

상 변화방식 마이크로 액츄에이터의 제조 및 성능에 관한 연구

박승인[†] · 황준영^{*} · 이상호^{*} · 강경태^{*} · 강희석^{*} · 강신일^{**}

The fabrication and characterization of a phase change type micro actuator

Seung-in Park · Jun-young Hwang · Sang-ho Lee · Kyung-tae Kang · Hee-suk Kang · Shin-ill Kang

Key Words : Direct Methanol Fuel Cell(직접메탄올 연료전지), Phase Chang(상변화), Micro Actuator(미세구동기), Thermopneumatic(열공압)

Abstract

Characteristics of a phase change type micro actuator have been studied. The micro actuator has been designed for a micro-pump in an active direct methanol fuel cell (DMFC), consisting of an actuating chamber, a membrane, an electric heater, and a sensor of resistance temperature detector (RTD). In the present study, researches have been focused on the response of the actuator to control algorithm of the heater. The experiments demonstrated that the displacement of the membrane increase with temperature variation which is a function of applied voltage, duty ratio, and operating frequency of heating. The results also showed that operation of the actuator with high voltage at small duty of heating is more efficient than the same power consumption of heating with low voltage at large duty.

1. Introduction

능동형 직접메탄올 연료전지(Active DMFC)는 수동형 직접메탄올 연료전지에 비하여 상대적으로 높은 에너지 이용률로 인하여 휴대용 전자 기기의 차세대 전력원으로서 주목 받고 있다.(1) 스택에 메탄올 연료를 공급해 주는 마이크로 펌프는 능동형 DMFC의 핵심부품 중 하나로, 이와 관련된 다양한 연구와 개발시도가 현재까지 진행되고 있다.(2) 열공압형 마이크로 액츄에이터는 다른 방식에 비해 저 전압에서 구동이 가능하며, 별도의 전압변환장치 없이 휴대용 전자기기에 적용시키기 유리하다. 열공압형 마이크로 액츄에이터를 DMFC용 연료공급장치로서 사용시 DMFC 스택의

반응과정에서 나오는 배출열을 이용하여 펌프의 효율을 높일 수 있지만, 구동을 결정하는 인자가 펌프 챔버 내의 온도 변화이므로 정밀한 제어가 어렵고 구동주기가 낮다.(3)

본 연구에서는 구동주기가 낮은 점을 개선시키기 위하여 액체의 상변화시 부피가 폭발적으로 늘어나는 점을 이용하여 변위를 크게 하는 상 변화 방식 마이크로 액츄에이터를 제작하였다. 소형화를 위해 MEMS 기술을 사용하여 마이크로 액츄에이터를 제작하였고, 다양한 히터 구동조건에 대한 액츄에이터 챔버 내의 온도 변화 및 멤브레인의 변위를 분석하여 최적제어가 가능한 운전조건을 제시하였다.

2. Basic design and structure

상 변화방식 마이크로 액츄에이터의 구조는 그림 1 과 같다. 뒷면은 챔버 안의 액체를 가열하기 위한 Heater 와 가열과 냉각 시 온도변화를 측정하기 위하여 Resistance temperature detector(RTD)로 이

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : susfel@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2829 FAX : (02)362-2736

* 한국생산기술연구원 마이크로시스템팀

** 연세대학교 기계공학과

루어져 있다. Heater 의 폭은 300um, 길이는 30mm, 두께는 4000A 으로 총 저항은 40Ω 이다. 앞면은 300um 깊이로 파인 원형의 챔버가 있고, 그 위는 Polydimethyl siloxane(PDMS) 멤브레인으로 덮여있다. 챔버 안의 액체는 밀봉된 상태로 있는데, 뒷면의 Heater 에 의해서 가열되어서 상 변화를 일으키며 부피팽창을 하게 되고 이때 멤브레인이 바깥쪽으로 밀리면서 액추에이터의 구동력을 발생시킨다. 챔버 안의 아일랜드는 멤브레인의 지지대 역할을 하여서, 멤브레인이 DMFC 스택으로부터의 Back pressure 에 의해서 안쪽으로 접히는 현상을 예방할 수 있다.

