

< 논문 >

전기 및 유체 동시접속이 가능한 멀티칩 미소전기유체통합벤치의 설계, 제작 및 성능시험

장성환* · 석상도* · 조영호 †

(2005년 5월 9일 접수, 2006년 2월 24일 심사완료)

A Multi-chip Microelectrofluidic Bench for Modular Fluidic and Electrical Interconnections

Sunghwan Chang, Sang Do Suk and Young-Ho Cho

Key Words : Microelectrofluidic Bench(미소전기유체통합 벤치), Multi-chip System(멀티칩 시스템), Micro-fluidic Modules(미소유체 모듈), Electrofluidic Interconnection(전기유체적 연결), Low-loss Interconnection(저손실 연결), Low-temperature Assembly(저온 결합)

Abstract

We present the design, fabrication, and characterization of a multi-chip microelectrofluidic bench, achieving both electrical and fluidic interconnections with a simple, low-loss and low-temperature electrofluidic interconnection method. We design 4-chip microelectrofluidic bench, having three electrical pads and two fluidic I/O ports. Each device chip, having three electrical interconnections and a pair of two fluidic I/O interconnections, can be assembled to the microelectrofluidic bench with electrical and fluidic interconnections. In the fluidic and electrical characterization, we measure the average pressure drop of 13.6~125.4 Pa/mm with the nonlinearity of 3.1% for the flow-rates of 10~100 $\mu\text{l}/\text{min}$ in the fluidic line. The pressure drop per fluidic interconnection is measured as 0.19kPa. Experimentally, there are no significant differences in pressure drops between straight channels and elbow channels. The measured average electrical resistance is 0.26 Ω /mm in the electrical line. The electrical resistance per each electrical interconnection is measured as 0.64 Ω . Mechanically, the maximum pressure, where the microelectrofluidic bench endures, reaches up to 115 \pm 11kPa.

1. 서 론

최근 미소생화학분석시스템(μTAS : Micro Total Analysis Systems), 랩온어칩(Lab on a chip) 등 소형화된 분석 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 미소분석시스템들은, 시료의 준비, 주입,

처리, 분리, 감지 등의 많은 과정들이 필요하다. 그러나, 현재까지의 많은 연구들은 각각의 과정을 위한 개별 소자 개발에 초점이 맞추어져 있고, 전체 시스템 구성을 위한 인터페이스와 소자간 접속에 관한 연구는 많이 진행되지 못했다. 본 논문에서는 다수의 소자로 구성된 미소 전기유체 분석 시스템을 구축하기 위해 필수적인⁽¹⁾ 소자간 접속 구조와 관련 모듈 개발에 초점을 맞추고자 한다.

접속을 통해 구현된 멀티칩 시스템⁽²⁾은 집적화된 단일칩 시스템⁽³⁾에 비하여 별도의 접속로봇과정이 필요한 단점이 있지만, 구성요소의 재료와

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오시스템학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail: nanosys@kaist.ac.kr
TEL: (042)869-8691, FAX: (042)869-8690

* 한국과학기술원 바이오시스템학과, 디지털나노구동연구단

제작공정의 선택이 다양하다는 장점이 있다. 기존의 멀티칩 접속에 관한 연구로서, 또한 양극접합,⁽⁴⁾ O링 튜빙,⁽⁵⁾ 기계적 체결⁽⁶⁾을 이용한 유체접속이 제안되었으나, 미소 전기유체 분석시스템에 적용을 위한 전기접속은 간과하고 있다.

이에 본 논문에서는 다수의 칩으로 구성된 열유체 및 생화학 멀티칩 미소시스템⁽¹⁾ 구현을 위하여, 상온에서 다수개의 전기유체칩의 전기접속과 유체접속을 동시에 구현할 수 있는 새로운 형태의 미소전기유체통합벤치(이하 통합벤치)를 설계, 제작하였으며, 멀티칩의 접속부위에서 발생하는 유체접속 및 전기접속 손실, 그리고 유체접속부의 임계압력을 정량적으로 측정 분석하였다.

2. 동작원리 및 설계

Fig. 1은 4개의 전기유체칩(device-chip)을 접속할 수 있는 통합벤치의 구조를 나타내며, 각각의 전기유체칩은 3개의 전기접속 단자와 2쌍의 유체접속 단자(Fig. 2)를 통하여 통합벤치에 접속된다.

