

# 열대류형 초소형 가속도계의 최적 설계

박병규<sup>†</sup> · 김준원<sup>\*</sup> · 문일권<sup>\*\*</sup> · 김동식<sup>\*\*\*</sup>

## Optimal Design of a Convective MEMS Accelerometer

Byoung Kyo Park<sup>†</sup>, Il Kwon Moon<sup>\*\*</sup>, Joonwon Kim<sup>\*</sup> and Dongsik Kim<sup>\*\*\*</sup>

**Key Words :** Convective accelerometer (열대류형 가속도계), Design optimization(설계최적화), MEMS (초소형기전공학), Numerical analysis (수치해석), Thermal sensor (열센서)

### Abstract

Various MEMS accelerometers are used in engineering applications including automobiles, mobile phones, military systems, and electronic devices. Among them, the thermal accelerometer employing the temperature difference induced by the convective flow inside the micro cavity has been a topic of interest. As the convective sensor does not utilize a solid proof mass, it is compact, lightweight, inexpensive to manufacture, sensitive and highly endurable to mechanical shock. However, the complexity of the convective flow and various design constraints make optimization of a device a crucial step before fabrication. In this work, optimization of a 2-axis thermal convective MEMS accelerometer is conducted based on 3-dimensional numerical simulation. Parametric studies are performed by varying the several design variables such as the heater shape/size, the cavity size and types of the gas medium and the position of temperature probes in the sensor. The results of optimal design are presented.

#### 기호설명

$a$ : 가속도 ( $m/s^2$ )  
 $C_p$ : 비열 ( $J/kg \cdot K$ )  
 $D$ : 히터 끝에서 공동 끝까지의 길이 (m)  
 $k$ : 열전도율 ( $W/m \cdot K$ )  
 $L$ : 히터 폭; 히터 구조물 양 끝 단 간 길이 (m)  
 $P$ : 압력 (Pa)  
 $R$ : 이상기체상수 ( $J/mole \cdot K$ )  
 $T$ : 온도 (K)  
 $u$ : 속도 (m/s)  
 $x'$ : 히터 끝에서 센서까지의 길이 (m)  
 $w$ : 공동 폭 (m)  
 $\Delta T$ : 양편 온도 센서 간 온도 차 (K)

$\mu$ : 동점도(dynamic viscosity) ( $kg/m \cdot s$ )

$\rho$ : 밀도 ( $kg/m^3$ )

### 1. 서론

가속도계는 물체의 움직임, 기울어짐, 충격, 진동 등의 상태나 가속도를 감지하는 센서로서 산업 전반에 걸쳐 장치 제어 및 보호, 사용자 안전등을 위하여 널리 이용되고 있다. 최근에는 작은 크기와 낮은 전력 소비, 높은 민감도 및 낮은 생산 단가 등의 장점을 가진 초소형의 가속도 센서가 실리콘 미세가공 기술을 이용하여 개발됨에 따라 자동차, 핸드폰, 네비게이션, 군사장비, 로봇, 노트북, 오락기기 등 활용범위가 더욱 넓어지고 있는 추세로, 더욱 다양한 분야에서 범용성을 높이기 위해 높은 성능과 소형화를 지속적인 연구가 요구되고 있다.

현재 상용화된 가속도계들은 그 측정 방식에 따라 여러 종류로 나뉘어 지는데, 그 중에서도

<sup>†</sup> 포항공과대학교 기계공학과

<sup>\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과

<sup>\*\*</sup> (주)한국센시스

<sup>\*\*\*</sup> 책임저자, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : dskim87@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2179 FAX : (054)279-5899