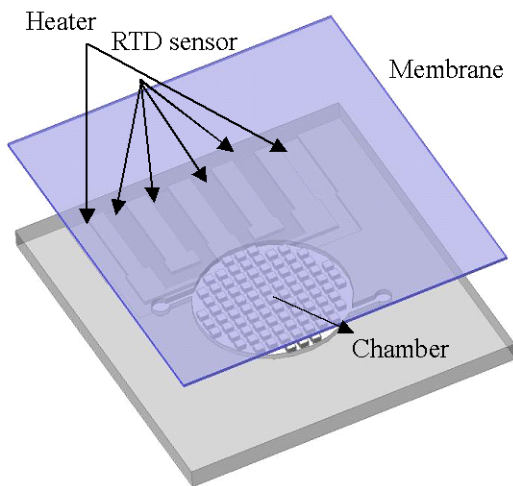


Fig. 1 A schematic of the micro actuator

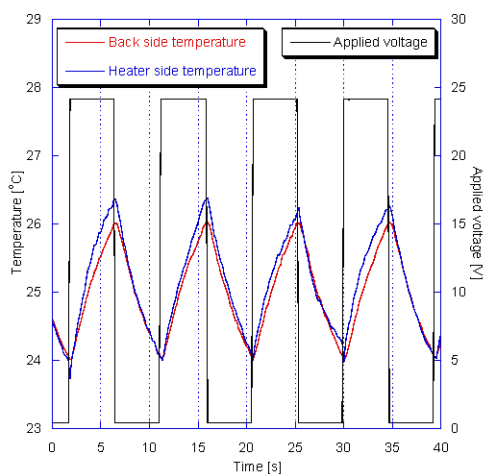


Fig. 2 The measured heater side and back side temperature

그림 2 는 이전에 제작했었던 Micro actuator 의 실험 데이터로, 액추에이터 앞면에 형성된 챔버의 안쪽 Heater 의 구동에 의해서 앞면과 뒷면의 온도 변화를 측정한 그림이다. 앞면과 뒷면의 온도변화가 비슷한 형상을 띄는 것을 살펴볼 수 있는데, 이는 실리콘의 열전도계수가 크고, 식각 공정을 통하여 Heater 와 뒷면 사이의 간격을 최소화했기 때문이다.(4) Actuator 의 뒷면에 Heater 를 위치시키면 전극 연결을 위한 통로를 챔버 내에 뚫을 필요가 없어서 챔버 밀봉과 상 변화에 의해 발생하는 기체의 누설 방지에 유리하다.

3. Fabrication

그림 3 은 액추에이터의 제작공정도이다. 4 인치 P 타입 (100)방향의 실리콘 웨이퍼 위에 Furnance 를 사용하여 양면에 실리콘 옥사이드를 5000A 증착하였다.

두 번째 공정은 마지막 공정에서 멤브레인을 본딩할 때, 멤브레인을 선택적으로 본딩하기 위하여 본딩방지막을 증착하였다. 본딩방지막으로 금을 사용하였고, 금과 실리콘 옥사이드 사이의 접착을 위하여 타이타늄을 Thermal evaporator 로 20A 증착하고, 금을 같은 방법으로 200A 증착하였다.

Deep RIE 를 사용하여 실리콘을 300um 에칭하여, 실리콘 웨이퍼의 앞면에 챔버, 입구 그리고 출구를 형성시켰다.

웨이퍼의 뒷면에 히터와 RTD sensor 를 형성시키기 위하여 E-Beam evaporator 를 사용하여 타이타늄, 백금 순서로 증착하였다. 백금만을 증착할 경우 앞 공정의 금과 마찬가지로 실리콘 옥사이드와 접착이 좋지 않아서 공정 후에 떨어질 위험이 있으므로 접착력을 높이기 위하여 실리콘 옥사이드와 백금에 모두 접착력이 좋은 타이타늄을 접착층으로 사이에 증착하였다. 저항 및 RTD sensor 소자가 서로 전기적 영향에 의해서 오작동을 하는 것을 예방하기 위하여, 절연층으로 실리콘 나이트라이드를 웨이퍼 뒷면에 고르게 증착하였다.

