

논문 97-6-1-02

빔 혹은 멤베레인 구조를 가지는 써모파일 센서의 다목적 최적설계

이준배*, 김태윤*

The Multi-objective Optimal Design of Thermopile Sensor Having
Beam or Membrane Structure

Jun-Bae Lee*, Tae-Yoon Kim*

요 약

이 논문은 빔의 구조를 갖거나 멤베레인의 구조를 갖는 써모파일 센서의 다목적 최적설계에 관한 연구이다. 연구대상의 써모파일 센서는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 박막위에 알루미늄과 다결정 실리콘을 사용하여 열전쌍을 형성하고, 박막중심부에 RuO_2 를 사용하여 적외선 흡수부를 만들어 중심부와 실리콘립부 사이의 온도차이에 따른 Seebeck 효과에 의한 유기전압을 감지하는 센서를 대상으로 하였다. 최적설계의 목적함수는 센서의 감도, 검출능(detectivity) 및 열시정수를 대상으로 하였다. 패키지를 고려하여 모델링을 하였으며, 기존의 식의 고찰에 의한 단순 설계방법이 아닌 수학적 계획법을 사용한 다목적 최적화 방법을 이용하여 최적해를 구하였다. 최종적인 최적설계 수식화에는 퍼지계획법에서 사용되는 소속함수를 정의하여 설계자가 우선적으로 신뢰할 수 있는 해를 구할 수 있도록 하였다. 또한, 제한조건으로서 주위 온도변화에 따른 센서의 출력전압변화를 포함시켜 실제 사용되는 환경을 고려하였다.

Abstract

This paper presents the multi-objective optimal design of thermopile sensor having beam or membrane structure. The thermopile sensor is composed of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ dielectric membrane, Al-polysilicon thermocouples and RuO_2 thin film for black body. The sensing method is based on the Seebeck effect which is originated from the temperature difference of the two positions, black body and silicon rim. The objective functions of the presented design are sensitivity, detectivity and thermal time constant. The modelling of the sensor is proposed including the package. The multi-objective optimization technique is applied to the design of the sensor not only inspecting the modelling equation but also simulating mathematical programming method. Especially, fuzzy optimization technique is adapted to get the optimal solution which enables the designer to reach the more practical solution. The design constraint of the voltage output originated from the change of the environmental temperature is included for practical use.

1. 서론

원시적인 기계적 구조를 지닌 열전쌍 센서로부터 출발하여, 지난 20년간 실리콘 써모파일 센서는 눈부신 많은 발전을 하여왔다. 실리콘을 기반으로 하는 써모파일 센서는 실리콘 웨이퍼상에 박막을 형성하고, 그

위에 에너지 흡수부인 흑체를 만들어 흑체와 실리콘립 사이의 온도차이에 의해 유기되는 전압을 감지하는 제백효과⁽¹⁾를 사용하는 센서로서 여러개의 열전쌍을 연결하여 감도를 높이도록 설계된 센서이다. 이 센서는 입력된 신호에 대응하는 제백효과에 의한 출력전압 신호를 감지하는 센서이므로, 타 센서와 비교 하였을 때

* LG전자기술원(LG Electronic Research Center)

<접수일자 : 1996년 9월 30일>

오프셋에 의한 왜곡이 거의 없으며, 다른 물리 화학적인 간섭을 잘 받지 않는 장점을 가지고 있다. 또한, 출력신호가 전압이므로 회로의 구성이 간단해지며, 센서의 감도에 있어서도 열전쌍 하나당 대략 0.5 mV/K에서 1 mV/K 정도의 감도로써 여러개의 열전쌍을 연결한 써모파일은 높은 감도를 가질 수 있다.

열전쌍을 이루는 재료로는 Bi-Sb를 사용한 고감도의 박막 써모파일이 개발되었으나, Bi-Sb 써모파일은 IC 표준공정과의 호환성이 없어서, 보통 알루미늄과 p형 실리콘을 사용하거나 알루미늄과 다결정 실리콘을 CMOS 공정기술로 만들거나, 혹은 다결정 실리콘과 금을 사용하여 왔다^[2-5].