미세 열측정 기술을 바탕으로 하는 열대류형 가속도계는 구조가 간단하여 제작이 용이할 뿐 아니라 가볍고 충격에 강하며, 작은 가속도에도 높은 민감도를 가지는 장점을 갖고 있다[1-2]. 그러나 열대류형 가속도계가 갖는 여러 장점에도 불구하고, 열 대류현상의 복잡성과 다양한 설계 변수들의 존재로 인하여 장치의 성능을 최대화할 수 있는 다양한 디자인 인자들에 대한 연구, 특히 히터 구조에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다[3-7]. 실제 가속도계의 설계 변수들 대부분이 사용 목적에 따라 제약이 가해지기 때문에, 장치의 설계 요구조건 하에서 최대의 성능 향상을 위해서 히터의 구조에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 3 차원 수치해석을 통해 2 축 열대류형 가속도계의 성능을 최적화하였다. 최적 구조를 구하기 위하여 가속도계 내부의 공동(cavity) 폭을 비롯하여, 히터 폭, 기체 매질, 히터 가열량과 온도 센서의 위치 등에 대한 분석을 수행하였다. 또한 내부 기체 매질의 열유동과 히터의 열전달 해석을 통해 가장 우수한 민감도를 갖는 히터 구조를 찾고 그 선형성을 시험함으로써 최적의 설계방안을 도출하였다.

## 2. 측정 원리 및 수치해석 조건

### 2.1 열대류형 가속도계 구조 및 측정 원리

Figure 1 은 기본적인 2 축 열대류형 가속도계의 구조를 나타낸다. 센서 중앙의 히터는 전기적으로 가열되며, 온도 센서는 히터로부터 대칭되는 위치에 존재한다. 외부 대기가 가속도계의 내부 유동에 영향을 미치지 않기 위해 가속도계는 밀폐된 상태여야 한다. 가속도계는 가속도계의 수평 방향으로 작용하는 가속도를 측정한다. 가속도계의 수

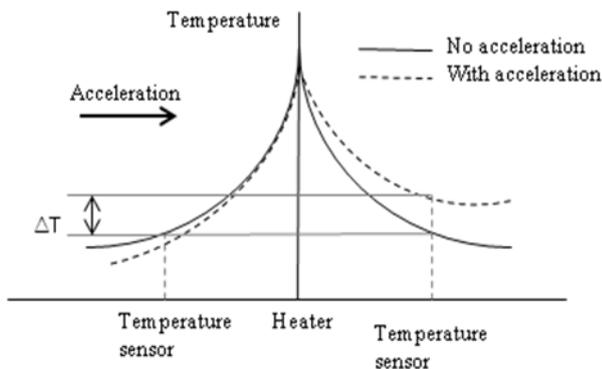


Fig.1 Principle of a micromachined convective accelerometer

평방향으로 가속도가 작용하지 않을 때에는 양온도 센서간의 온도 차이는 발생하지 않는다. 그러나 가속도가 가해지면, 고온으로 가열된 기체 매질과 차가운 매질 간의 밀도 차이로 인한 관성력의 차이에 의해 내부 유동이 비대칭적으로 형성된다. 그에 따라 양 온도 센서간의 온도 차이  $\Delta T$  가 발생한다. 이 온도 차이의 크기를 통하여 가해진 가속도를 구할 수 있다.

### 2.2 지배 방정식 및 수치 해석 조건

Figure 2 은 열대류형 가속도계의 단면도이다. 중력은  $-z$  방향으로 작용하고 있으며, 가속도는  $x$  방향으로 작용한다. 히터는 일정 열량으로 가열되고, 센서 하부 공동 벽은 단열(adiabatic wall)로, 센서 상부 벽은 등온(isothermal wall)으로 가정하였다. 또한 기체 매질의  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $k$  는 일정한 값을 가지며,  $\beta$  는 이상기체의 그것을 따른다고 가정하였다. 히터 역시 일정한  $C_p$  와  $k$  를 가진다고 가정하였다. 한편, 열대류형 가속도계 내부의 유동은 유동의 속도가 매우 작기 때문에 완전히 층류로 가정하였다.

