

UV경화성 폴리머를 이용한 미소유체 통합접속 벤치 개발 및 전기/유체적 특성평가

윤세찬* · 진영현* · 조영호*†

* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과

Electrical and Fluidic Characterization of Microelectrofluidic Bench Fabricated Using UV-curable Polymer

Sechan Youn*, Young-Hyun Jin* and Young-Ho Cho*†

* Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST

(Received March 31, 2010; Revised February 23, 2012; Accepted March 1, 2012)

Key Words : Lab-on-a-chip (랩온어칩), MicroTAS (미소분석시스템), Microfluidic Bench (미소유체 접속벤치)

초록: 본 논문은 고차가지구조 폴리머인 AEO3000 를 이용한 UV 광경화 성형 공정을 제안하고자 한다. 이는 기존의 바이오칩 제작에 사용되는 PDMS 보다 경도가 높아 금속 전극 형성이 용이하고 제작 공정이 빠르다는 장점을 갖는다. AEO3000 을 이용하여 본 연구에서는 4 개의 소자를 전기적·유체적으로 연결할 수 있는 전기유체 통합벤치를 제작하고 미소유체 혼합소자와 세포분리소자를 연결, 본 소재와 공정이 바이오칩에 적용될 수 있음을 검증하였다. 전기 유체적 특성 분석 결과 전기적 접촉 저항은 $0.75 \pm 0.44 \Omega$ 으로 충분히 작은 값을 보였으며, 유체 접속의 압력 저하는 8.3kPa 로 기존의 튜브 연결 방법 대비 39.3% 개선된 값을 보였다. 통합벤치에 접속된 소자에 활성 및 비활성 효모를 주입하여 순차적인 혼합 및 재분리를 성공적으로 구현함으로써 본 소자에 적용된 AEO3000 및 UV 광경화 공정이 생체시료의 처리에 적용될 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 이는 바이오 의료 분야에 적용 가능한 생체 친화적 소재의 고속 생산에 응용될 수 있다.

Abstract: We present a novel polymer fabrication process involving direct UV patterning of a hyperbranched polymer, AEO3000. Compared to PDMS, which is the most widely used polymer in bioMEMS devices, the present polymer has advantages with regard to electrode integration and fast fabrication. We designed a four-chip microelectrofluidic bench having three electrical pads and two fluidic I/O ports. We integrated a microfluidic mixer and a cell separator on the bench to characterize the interconnection performance and sample manipulation. Electrical and fluidic characterization of the microfluidic bench was performed. The measured electrical contact resistance was $0.75 \pm 0.44 \Omega$, which is small enough for electrical applications, and the pressure drop was 8.3 kPa, which was 39.3% of the value in the tubing method. By performing yeast mixing and a separation test in the integrated module on the bench, we successfully showed that the interconnected chips could be used for bio-sample manipulation.

1. 서론

최근 활발히 개발되고 있는 나노-바이오 소자의 양산을 위한 소재 및 공정의 중요성이 대두되고 있다. 나노-바이오 소자는 생체시료를 적용할 수 있는 생체친화성, 광학적 측정이 가능한 투명성, 그리고 경제성을 만족시키는 소재와 공정을 요구하는데, 이에 따라 대부분의 연구개발은 폴리머

소재에 집중되어 있다.

그 중 PDMS(Polydimethylsiloxane)는 생체친화성 및 경제성이 뛰어나 나노-바이오 소자에 가장 많이 사용되고 있는 폴리머 소재이나 경도가 낮아 (Young's modulus: 0.3~9MPa) 소자의 변형이 쉬워 금속전극의 손상을 초래하는 문제를 가지고 있다. 또한 2시간에 이르는 경화시간 역시 대량생산에 부적합하다. 이에 본 논문에서는 AEO3000⁽¹⁾ 이라는 새로운 형태의 UV 경화성 폴리머를 이용하여 PDMS에 비해 가공속도 및 기계적 물성이 우수한 새로운 폴리머 정밀가공 공정을 제안하고, 가능성을 검증하였

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

다. 또한 제안된 재료 및 공정의 바이오칩 적용가능성을 검증하기 위해 4개의 Chip을 이용한 미소유체 통합벤치를 AEO3000 공정을 기반으로 제작하고, 생체시료 적용 평가를 수행하였다. 이를 바탕으로 제안된 공정이 기존의 PDMS 공정을 대체하고, 성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

