

< 논문 >

열 대류 가속도계의 성능향상에 관한 연구

오 준 석[†] · 윤 성 기^{*}

(2006년 10월 2일 접수, 2007년 4월 9일 심사완료)

A Study on the Performance Improvement of the Micromachined Convective Accelerometer

Jun-Seok Oh and Sung-Kie Youn

Key Words : Convective Accelerometer(열 대류 가속도계), Thermal Accelerometer(열 가속도계), Natural Convection(자연대류)

Abstract

A micromachined convective accelerometer is a recently developed device. Typical micromachined accelerometers use a solid proof mass for measuring acceleration. But a micromachined convective accelerometer does not use a solid proof mass. A micromachined convective accelerometer is composed of a heating resistor and temperature sensors. This device measures acceleration by using convective heat transfer phenomenon. Therefore characteristics of a micromachined convective accelerometer are different as compared with typical micromachined accelerometer. In this research, we analyze the convective accelerometer by using transient convective heat transfer analysis. Based on the results of a convective accelerometer, we propose a new model which has improved performance.

1. 서 론

1990 년대 이후 미세가공기술(MEMS)의 발달로 여러 가지 기계, 전기적인 장치들의 초소형화가 이루어졌다. 초소형화에 성공한 대표적인 것 중 하나가 가속도계이며 소형 전자제품의 개발로 인해 그 수요는 점점 증가하고 있다.

기존의 가속도계의 대부분은 고체 질량체(proof mass)를 이용한 것으로 가속도에 의한 내부 질량체의 변위를 이용하여 가속도를 검출하는 방식이다. 현재 개발, 상품화 되어있는 대부분의 초소형 가속도계도 이러한 검출 방식을 이용하고 있다.

이러한 기존의 가속도계와는 다르게 열 대류 가속도계(Micromachined convective accelerometer)는 고체 질량체를 이용하지 않는다. 열 대류 가속도계는 내부의 작동 유체의 자연 대류 열전달 현상에 기반하여 가속도를 검출하며 비교적 최근에 연구, 개발된 것으로 현재 상용화되어 휴대폰과 같은 소형 전자제품에 적용되고 있다.

기존의 가속도계와는 다른 검출 방식으로 인해 열 대류 가속도계는 기존 방식의 것과는 다른 성능 특성을 나타낸다. 가속도의 검출에 고체 질량체를 사용하지 않으므로 높은 내충격량(shock resistance)을 가지며 고체 질량체를 이용하는 가속도계와 비교했을 때 비교적 단순한 내부 형상을 가지고 있다.

하지만 가속도의 검출에 유체의 열 전달 현상을 이용하므로 상대적으로 고체에 비해 느린 유체의 반응속도로 인해 가속도계의 대역폭이 좁다는 단점을 가지고 있다.

† 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원

E-mail : ohjs@kari.re.kr

TEL : (042)860-2734 FAX : (042)860-2233

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

본 논문에서는 열 대류 가속도계의 모델링을 통해 가속도계 내부에서의 자연대류 현상을 수치적으로 해석함으로써 열 대류 가속도계가 갖는 성능 특성을 파악하고 이를 바탕으로 하여 기존 열 대류 가속도계가 갖는 단점을 개선할 수 있는 새로운 모델을 제안한다.

2. 열 대류 가속도계

열 대류 가속도계는 크게 마이크로 히터와 온도 센서로 구성되어 있다. Fig. 1 은 1 축 열 대류 가속도계의 개략적인 형상을 나타내고 있다.

미세공정기술을 이용하여 실리콘 기판(silicon substrate)을 식각(etching)하여 기판의 중앙에 공동(cavity)을 만든 후 막대(bar) 형태의 구조물을 공동 위에 구성하게 된다. 이렇게 구성된 구조물 위에 전기적인 성질을 나타내는 불순물을 입히는 과정(doping)을 통해 히터와 온도센서를 구성한다. 히터는 가속도계 내부 공동 윗부분의 중앙에 위치하며 온도센서는 히터로부터 같은 거리에 대칭으로 구성을 한다. 히터와 온도센서가 구성되고 남은 실리콘 기판 부분에는 전기적인 신호를 처리할 수 있는 전기 회로를 구성한다. 이와 같이 구성된 가속도계는 작동유체와 함께 밀봉(hermetic packaging)한다.