정상상태 센서 내부 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\text{Continuity equation} \\ \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Momentum equation} \\ \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{a} \quad (2)$$

$$\text{Energy equation} \\ \rho c_p \vec{u} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T \quad (3)$$

$$\text{Equation of state} \\ \rho = p/RT \quad (4)$$

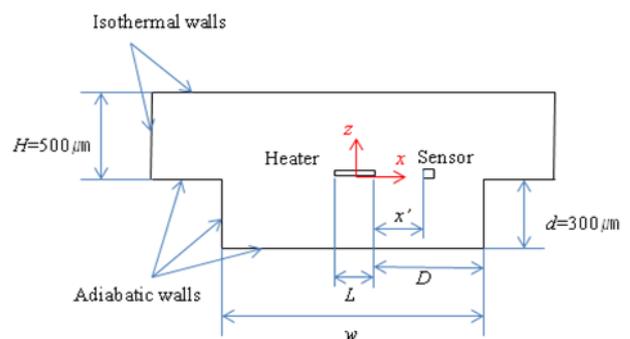


Fig. 2 Schematic of simulated convective accelerometer. (Side view)

본 연구에서는 3 차원 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어인 STAR-CD(ver. 3.22)를 이용하였다. 효율적인 계산 수행을 위하여 히터 주변부 격자를 보다 조밀하게 구성한 비균일 격자를 사용하였으며 격자의 총 수는 200,000~500,000 개이다.

### 3. 수치해석 결과 및 분석

#### 3.1 기체 매질 및 히터 가열량

앞서 언급한 바와 같이 가속도계 내부의 유동은 자연대류에 의하여 발생하기 때문에 가속도계의 성능은 대류를 지배하는 무차원 수인 Grashof 수에 큰 영향을 받는다. 기체 매질의 물성치 변화는 여타 설계 변수에 비해 Grashof 수의 변화에 미치는 영향이 크다. 따라서 가속도계의 내부 설계 변수들의 최적화에 앞서 동일 조건하에서 Grashof 수를 최대화하는 기체 매질을 찾는 것이 중요하다. Table 1 은 각각의 기체 매질이 사용된 가속도계의 조건과 1g 의 가속도가 가해졌을 때의 민감도를 나타낸다. 상대적으로 낮은 동적 점성도와 높은 열팽창계수, 낮은 열용량을 갖는 기체 매질이 사용될 때 민감도가 높아지는 것이 확인된다.

#### 3.2 히터 폭 (L)

가속도 내 유동의 Grashof 수의 특성길이는 자연대류를 유발하는 인자인 히터의 x 방향 길이, 즉 폭에 해당한다. 선형 히터의 폭을 변화시키면서 그에 따른 센서 민감도의 변화를 계산하였고 그 결과, 히터 폭이 증가함에 따라 민감도가 증가하는 것을 알 수 있다. (Fig. 3)

#### 3.3 공동 폭 (w)

Grashof 수에 포함되지 않는 디자인 변수로는 히터의 형상 외에도 공동의 폭이 있다. 이 공동은

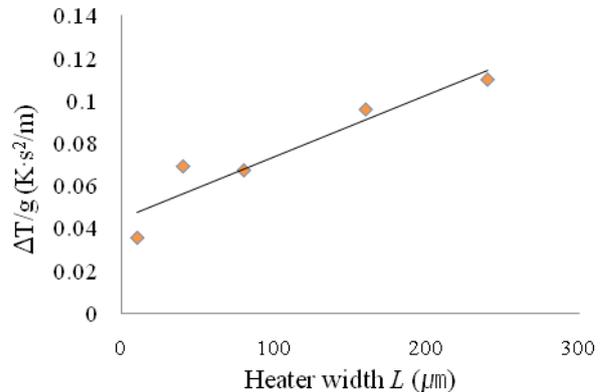
**Table 1** Sensitivity of accelerometer for different gas media (cavity width 1000  $\mu\text{m}$ ).

Gas medium	Heating Power	Heater geometry	Heater width	Sensitivity ( $\Delta T/1g$ )
Air	12.74mW	Line	240 $\mu\text{m}$	0.0078K
SF6				0.11K
Cl2				0.043K
CO2				0.017K

자연대류 유동이 일어나는 공간이므로 그 크기의 변화에 따라 장치 성능에 변화가 있을 것을 쉽게 예상할 수 있다. Table 2 에서 볼 수 있듯이, 다른 설계 변수들이 동일한 상태에서 공동 폭의 증가에 따라 센서의 민감도가 상승함을 알 수 있다. 따라서 높은 민감도와 센서의 소형화 사이에 상반 관계(trade-off)가 성립하는 것을 알 수 있다.