2. UV 경화성 폴리머 가공공정

2.1 AEO3000

본 연구에서 제안한 폴리머 공정에 사용된 AEO3000은 acrylated third generation hyperbranched polyether로 UV 경화성을 가지고 있어 SU-8 등의 Photoresist계열 폴리머와 같이 마스크링 레이어를 이용한 패터닝이 가능하다는 장점이 있다. 또한 Young's modulus가 770MPa로 PDMS보다 약 100배가량 높아 기존의 PDMS 소자들이 가지고 있던 한계 (전극배선공정, 변형문제)의 극복에 활용 가능하다. Table 1은 다양한 폴리머의 물성을 정리한 것이다. AEO3000은 물과의 접촉각도가 54.9°로 소수성(Hydrophobic)인 PDMS에 비해 유체 샘플의 제어에 적합하다는 장점도 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 가진 AEO3000을 이용한 새로운 정밀가공 공정을 제안하여, 이를 바이오 유체소자에 적용할 수 있음을 규명하였다.

2.2 UV 직접 패터닝 공정

본 연구에서는 선행연구³⁾를 통해 제안한 전기유체 통합벤치의 전극층을 AEO3000을 이용하여 제작하는데 있어, 마스크링 레이어를 이용한 UV의 선택적 조사를 통해 제작하고자 하는 형상을 직접 curing하는 UV 직접 패터닝 공정(Fig. 1)을 제안하고 실험적으로 검증하였다. UV 직접 패터닝 공정은 시편에 AEO3000을 도포한 후 그 위에 마스크링 레이어를 밀착하여 UV를 조사함으로써 별도의 주형 없이 원하는 형태의 구조물을 제작하는 방식으로 기존의 방식에 비해 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다. UV조사를 통한 경화시간은 90초였으며 이는 PDMS 경화시간인 2시간에 비해 속도면에서 월등한 값이다. UV조사 후 SU-8 현상액으로 경화되지 않은 부분을 제거한 AEO3000 구조물은 Fig. 2와 같다.

Table 1 Properties of polymer materials

Polymer	Young's Modulus (MPa)	Internal Stress (MPa)	Tg (°C)	Contact angle with water (deg)
AEO3000	770	1.7	55	53.9
PDMS ²⁾	0.3~9	N/A	-125	112.6
AH20	3920	3.6	N/A	91.0
DPHA	>5000	5	N/A	72.5

2.3 금박막 스크린프린팅 공정

제작된 AEO3000 구조물에 Shadow 마스크를 밀착한 후 스퍼터링을 통하여 0.5μm 두께의 금박막 전극 배선 공정(Fig. 1)을 수행하였다. AEO3000은 높은 탄성계수로 인해 소자변형에 의한 전극의 손상을 일으키지 않아 전극을 포함한 공정에 적합함을 실험적으

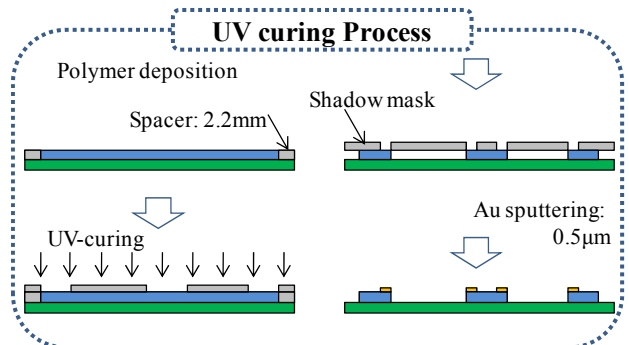


Fig. 1 Proposed polymer structure fabrication process including UV-direct patterning and screen printing

