications," Kluwer Academic Publishers, pp. 3-22, 2002.
6. Moroney, R. M., White, R. M. and Howe, R. T., "Ultrasonically Induced Microtransport," Proceedings of 1991 IEEE Micro-Electro Mechanical Systems, pp. 277-282, 1991.
7. Nguyen, N. T. and White, R. M., "Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wave micropump using numerical simulation," Sensors and Actuators, Vol. 77, No. 3, pp. 229-236, 1999.
8. Ikuta, K., Maruo, S. and Kojima, S., "New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure," Proceedings of the IEEE Micro electro mechanical Systems, pp. 290-295, 1998.
9. Gardeniers, J. G. E., Berenschot, J. W., Boer, M. J., Yeshurun, Y. and Hefetz, M., "Silicon micro-machined hollow microneedles for transdermal liquid transfer," Proceedings of the IEEE Micro electro mechanical Systems, pp. 141-144, 2002.
10. Tabata, O., Matsuzuka, N., Yamaji, T., Uemura, S. and Yamamoto, K., "3D fabrication by moving mask deep X-ray lithography with multiple stage," Proceedings of the IEEE Micro electro mechanical Systems, pp. 180-183, 2002.
11. Ehrfeld, W. and Schmidt, A., "Recent developments in deep X-ray lithography," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 16, No. 6, pp. 3526-3534, 1998.
12. Beret, C., Racine, G. A., Gobet, J., Luthier, R. and De Rooij, N. F., "Micro fabrication of 3D multi-directional inclined structure by UV lithography and electroplating," Proceedings of the IEEE Micro electro mechanical Systems, pp. 81-85, 1994.
13. <http://www.microchem.com>, "SU-8 Photoresist Product Line," 2007.