#### 3.4. 히터 형태

히터의 구조는 가속도계의 성능을 높이는데 있어 매우 중요한 설계 요소이다. 그러나 히터 구조에 관해서는 자연 대류 및 열전달 해석의 어려움 때문에 보고된 연구가 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 히터 내부 유동장 및 해석하였다. 이를 통해, 일정 가속도에서 양 온도 센서의 온도 차이를 가장 크게 하는 히터 구조를 찾고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4 에서 볼 수 있는 것과 같은 선형 히터와 정사각형 히터, 마름모형 히터 등의 히터 구조에 대하여 계산을 수행하고 각각의 민감도 및 유동장, 온도장 등을 비교하였다. 이때 각 히터는 동일한 온도로 가열되었다.



**Fig. 3** Dependence of temperature difference on heater width.

**Table 2** Sensitivity of accelerometer for different cavity widths.

Cavity width (w)	Gas medium	Heating Power	Heater geometry	Heater width (L)	Sensitivity ( $\Delta T/1g$ )
1000 $\mu\text{m}$	SF6	6.2mW	Line	240 $\mu\text{m}$	0.11K
1500 $\mu\text{m}$					0.19K
2000 $\mu\text{m}$					0.27K

해석 결과 Fig. 5 에서 볼 수 있는 것과 같이, 마름모형 히터의 경우가 다른 여타의 히터 구조들에 비하여 높은 민감도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 선형 히터(Fig. 4(a))에 비해 고리형태 구조들이 높은 민감도를 가지는 것은 히터 자체가 유동의 장애물로서 작용하기 때문이다. 즉, 정사각형 혹은 마름모형 히터의 경우 히터 내부의 공동을 통해 유동이 통과하기 때문에 선형히터의 경우보다 유동이 활발히 일어나고 그 결과 히터 양측의 온도차이가 크게 나타난다.

한편, 정사각형 히터에 비해 마름모형 히터의 민감도가 높은 것은 온도장의 영향에 의한 것으로 볼 수 있다. 가속도계의 측정 원리에 따르면 동일한 가속도가 가해졌을 때 온도 기울기가 클 수록 양편의 온도 차가 크게 발생한다. 마름모형 히터의 경우 센서 중심 축 상에  $x$  방향으로 나타나는 온도장의 기울기가 정사각형 히터보다 크게 나타난다

그러나 Fig. 5 에서 볼 수 있는 것과 같이, 비대칭 마름모(Fig. 4(d))의 경우 예상과 달리 민감도가 오히려 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 이는  $x$  축 상의 히터 외부로의 온도 기울기를 크게 하는 효과는 마름모형 히터(Fig. 4(c))에 비해 그리 크지 않은 반면, 히터가 유동을 제한하는 효과가

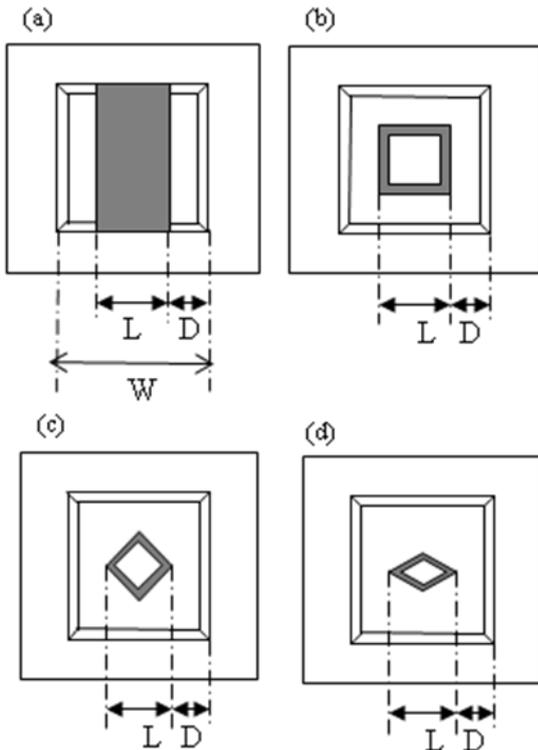


Fig. 4 Heater shapes: (a) line\_shaped heater, (b) square\_shaped heater, (c) diamond\_shaped heater, (d) elongated diamond\_shape heater.