써모파일 센서를 성공적으로 설계하기 위하여서는 열원의 도입부로부터 시작하여 박막으로의 열전달, 경계조건 및 패키지와의 열전달을 정확히 파악해야 하는데, 이는 열전달의 기본 메카니즘인 전도, 복사 및 대류를 정확히 모델링하고 전체시스템을 최적화 시킴으로써 이루어질 수 있다. 이러한 연구는 박막부분의 온도분포를 예측하여 감도를 구하고, 검출능력과 고찰을 통하여 센서를 최적설계하려는 방향으로 진행되어 왔다. 또한, FEM(Finite Element Method) 시뮬레이션을 통하여 보다 정확한 해석하려는 시도 또한 행해졌다^[6-9].

본 연구에서는 전체 센서시스템에 대하여 열전달 관계를 모델링함으로써 단순 패키지 모델에서의 대류, 전도 및 복사를 고려하고, 조직적인 수학적 계획법을 사용함으로써 실제 센서의 기하학적 수치를 설계자의 입장에서 구할 수 있는 방법을 적용시켰다. 목적함수로는 감도, 검출능 및 열시정수를 고려함으로써 설계자의 선택범위를 고려하였고, 초기단계에서 각 목적함수를 퍼지함수화 하여 실제 설계치를 제공함으로써 설계의 기본방향과 구체적인 수치를 구할 수 있도록 하였다. 또한, 실제로 센서가 사용되는 환경을 고려하여 주위 온도변화에 따른 출력전압의 변화를 제한조건으로 고려하였다.

II. 센서의 구조 및 모델링

그림 1에 써모파일 센서의 전체 시스템에 대한 개략도를 나타내었다. 센서의 주요부는 흑체, 써모파일 및 실리콘 림부로 이루어진 센서의 본체부, 패키지부 및 적외선 필터부로 이루어져 있다. 여기서 T_e 는 외부

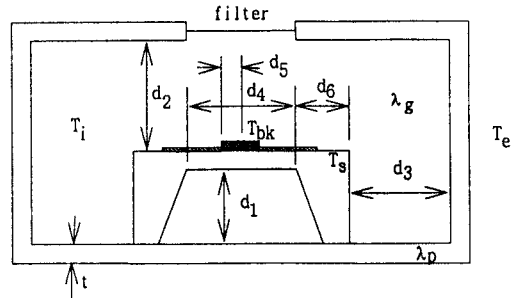
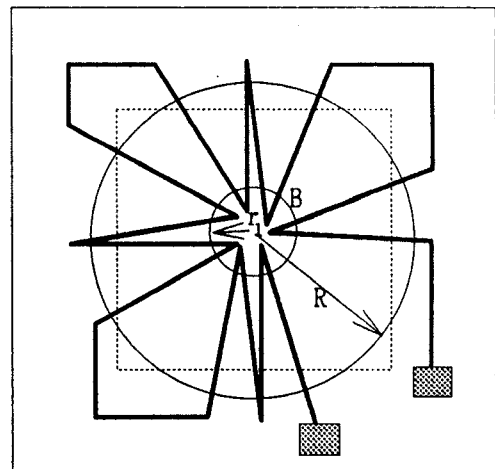


그림 1. 써모파일 센서의 구조도.

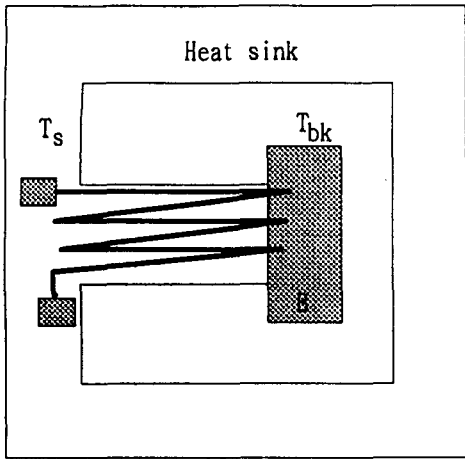
Fig. 1. Schematic diagram of thermopile sensor.

공기의 온도이고 T_i 는 내부온도, T_{bk} 는 흑체의 온도, T_s 는 실리콘 림부의 온도를 각각 나타낸다. 또한, d 및 t 는 각 부분의 주요 치수를 각각 나타내며, λ_g 와 λ_p 는 각각 공기 및 패키지부의 열전도도를 나타낸다.