다이싱을 통하여 웨이퍼 전체에 형성시킨 여러 개의 마이크로 액추에이터를 각각 하나씩으로 자른 후에 PDMS 를 UV ozone treatment 를 통하여 본딩하였다. PDMS 표면은 UV ozone treatment 를 할 경우 PDMS 소자 내의 OH 원자가 전자를 하나 잃어 OH⁻ 를 띄게 되는데, 이 원자가 Si 원자와 만나면 쉽게 전자를 받아들여서 공유결합을 일으키게 된다. 그 결합력에 의해서 실리콘옥사이드와

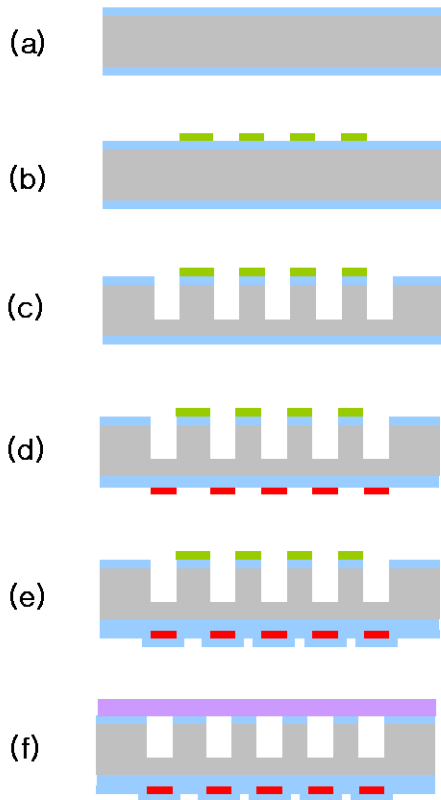


Fig. 3 Process for the micro actuator: (a) Silicon oxide deposition, (b) Ti/Au patterning, (c) Silicon etching, (d) Ti/Pt patterning, (e) Oxide deposition, (f) Membrane bonding

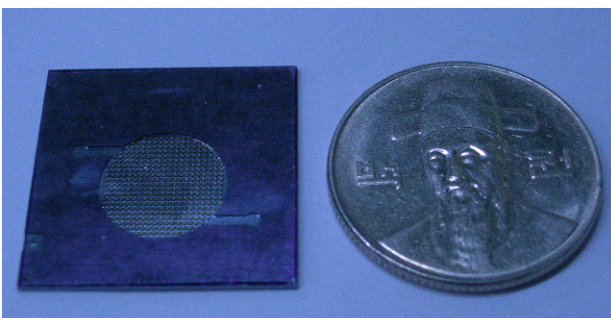


Fig. 4 A photo of the micro actuator

PDMS 는 붙게 된다.(5) 이때 앞의 공정에서 미리 증착한 금은 OH 원자와 Si 원자가 만나지 못하도록 하여서 분당 방지 기능을 하고, 이 현상 때문에 PDMS 멤브레인을 실리콘 웨이퍼 위에 선택적으로 분당 할 수 있다.

챔버 내에 액체를 주입하고 밀봉하여서 마이크로 액츄에이터를 완성하였다.

4. Test

4.1 실험장치 및 조건

제작한 마이크로 액츄에이터의 가열 냉각 특성 실험을 통해서 최적 운전을 위하여 필요한 조건을 탐색하였다. 그림 5 는 마이크로 액츄에이터의 가열 냉각 특성 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 Multi controller, Voltage controller, Computer, Oscilloscope, Card edge connector, thermocouple, Laser deflection measurement system 으로 이루어진다. 액츄에이터의 성능은 액츄에이터에 공급된 전압, 주기, Duty ratio 에 따라서 결정되는데, 전압은 제작한 액츄에이터의 가열성능을 결정하는 인자이고 주기와 Duty ratio 는 가열과 냉각 성능을 결정하는 인자이다. 전압을 각각 7, 10, 12V 로 인가하고 Duty ratio 를 각각 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80%로 조절하고 주기를 각각 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05s 로 실험조건을 조절하여 액츄에이터에 다양한 종류의 전력을 공급하면서 챔버 내의 온도변화와 멤브레인의 변위를 측정하였다.