히터는 전기 저항의 성질을 가지며 전류를 인가할 경우 열을 발생하여 열원의 역할을 한다. 히터가 동작하여 가속도계 내부가 가열되면 내부의 온도 분포는 히터를 중심으로 대칭적으로 나타난다. 즉, 가속도가 없는 경우 히터에 의한 가속도계 내부의 온도 분포는 Fig. 2 와 같이 대칭으로 나타난다. 하지만 외부에서 가속도가 작용하게 되면 가속도계 내부에서는 작동 유체의 자연 대류 현상이 발생하며 이로 인해 온도 분포의 대칭성은 깨지며 온도 분포가 Fig. 2 와 같이 비대칭으로 바뀌면 온도센서에서는 서로 다른 온도 값을 측정한다.

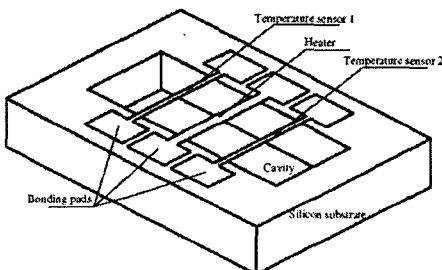


Fig. 1 1-axis convective accelerometer⁽¹⁾

이 때 온도센서간의 측정 온도의 차이 ΔT 를 이용하여 가속도의 방향과 크기를 검출하게 된다.

온도센서는 열전대열(thermopile)로 구성되며 측정된 온도 값을 전압신호로 바꾸어 준다. 열전대열은 열전쌍(thermocouple)을 직렬로 연결한 것으로 온도 측정 부분(hot junction)과 기준 온도 부분(cold junction)으로 나누어진다. 온도 측정 부분은 온도 센서가 되며 기준온도 부분은 실리콘 기판 위에 구성된다. Fig. 3 과 같이 전기 회로를 구성하여 두 온도센서에서 측정된 온도의 차이 값을 식 (1)과 같이 전압신호로 바꾸게 된다.

$$\begin{aligned} V_{out} &= A_{diff}(V_1 - V_2) \\ &= A_{diff} \{s(T_1 - T_R) - s(T_2 - T_R)\} \\ &= A_{diff} \cdot s(T_1 - T_2) \\ &= A_{diff} \cdot s\Delta T \end{aligned} \quad (1)$$

A_{diff} 는 차동증폭기(differential amplifier)의 증폭 비를 나타내고 s 는 Seebeck 계수로 열전대열을 구성하고 있는 두 물질에 따라 달라진다. 식 2.1 과 같이 출력전압은 두 온도센서에서의 차이 값 ΔT 에 비례하여 나타난다. 따라서 ΔT 값을 알게 되면 열 대류 가속도계의 성능 특성을 파악할 수 있다.

Fig. 4 는 2 축 열 대류 가속도계의 개략적인 내부 형상을 나타낸다. 2 축 가속도계의 검출 원리와 기본 구성은 1 축 가속도계와 같다.

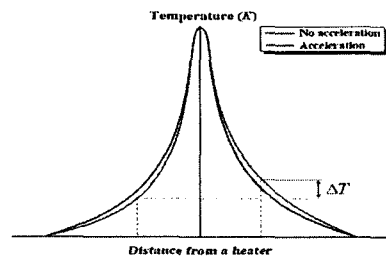


Fig. 2 Temperature profile in a convective accelerometer

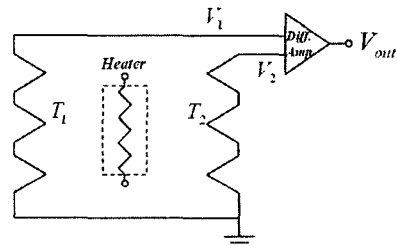


Fig. 3 Electrical circuit in a convective accelerometer

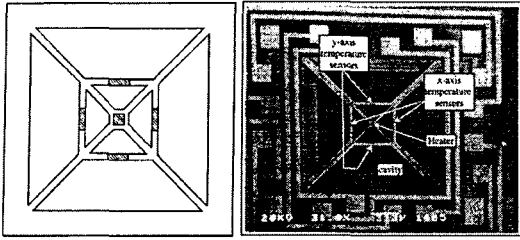


Fig. 4 Dual axis convective accelerometer⁽⁶⁾

하지만 2 축 감지의 경우 히터와 온도센서가 두 방향에 대해서 대칭이 되어야 하므로 히터가 막대 형태가 아닌 점(point)형태의 구조물 위에 구성이 된다.

3. 기존 모델의 해석

3.1 해석과정

열 대류 가속도계는 자연 대류 열전달 현상을 이용하므로 식 (2)~(4)과 같은 자연 대류 열전달의 지배방정식을 따른다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + a_i \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

- u_i : i 방향 속도 성분 (m/s)
- T : 작동 유체의 온도 (K)
- p : 작동 유체의 압력 (N/m²)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- k : 열전도도 (W/m·K)
- ν : 점성도 (N·s/m²)
- c_p : 비열 (J/kg·K)

식 (3)의 a_i 는 i 방향으로 작용하는 가속도 성분을 나타낸다. 자연대류의 지배방정식은 정해를 구할 수 없으므로 수치해석으로 근사해를 구해야 한다. 본 연구에서는 유한체적법(finite volume method) 프로그램인 FLUENT⁽¹²⁾를 사용 하였다.