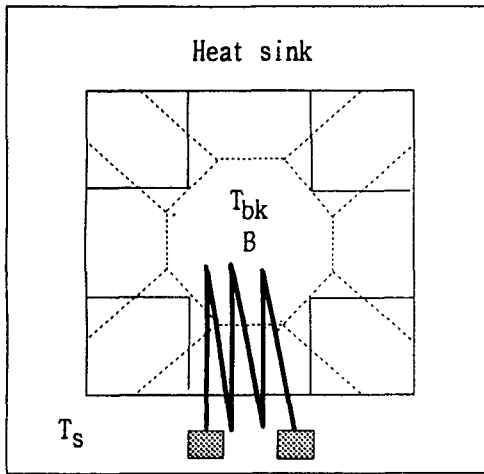
박막, 흑체 및 열전쌍의 집합으로 이루어지는 써모파일 센서의 핵심부분을 자세히 살펴보면, 그 대표적인 모양은 그림 2에 도시한 바와 같이 빔 구조와 전체 또는 일부의 멤베레인 구조를 가지는 센서로 구분할 수 있다. 그림 2(a)는 전체가 멤베레인 구조로 이루어져 있으며 원이나 사각형의 모양을 이루고 중앙부에 열의 흡수부인 흑체부분을 가지고 있다. 그림 2(b)는 단일 빔모양의 구조로 그 끝부분에 흑체부분이 놓여있다. 그림 2(c)는 여러개의 빔을 가지는 구조로 그림의 점



(a)



(b)



(c)

그림 2 써모파일 센서의 감지부에 대한 여러가지 구조: (a) 전체가 박막인 구조, (b) 빔 구조 및 (c) 여러개의 빔을 갖는 구조.

Fig. 2 Structures of sensing area of thermopile sensor:

(a) Membrane structure, (b) One beam structure, and (c) Four beams structure.

선부분과 같이 여러배치를 이루고 있다. 빔의 모양과 위치는 다양할 수 있으며 효과적인 열차단을 위하여 빔을 길게 늘이는 여러 가지 구조가 제안되어 있다^[3]. 실제로는 빔을 갖는 구조라 할지라도 열차단을 위하여 길이/두께의 비율이 매우 큰 멤베레인에 가까운 구조

를 사용하므로 멤베레인이나 빔을 열차단 박막으로 보고 기술한다.

이러한 여러가지 구조는 흑체로부터 실리콘립부의 열방출부까지의 온도분포에 의하여 출력감도가 결정되므로, 이 부분의 온도분포를 구하는 것이 모델링의 중요한 단계이다. 박막으로 부터의 열전달은 복사, 대류 및 전도의 방법에 의하여 일어나는데, 그림 3은 이러한 여러가지 열전달 과정을 도식화한 것이다.

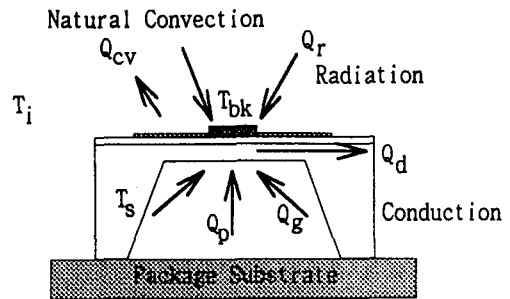


그림 3. 써모파일 센서에서의 열전달 과정.

Fig. 3. Heat transfer processes of thermopile sensor.

