

단순공정으로 제작된 마이크로/나노 하이브리드 채널의 불균형 동전기성을 이용한 미세혼합기 연구

유사무엘* · 김 선 민*†

* 인하대학교 기계공학부

Simple Fabrication of Micromixer Based on Non-Equilibrium Electrokinetics in Micro/Nano Hybrid Fluidic System

Samuel Yu* and Sun Min Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received September 30, 2010 ; Revised January 13, 2011 ; Accepted January 13, 2011)

Key Words : Non-Equilibrium Electrokinetics(불균형 동전기성), Micromixer(미세혼합기), Electrical Breakdown(전기적 파괴), Electroosmosis(전기삼투), Polydimethylsiloxane (PDMS), Micro/Nano Fluidic System(미세/나노 유체시스템)

초록: 본 연구에서는 미세채널과 나노채널의 교차부에 불균형 동전기성을 이용한 미세혼합기를 개발하였다. 채널 내 용액의 혼합은 인가된 전압에 의한 전기삼투유동과 미세채널과 나노채널 교차 부에서의 불균형 동전기성에 의한 와류현상에 의해 이루어진다. 미세채널은 PDMS 을 이용하여 소프트리소그래피 공정으로 제작하였고, 나노채널은 미세채널의 특정위치에 전기적 충격에 의한 PDMS 의 파괴로 매우 간단하게 제작하였다. 혼합성능을 평가하기 위하여 형광물질인 Rhodamine B 용액을 이용하여 혼합 전과 후의 형광 분포를 분석하였으며, 약 90%의 혼합을 얻을 수 있었다. 본 연구의 미세혼합기는 복잡한 공정을 요구하지 않고 매우 간단하게 제작되었으며, 생화학시료 분석을 위한 미세시스템에 활용될 수 있다.

Abstract: In this study, we developed a micromixer based on the non-equilibrium electrokinetics at the junction of a microchannel and nanochannel. Two fluid streams were mixed by an electro-osmotic flow and a vortex flow created as a result of the non-equilibrium electrokinetics at the junction of the microchannel and nanochannel. Initially, the microchannel was fabricated using Polydimethylsiloxane (PDMS) by the general soft lithography process and the nanochannel was created at a specific position on the microchannel by applying a high voltage. To evaluate the mixing performance of the micromixer, fluorescent distribution was analyzed by using the fluorescent dye, Rhodamine B. About 90% mixing was achieved with this novel micromixer, and this micromixer can be used in microsystems for biochemical sample analysis.

1. 서 론

생체 시료(DNA, 단백질, 세포 등) 분석을 위한 미세유체시스템에서 유체의 효과적인 혼합은 시료의 반응 및 분석을 위해 매우 중요한 과정 중 하나이다.⁽¹⁾

그러나 미세유체시스템의 경우, 작은 채널 크기로 인해 매우 낮은 레이놀즈 수(Reynolds number)

를 갖게 되며 채널 내부 유동이 층류(laminar flow)를 이룬다. 따라서, 난류(turbulent flow)에 의한 와류(vortex) 등의 유동현상을 이용한 유체의 혼합은 어려우며, 단지 분자확산에 의한 매우 느린 속도의 혼합이 진행된다.⁽²⁾

따라서 효과적이고 제어가 가능한 미세혼합기에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 미세혼합기는 크게 능동형(active)과 수동형(passive)으로 분류된다.^(3,4) 수동형 미세혼합기는 외부 에너지를 이용하지 않고 미세혼합기의 채널형상을 변화시켜 혼합을 증진시킨다. 반면에 능동형 미세

† Corresponding Author, sunmk@inha.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

혼합기는 구동장치, 전기장, 자기장과 같은 외부 에너지원을 이용한다.⁽⁵⁻⁷⁾

능동형 혼합기는 수동형 혼합기에 비하여 빠른 혼합이 가능하고 외부에서 혼합기를 제어 할 수 있는 장점이 있어 능동형 혼합기가 미세유체시스템에 다양하게 활용되고 있다. 그러나 능동형 혼합기는 복잡한 제작공정으로 인해 높은 제작비가 요구되는 문제점이 있다.^(8,9)