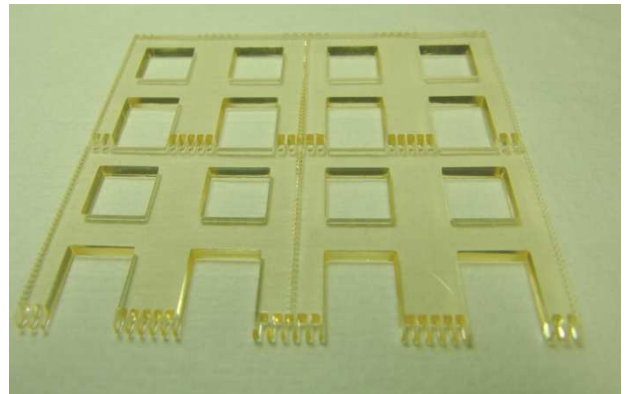


Fig. 2 Fabricated AEO3000 structure after UV exposure



Fig. 3 Separated AEO3000 structure after gold sputtering for electrode fabrication

Table 2 Comparison of individual chips and the chips integrated on the bench

	Interconnection		Achievement
	Tubing	Bench	
Contact resistance	<1 Ω	0.75± 0.44 Ω	Equivalent
Pressure drop (100μl/min)	21.1kPa	8.3kPa	60.7% reduced
Dead volume	>100ul	3.14μl	>95% reduced
Cell separation performance	95.9% (V) 64.9% (N/V)	89% (V) 58% (N/V)	Equivalent

*V: Viable, N/V: Non-viable

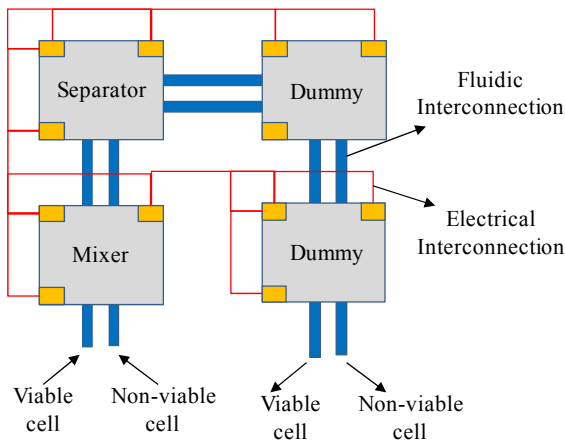


Fig. 4 Device composition on the bench

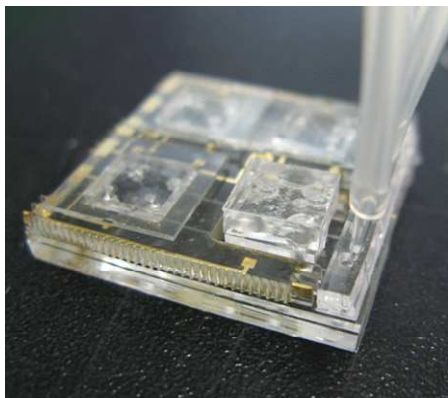
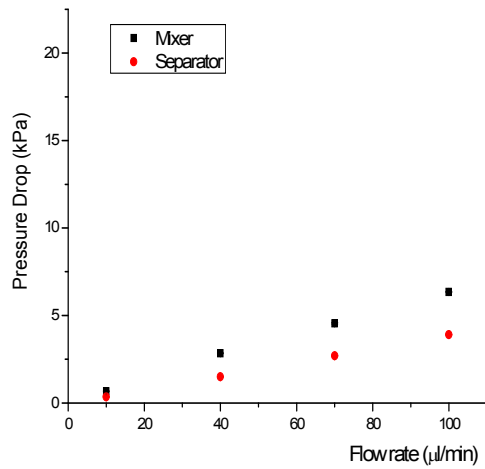


Fig. 5 Fabricated device including microelectrofluidic bench and interconnected 4 device chips

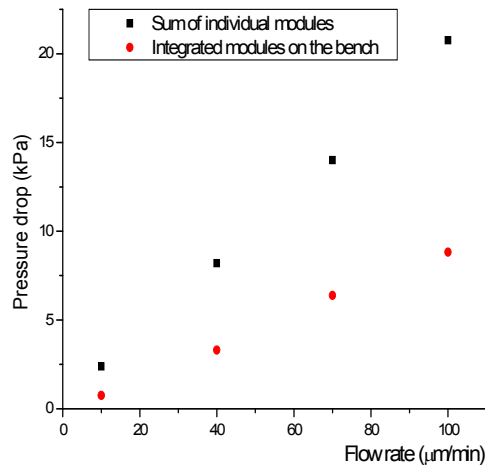
로 검증하였으며, 전극배선을 포함한 전기접속층 구조물은 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