4.2 결과 및 고찰

그림 6 은 주변온도가 19℃인 액츄에이터에 12.7V 전압을 1Hz, 50%의 듀티로 인가하였을 때 공기 중에서도 물속에 담근 상태 그리고 챔버 안에 물을 채운 상태에서 측정된 온도 변화 특성을 나타낸 그림이다. 각 실험의 경우에 정상상태에 도달했을 때 Heater side 의 최고 온도가 다른 것을 확인할 수 있는데, 이는 현재 측정하는 지점이 Heater 의 온도를 직접 측정하는 것이 아니라 인접하는 지역의 온도를 측정하기 때문이다. 액체의 대류 열전달계수가 기체의 대류 열전달계수보다 크므로, Heater 에서 발생한 열이 주변으로 빨리

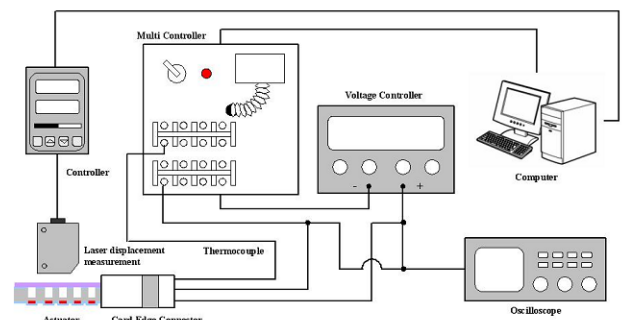


Fig. 5 Schematic illustration of the measurement setup

전달되고 그로 인하여 각각의 측정온도가 달라지게 된다. 주변이 모두 액체로 이루어진 물 속에 담긴 경우의 최고온도가 가장 낮고 주변이 모두 기체로 이루어진 공기 중에서 측정한 경우의 최고온도가 가장 높음을 확인할 수 있다. 그림 7 은 주변온도가 19°C인 경우 동일한 실험을 챔버에 물을 주입한 상태에서 전압을 인가하여 정상상태에 도달했을 때 액츄에이터의 온도변화와 변위를 측정한 그림이다. 이 결과를 이용하여 챔버 내부에 물을 채우지 않고 공기 중에 위치시킨 상태에서 가열냉각실험을 통한 평균온도분석에 의해 마이크로 액츄에이터의 운전 조건을 예측하는 것이 가능하다.

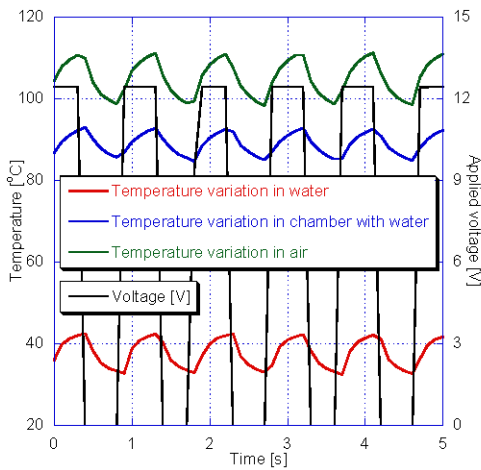


Fig. 6 The measured temperature variation in various surrounds (Power 1.6W, 50%, 1Hz, Ambient 19°C)

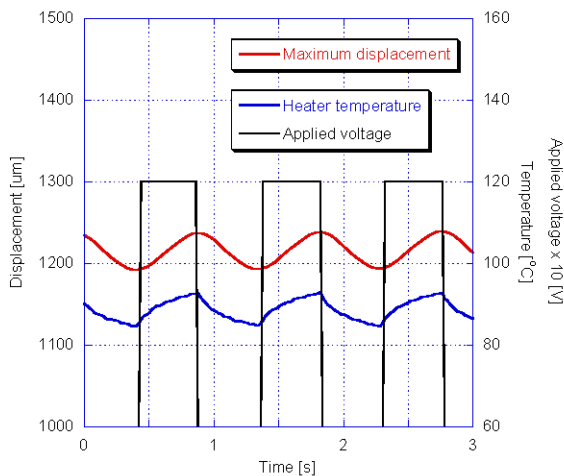


Fig. 7 The measured heater temperature and maximum displacement (Power 1.6W, 50%, 1Hz, Ambient 19°C)