본 연구에서는 기존의 능동형 미세혼합기 제작 공정에 비해 매우 간단한 제작공정을 갖는 능동형 미세혼합기를 개발하였다. 높은 전압인가에 따른 polydimethylsiloxane(이하 PDMS)의 전기적 파괴를 이용하여 간단하게 나노채널을 형성한 후, 미세채널과 나노채널의 교차부의 불균형한 동전기적 현상을 일으키는 적정전압을 인가하여 와류에 의한 용액의 혼합을 얻는다.

2. 미세혼합기 제작 및 실험방법

2.1 미세혼합기 제작

미세혼합기 (길이 2.25cm × 폭 100 μ m × 두께 28 μ m)는 AutoCAD (Autodesk Inc.)를 이용하여 설계하였으며, 전기적인 파괴로 나노채널이 형성될 수 있도록 PDMS의 파괴전압 (21V/ μ m)을 고려하여 미세채널의 특정위치를 근접하게 설계하였다.⁽¹⁰⁾

설계과정을 통해 제작된 필름마스크를 이용하여, PDMS를 이용한 시스템 제작을 위해 소프트리소그래피 공정을 통해 SU-8 photoresist (SU-8 2025, Microchem) 주형을 제작하였다.

제작된 SU-8 주형 위에 PDMS (Sylgard 184, Dow Corning Corp.)와 경화제를 질량 비 10:1의 비율의 섞은 혼합액을 도포한 후, PDMS가 도포된 주형을 Vacuum jar에서 기포를 제거하고 순환식 건조기에서 70 $^{\circ}$ C로 2시간 동안 처리하였다.

PDMS가 경화된 후 주형과 PDMS를 분리하고 PDMS와 슬라이드 글래스 (Slide glass)를 플라즈마 장치 (CUTE-100LF, FEMTO Science)에서 60초간 처리한 후 PDMS-glass 접합 (bonding)을 통해 Y-채널 미세혼합기를 제작하였다.

2.2 나노채널 제작

강한 전압인가에 의한 전기충격으로 미세채널 사이의 PDMS를 파괴시켜 나노채널을 형성하였다. 미세채널에 KCl 50mM 용액을 채운 후 1400V를 1초 동안 인가하여(Fig. 1(a)의 port 1, 2는 (+), port 3은 (GND)) 두 미세채널 사이에 나노채널을 형성하였다.^(10,11)

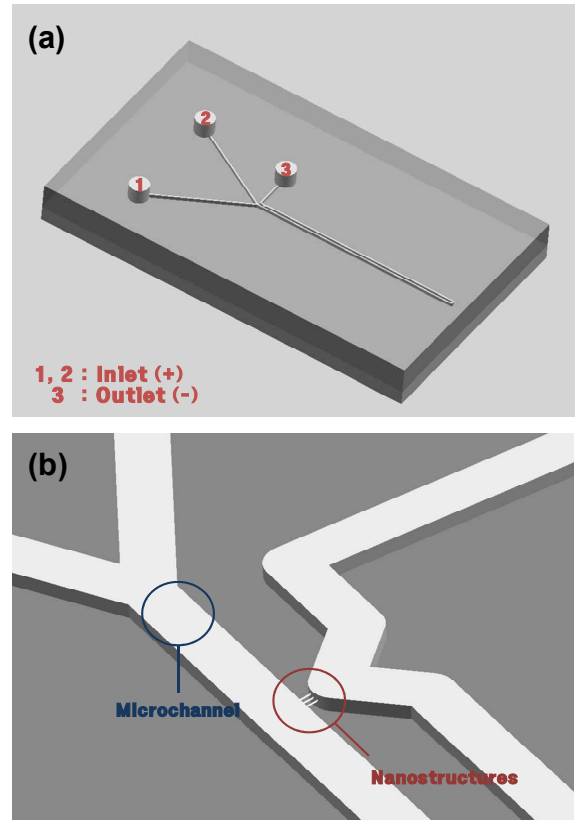


Fig. 1 Schematics of a proposed micromixer. (a) Overall micromixer; (b) Zoom-in figure of a micromixer near the micro/nano channel junction

Fig. 1은 본 연구에서 제작된 미세혼합기의 개략적인 모습을 CAD 프로그램으로 디자인 한 것으로, 형성된 나노채널의 길이는 약 30 μ m이며 40 μ m의 범위에서 다수의 나노채널이 형성되었다.