2.4 전기/유체적 접합 공정

제작된 미소유체 통합벤치의 성능평가를 위해 바이오 유체 혼합소자⁽⁴⁾와 세포 분리 소자,⁽⁵⁾ 그리고 두개의 Dummy Chip을 Fig. 4와 같은 배치



(a)



(b)

Fig. 6 Fluidic resistance characterization: (a) pressure drop in each chips; (b) pressure drop in the bench compared to the sum of each chips

로 장착하였다. PDMS로 제작된 소자의 유체적 접속은 플라즈마 처리를 통해 이루어 졌으며 전기접속은 전도성 폴리머(ICA)를 이용하였다. 벤치상에 장착된 네개의 Chip은 Fig. 5와 같다.

3. 특성평가

3.1 전기/유체적 특성평가

제작된 벤치에 소자 장착 후 전기/유체적 접속 성능을 평가하였다. 전기적 접속의 경우 접촉저항이 0.75±0.44Ω으로 기존의 개별연결 방식과 대등한 값을 보였다. 이를 통해 AEO3000은 폴리머상에 금속 전극 배선이 가능하며, 그 특성이 실제 전기적 접속에 사용할 수 있음을 검증하였다. 또한 유체접속의 압력강하의 경우 Tube를 이용한 접속에 비해 60.7% 감소된 수치를 나타내었다(Table 2, Fig. 6). 이를 통해

제안된 폴리머 구조물 및 이를 이용한 바이오소자의 접합공정이 기존의 바이오소자 접속방법과 동등하거나 향상된 결과를 나타낼 수 있음을 입증하였다.

3.2 생체시료 적용 및 특성평가

제작된 통합벤치가 생체시료의 처리에 사용될 수 있음을 입증하기 위하여 벤치상에 바이오유체 혼합소자⁽⁴⁾와 세포 분리소자⁽⁵⁾를 장착하고 특성을 분석하였다. 벤치상에 장착된 소자의 성능을 평가하기 위해 기존의 전기/유체적 접속방식인 Tubing 및 Soldering을 통해 개별소자의 특성을 분석하였고, 이를 벤치상에 집적시킨 성능특성과 비교분석을 수행하였다. Figure 7은 페놀프탈레인 용액을 이용하여 바이오유체 혼합소자의 성능을 가시화한 것이다. 이를 통해 제작된

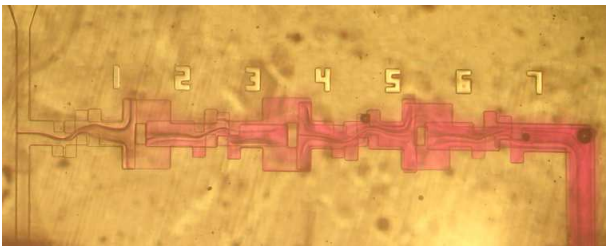


Fig. 7 Visualization of fluidic mixing performance using phenolphthalein

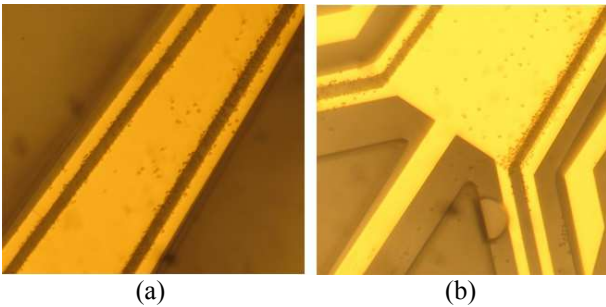


Fig. 8 Cell separating performance: (a) separation of viable and non-viable yeast; (b) collecting cells at the outlet channels

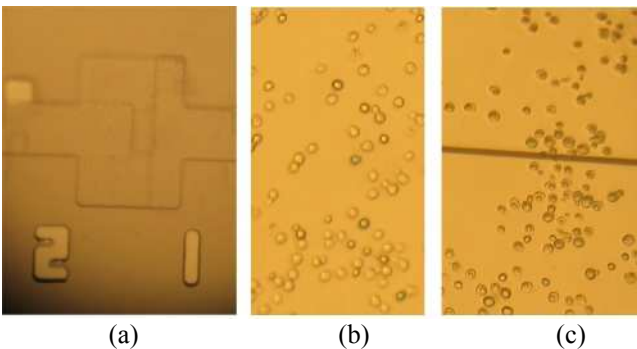


Fig. 9 Experimental results: (a) Mixed cells in the mixer; (b) Viable cells collected at the outlet port; (c) Non-viable cells collected at the other port