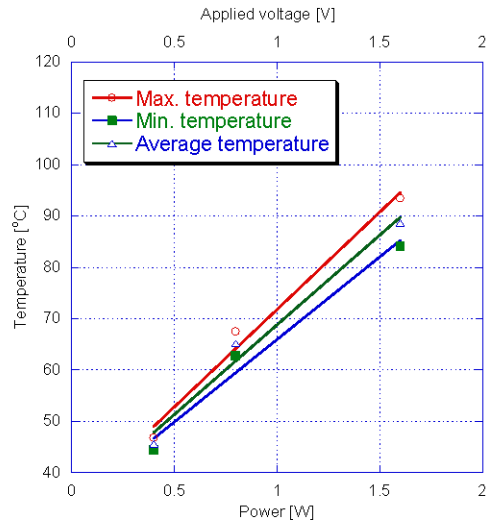


Fig. 8 The measured average temperature of the micro actuator as a function of voltage (50%, 1Hz, Ambient 19°C)

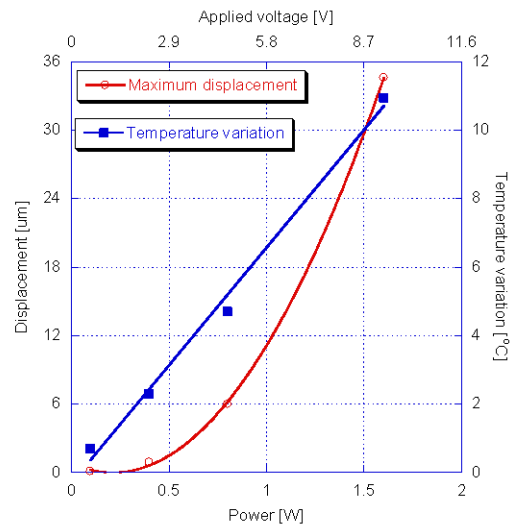


Fig. 9 The temperature variation and maximum displacement as a function of voltage (50%, 1Hz, Ambient 19°C)

그림 8 은 주변온도가 19°C인 경우에 50%, 1Hz로 모든 조건을 동일하게 놓은 상태에서 전압을 증가시키면서 온도변화를 측정한 그림이다. 여기서 말하는 평균온도는 정상상태에 도달했을 때 최고온도와 최저온도의 합을 2로 나누어 나타낸 값이다. 그림 9는 그림 8과 동일한 실험조건에서 측정한 실험결과를 온도변화와 변위로 나타낸 그림이다. 전력이 증가됨에 따라 온도변화 역시 선형적으로 증가하는데 비해 변위는 지수적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 온도와 포화수 증기압의 관계에서 온도가 선형적으로 증가할 때 압력이 지수적으로 증가하기 때문에 변위 역시

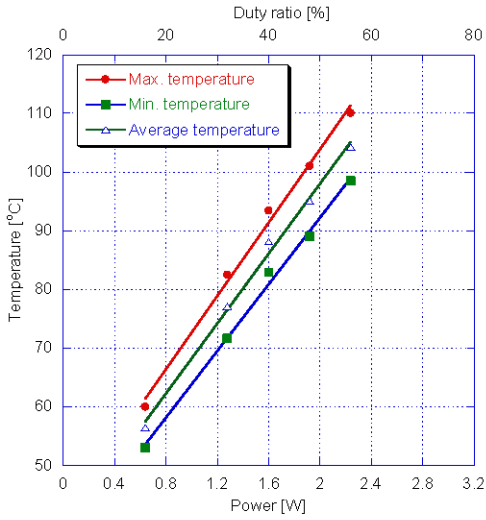


Fig. 10 The measured average temperature of the micro actuator as a function of duty ratio (12.7V, 1Hz, Ambient 19°C)

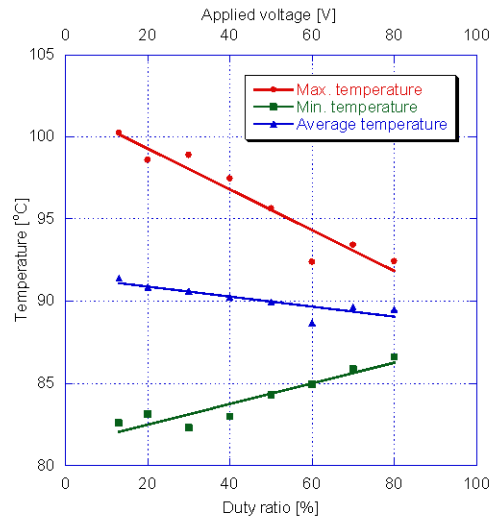


Fig. 12 The measured average temperature of the micro actuator as a function of duty ratio (1.5W, 1Hz, Ambient 19°C)