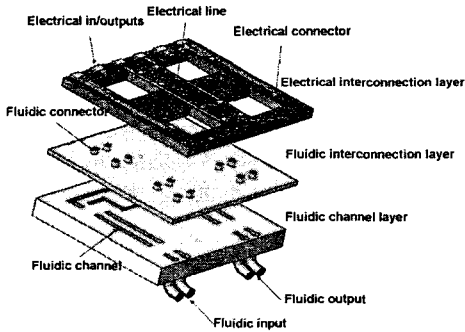


Fig. 1 Perspective views of the microelectrofluidic bench and the device-chip optimized for interconnection

통합벤치는 전기접속 단자와 배선이 형성된 전기접속층[Fig. 3(a)], 유체접속 단자가 제작된 유체접속층[Fig. 3(b)], 그리고 칩간의 유체 연결배선이 형성된 유체배선층[Fig. 3(c)]의 3개의 층으로 구성된다. 주요 구성요소의 상세치수를 Table 1에 정리하였다.

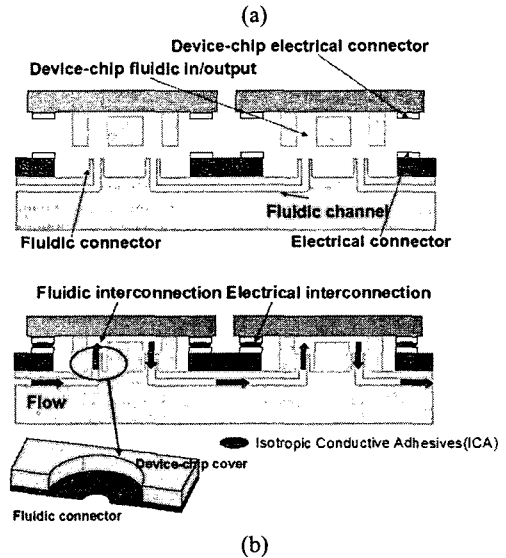
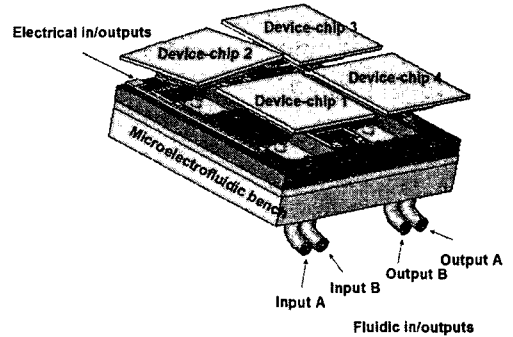


Fig. 2 Electrical and fluidic interconnections using microelectrofluidic bench: (a) perspective view; (b) cross-sectional view

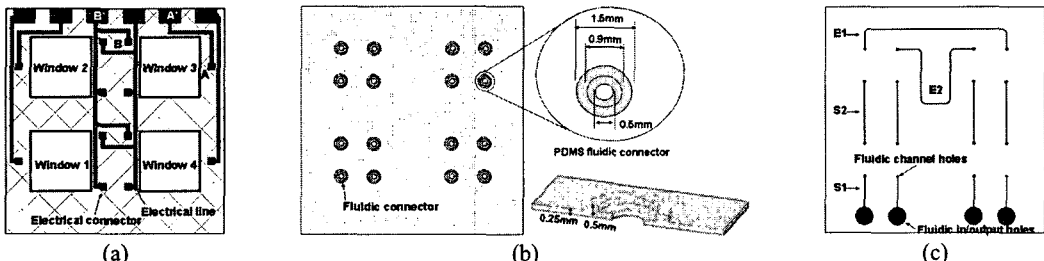


Fig. 3 Three layers of the microelectrofluidic bench: (a) electrical interconnection layer; (b) fluidic interconnection layer; (c) fluidic channel layer

Table 1 Dimensions of microelectrofluidic bench in Fig. 3

Layers [30×31mm ²]	Components	Dimension
Electrical interconnection layer	Electrical contact pad	1×1 mm ²
	Electrical line thickness	490±50 μm
	Window	8×8 mm ²
Fluidic interconnection layer	Fluidic connector	Inner diameter: 0.9 mm Outer diameter: 1.5 mm Hole diameter: 0.5 mm
	Channel geometry	Depth: 101±4 μm Width: 198±5 μm
Fluidic channel layer	Channel length	4, 8, 24 mm
	Fluidic channel end diameter	0.48±0.03 mm
	Fluidic in/output hole diameter	2.5±0.5 mm