2.3 미세채널 내 저항 측정을 통한 나노채널 형성 검증

높은 전압 인가에 의한 PDMS의 파괴에 의한 나노채널 형성을 검증하기 위하여 나노채널 형성 전과 후의 미세채널 내 용액의 저항 값을 측정하였다.

미세혼합기의 모든 채널을 KCl 50mM 용액으로 채운 후, Picoampere meter (Picoammeter 6487, Keithley)를 이용하여 전압을 인가하고 혼합기 내 용액에 흐르는 전류 값을 측정하였다. 이후 측정된 전류 값의 평균 값으로 혼합기의 저항 값을 계산하였다(Table 1참고).⁽¹²⁾

2.4 혼합실험

제작된 미세혼합기의 혼합성능을 측정하기 위해 형광입자(Rhodamine B, 이하 RhB)를 섞은 유체를 흘려 보낸 후, 독립 형광 현미경 (Ti-U, Nikon)과

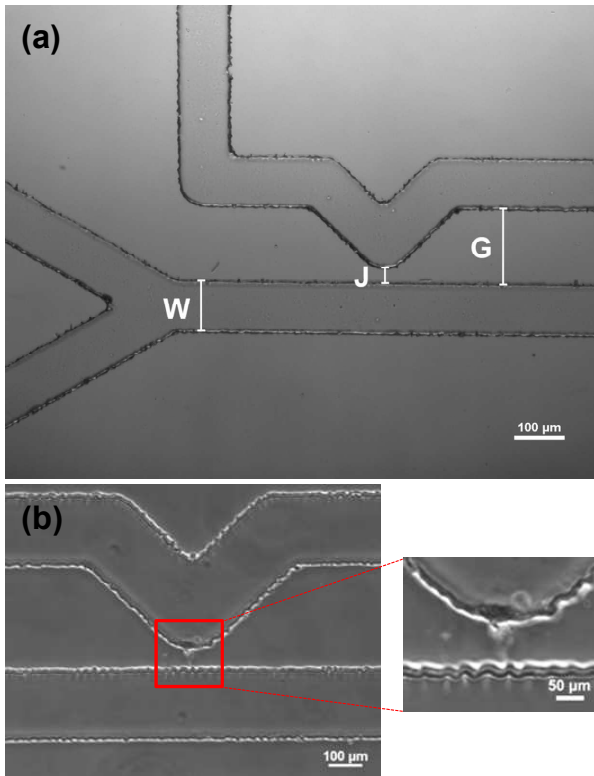


Fig. 2 Optical micrograph of the micromixer. (a) Dimensions of the micromixer are 2.25cm horizontal length x 100μm width [W] x 28μm depth. The gap of the junction [J] where nanostructures were formed by using electric breakdown is 30μm. The gap of micro channels [G] is 150μm. The bent angle is 90°; (b) Optical micrograph of the micromixer near the micro/nano channel junction. KCl (50mM) solution was used as a buffer for electrical breakdown and 1400V were applied for 1sec

CCD 카메라를 이용하여 이미지촬영을 하였다.

Fig. 1(a)의 port 1 에는 KCl 5mM 용액, port 2 에는 KCl 5mM + RhB 100μM 혼합용액을 주입하고 port 3 (outlet)은 주사기 펌프 (Syringe pump)를 연결하여 300μL/min의 유량으로 층류를 형성하였다.