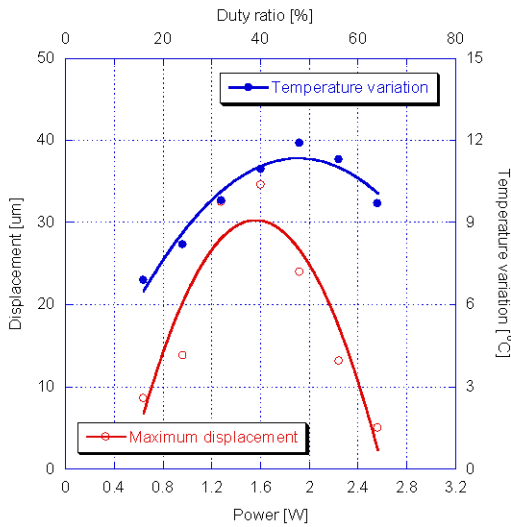


Fig. 11 The temperature variation and maximum displacement as a function of duty ratio (12.7V, 1Hz, Ambient 19°C)

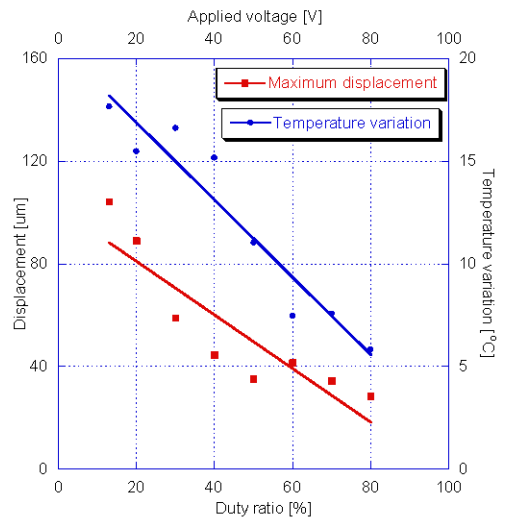


Fig. 13 The temperature variation and maximum displacement as a function of duty ratio (1.5W, 1Hz, Ambient 19°C)

지수적으로 증가한다.

그림 10 은 주변온도가 19°C인 경우에 1Hz, 12.7V 의 동일한 전압을 인가하면서 Duty ratio 변화에 따른 평균온도 변화를 측정 한 그림이다. 그림 11 은 동일한 조건에서 온도변화와 변위를 측정 한 그림이다. 그림 8 과 그림 10 을 살펴보면 두 그림 모두 전력이 증가함에 따라 챔버 내의 온도가 상승하는 것을 살펴볼 수 있다. 그림 9 에서 전력이 증가할수록 평균 온도 증가와 함께 변위가 증가하지만, 그림 11 은 Duty ratio 50% 이상인 지점부터 전력이 증가함에 따라 평균 온도가 상승하더

라도 변위는 계속해서 증가하지 않는다는 사실을 확인할 수 있다.

그림 12 는 주변온도가 19°C, 1Hz 에 가변전압을 인가하여서 각 실험경우가 동일한 전력소비를 할 경우 Duty ratio 변화에 따른 평균온도 변화를 측정 한 그림이다. 그림 13 은 같은 조건에서 온도변화와 변위를 측정 한 그림이다. 동일한 전력소비를 하더라도 순간전력이 클수록 변위가 크다는 것을 확인할 수 있는데 이는 같은 전력을 사용하더라도 순간전력을 높여서 운전할 경우 적은

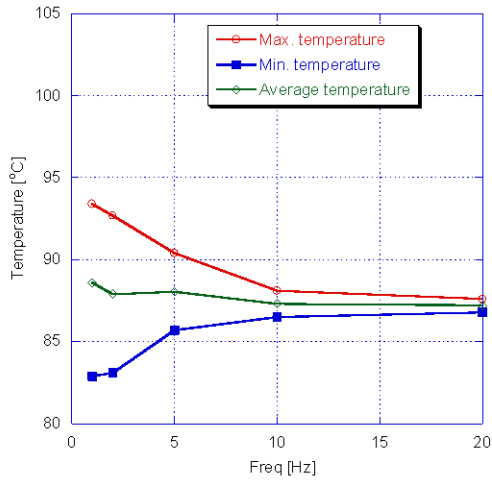


Fig. 14 The measured average temperature of the micro actuator as a function of frequency (12.7V, 50%, Ambient 19°C)

