

초소형 냉동시스템의 응용을 위한 마이크로 증기 압축기의 개발 및 성능에 관한 연구

윤재성, 최종원, 김민수^{*†}

서울대학교 대학원 기계항공공학부, *서울대학교 기계항공공학부

A Study on the Micro Vapor Compressor based on Microfabrication Process
for the Application to the Micro Miniature Refrigeration System

Jae Sung Yoon, Jong Won Choi, Min Soo Kim[†]

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

ABSTRACT: In this study, a micro vapor compressor has been designed, fabricated and tested. The micro vapor compressor was made of silicon substrates and fabricated by micromachining process. The compressor is driven by a piezoelectric actuator which is widely used in microfluidic systems because of its strong force and rapid response. The actuator is a bimorph structure which consists of a silicon membrane and a piezoelectric ceramic film. A simulation work was conducted on the performance characteristics of the compressor. The simulation investigated the flow rate variation under various back pressure conditions. Experimental works were carried out on the operation of a compressor and the test results were compared with the simulation results.

Key words: MEMS(Microelectromechanical system), Vapor compressor(증기압축기), Piezoelectric ceramic(압전 세라믹), Microfabrication(미세 가공기술), Micro miniature refrigeration system(초소형 냉동시스템)

기 호 설 명	
A	: 밸브 개방면적, [m ²]
C	: 오리피스 계수
E	: 탄성계수, [Pa]
f	: 주파수, [Hz]
I_o	: 단면 모멘트, [m ⁴]
I	: 질량관성 모멘트, [kg·m ²]
P	: 압력, [bar]
L	: 길이, [m]
m	: 질량 유량, [g/hr]
n	: 비열비

t	: 시간, [s]
V	: 체적, [m ³]

그리스 문자

θ	: 회전각, [rad]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]

하첨자

ch	: 압축실(compression chamber)
in	: 입구 (inlet)
out	: 출구 (outlet)
suc	: 흡입측 (suction)
dis	: 토출측 (discharge)
$cant$: 외팔보 (cantilever)

†Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362; fax: +82-2-883-0179

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

1. 서론

반도체 제조공정 및 이를 응용한 초소형 미세 가공기술(microfabrication technique)의 발달로 각종 전자장치 및 전자기기들은 지속적으로 소형, 경량화 하는 추세이다. 이러한 소형화 추세는 전자 및 기계 분야뿐 아니라 μ -TAS(micro total analysis system), lap-on-a-chip 등 화학 및 생물공학 등의 분야로도 확대되는 추세이다. 각종 기기들의 소형화와 집적화가 고도로 진행될수록 이에 상응하는 발열 문제가 수반된다. 기기의 크기가 작아질수록 절대적인 발열량은 다소 감소할 지라도, 단위 체적당 발열량(heat flux)은 급격히 늘어나게 된다. 따라서 최근에는 초소형 냉각 시스템에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

소형 냉각시스템은 주로 히트파이프(heat pipe)의 형태로 개발 및 연구되어 왔다. Khrustalev와 Faghri⁽¹⁾는 $2 \times 7 \times 12 \text{ mm}^3$ 의 크기를 갖는 히트파이프를 제시하였는데, 내부에 다공성 판을 설치하여 열전달을 향상시킨 결과 약 100 W/cm^2 의 냉각성을 실험을 통하여 확인하였다. Lin 등⁽²⁾은 전통적 기계가공을 이용하여 소형 전자기기 냉각용 히트파이프를 개발하였으며, 140 W/cm^2 의 열부하 하에서 실험을 수행하였다. 미세공정을 이용한 히트파이프 또한 지속적으로 연구되고 있는데, Berre 등⁽³⁾은 식각 공정을 이용하여 실리콘 웨이퍼(wafer) 상에 응축부, 증발부 및 유로 등 히트파이프의 구성품 뿐 아니라, 열 부하 모사를 위한 초소형 히터 등을 구현하였으며, 실험 결과 최대 4 W 의 냉각 성능을 관찰하였다. 실리콘 웨이퍼는 열전도도가 상대적으로 높은 재질이므로 히트파이프를 가공할 경우 많은 장점이 있지만, 전도를 통한 열전달량이 많을 경우, 히트파이프의 유용도(effectiveness)가 높지 않을 수 있다. Peterson 등⁽⁴⁾은 실리콘을 통한 전도 열전달로 인해, 히트파이프의 성능 향상지수가 그다지 높지 않다는 것을 보였다.