3. 제작 공정

통합벤치와 전기유체칩의 제작과정을 Fig. 4에 각각 도시하였다. 통합벤치는 전기접속층과 유체 접속층, 유체배선층을 함께 조립하여 제작된다. Fig. 4(a)에서, 전기접속층은 polycarbonate(PC) 기판에 증착된 Cr과 Au를 패턴 함으로 제작된다. 유체 접속층은 PDMS 몰딩공정을 이용하여 제작된다. 몰드는 negative PR인 SU-8 100을 2중 노출 후, 1번 현상하여 제작하였다. 두께가 총 500 μm에 이르는 PR 두께로 인하여 일반적인 525 μm의 실리콘 웨이퍼가 휘어지는 문제가 생겨, 이것을 극복하고자 몰드의 기판으로 3 mm 두께의 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. 유체배선층은 역시 PDMS 몰딩으로 제작된다. 몰드는 100 μm 두께의 SU-8이 패턴된 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. Fig. 4(b)에서 전기유체칩은 Cr과 Au가 증착된 PC기판과 PDMS 몰딩 공정으로 만들어진 덮개를 조립하여 제작된다.

조립된 통합벤치와 전기유체칩의 유체접속은 플라즈마 처리⁽⁷⁾된 PDMS 접합으로 형성되며, 전기접속은 각각의 전기패드 사이의 전도성폴리머(ICA)로 형성되었으며,⁽⁸⁾ 모두 상온에서 이루어진다. 제작된 통합벤치와 전기유체칩은 Fig. 5(a)과 같으며, 4개의 전기유체칩과 결합된 통합벤치를 Fig. 5(b)에 제시하였다. Fig. 6(a)는 제작된 유체접속 단자를 나타내며, 유체접속층과 유체배선층이 정렬이 된 모습을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 유체/전기 접속부의 단면이다.

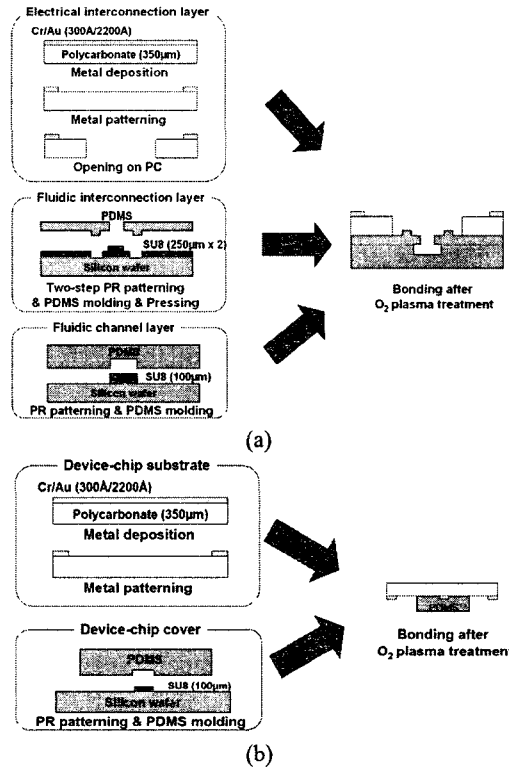


Fig. 4 Fabrication process: (a) the microelectrofluidic bench; (b) the device-chip

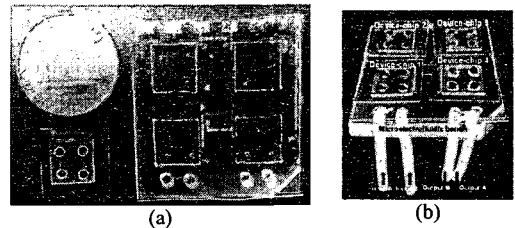


Fig. 5 Fabricated devices: (a) microelectrofluidic bench and device-chip; (b) microelectrofluidic bench interconnecting four device-chips

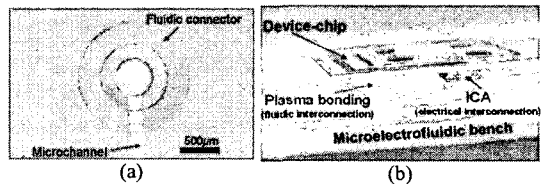


Fig. 6 Enlarged views of (a) the fluidic interconnection part; (b) electrical and fluidic interconnections