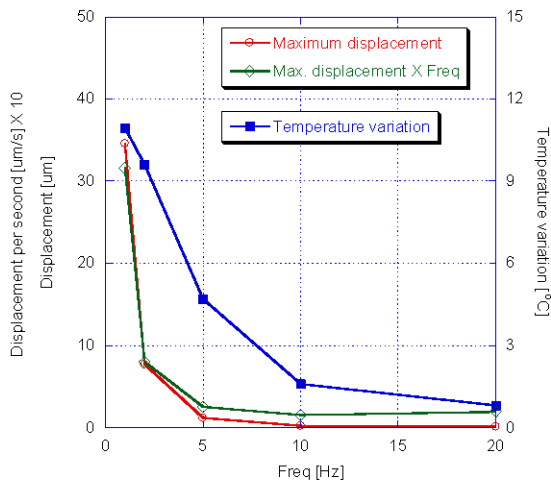


Fig. 15 The temperature variation and maximum displacement as a function of frequency (12.7V, 50%, Ambient 19°C)

에너지를 사용하여 액츄에이터의 효율을 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 14 와 15 는 주변온도가 19°C인 경우에 전압과 Duty ratio 는 12.7V, 50% 로 고정된 상태에서 주기를만 변화시키면서 온도변화와 변위를 측정하는 그래프이다. 주기가 바뀌더라도 전력은 바뀌지 않으므로 각 경우를 살펴보아도 동일한 평균온도를 보이고 있다. 변위는 주기가 짧아질수록 가열과 냉각에 필요한 시간이 부족하여서 챔버 내부의 온도가 많이 상승하지 못하고 그에 따라 줄어들게 된다. 또한 주파수가 증가할수록 최대변위는 지속적으로 감소한다.

5. 결론

본 연구에서는 휴대용 전자기기에 적용을 목적으로 하는 Active DMFC 용 상 변화 타입 마이크로 액츄에이터를 제작하고 온도특성과 변위를 측정하여서 제작한 마이크로 액츄에이터의 최적 운전조건을 분석하였다. 제작한 마이크로 액츄에이터의 크기는 $23 \times 23 \times 0.7 \text{mm}^3$ 이며, 백금을 사용하여 증착한 히터는 가로 300µm, 길이 30mm, 두께 4000Å 이며 40Ω 의 저항을 보였다. 1.6W, 1Hz, 50% 의 조건에서 11°C 의 온도변화를 보였고, 35µm 의 변위를 측정할 수 있었다. 챔버 내부에 물을 채우지 않고 공기 중에 위치시킨 상태에서 가열냉각실험을 통한 평균온도분석에 의해 마이크로 액츄에이터의 최적 운전 조건을 예측할 수 있다. 소비전력이 증가할수록 변위가 증가하고, 같은 소비전력에서 변위는 순간전력이 높을수록 더욱 높아지는 것을 확인하였다. 이 결과로부터 같은 전력을 사용하더라도 순간전력을 높여서 운전할 경우 적은 에너지를 사용하여 액츄에이터의 효율을 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 향후 본 액츄에이터에 밸브를 추라하여 구성한 펌프의 성능에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 생산기술연구사업의 일환인 “ 능동형 마이크로 연료전지용 유체 공급 모듈 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) James, L., Andrew, D., 2003, “Fuel Cell Systems Explained second edition”, pp. 152-160
- (2) Nguyen, N. T., Huang, X. and Chuan, T. K., 2002, “MEMS micropump a review”, Journal of fluids engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 384-392
- (3) Jang, W. I., Choi, C. A., Jun, C. H., Kim, Y. T., Esashi, M., 2004, “Surface micromachined thermally driven micropump”, Sensor and actuators A, Vol. 115, No. 1, pp. 151-158
- (4) Mills, A. F., 1992, “Heat transfer”, pp. 810-811
- (5) Tang, K. C., Liao, E., Ong, W. L., Wong, J. D. S., Agarwal, A., Nagarajan, R., Yobas, L., 2006, “Evaluation of bonding between oxygen plasma treated polydimethyl siloxane and passivated silicon”, Journal of physics, Vol. 34, No. 1, pp. 155-161