이에 반해 증기 압축식 냉동 사이클은 소형화에 관한 연구가 상대적으로 미비한데, 이는 핵심 구성품인 증기 압축기를 미세 가공기술로서 구현한 사례가 드물기 때문이다. Narayanan 과

Venkatarathnam⁽⁵⁾은 압축기를 제외한 증발기, 응축기 및 팽창장치를 이용한 소형 냉동시스템에 관해서 수치해석을 수행하였다. Munkejord 등⁽⁶⁾은 실리콘 웨이퍼 상에 증발기와 응축기를 제작하였으며, 압축기 대신 냉매용기와 개방형 회로를 이용하여 증기 압축식 열펌프를 모사실험 하였다. Darabi와 Ekula⁽⁷⁾는 증발부와 응축부로 이루어진 냉매 순환 회로를 제작하였고, 여기에 증기 압축기가 아닌 액체 이송용 마이크로 펌프를 이용한 냉각 시스템을 개발하였다. Richter 등⁽⁸⁾은 액체뿐 아니라 기체의 이송이 가능한 마이크로 펌프를 제작하여 실험하였으며, Yoon 등⁽⁸⁾은 마이크로 압축기의 성능에 대해서 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 초소형 냉동 시스템으로의 응용을 위한 마이크로 압축기를 미세 가공기술을 이용하여 개발하였으며, 그 성능 시뮬레이션 및 실험을 통하여 증기 압축식 냉동 시스템으로의 응용 가능성을 가능해 보았다.

2. 설계 및 제작

본 연구에서 설계된 마이크로 압축기의 개략적인 형상은 Fig. 1과 같다. 마이크로 압축기는 세장의 실리콘 웨이퍼로 구성되어 있는데, 상단의 웨이퍼에는 박막 및 구동장치가 가공되어 있다. 구동장치로는 빠른 응답성과 높은 구동력을 얻을 수 있는 압전 세라믹을 이용하여 실리콘 박막을 구동하는 방식을 택하였다. 중앙의 웨이퍼에는 외팔보(cantilever) 형식의 밸브와 유체 입출구 등이

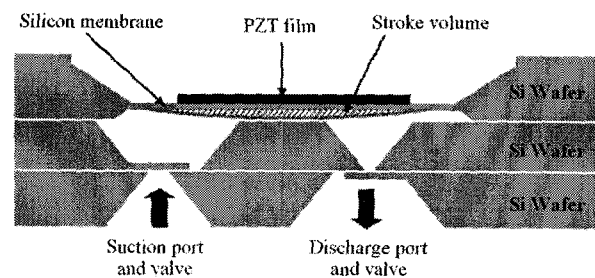


Fig. 1 Schematic diagram of the micro compressor with the stroke volume of the membrane and the refrigerant flow through the valves.

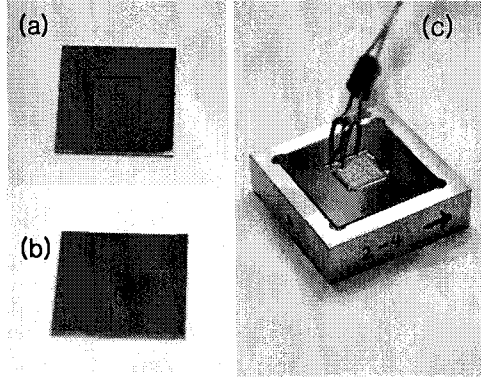


Fig. 2 Photos of the micro vapor compressor
 (a) Silicon membrane
 (b) Cantilever valve and port hole
 (c) Piezoelectric layer on the membrane

가공되어 있으며, 하단의 웨이퍼는 이와 동일한 형상으로 가공되어 중앙의 웨이퍼와 접합되어 있다. 상하로 진동하는 실리콘 박막은 압축실 (compression chamber) 내부의 기체를 압축시키며, 외팔보 밸브는 압력차에 의해 유체의 이송 혹은 역류 방지 역할을 한다.