커졌기 때문으로 보인다. 이상의 결과로부터 마름모형(Fig. 4(c))이 최적의 히터 구조라고 결론 내릴 수 있다.

### 3.4.1. 마름모형 히터의 성능 개선

히터의 형태 이외에도 제한된 상황에서 부분적인 성능 개선을 위하여 마름모형 자체는 고정시킨 상태에서 히터의 모서리 부와 이외 부분의 매질을 poly-Si 과 Al 으로 다르게 하여 모서리 부에서 열이 집중적으로 발생하도록 하였다. 이를 통하여 열의 집중도가 달라짐에 의하여 히터 외부의 온도 구배가 더 크게 발생하는 효과를 기대할 수 있다. 이 때, 실제 히터의 가열은 전기적인 방식으로 이루어지므로 충분한 저항을 얻기 위하여 모서리 부의 선포를 줄이고 선의 길이를 늘이는 Fig. 6 과 같은 구조를 채택하였다. 이러한 모서리부의 구조 변화는 그 부분의 열용량을 줄임으로써, 같은 전력량으로 더 높은 히터의 온도를 얻는 효과 또한

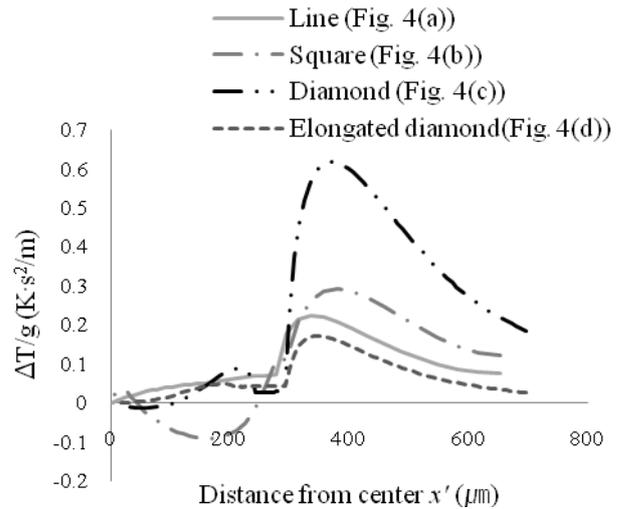


Fig. 5 Dependence of temperature difference on heater geometry.

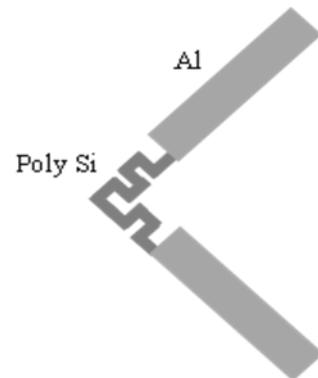


Fig. 6 Improvement of diamond-shaped heater by increasing the thermal resistance at the corner.

기대할 수 있다. Fig 7은 이러한 구조 개선이 민감도 향상에 끼친 영향을 보여준다. 이 두 가지 구조 개선을 통하여 기존의 마름모형 히터에 비해 약 10%의 성능 향상을 얻을 수 있었다.

### 3.5. 온도 센서의 위치

센서의 민감도를 최대화하기 위해서는 가속도가 가해졌을 때, 히터로부터 대칭되는 지점 간의 온도 차가 가장 큰 곳에 온도 센서가 위치해야 한다. 이상의 설계 변수들을 변화시키면서 계산을 수행한 결과를 분석하여 온도 차가 최대가 되는 지점을 조사하였다. 그 결과  $x'/D$ 가 0.1~0.2인 지점에 최대의 온도 차가 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 가속도계의 기본 원리상, 온도 구배가 클수록 대류에 따른 온도 변화가 커지기 때문에 중심부로부터 갈수록 온도 차이가 커지다가, 히터에 매우 근접한 영역에서는 온도 분포가 완만해지기 때문으로 보인다.