층류를 형성한 후, 나노채널 부근의 불균형 동전기성을 이용한 혼합이 일어날 수 있도록 전기장 (Fig. 1(a)의 port 1, 2 에는 (+), port 3 에는 (GND))을 형성하기 위해 LabView 프로그램을 이용하여 미세혼합기에 인가하는 전압을 제어하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 PDMS의 전기적 파괴에 의한 나노채널 형성

Fig. 2(a)는 일반적인 소프트리소그래피 공정을 통해 제작된 미세혼합기의 모습을, Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 미세채널에 전기충격에 의한 PDMS의 파

Table 1 Measured currents in the microchannel

Applied volt(V)	Before breakdown Current(μA)	After breakdown Current(μA)
10	0.3922	0.8612
20	0.8450	1.8872
30	1.2986	2.9297
40	1.7596	4.0112
50	2.2563	4.9568

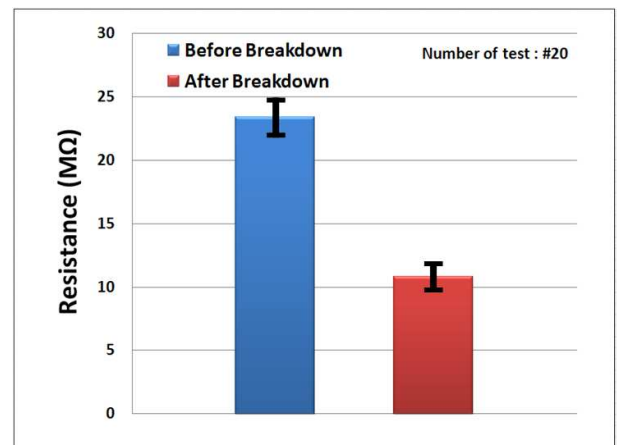


Fig. 3 Changes of the resistance in the microchannel (n=20). The resistance in the microchannel after breakdown is about the half of the resistance in the microchannel before breakdown

괴로 나노채널을 형성한 모습을 광학현미경으로 촬영한 사진이다.

Fig. 2(b)를 통해 PDMS의 전기적 파괴에 의해 미세혼합기의 특정부분에 형성된 나노채널을 확인할 수 있으며, 이는 전류가 저항이 작은 최단거리로 흐르려는 특성을 이용한 것으로 미세채널의 일정부분을 근접하게 (30μm) 한 부분의 PDMS가 파괴되어 나노채널이 형성되었다.

나노채널의 형성에 의하여 나노채널 형성 전보다 나노채널 형성 후에 혼합기 내의 용액에 흐르는 전류 값이 Table 1과 같이 약 2배 증가했으며, 혼합기 내 용액의 저항 값이 20번의 실험결과를 기준으로 Fig. 3에 표시된 표준오차 값을 가지며 약 2배 감소하였다.

3.2 미세혼합기의 혼합 성능

Fig. 4(a)는 1400V를 1초 동안 인가하여 형성된 나노채널을 갖는 미세혼합기와 주사기 펌프를 연결한 후, 300μL/min의 유량으로 층류를 이룬 모습이고 (b)는 미세혼합기에 500V의 전압을 인가하였을 때의 변화이다.