박막 및 외팔보 등은 50% 농도의 수산화칼륨 (KOH) 용액을 이용한 습식 식각(wet etch process) 공정으로 이루어 졌으며, 식각공정 후 실리콘 표면에 금속 층을 도포(deposition)하여 용융시킴으로서 각 실리콘 웨이퍼를 접합시켰다(metal layer bonding). Fig. 2는 접합 공정후의 마이크로 압축기 및 압전구동기를 부착후의 형상이다. 박막 및 압축실은 12×12 mm²의 면적에 불과하지만, 접합공정 및 취급의 용이성을 위해서 30×30 mm²의 크기로 제작하였다.

3. 성능 시뮬레이션

압축실을 검사체적으로 하여 질량 및 에너지 방정식을 유도하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dP_{ch}}{dt} = -\frac{nP_{ch}}{V_{ch}} \frac{dV_{ch}}{dt} + \frac{nP_{ch}}{\rho_{ch}V_{ch}} (\dot{m}_m - \dot{m}_{out}) \quad (1)$$

여기서 우측 첫 항은 체적 변화에 기인한 압력의 변화를 의미하며, 두 번째 항은 유체의 출입에 기인한 압력의 변화를 의미한다. 여기서 출입하는 질량 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{suc} = C_{suc} A_{suc} \sqrt{2\rho_{ref,suc} (P_{suc} - P_{ch})} \quad (2-a)$$

$$\dot{m}_{dis} = C_{dis} A_{dis} \sqrt{2\rho_{ref,dis} (P_{ch} - P_{dis})} \quad (2-b)$$

윗 식에서 A_{suc} 및 A_{dis} 등은 각각 흡입측, 토출측 밸브의 개도를 의미하는데, 이 값들은 외팔보 밸브에서의 각 운동량 보존 법칙을 이용하여 다음 식을 통하여 구할 수 있다.

$$I \frac{d^2\theta_{suc}}{dt^2} = C_{suc} A_{suc} L_{cant} (P_{suc} - P_{ch}) - \frac{3EI_v}{l_{cant}} \tan \theta_{suc} \quad (3-a)$$

$$I \frac{d^2\theta_{dis}}{dt^2} = C_{dis} A_{dis} L_{cant} (P_{ch} - P_{dis}) - \frac{3EI_v}{l_{cant}} \tan \theta_{dis} \quad (3-b)$$

위의 방정식들은 서로 연결된(coupled) 형태이므로, 박막이 왕복 구동하는 한 사이클 동안의 시간을 세분하여 4차 Runge-Kutta 기법을 이용하여 동시에 풀이하였다.

Fig. 3은 배압 (back pressure)이 없을 경우 압전소자의 전압과 주파수를 변경시키면서 유량을 계산한 결과이다. 전압이 높아지면 박막의 변형량이 증가하므로 유량이 증가하게 된다. 주파수가 증가하면 단위 시간당 박막의 구동 횟수가 늘어나므로 마찬가지로 유량이 증가하게 된다. 그러나, 주파수가 약 400 Hz 보다 높아지면 유량의 증가 폭이 현저히 둔화되었다. 이는 식 (3)에서 보듯, 일정한 질량을 지닌 외팔보의 회전 관성에 의해서 주파수가 높아질수록 외팔보가 압력의 변화에 동조하지 못하기 때문으로 풀이된다.

Fig. 4는 다양한 배압 하에서 주파수와 전압을 달리하며 계산한 성능 곡선이다. 결과에서 보듯

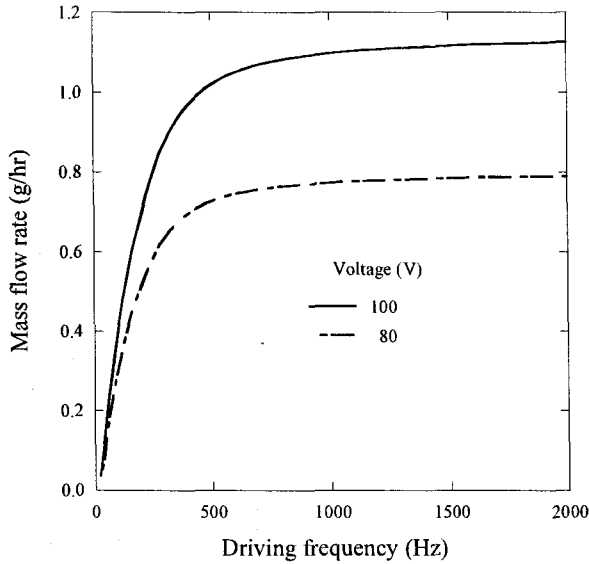


Fig. 3 Simulation results of the maximum flow rate ($\Delta P \approx 0$) under various driving frequencies and voltages.