여기서, 먼저 흑체와 주위로 부터의 복사를 살펴보면 단위면적당 순수 복사열 전달량 Q_r 은 다음의 식(1)과 같고,

$$Q_r = \epsilon \sigma (T_i^4 - T_{bk}^4) \quad (1)$$

여기서 ϵ , T_i , T_{bk} 및 σ 는 각각 물체표면의 복사율, 외부온도, 흑체온도 및 Stefan-Boltzmann 상수이다. 또한, 전도에 의한 흑체부분으로부터 박막을 통한 실리콘립부로의 열전달량 Q_d 는 다음의 식(2)로 표시되며,

$$Q_d = 2 \lambda_m t_m w_m (T_{bk} - T_s) / d_A \quad (2)$$

여기서 λ_m , t_m , w_m 및 T_s 는 각각 박막의 열전도도, 두께, 세로의 길이 및 실리콘 림부분의 온도를 표시한다. 이것은 여러개의 빔을 가지는 경우는 한개의 빔에 대한 열전달량을 표시한다. 박막의 두께는 일반적으로 여러개의 층이 존재하여 균일하지 않으므로, 열전대가 지나가는 부분과 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 박막만이 존재

하는 부분을 동시에 고려하면 박막의 보다 실제에 가까운 열전도도 λ_m 은 다음의 식(3)으로 구해지며,

$$\lambda_m = \frac{\sum_i \lambda_i t_i}{\sum_i t_i} \quad (3)$$

여기서 두께 또한 평균값이다. 패키지에 연결된 실리콘 림부 및 흑체부 사이의 열전도량 Q_g 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_g = \lambda_g d_5 (d_4/2 + t_w \cot \phi) (T_s - T_{bk}) / t_w \quad (4)$$

여기서 d_5 는 흑체부의 가로의 길이이고 t_w 는 웨이퍼의 두께이며, ϕ 는 54.74°로써 (100) 실리콘 웨이퍼를 이방성 식각했을 경우의 웨이퍼면과 식각면이 이루는 각도이다. 또한, 흑체부와 패키지부 사이의 열전도량 Q_p 는 식(5)와 같이 표시된다.

$$Q_p = \lambda_g B \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) (T_i - T_{bk}) \quad (5)$$

여기서 B 는 흑체부의 면적을 나타낸다. 마지막으로 자유대류에 의한 열전달량 Q_{cv} 를 보면 식(6)으로 표시되며,

$$Q_{cv} = h (T_{bk} - T_i) \quad (6)$$

여기서 h 는 평균 대류열전달 계수이다.

이제 흑체부분의 열평형 상태를 고려하여 보면, 흑체로 유입되는 열량 Q_{ip} 는 식(7)로 주어지며,

$$Q_{ip} = Q_d + Q_{loss} \quad (7)$$

여기서 Q_d 는 박막을 통해 전달되는 열량이고 Q_{loss} 는 박막이외의 부분으로 손실된 열량이다. 이 손실되는 열량은 $Q_r + Q_p + Q_g - Q_{cv}$ 와 같으며, 앞에서 정의된 식(1)에서부터 식(6)까지에 의해 구해진다. 박막과 빔부분의 온도분포 $\Delta T(x) = T(x) - T_s$ 는 $x=0$ 인 위치를 실리콘 림부분으로 하고 $x = -\frac{d_4}{2}$ 인 위치를 흑체

부분으로 하면, 다음과 같은 식(8)을 풀어 해를 구할 수 있다. 즉, 빔의 경우에 대하여는

$$\lambda_m t_m \frac{d^2 \Delta T(x)}{dx^2} - \gamma \Delta T(x) = 0 \quad (8)$$

로 표시된다. γ 는 각 열전달 현상에 대한 복합적인 열전달 계수로서 다음과 같이 정의할 수 있다. 만약 복사에 의한 열전달의 경우에 $(T_{bk} - T_i) \ll T_i$ 로 가정하여 식(1)을 선형화 시키고, 패키지로부터의 세로방향의 열전달량을 무시하고 흑체로의 윗부분과 아래부분을 향한 쪽으로의 열전달량만을 고려한다면, 복합 열전달계수 γ 는 다음의 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\gamma = 8\epsilon\sigma T_s^3 + \lambda_g d_5 \left(\frac{d_4}{2} + t_w \cot \phi \right) / (t_w B) + h + \lambda_g \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (9)$$

일반적으로 빔구조의 경우라도 실제로는 길이에 대한 두께의 비율이 매우 작으므로 박막에 가까운 구조를 이룬다. 따라서, 식(8)은 일부분이 박막구조인 경우로 보아도 무방하다. 전체가 박막구조인 경우에는 그 모양을 원형으로 가정하고 극좌표계를 사용하여 $r=0$ 인 위치를 실리콘 림부분으로 하고 $r = \frac{d_4}{2}$ 인 위치를 흑체부분으로 하면, 다음과 같은 식(10)을 풀어 해를 구할 수 있다. 즉, 박막의 경우에는 아래의 식(10)으로 표시된다.