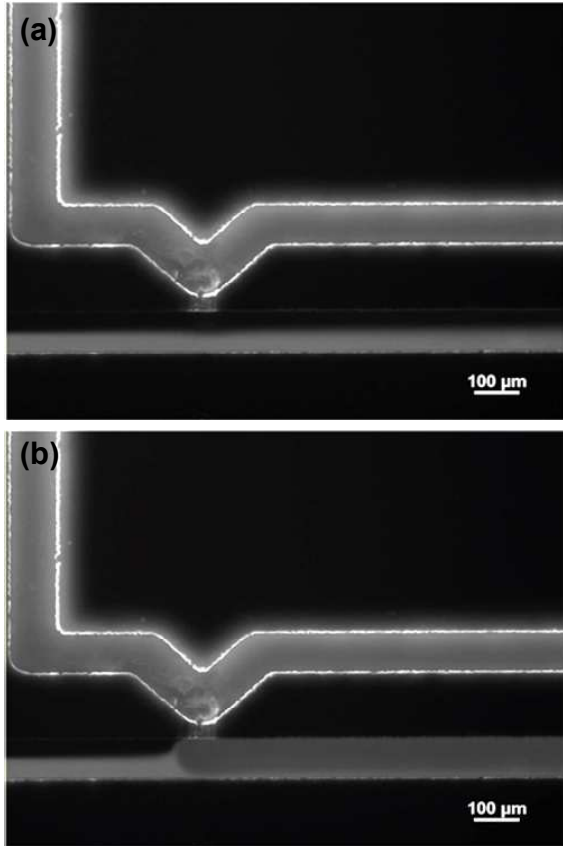


Fig. 4 Mixing flow patterns. (a) Laminar flow without applied voltage; (b) Vortex mixing with applied voltage

Fig. 4 의 나노채널을 기준으로 좌, 우 300μm 떨어진 지점의 미세채널의 위, 아래 45μm 범위의 형광강도를 측정하였다. 나노채널을 지나기 전에는 혼합이 되지 않으며 위와 아래의 확실한 형광강도의 차이를 보였지만, 나노채널을 지난 후에는 인가 전기장에 의해 형성된 와류에 의해 혼합이 이루어졌다(Fig. 5 참고).

혼합성능의 정량적 분석을 위해 먼저 미세혼합기 내에서 형광입자의 분산(variance)을 아래와 같이 정의하여 계산하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (c_i - \bar{c}_m)^2} \quad (1)$$

여기서, C_i 는 i 번째의 형광강도 값, \bar{c}_m 은 최적 혼합 시의 형광강도 값, N 은 데이터 개수, σ 는 유체의 분산을 나타낸다. 위에서 구한 분산을 이용하여 혼합지수 (Mixing index)를 구한다. 혼합지수의 정의는 다음과 같이 정의한다.

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (2)$$

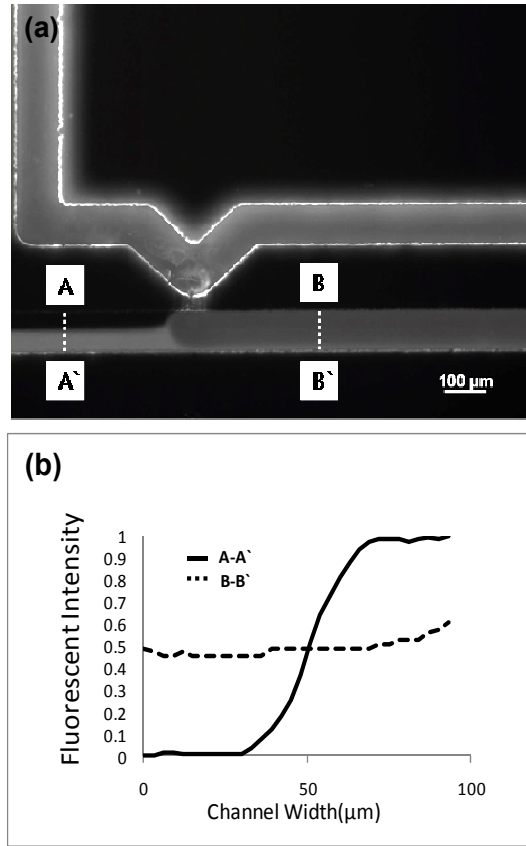


Fig. 5 Mixing experimental results. (a) Fluorescent image; (b) Plots for the fluorescence intensity across the width of the channel at two positions (A-A') and (B-B')

여기서, σ 는 유체 종의 분산, σ_{max} 는 유체 종의 최대 분산 값으로 혼합이 전혀 이루어지지 않았을 때의 분산 값, M 은 혼합지수를 나타낸다. 나노채널을 기준으로 나노채널을 지나기 전과 후의 혼합지수는 각각 0.13 과 0.90 이며, 이로부터 나노채널을 지난 후 90% 혼합이 이루어졌음을 알 수 있다.

이러한 유체의 혼합은 외부에서 인가된 전기장과 미세/나노 채널 교차지점의 동전기적 불균형에 의하여 이루어진다.