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험장치 및 방법

제작된 4칩 통합벤치의 성능특성 실험은 Table 2에 정리된 조건하에서 접속부의 유체 및 전기 저항 특성평가와 접속부의 기계적 강도 측정에 중점을 두었다. Fig. 7은 전기 저항 및 유체 저항을 측정하기 위한 장치이다. 유체접속 평가를 위하여 유량변화에 따라 유로배선과 접속부위에서 발생하는 압력강하를 측정하였고, 전기접속 평가를 위해서는 Cr/Au 전기배선과 ICA 접속부위에서 발생하는 전기저항을 측정하였다.

접속부위에서 발생하는 압력강하를 구하기 위하여, 본 논문은 접속부위의 압력강하와 유로배선의 압력강하를 포함한 전체 압력강하를 측정 한 후, 식 (1)과 같이 유로 배선의 측정 압력강하를 빼는 방법을 사용한다. 또한, 본 논문은 접속부위에서 발생하는 전기저항을 구하기 위하여, 접속부위의 전기저항과 전기배선의 저항을 포함하는 전체 저항 값을 빼는 방법을 사용한다.

$$\Delta P_{con} = \Delta P_{total} - \Delta P_{line} \quad (1)$$

$$R_{con} = R_{total} - R_{line} \quad (2)$$

여기서 ΔP_{total} , R_{total} 은 전체 압력강하와 전체 저항, ΔP_{line} , R_{line} 은 배선 압력강하와 배선 저항, ΔP_{con} , R_{con} 은 접속 압력강하와 접속 저항이다.

Fig. 8은 유체접속부의 기계적 강도를 측정하기 위한 장치이다. 헬륨가스를 흘려주며, 접속부가 파괴되는 압력을 측정하여 접속부가 견디는 임계압력을 측정하였다.

4.2 유체 접속 평가

유체접속 특성평가에서는 상온에서 DI water를 이용하여, 10~100 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량변화 조건에서, 통합벤치에 형성된 유체배선과 유체접속부에서 발생하는 압력강하를 각각 측정을 하였다.

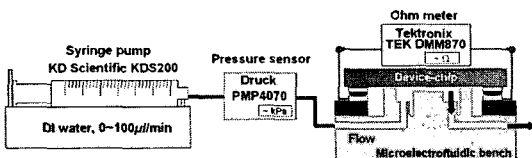


Fig. 7 Experimental apparatus for the characterization of electrical and fluidic interconnections

Fig. 9는 유체배선에서의 압력강하를 측정하기 위한 시편을 나타낸다. 유체배선에서의 압력강하는 각각 4 mm(S1), 8 mm(S2), 24 mm(S3)의 3개의 서로 다른 길이의 유로와 길이는 24 mm로 같되 굴곡이 2개(E1), 4개(E2)인 유로의 압력강하를 비교함으로써 분석하였다.

Fig. 10(a)는 서로 다른 길이의 유로에서 측정 한 압력강하와 Fluent 5.5에 의한 시뮬레이션 예측치를 서로 비교한 것이다. 10, 40, 70, 100 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 변화된 유량조건에서의 유로에 의한 압력강하는 각각 13.6, 57.0, 97.2, 125.4 Pa/mm로서 최대 비선형도 3.1%이내로 측정되었다. Fig. 10(b)는 24 mm의 길이를 가지며 굴곡이 없는 유로(S3)와 굴곡이 2개(E1), 4개(E2)인 유로에서 측정 한 압력강하와 Fluent 5.5에 의한 시뮬레이션 예측치를 서로 비교한다.