한편, Fig. 8(a)를 통해 선형히터(Fig. 4(a))의 경우  $z$  축 상의 위치가 100  $\mu\text{m}$ 인 지점에서 민감도가 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 센서 내부 속도장에서 자연대류 유동이 가장 활발하게 일어나 히터 양편의 온도 비대칭성이 가장 크게 나타나는 지점이 100  $\mu\text{m}$  지점이기 때문인 것으로 생각된다. 반면, 마름모꼴 히터(Fig. 4(d))의 경우  $z=0$ 인 위치에서 최대의 민감도를 얻을 수 있음을 Fig. 8(b)을 통해 알 수 있다. 이는 선형 히터의 경우, 가속도계 내부의 유동에 히터가 방해요소로 작용하는 반면 히터 내부가 비어있는 마름모형 히터의 경우 히터 주변 대류 유동이 히터에 의해 방해 받지 않고 내부 공동을 통해 형성됨에 따라  $z=0$ 인 지점 주위에서 유동이 가장 활발하게 일어나기 때문으로 추정된다.

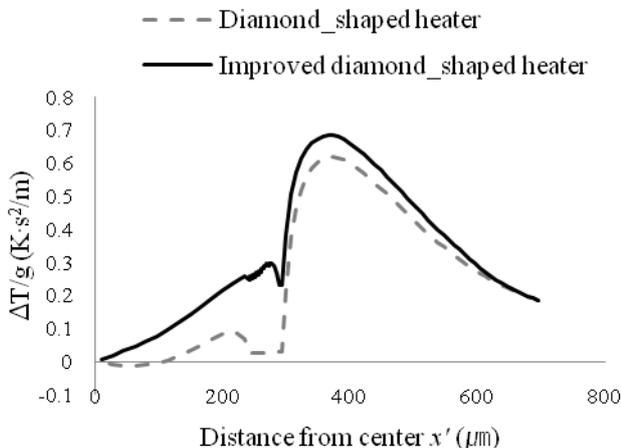


Fig. 7 Temperature difference of improved diamond-shaped heater.

### 3.6. 선형성

최적 히터 구조라고 할 수 있는 마름모형 히터에 대해 가속도계에 가해진 가속도에 대한 센서 출력의 크기의 선형성(linearity)을 시험한 결과는 Fig. 9와 같다. 센서 응답이 가속도에 선형 비례함을 알 수 있다.