바이오유체 혼합소자의 유체혼합 성능을 실험적으로 검증하였다. 또한 세포분리소자 역시 개별소자 성능평가를 수행하였는데, Fig. 8(a)에 도시된 바와 같이 활성 효모와 비활성 효모가 DEP 특성에 따라 각기 다른 전극 주위에 모이는 것을 확인할 수 있었다.

이를 소자의 출구(Fig. 8(b))에서 회수하여 분석한 결과 분리된 활성효모의 순도는 95.9%, 비활성효모의 경우 64.9%를 나타내어 제안된 세포분리소자가 고효율로 활성효모를 분리해낼 수 있음을 확인하였다.

개별소자의 성능검증 이후 Fig. 4와 같이 이를 벤치상에 장착시켜, 벤치상에 전기/유체적으로 연결된 소자의 성능을 비교 평가하였다. 먼저 벤치상의 두개의 유입구에 활성 효모와 비활성 효모를 각각 주입한 후 바이오유체 혼합소자에서 혼합을 수행하였다. Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 혼합소자를 지나면서 세포가 활발하게 혼합됨을 현미경을 통해 관찰할 수 있었다. 혼합된 효모는 세포분리소자로 이송되어 DEP 특성에 의한 분리가 이루어졌는데, 활성효모(Fig. 5(b))의 경우 89%, 비활성 효모(Fig. 5(c))는 58%의 순도를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 전기유체 통합벤치상에 장착된 소자들은 각 소자의 개별적 성능을 벤치상에서도 대등하게 구현할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 바이오소자에 적용할 수 있는 새로운 폴리머 소재와 공정을 제안하고, 실험적으로 특성을 분석하였다. AEO3000을 이용한 폴리머 직접 패터닝 공정은 기존의 바이오소자에 사용되는 PDMS에 비해 공정시간이 짧고, 물질의 기계적 강도가 높아 금속전극 배선이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이를 바탕으로 기존의 PDMS 공정을 대체하여 전기유체 통합벤치를 제작한 결과 기존 소재에 비해 전기/유체적 접속 성능이 우수하였으며, 효모를 이용한 생체 시료 혼합/분리 실험 결과 세포의 활성을 유지하며 처리할 수 있음을 입증하였다. 이를 통해 생체시료 분석을 위한 바이오소자에 본 소재와 공정이 사용될 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 신기술융합형 성장동력사업인 “융합기술을 이용한 혈중 암세포 기반 신개념 암 예후 예측 진단 원천기술 개발”의 세부

과제 “CTC 활성유지 선별 및 다중특성 분석기술 개발” (과제번호 2011K000864)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Schmidt, L.E., Yi, S., Jin, Y. -H., Leterrier, Y., Cho, Y. -H. and Månson, J. E., 2008, "Acrylated Hyperbranched Polymer Photoresist for Ultra-Thick and Low-Stress High Aspect Ratio Micropatterns," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 4, Paper No. 045022, pp. 1~8.
- (2) Lotters, J. C., Olthuis, W., Veltink, P. H., and Bergveld, P., 1997, "The Mechanical Properties of the Rubber Elastic Polymer Polydimethylsiloxane for Sensor Applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 7, pp. 145~147.
- (3) Chang, S., Suk, S. D. and Cho, Y. -H., 2009, "Characterization of a Multi-Chip Microelectro-Fluidic Bench for Modular Fluidic and Electric Interconnections," *Sensors and Actuators B*, Vol. 140, No. 2, pp. 342~348.
- (4) Chang, S. and Cho, Y.-H., 2005, "Static Micromixers Using Alternating Whirls and Lamination," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 1397~1405.
- (5) Doh, I. and Cho, Y. -H., 2005, "A Continuous Cell Separation Chip Using Hydrodynamic Dielectrophoresis (DEP) Process," *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, pp. 59~65.