해석 대상의 모델링은 Fig. 5 와 같다. 자연 대류 열전달은 공간의 크기와 형상의 영향을 받는다. 따라서 히터와 온도센서간의 열전달에 영향을 줄

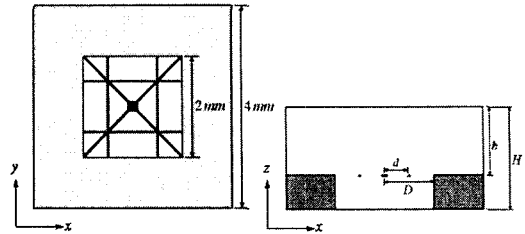


Fig. 5 An analysis model of a typical accelerometer

Table 1 Modeling sizes of a convective accelerometer

Part	Length(mm)	Width(mm)	Height(mm)
Heater	0.2	0.2	0.002
Heater support	1.273	0.04	0.002
Support of temp. sensor	2	0.05	0.002

인자로 거리 d 와 내부의 높이 h 를 선택하여 그 값을 변화시키면서 해석하였다.

상용화된 열 대류 가속도계는 $5 \times 5 \times 2\text{mm}^3$ 의 크기를 만족한다. 따라서 실리콘 기판의 길이와 폭, 높이는 각각 4mm, 4mm, 0.4mm로 하였으며 공동의 길이와 폭은 각각 2mm로 고정하였다. 히터와 히터를 지지하는 구조물, 온도센서를 지지하는 구조물의 모델링 크기는 Table 1 과 같다. 히터에 600K의 등온 조건을 부여하였고 가속도계 외부의 경계는 상온으로 가정하여 298K의 등온 조건을 부여하였다. 해석 모델의 경계조건은 Fig. 6 과 같다.

일반적으로 가속도는 DC 처럼 일정한 값을 갖지 않고 주파수를 가지며 크기, 방향이 시간에 따라 변한다. 따라서 주파수 특성을 갖는 형태의 가속도를 모사해야 하며 과도 열전달(transient heat transfer)현상의 해석이 수반되어야 한다. 본 연구에서는 가속도는 식 (5)와 같이 정현파 함수(sinusoidal function)를 이용하여 모사하였으며 자연 대류 열전달 현상의 과도해석을 수행하였다. 히터에 전류가 인가되고 가속도계의 내부 온도가 정상상태(steady state)에 도달한 후 가속도 함수가 적용되도록 시간 t_0 의 이전은 가속도의 값이 0이 되도록 하였다. 시간 t_0 는 가속도계의 내부 온도 분포가 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이다. 가속도의 최대 값 A 는 $3g(29.43\text{m/s}^2)$ 로 하였다.

$$a(t) = \begin{cases} A \sin\{2\pi f(t-t_0)\} & (t \geq t_0) \\ 0 & (t < t_0) \end{cases} \tag{5}$$

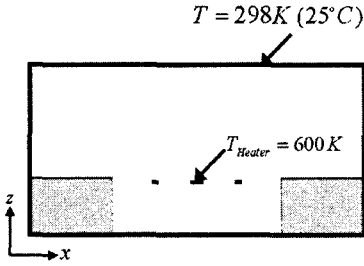


Fig. 6 Boundary condition of an analysis model

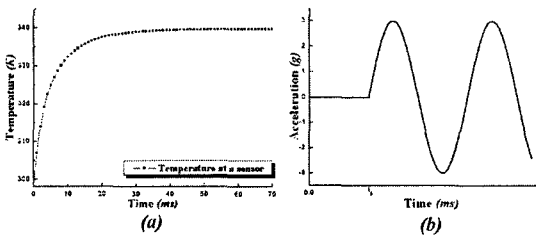


Fig. 7 (a) Temperature profile with no acceleration, (b) Applied acceleration function

Table 2 Properties of structures in an accelerometer

Material	Density (kg/m^3)	Specific heat ($J/kg \cdot K$)	Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)
Silicon	2330	712	148
SiO_2	2220	745	1.38

Fig. 7 의 (a)는 외부의 가속도가 없을 때 온도 센서에서 측정된 값의 변화를 나타낸다. 약 30ms ~ 40ms 사이에 가속도계 내부는 정상상태에 도달하므로 식 (5)의 t_0 는 50ms로 하였으며 이 때의 가속도 모사 함수는 Fig. 7(b)와 같다.