배압이 존재할 경우 200 Hz 이하에서 현저한 성능 저하가 예상되며, 400 Hz 근방에서는 주파수의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

4. 성능실험

Fig. 5는 마이크로 압축기 성능 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 함수 발생기(function generator), 신호 증폭기(amplifier), 절대압계 및 차압계 등으로 구성되어 있다. 함수 발생기

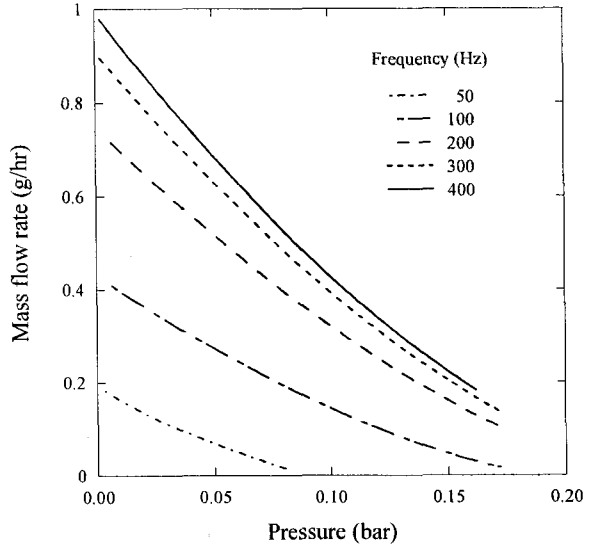


Fig. 4 Simulation results of the performance curves under various driving frequencies at the voltage of 100 V.

(Tektronix, AFG-3022)는 다양한 종류의 신호를 최대 25 MHz 까지 발생시킬 수 있는 장치인데 본 실험에서는 입력 신호로써 정현파(sine wave)만을 사용하였다. 신호 증폭기(PI E-507)는 입력된 신호를 증폭시켜서 압전 세라믹(PZT)을 구동시키기 위한 장치이다. 마이크로 압축기의 발생 유량은 일반 압축기에 비해 매우 작아서 질량 유량계를 사용하기에 곤란하므로, 그림에서와 같이 상방 치환을 이용하여 일정 시간동안 이송된 기체의 체적을 측정하였다.