$$\lambda_m t_m \left[\frac{d^2 \Delta T(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Delta T(r)}{dr} \right] - \gamma \Delta T(r) = 0 \quad (10)$$

박막의 구조가 사각형인 경우는 식(10)을 사용하는 경우 근사해를 구하게 된다. 경계조건은 빔의 경우는 식(11) 및 식(12)와 같고,

$$\Delta T(x=0) = 0 \quad (11)$$

$$\lambda_m t_m w_m \frac{d\Delta T(x)}{dx} \Big|_{x = -\frac{d_4}{2}} = Q_{tr} \quad (12)$$

박막의 경우는 다음의 식(13) 및 식(14)로 표시된다.

$$\Delta T(r=r_1)=0 \quad (13)$$

$$\lambda_m t_m 2\pi R \frac{d\Delta T(r)}{dr} \Big|_{r=R} = Q_{tr} \quad (14)$$

식(8) 및 식(10)의 해는 다음의 식(15) 및 식(16)과 같이 각각 주어진다.

$$\Delta T(x) = \frac{\sinh(\delta x)}{\lambda_m t_m w_m \cosh(\delta d_4/2)} Q_{tr} \quad (15)$$

$$\Delta T(r) = \frac{I_0(\delta R) K_0(\delta r) - I_0(\delta r) K_0(\delta R)}{\lambda_m t_m 2\pi r_1 \delta [I_1(\delta r_1) K_0(\delta R) + I_0(\delta R) K_1(\delta r_1)]} Q_{tr} \quad (16)$$

여기서 I_0, I_1, K_0 및 K_1 은 각각 잘 알려진 베셀(Bessel)함수이며, δ 는 $\sqrt{\frac{\gamma}{\lambda_m t_m}}$ 를 의미한다. 따라서, 식(15) 및 식(16)으로부터 박막과 빔부분의 온도분포를 알 수 있으며, 이들 온도분포로부터 감도를 계산할 수 있다. 감도는 주어진 흑체로의 열전달량에 대한 출력전압으로 정의한다. 즉, 다음의 식(17)과 같이 표시되며,

$$S = n\alpha(T_{bk} - T_s) / Q_{ip} = n\alpha R_T(\delta d_4/2) \quad (17)$$

여기서 n 은 열전쌍의 개수, α 는 제백계수이다.

III. 최적설계의 수식화

제2장에 모델링한 전체 시스템은 설계자가 선택한 적절한 설계목적과 주어진 제한조건에 따라 최적설계를 위한 수식화를 할 수 있다. 먼저 식(17)에 표현된 센서의 감도, 잡음을 고려한 검출능 및 열시정수를 목적함수로 정의한다. 일반적으로 감도 및 검출능은 클수록 좋으며, 열시정수는 작을수록 좋다. 검출능은 흑체부분의 면적과 밀접한 관계가 있으며, 전단증폭기에 의한 잡음 등이 있을 수 있으나, 여기서 주요한 잡음의 원인인 열에 의한 존슨잡음(Johnson noise)만을 고려한다면 검출능 D^* 을 다음의 식(18)과 같이 쓸 수 있다.^[7,10]

$$D^* = \frac{S\sqrt{BW}}{\sqrt{4kTR_e}} = \frac{n\alpha\sqrt{BR_T}(\delta d_4/2)}{\sqrt{4kTn(\rho_1/A_1 + \rho_2/A_2)d_4/2}} \quad (18)$$

여기서 R_e 는 전기저항이며 k 는 볼츠만 상수이고, ρ, A 및 W 는 알루미늄과 다결정 실리콘에 대한 비저항, 단면적 및 대역폭을 각각 나타낸다. 높은 검출능을 얻으려면 열전쌍을 구성하는 물질의 열적 전기적 성질이 작은 저항을 가지면서 높은 제백계수를 가져야 하는데, 일반적으로는 높은 제백계수를 가지는 물질은 낮은 전기전도도를 가지므로 최적의 열전쌍을 구성하는 물질을 선택하기 위해서는 성능지수(figure of merit)를 고려하여 두 물질을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 열전쌍을 구성하는 물질에 대한 선택은 이미 결정되어 있는 것으로 생각하였고, 기하학적인 구조의 설계에 초점을 맞추기로 하였다.