Table 2 Experimental methods and conditions for microelectrofluidic benches with device-chips

Characterization		Used structure	Methods	Conditions
Fluidic	Line	S1, S2, S3	Flow rate vs. Pressure drop measurement	DI water at 20°C Flow rate ($\mu\text{l}/\text{min}$): 10, 40, 70, 100
	Elbow	E1, E2		
	Interconnection	Bench + device-chip		
Electrical	Line	Bench + device-chip	Electrical resistance measurement	ICA (DOTITE D-500) bonded at 20°C
	Interconnection	Bench + device-chip		
Mechanical	Interconnection	Bench + device-chip	Helium gas flowing	At 20°C

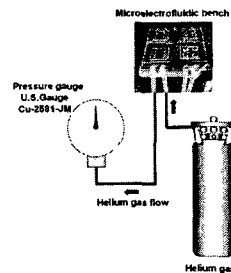


Fig. 8 Experimental apparatus for maximum pressure test

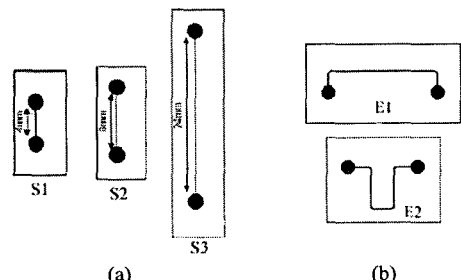
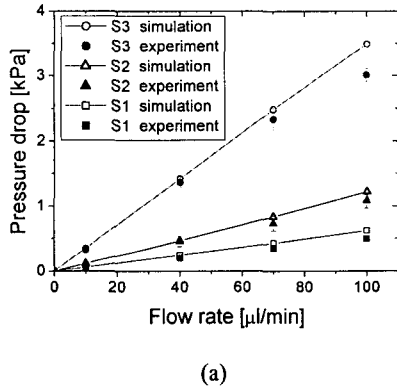
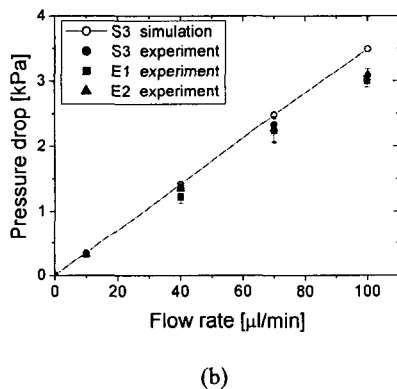


Fig. 9 Channel structures for fluidic line resistance test: (a) straight channels; (b) equivalent 24mm-length channels with 2 and 4 elbows



(a)



(b)

Fig. 10 Measured and estimated fluidic line resistances of fluidic channels in fig. 9: (a) S1, S2, S3; (b) S3, E1, E2 for the flow rates of 10, 40, 70, and 100μl/min, respectively

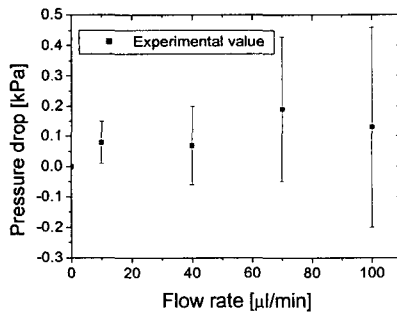


Fig. 11 Measured fluidic interconnection resistances in Fig. 2(b) for the flow rates of 10, 40, 70, and 100μl/min, respectively

측정치에서 굴곡에 의한 압력강하는 모두 최대 측정오차 0.098 kPa 안에 들어가는 값이며 이 값은 전체 압력강하의 2.3%에 해당하는 매우 작은 값이다. 따라서 Fig. 3(c)의 E1, E2, 두 유체 배선에서의 압력강하는 거의 차이가 없다.

Table 3 Measured electrical resistances of electrical lines in Fig. 3(a), device-chip, and electrical interconnections in Fig. 2(b)

Electrical characterization	Line resistance			Interconnecti on resistance
	R_{AA}	R_{BB}	R_{chip}	R_{ICA}
Measured resistance (Ω)	2.20	3.40	6.40	0.64±0.58
	±0.35	±0.42	±0.39	

Fig. 11은 동일한 유량조건 변화에 관한 유체접속에 의한 압력강하를 보여주고 있는데, 단일 유체접속별 최대압력강하는 0.19 kPa로서 24 mm 길이의 유로에서 유속 100 μl/min 시 발생하는 압력강하(3.0 kPa)의 6.3%에 해당하는 매우 작은 값이다.

4.3 전기 접속 평가

전기접속 특성평가에서는 Table 3과 같이 전기배선 및 전기접속부의 저항을 측정하였다. 직선형태의 전기배선의 저항은 0.26 Ω/mm이며, ICA와 양단의 패드간의 접속부위에서 발생하는 전기접속 저항은 평균 0.64 Ω으로 측정되었다. 따라서 전기접속부의 저항은 2.5 mm 길이의 전기배선의 평균저항에 해당한다.