현재 상용화된 열 대류 가속도계의 경우 공기를 작동유체로 사용한다. 따라서 본 연구에서도 작동유체는 공기로 가정하였다. 히터로 인해 가속도계 내부의 온도가 상승하면 작동유체의 물성치도 온도에 따라 변하게 되므로 해석과정 에서 사용된 물성치는 Fig. 8 과 같이 온도의 함수로 근사하여 적용하였다.

열 대류 가속도계는 실리콘 기판으로 제작되며 온도센서와 히터를 구성한 후 지지 부 구조물은 SiO_2 피막을 입힌다. SiO_2 는 실리콘에 비해 열전달 계수가 크게 낮으므로 온도센서와 히터를 지지하는 구조물의 물성치는 SiO_2 로 가정하였다. Si 와 SiO_2 의 물성치는 Table 2 와 같다.

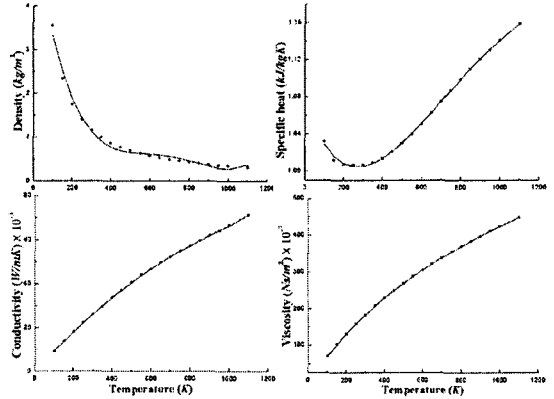


Fig. 8 Approximations of thermal properties

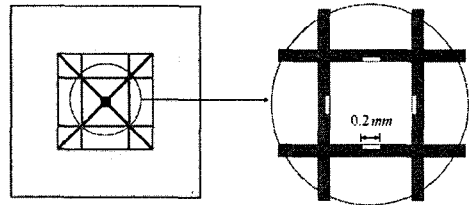
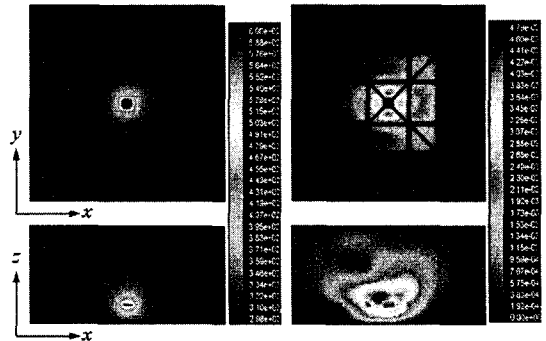


Fig. 9 Positions of temperature sensors



(a) Temperature (b) Velocity

Fig. 10 Temperature and velocity contours at -3g in x

온도센서를 지지하는 구조물에서 온도센서는 Fig. 9 와 같이 길이 0.2mm의 부분에만 구성되는 것으로 가정하였다.

3.2 해석결과

Fig. 10 의 (a), (b)는 x 방향으로 -3g가 작용할 때 가속도계 내부에서의 온도분포와 속도분포를 나타낸다. Fig. 10(a)에서 온도센서간의 차이 값 ΔT 는 약 2°C 정도로 내부 온도분포의 비대칭성을 확인하기 쉽지 않다. 하지만 Fig. 10(b)의 같은 순간에서 속도장은 자연대류에 의해 내부의 속도 분포가 비대칭으로 변한 것을 확인할 수 있다.

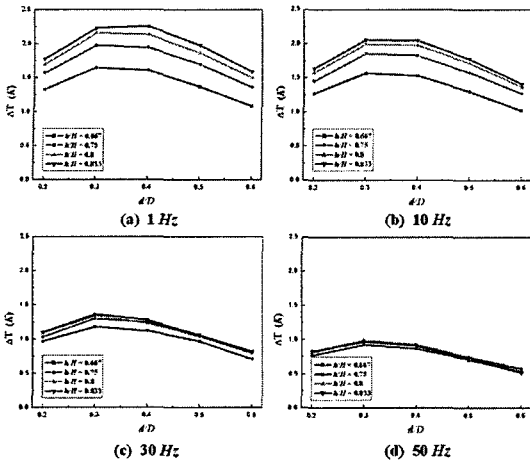


Fig. 11 ΔT between temperature sensors

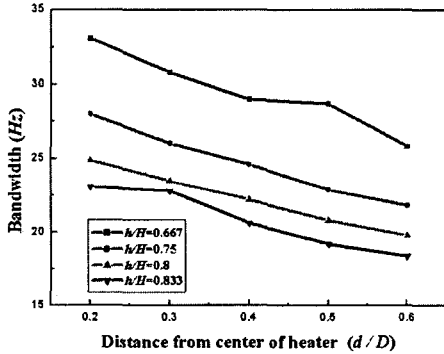


Fig. 12 Bandwidth of typical convective accelerometers

Fig. 11 은 가속도의 주파수 f , 히터와 온도 센서의 거리 비 d/D , 가속도계 내부의 높이 비 h/H 에 따른 온도센서에서의 차이 값 ΔT 를 나타낸다.