PDMS 로 이루어진 미세혼합기의 채널이 KCl 용액으로 채워지면 음전하를 띤 PDMS 채널 표면에 의해 용액내의 반대 극성인 양전하들이 채널 표면과 전기적 중성을 이루기 위하여 채널 표면 근처로 끌려와서 층을 형성하게 되는데, 이것을 전기 이중층(electrical double layer, 이하 EDL)이라 하며 KCl 1M~10μM 용액의 경우 1nm~100nm 의 EDL 두께를 갖는다(Fig. 6(c)).⁽¹³⁾

나노채널의 경우 일반적으로 50nm 이하의 채널 두께를 갖기 때문에 채널 표면에 형성된 EDL 이

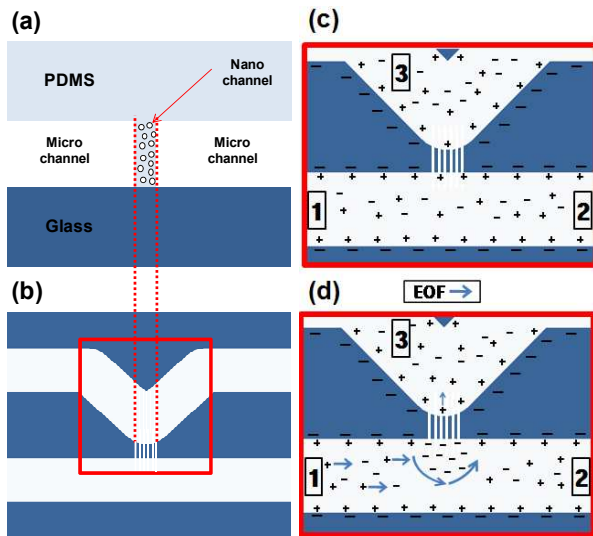


Fig. 6 Schematics of the electrokinetic non-equilibrium phenomenon near the junction of micro/nano channel. (a) Front view of the junction; (b) Top view of the junction; (c) Zoom-in figure of the junction without applied voltage; (d) Zoom-in figure of the junction with applied voltage

서로 중첩된다. EDL의 중첩에 의해 나노채널 내부의 음이온은 밖으로 배제되고 상대적으로 음이온에 비해 양이온이 풍부하게 된다.⁽¹⁾

Fig. 6(c)는 미세혼합기에 전압 인가 전, (d)는 전압 인가 후에 미세채널과 나노채널의 교차지점을 나타낸다. 혼합을 일으키는 적정전압을 인가 시, 미세채널 내의 전체적인 유동방향이 PDMS의 전하특성에 의한 전기삼투유동(electro osmotic flow, 이하 EOF)으로 Inlet에서 Outlet으로(Fig. 6(d)의 1→2→3 또는 1→3) 이동하게 되는데, 이때 상대적으로 양이온이 풍부한 나노채널이 이온을 선택적으로 투과시키는 막의 역할(음이온의 투과 저지)을 함으로서 나노채널의 입구부분은 이온 부족(depletion)구간, 출구는 이온 풍부(enrichment)구간이 되어 전하의 불균형을 가져온다.

이러한 전하의 불균형은 미세채널 내의 EOF에 의한 유동과 함께 와류를 일으키며 혼합을 촉진시키는 메커니즘으로 작용한다.⁽¹³⁻¹⁵⁾

4. 결 론

본 연구에서는 매우 간단한 방법으로 PDMS에 나노채널을 형성하고 이를 이용하여 효과적인 미세혼합기를 개발하였다.

저항이 작은 최단거리로 흐르려는 전류의 특성을 이용하여 나노채널을 제작할 부분에 미세채널

간의 간격을 가깝게 하여 혼합기를 제작 후, 높은 전압인가에 따른 PDMS의 파괴로 기존 나노채널 제작 기술인 반응성 이온에칭 기술(deep reactive ion etching)보다 단순한 방법으로 나노채널을 제작하였다.