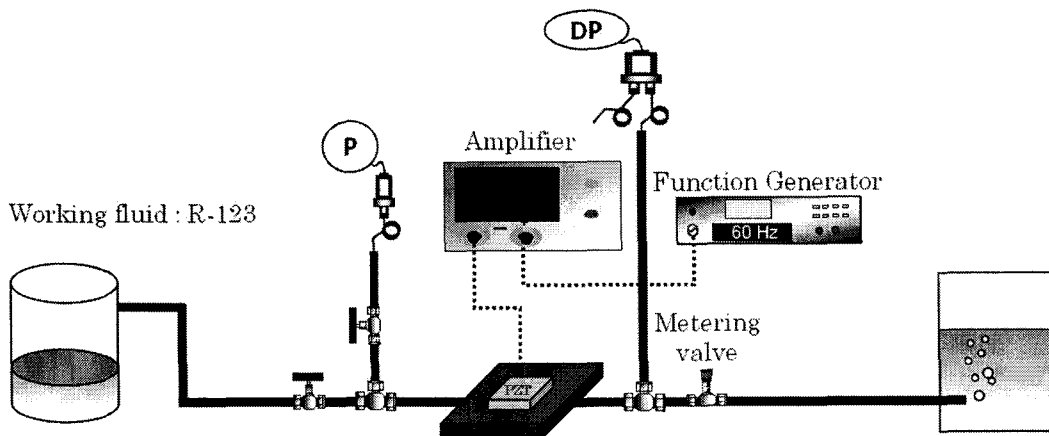


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

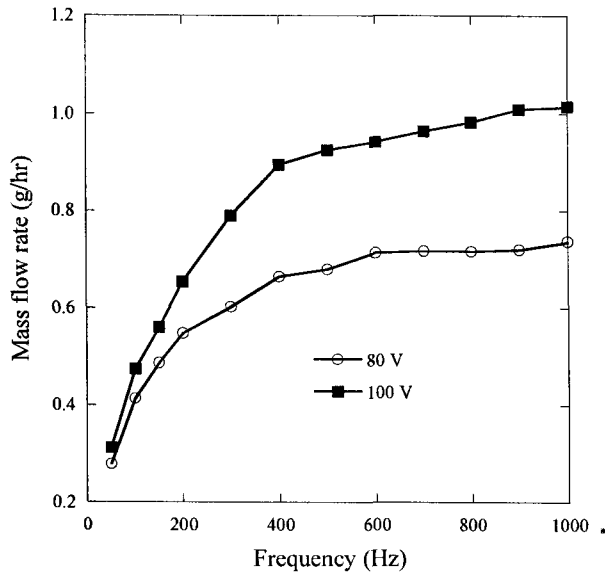


Fig. 6 Measured maximum flow rate ($\Delta P \approx 0$) under various driving frequencies and voltages.

Fig. 6은 배압이 없는 경우 주파수와 전압의 변화에 대한 유량의 변화를 측정된 결과이다. 실험은 저압 냉매인 R-123을 이용하여 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로, 주파수가 약 400 Hz 부근을 초과하면 유량의 증가가 둔화됨을 알 수 있다. Fig. 7은 배압을 변화시키며 유량을 측정된 결과이다. 앞선 시뮬레이션 결과와 마찬가지로

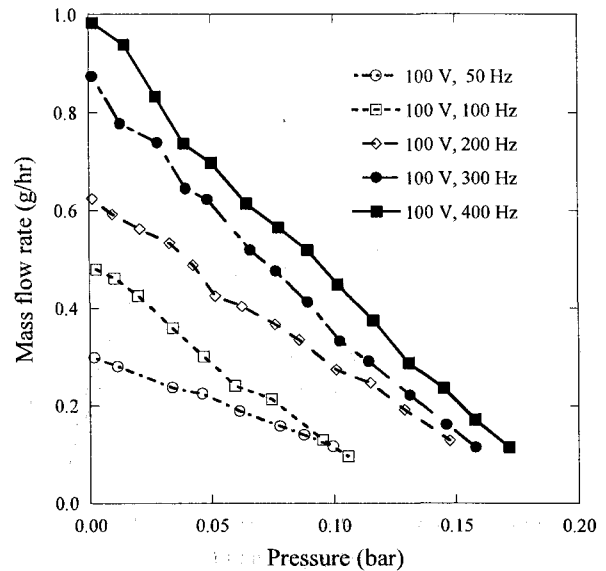


Fig. 7 Measured performance curves of the micro compressor under various frequencies at the voltage of 100 V.

로, 배압이 존재할 경우 주파수가 증가할수록 주파수의 영향이 감소함을 알 수 있다.

미세 가공기술로 제작된 펌프 혹은 압축기는 그 행정 체적 (stroke volume)이 작기 때문에, 높은 압력을 발생하는 경우가 드물다. 본 연구에서는 두 대의 압축기를 이용하여 직렬로 운전시킴으로서 발생 압력을 높이고자 하였다. Fig. 8은 두 대의 압축기를 직렬로 연결하여 실험한 결과이다. 단일 압축기의 경우와 비교하였을 때, 유량의 변화는 미미하지만 발생 압력은 크게 증가함을 알 수 있다. 한편, 주파수 혹은 전압을 감소시킨 경우를 각각 비교해 보면, 전압의 감소에 대한 성능의 저하가 훨씬 두드러짐을 알 수 있다. 이는 전압의 변화는 박막의 변형량에 직접 영향을 미치므로, 압축실 내부의 체적 압축비율 (volume compression ratio)이 변화하기 때문이다. 즉, 배압이 존재하는 실제 응용분야에서는 마이크로 압축기의 행정체적 (stroke volume) 및 압축실 체적 등이 가장 중요한 변수임을 알 수 있다.