Fig. 11 에서 $d/D=0.3$ 일 때 온도 차이가 가장 크게 나타나는 것으로 나타났다. 즉, 히터와 온도센서의 거리가 특정 위치에 있을 때 온도 차이가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

가속도의 주파수가 낮을 경우 h/H 의 값이 가속도계의 출력 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났으나 주파수가 높아지게 되면 h/H 에 따른 영향이 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 가속도의 주파수가 증가할수록 온도 차이도 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이는 바로 출력 전압의 감소로 나타난다.

가속도의 주파수가 증가할 경우 작동 유체의 반응속도도 증가해야 하나 유체의 경우 반응속도가 고체에 비해 민감하지 못하다. 따라서

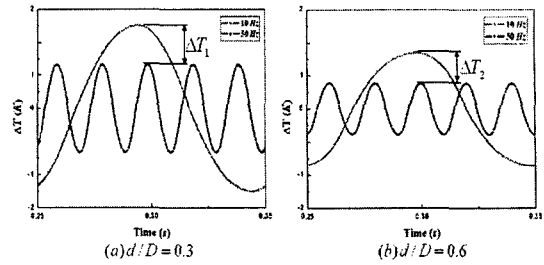


Fig. 13 Decrease of ΔT in different models

작동유체의 반응이 가속도의 변화보다 늦기 때문에 열 대류 가속도계는 좁은 대역폭을 갖는다.

Fig. 12 는 $d/D, h/H$ 에 따른 해석 모델의 대역폭을 나타낸다. 가속도계 내부의 높이, 히터와 온도센서의 거리에 따라 대역폭의 크기가 조금씩은 달라지나 열 대류 가속도계의 전반적인 대역폭은 20 ~ 30 Hz 수준임을 알 수 있다. 이러한 열 대류 가속도계의 대역폭은 기존 문헌^(3,11)의 결과와도 일치한다.

4. 새로운 모델의 제안

4.1 해석과정

기존 모델의 해석을 통해 열 대류 가속도계가 좁은 대역폭을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 앞 절의 해석 결과를 바탕으로 하여 본 절에서는 이와 같은 단점을 개선할 수 있는 새로운 모델을 제안한다.

Fig. 13 은 기존 모델의 해석결과 중 온도 센서의 거리 비 d/D 가 각각 0.3, 0.6 일 때의 주파수 10Hz, 50Hz 에서의 ΔT 의 파형을 나타내고 있다. 그림에서 d/D 의 값이 다른 경우 가속도의 주파수가 증가할 때 ΔT 의 감소 값 $\Delta T_1, \Delta T_2$ 가 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 즉, 온도센서의 위치가 달라지면 가속도 주파수의 증가에 의한 온도 차이의 감소 정도도 달라지게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하여 본 연구에서는 새로운 모델을 제안한다.

기존의 열 대류 가속도계는 한 방향의 가속도 검출에 한 쌍의 온도센서를 사용하였다. 하지만 본 논문에서 새롭게 제안된 모델은 한 방향에 두 쌍의 온도센서를 구성하게 된다. 두 쌍의 온도 센서를 구성할 경우 히터와 가까운 온도 센서에서의 출력 전압과 히터로부터 멀리 떨어진 온도센서에서의 출력 전압은 가속도 주파수가 증가할 때 서로 다른 감소율로 감소하게 된다. 이 때의 출력 전압간의

차이를 이용한다면 전체 출력 전압을 보상할 수 있게 된다.

히터로부터 가까이 위치한 온도센서를 주온도 센서(primary temperature sensor), 멀리 위치한 온도 센서를 보조온도센서(secondary temperature sensor)라 칭한다. 주온도센서에서의 출력 전압을 v_1 , 보조온도센서에서의 출력 전압을 v_2 라 하고 식 (6)과 같은 출력 전압 보상 식을 구성한다.

$$V_{out} = v_1 + \alpha(v_1 - v_2) \quad (6)$$

식 (6)은 주온도센서와 보조온도센서간에서의 출력전압의 차이를 이용하여 주온도센서의 출력 전압의 감소 정도를 보상해주는 것을 나타낸다.