4.4 임계 압력 평가

유체접속부의 임계 압력평가에서는 Table 4와 같이 유체접속단자에서 기계적 파괴가 일어나 헬륨 가스가 누출되는 임계 압력을 측정하였다. 측정된 임계 압력은 115±11.2 kPa이며, 이것은 미소유체펌프들의 동작범위인 10 kPa⁽⁹⁾의 압력을 고려할 때, 충분히 크므로, 미소유체펌프들이 가하는 압력으로는 기계적 손실이 일어나지 않을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 멀티칩 전기유체시스템 구현을 위하여 다수 칩들 간에 전기 및 유체 접속을 동시에 형성할 수 있는 미소전기유체통합벤치를 설계, 제작하였고 실험을 통하여 유체접속저항 및 전기접속저항을 정량적으로 측정하였다.

유체접속 평가에서, 유로에서 발생하는 압력강하는 10, 40, 70, 100μl/min 의 유량 조건에 따라 3.1%의 비선형성을 가지며, 평균적으로 13.6, 57.0, 97.2, 125.4 Pa/mm이었다. 실험적으로 굴곡이 있는 유로에서 발생한 압력강하는 굴곡이 없는 유로에서 발생한 압력강하와 측정오차 범위, 0.098kPa 내에서 동일하였다. 또한, 각각의 접속부위의 압력강하는 최대 0.19kPa이었고, 24mm 길이의 유로에서 발생하는 압력강하의 6.3%에 해당하는 값이다. 전기접속 평가에서, 전선 부분의 평균 전기 저항은

0.26 Ω /mm이었고, 접속부위의 평균 전기 저항은 0.64 Ω 이었다. 임계압력평가에서, 유체접속부가 기계적으로 파괴되는 압력은 115 \pm 11.2kPa이었다.

따라서 본 논문의 미소전기유체통합벤치는 전기 및 유체 동시접속과 상온 저 접속손실을 위한 실용적 방법을 제시하고 있으며, 다수의 칩으로 구성된 열유체 및 생화학 멀티칩 미소시스템 구현에 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구"와 한·스위스 국제공동연구사업인 "나노바이오유체소자 개발 및 특성 분석"의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Reyes, D. R., Iossifidis, D., Auroux, P. -A. and Manz, A., 2002, "Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology," *Analytical Chemistry*, Vol.74, No.12, pp.2623~2636.
- (2) Hofmann, O., Niedermann, P. and Manz, A., 2001, "Modular Approach to Fabrication of Three-dimensional Microchannel Systems in PDMS - Application to Sheath Flow Microchip," *Lab on a Chip* Vol. 1, pp. 108~114.
- (3) Kikutani, Y., Tokeshi, M., Sato, K. and Kitamori, T., 2002, "Integrated Chemical Systems on Microchips for Analysis and Assay. Potential Future, Mobile High-Performance Detection System for Chemical Weapons," *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 74, No. 12, pp. 2299~2309.
- (4) Schabmueller, C. G. J., Koch, M., Evans, A. G. R. and Brunnschweiler, A., 1999, "Design and Fabrication of a Microfluidic Circuitboard," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9, pp. 176~179.
- (5) Yao, T. -J., Lee, S., Fang, W. and Tai, Y. -C., 2000, "Micromachined Rubber O-ring Micro-Fluidic Couplers," *Proceedings of the 13th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Miyazaki, Japan, pp. 624~627.
- (6) Gray, B. L., Collins, S. D. and Smith, R. L., 2004 "Interlocking Mechanical and Fluidic Interconnections for Microfluidic Circuit Boards," *Sensors and Actuators*, Vol. A112, No. 1, pp. 18~24.
- (7) Duffy, D. C., McDonald, J. C., Schueller, O. J. A. and Whitesides, G.M., 1998, "Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane)," *Analytical Chemistry*, Vol. 70, No. 23, pp. 4974~4984.
- (8) Lu, D., Tong, Q. K. and Wong, C. P., 1999, "Conductivity Mechanism of Isotropic Conductive Adhesives (ICA's)," *IEEE Transactions on Electronics Packaging, and Manufacturing*, Vol. 22, No. 3, pp. 223~227.
- (9) Kovacs, G. T. A., 1998, *Micromachined Transducers Sourcebook*, WCB McGraw-Hill, Boston, pp. 839~858.