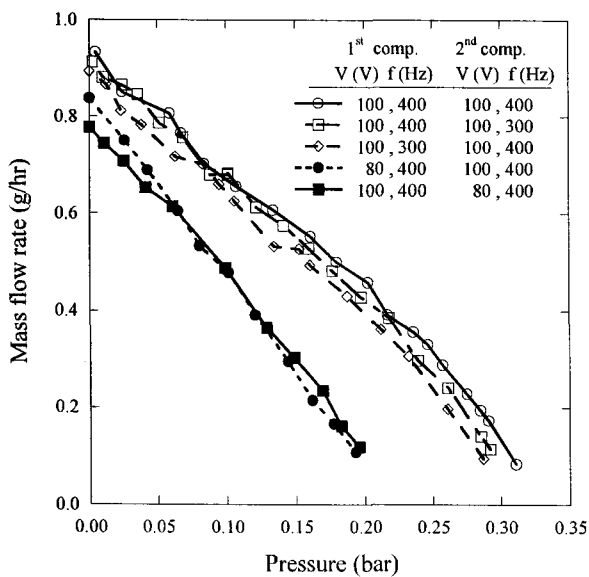


Fig. 8 Measured performance curves of the dual compressors in serial.

5. 결론

증기 압축식 냉동시스템은, 많은 장점에도 불구하고

하고 핵심 요소인 압축기의 소형화가 곤란하여 소형화 및 집적화의 진행 속도가 느린 편이다. 본 연구에서는 미세 가공기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼 상에 증기 압축기를 구현하였다. 수치해석을 통하여 그 성능을 모사하였으며, 성능실험을 수행하여 정량적인 성능을 파악하였다. 또한, 발생 압력을 증가시키기 위해 두 개의 압축기를 직렬로 연결하였을 경우 최고 압력은 약 0.3 bar 로 측정되었고, 배압이 없을 경우 최대 유량은 약 1 g/hr를 기록하였다. 미세 가공기술의 특성상, 반복적인 패턴의 가공을 통하여 다수의 직렬 혹은 병렬 압축기를 제작하는 것은 상대적으로 용이하여 유량 및 발생 압력의 개선 가능성은 매우 높으므로, 초소형 냉동 시스템으로의 응용 실현 가능성을 기대할 수 있다. 그러나, 압축기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 변수인 체적 압축비율을 높이기 위해서는 높은 전압 하에서 운전 가능한 압전소자 및 박막 재질의 개발 또한 병행되어야 한다.

참고문헌

1. Khrustalev, D. and Faghri, A., 1996, Estimation of the maximum heat flux in the inverted meniscus type evaporator of a flat miniature heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 9, pp. 1899-1909.
2. Lin, L., Ponnappan, R., and Leland, J., 2002, High performance miniature heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3131-3142.
3. Berre, M. Le, Launay, S., Sartre, V., and Lallemand, M., 2003, Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 436-441.
4. Peterson, G. P., Duncan, A. B., and Weichold, M. H., 1993, Experimental investigation of micro heat pipes fabricated in silicon wafers, *J. Heat Trans.*, Vol. 115, pp 751-756.
5. Narayanan, S. P. and Venkatarathnam, G., 1999, Analysis of performance of heat exchangers used in practical micro miniature refrigerators, *Cryogenics*, Vol. 39, pp. 517-527.
6. Munkejord, S. T., Mæhlum, H. S., Zakeri, G. R., Neksa, P., and Pettersen, J., 2002, Micro technology in heat pumping systems, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, pp. 471-478.
7. Darabi, J. and Ekula, K., 2003, Development of a chip-integrated micro cooling device, *Microelectronics J.*, Vol. 34, pp. 1067-1074.
8. Richter, M., Linnemann, R., and Woias, P., 1998, Robust design of gas and liquid micropumps, *Sensors and Actuators A*, Vol. 68, pp. 480-486.
9. Yoon, J. S. and Kim, M. S., 2005, Performance analysis of a silicon-based micropump for gases, *Proc. of The Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, March 20-23, 2005, Cheju, Korea, Paper No. CJ02.