가속도의 주파수가 증가하면 v_1, v_2 의 값은 모두 감소한다. 하지만 v_1 의 감소율이 v_2 의 감소율보다 작아서 주파수가 증가할수록 $v_1 - v_2$ 의 값이 커지게 된다면 v_1 의 감소 정도를 $v_1 - v_2$ 의 값을 이용하여 보상할 수 있게 된다. 이 경우 주파수의 증감에 관계없이 일정한 출력 전압을 생성하게 되어 대역폭의 증가가 이루어질 수 있게 된다. 여기서 α 는 비례 상수이다.

주온도센서와 보조온도센서에서의 열전대열을 구성하는 물질이 같은 경우 식 (6)은 식 (7)와 같이 주 온도센서간의 온도 차이 값 ΔT_1 와 보조 온도센서간의 온도 차이 값 ΔT_2 로 바꾸어 나타낼 수 있다. 열전대열에서 전압은 양(positive)의 물질에서 음(negative)의 물질 방향으로 생성이 되므로 Fig. 14와 같은 증폭회로를 구성하여 표현할 수 있다. 이 때 비례 상수 α 는 각각의 증폭기의 증폭비로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} V_{out} &= v_1 + \alpha(v_1 - v_2) \\ &= (1 + \alpha)v_1 - \alpha v_2 \\ &= s\{\Delta T_1 + \alpha(\Delta T_1 - \Delta T_2)\} \\ &= s\{(1 + \alpha)\Delta T_1 - \alpha\Delta T_2\} \end{aligned} \quad (7)$$

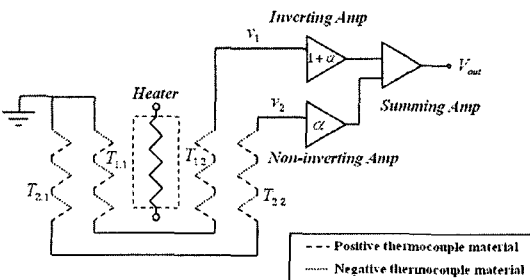


Fig. 14 Amplifying circuit of a proposed model

제안된 모델의 성능향상 여부를 알아 보기 위해 해석을 수행하였다. Fig. 15는 본 연구에서 제안된 새로운 모델을 나타낸 것으로 한 방향에 두 쌍의 온도센서를 구성하였다. 기존모델의 해석 결과에서 가속도계 내부의 높이는 주파수가 증가하면 영향력이 감소하는 것으로 나타났으므로 제안모델의 전체 높이 H 는 $1.6mm$ 로 고정하였고 실리콘 기판의 높이는 $0.4mm$ 로 고정하였다.

주 온도센서의 히터로부터의 거리를 d_1 , 보조 온도센서의 히터로부터의 거리를 d_2 라 하였으며 그 값을 변화시키면서 해석하였다. 온도센서와 히터와의 거리가 너무 멀 경우 온도센서에서 측정할 수 있는 온도 값의 변화 값은 작아지게 된다. 따라서 보조온도센서의 거리 d_2 는 $0.7mm$ 보다 작은 값으로 제한하였다. 히터에 가까울수록 내부 온도분포의 구배가 커지므로 주온도센서의 거리 d_1 은 $0.05mm$, d_2 는 $0.1mm$ 의 간격으로 변경하면서 해석하였다. 제안된 모델은 Table 3과 같이 12 가지 경우로 나누어 각각의 경우에 대해 주파수를 변경시키며 과도 열전달 현상을 해석하였다.

같은 조건에서 대역폭의 증가여부를 확인하기 위해 가속도 모사함수와 제안모델의 경계조건,

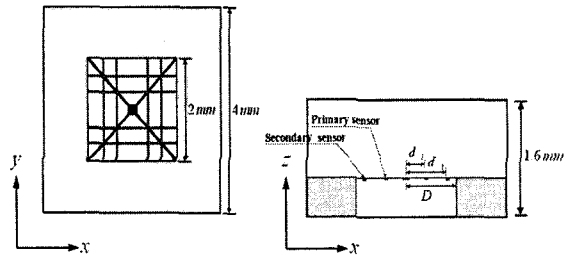


Fig. 15 Analysis modeling of a proposed model

Table 3 Analysis cases of a proposed model

Case	d_1 (mm)	d_2 (mm)	$d_2 - d_1$ (mm)
1	0.2	0.35	0.15
2		0.45	0.25
3		0.55	0.35
4		0.65	0.45
5	0.25	0.4	0.15
6		0.5	0.25
7		0.6	0.35
8	0.3	0.45	0.15
9		0.55	0.25
10		0.65	0.35
11		0.5	0.15
12	0.35	0.6	0.25

작동 유체와 물성치는 앞 절의 기존모델의 해석 경우와 동일하게 하였다.