또한 제안한 공정으로 제작된 미세혼합기에 미세채널과 나노채널의 교차부의 불균형한 동전기적 현상을 일으키는 적정전압을 인가하여 혼합효율을 측정된 결과, 약 90%의 혼합을 이루었다.

본 연구를 통해 보다 단순한 공정으로 능동형 미세혼합기를 제작할 수 있게 되었으며, 미세유체 시스템의 효과적이고 빠른 분석을 위해 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009년, 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0065065, 2010-0021066).

참고문헌

- (1) Kim, S. J., Wang, Y.-C., Lee, J. H., Jang, H. and Han, J., 2007, "Concentration Polarization and Nonlinear Electrokinetic Flow near a Nanofluidic Channel," *Physical Review Letters*, Vol. 99, No. 4, 044501.
- (2) Kim, D., Raj, A., Zhu, L., Masel, R. I. and Shannon, M. A., 2008, "Non-Equilibrium Electro-kinetic Micro/Nano Fluidic Mixer," *Lab on a Chip*, Vol. 8, No. 4, pp. 625~628.
- (3) Nguyen, N. T. and Wu, Z., 2005, "Micromixers- a Review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 2, pp. R1~R16.
- (4) Hessel, V., Lowe, H. and Schonfeld, F., 2005, "Micromixers- a Review on Passive and Active Mixing Principles," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 8~9, pp. 2479~2501.
- (5) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezi, I., Stone, H. A., Whitesides, G. M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, No. 5555, pp. 647~651.
- (6) Yang, J. T., Huang, K. J. and Lin, Y. C., 2005, "Geometric Effects on Fluid Mixing in Passive Grooved Micromixers" *Lab Chip* Vol. 5, No. 10, pp. 1140~1147.
- (7) Wong, S. H., Ward, M. C. L. and Wharton, C. W., 2004, "Micro T-mixer as A Rapid Mixing Micromixer," *Sensors and Actuators B*, Vol. 100, No. 3, pp. 359~379.
- (8) Sasaki, N., Kitamori, T. and Kim, H. B., 2006, "AC

- Electroosmotic Micromixer for Chemical Processing in A Microchannel," *Lab Chip* Vol. 6, No. 4, pp. 550~554.
- (9) Oddy, M. H., Santiago, J. G. and Mikkelsen, J. C., 2001, "Electrokinetic Instability Micromixing," *Anal. Chem.* Vol. 73, No. 24, pp. 5822~5832.
- (10) Yu, H., Lu, Y., Zhou, Y., Wang, F., He, F. and Xia, X., 2008, "A Simple, Disposable Microfluidic Device for Rapid Protein Concentration and Purification via Direct-Printing," *Lab on a Chip*, Vol. 8, No. 9 pp. 1496~1501.
- (11) McDonald, J. C., Metallo, S. J. and Whitesides, G. M., 2001, "Fabrication of A Configurable, Single-Use Microfluidic Device," *Anal. Chem.*, Vol. 73, No. 23, pp. 5645~5650.
- (12) Lee, J. H., Chung, S., Kim, S. J. and Han, J., 2007, "Poly(dimethylsiloxane)-Based Protein Preconcentration Using a Nanogap Generated by Junction Gap Break Down," *Anal. Chem.*, Vol. 79, No. 17, pp. 6868~6873.
- (13) Pu, Q., Yun, J., Temkin, H., Liu, S., 2004, "Ion-Enrichment and Ion-Depletion Effect of Nanochannel Structures", *Nano Lett.*, Vol. 4, No. 6, pp. 1099~1103.
- (14) Kim, S. M., Burns, M. A., Hasselbrink, E. F., 2006, "Electrokinetic Protein Preconcentration Using Simple Glass/Poly (dimethylsiloxane) Microfluidic Chip," *Anal. Chem.* Vol. 78, No. 14, pp. 4779~4785.
- (15) Wang, Y. C., Han, J., 2008, "Pre-Binding Dynamic Range and Sensitivity Enhancement for Immuno-sensors Using Nanofluidic Preconcentrator," *Lab on a chip*, Vol. 8, No. 3, pp. 392~394.