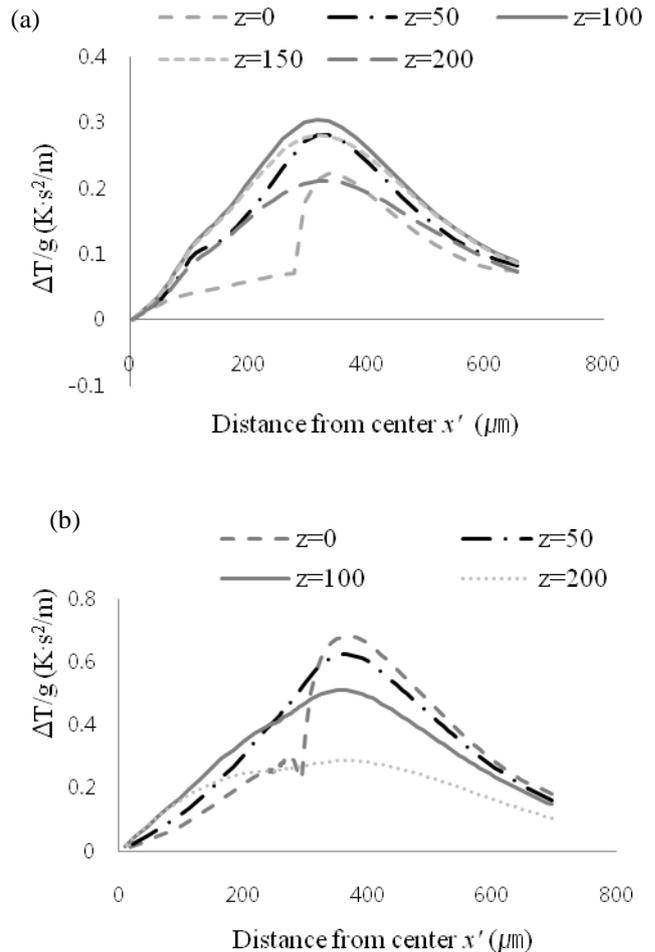


Fig. 8 Dependence of temperature difference with sensor location (heater width 240  $\mu\text{m}$ ): (a) line\_shaped heater (Fig. 4(a)), (b) diamond shaped\_heater (Fig.4 (d))

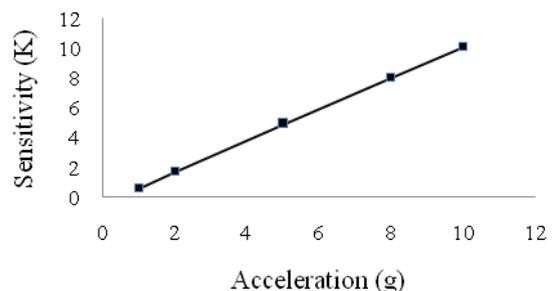


Fig. 9 Linearity of diamond\_shaped heater

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여, 최적의 성능을 갖는 열대류형 초소형 가속도계 설계인자를 도출하였다. 센서 설계상 요구되는 크기와 전력 등의 한계 내에서 최대의 공동 폭과 히터 가열량, 히터 폭을 가질 수록 높은 민감도를 갖는 것을 알 수 있다. 센서 내부의 기체매질로는 상대적으로 낮은 동점도와 높은 열팽창계수, 낮은 열용량을 갖는 매질을 사용해야 한다.

그리고 히터의 형태에 있어서는 마름모형의 히터가 가장 우수한 민감도를 가지며, 선형성도 우수함을 알 수 있었다. 또한, 마름모형 모서리 부의 열저항을 증가시켜 10 %가량의 성능 향상이 가능함을 보였다. 마지막으로 본 연구를 통하여 각 히터 구조에 대해 최적의 온도 센서의 위치를 도출하였다.

#### 후기

본 연구는 (주)한국센시스와 한국과학재단의 마이크로 열시스템 ERC의 지원으로 수행되었다.

#### 참고문헌

- (1) Dao, R., Morgan, D.E., Kries, H.H, Bachelder, D.M., 1996, "Convective Accelerometer and Inclinator," *US Patent*, 5581034
- (2) Leung, A. M., Jones, J., Czyzewska, E., Chen, J., Pascal, M., 1997, "Micromachined Accelerometer with no Proof Mass," *Technical digest of Int Electron Device Meeting*, 899~902.
- (3) Luo, X. B., Li, Z. X., Guo, Z. Y. and Yang, Y. J., 2002, "Thermal Optimization on Micromachined Convective Accelerometer," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 705~712.
- (4) Luo, X. B., Yang, Y. J., Zheng, F., Li, Xi and Guo, Z. Y., 2001, "An Optimized Micromachined Convective Accelerometer with no Proof Mass," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 504~508.
- (5) Mailly, F., Martinez, A., Giani, A., Pascal-Delannoy, F. and Boyer, A., 2003, "Design of a Micromachined Thermal Accelerometer: Thermal Simulation and Experimental Results," *Microelectronics*, Vol. 34, pp. 275-280
- (6) Mailly, F., Giani, A., Martinez, A., Bonnot, R., Temple-Boyer, P., Boyer, A., 2003, "Micromachined Thermal Accelerometer," *Sens. Actuators. A Phys.*, Vol. 103, pp. 359-363.
- (7) Zhu, R., Ding, H., Su, Y., Zhou, Z., 2006, "Micromachined Gas Inertia Sensor Based on Convection Heat Transfer," *Sens. Actuators. A Phys.*, Vol. 130-131, pp. 68-74.