식 (6)의 α 의 값이 커지게 되면 보상을 위한 값 $\alpha(v_1 - v_2)$ 이 주온도센서의 출력전압 v_1 보다 커지게 될 수 있다. 따라서 α 의 값은 3 이하의 범위에서 적용하였다.

4.2 해석결과

Fig. 16은 제안된 모델의 해석 결과 중 두 경우를 대시벨로 나타내었다. Fig. 16(a)의 경우 대역폭이 80~90Hz로 증가 정도가 크게 나타난 것에 비해 Fig. 16(b)는 50~60Hz로 대역폭의 증가 정도가 (a)의 경우 보다 작았다.

제안된 모델은 각각의 d_1, d_2 의 값에 따라 서로 다른 대역폭의 향상을 보이고 있다. Table 3의 12가지 해석모델의 대역폭의 크기를 주온도센서의 거리와 두 온도센서간의 거리에 따라 Fig. 17에 나타내었다. 일부 모델은 90Hz 수준까지 대역폭이 크게 향상되는 것을 알 수 있고 향상 정도가 크지 않은 모델도 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 17에서 $d_1/D \leq 0.3, (d_2 - d_1)/D = 0.15$ 인 경우 대역폭의 향상 정도가 크게 나타났으며 이외의 경우는 대역폭의 향상은 있으나 그 정도가 크지 않은 것으로 나타났다.

식 (7)에서 V_{out} 이 가속도 주파수의 변화에 상관없이 일정한 값으로 출력되기 위해선 ΔT_1 이 ΔT_2 보다 주파수의 변화에 영향을 덜 받아야 하며 주파수가 증가할 때 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값 역시 증가해야 한다. 하지만 $d_1/D > 0.3$ 인 경우 ΔT_1 의 값이 가속도 주파수의 변화에 ΔT_2 와 비슷한 영향을 받는 것으로 판단할 수 있으며 $(d_2 - d_1)/D > 0.15$ 경우 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값의 지속적인 증가가 이루어지지 않음으로써 대역폭의 증가 정도가 작게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

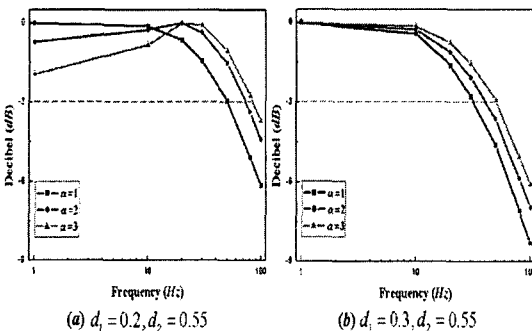


Fig. 16 Analysis results of proposed models

Fig. 18은 Table 3의 해석모델 중 대역폭의 향상이 큰 1, 2, 5, 8번 모델과 그렇지 못한 10, 12번 모델의 주파수의 증가에 따른 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값을 나타낸다. Fig. 18에서 주파수의 증가에 따라 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값이 증가하는 경향을 보이는 경우에서 대역폭의 증가가 큰 것을 확인할 수 있다. $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값이 점점 감소하는 10, 12번 해석 모델은 Fig. 17에서도 확인할 수 있듯이 대역폭의 증가가 거의 이루어지지 않는다.

$\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 값이 증가하는 경향을 보이는 경우도 주파수가 점점 높아질수록 값의 증분이 점점 줄어들게 되며 이는 높은 주파수에서 ΔT_1 의 감소 정도를 보상하지 못하게 된다. 이로 인해 제안된 모델의 대역폭은 약 90Hz까지 밖에 향상되지 못하게 되는 것을 알 수 있다.

따라서 제안된 모델에서 대역폭의 향상 효과를 최대한 얻기 위해서는 주온도센서는 보조온도센서보다 주파수의 영향을 덜 받도록 히터에 가깝게 위치시켜야 하며 보조온도센서는 주파수의 변화에 따른 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 의 증가율이 큰 위치에 구성하여야 한다.

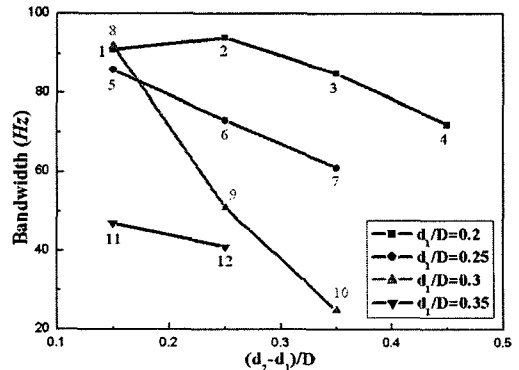


Fig. 17 Bandwidth of proposed models

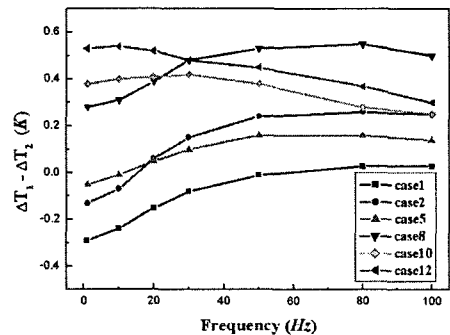


Fig. 18 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ of proposed models

5. 결론

현재 상용화된 열 대류 가속도계는 약 20Hz 수준의 대역폭 크기를 나타내고 있다. 열 대류 가속도계는 기존의 고체 질량체를 이용한 가속도계에 비해 높은 내충격량과 단순한 내부 형상 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 좁은 대역폭은 열 대류 가속도계의 적용에 제한 사항이 된다. 따라서 열 대류 가속도계의 폭 넓은 적용을 위해선 대역폭의 증가가 수반되어야 한다.

본 논문에서는 초소형 열 대류 가속도계의 모델링과 자연 대류 열전달 현상의 수치 해석을 통해 기존 열 대류 가속도계가 갖는 성능 특성을 파악하였다. 또한 이를 바탕으로 기존 열 대류 가속도계가 갖는 단점인 좁은 대역폭을 증가시킬 수 있는 새로운 모델을 제안하였다.

열 대류 가속도계의 내부에 추가적으로 온도 센서를 구성하여 대역폭 향상을 위한 출력전압 식을 정의하였으며 주 온도센서와 보조 온도센서의 위치에 따른 대역폭의 향상 정도를 수치 해석을 통해 알아보았다.

해석결과 주 온도센서와 보조 온도센서가 $d_1/D \leq 0.3$, $(d_2 - d_1)/D = 0.15$ 의 조건을 만족할 때 대역폭의 크기가 90Hz 정도로 기존의 모델에 비해 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 기존 열 대류 가속도계와 달리 추가적인 온도센서의 구성과 내부 전기 회로의 변경을 통해 열 대류 가속도계의 대역폭 증가 효과를 얻을 수 있다.

참고문헌

(1) Luo, X. B., Yang, Y. J., Zhang, F., Li, Z. X. and

- Guo, Z. Y., 2001, "An Optimized Micro-machined Convective Accelerometer with No Proof Mass," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 504~508.
- (2) Luo, X. B., Yang, Y. J., Zhang, F., Li, Z. X. and Guo, Z. Y., 2003, "Study on Linearity of a Micromachined Convective Accelerometer," *Micro electronic engineering*, Vol. 65, No.1/2, pp. 87~101.
- (3) Mailly, F., Giani, A., Martinez, A., Bonnot, R., Temple-Boyer, P. and Boyer, A., 2003, "Micro-machined Thermal Accelerometer," *Sensors and Actuators, A, Physical*. Vol. 103, No. 3, pp. 359~363.
- (4) Mailly, F., Giani, A., Martinez, A., Bonnot, R., Pascal, F. and Boyer, A., 2003, "Design of a Micromachined Thermal Accelerometer : Thermal Simulation and Experimental Results," *Micro electronics Journals*, Vol. 34, No. 4, pp. 275~280.
- (5) Leung, A., Jones, J., Czyzewska, E., Chen, J. and Pascal, M., 1998, "Micromachined Accelerometer without Proof Mass," *Technical digest*, pp. 899~902.
- (6) Leung, A., Jones, J., Czyzewska, E., Chen, J. and Woods, B., 1998, "Micromachined Accelerometer Based on Convection Heat Transfer," *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 98. Proceedings, The Eleventh Annual International Workshop on*, pp. 627~630.
- (7) Leung, A., 2001, "Accelerometer without Proof Mass," *U.S. Patent*
- (8) Dao, R., Morgan, E., Kries, H. and Bachelder, M., 1996, "Convective Accelerometer and Inclinometer," *U.S. Patent*
- (9) Bernstein, J., 2003, "An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology," *Sensors*, Vol. 20, No. 2, pp.14~21.
- (10) Zhang, F., 2004, "The Accelerometer and Tilt Sensor Based on Natural Convection Gas Pendulum," *Information Acquisition, Proceedings, International Conference on*, pp.122~125.
- (11) Memsic.Inc, 2005, "Product data sheets," <http://www.memsic.com>
- (12) FLUENT User's Guide, Version 6.1