마지막 목적함수로서 열시정수는 다음과 같이 식(19)로 정의된다.

$$\tau = R_T(\delta d_4/2) C_T \quad (19)$$

여기서 C_T 는 센서의 전체 열용량을 의미한다. 센서의 응답시간을 줄이기 위해서는 실리콘립부의 열용량을 줄이고 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 박막부는 작은 열저항값을 가지도록 하여야 하지만 이는 감도를 감소시키므로, 적절히 박막의 두께를 얇게 하여 저항값을 조절하고 실리콘립부의 두께와 폭을 조정하여 전체 열용량을 줄이는 것이 바람직하다. 센서의 전체 열용량은 실리콘립부의 기하학적인 치수와 박막의 성질 및 열전쌍을 연결하는 리드와 관계가 깊다.

다목적 최적설계 기법^[11]은 여러개의 목적함수를 동시에 최적화 시키는 기법으로서, 일반적으로 모든 목적함수를 모두 최적화 시키는 해는 존재하지 않으므로 어느 한쪽을 어느정도 양보하여 구한 해, 즉 파레토 최적해를 구하게 된다. 다목적 최적화 문제는 다음 식(20)과 같이 정의된다.

$$\max f(X) = \{ f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X) \} \quad (20)$$

여기서 X 는 설계변수이며, Ω 는 설계변수 X 와 제한조건 $g(X)$ 및 $h(X)$ 에 대한 가용 설계영역

$\{X \in R^n \mid g(X) \leq 0, h(X) = 0\}$ 의 집합이고, $f(X)$ 는 각각의 단일 목적함수들로 이루어진 벡터함수이다. 일반적으로 각각의 목적함수들은 서로 동일한 단위를 가지고 있지 않다.

본 연구에서는 세 개의 목적함수가 고려되며, 이들은 감도, 검출능 및 열시정수의 역수로 이루어진다. 각 목적함수들의 단위가 다른 것을 고려하여 다음 식(21)과 같은 정규화 형태를 사용한다.

$$f_{n_i}(X) = \frac{f_i(X) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (21)$$

여기서 f_i^{\min} 및 f_i^{\max} 는 $f_i(X)$ 가 취할 수 있는 하한값 및 상한값을 각각 나타내며, 이들 값은 설계자의 주관에 의해 변경이 가능하나 일반적으로 각각의 목적함수를 최대화한 경우의 값을 사용한다.

퍼지 최적설계이론^[12,13]은 대부분의 공학설계 문제에서 부딪히게 되는 시스템의 내적인 불확실성을 처리할 수 있도록 도입된 이론으로서 실제 설계문제에 매우 유용하게 사용되고 있다. 본 연구에서도 각 설계변수의 한계치에 대한 불확실성과 제한조건들에 대한 응용성을 주기 위하여 퍼지 최적설계기법을 이용한다. 이것은 또한 설계자가 시스템에 대해 정확한 파악을 하지 못하였을 경우에도 매우 합리적인 해를 제공하여 줌으로 초기 설계에 매우 유용한 설계기법이다.

우선 퍼지이론에서 사용되는 소속함수(membership function), $\mu_A(X)$ 는 전체집합 Ω 에 있는 객체 X 가 집합 A 에 속해 있는가 그렇지 않은가를 나타내는 척

도로써 구간 $[0,1]$ 사이의 값을 가진다. 여기서는 식(21)에 사용된 정규화식을 소속함수로 사용한다. 즉, 목적함수에 대한 소속함수를 원하는 설계치에 도달하였는가 그렇지 않은가를 나타내는 척도라고하면, 식(21)은 가장 좋은 설계치 f_i^{\max} 를 얻었을 경우에 1의 값을 가지고, 가장 나쁜 설계치 f_i^{\min} 를 가졌을 경우에 0의 값을 가지는 함수이므로 소속함수로서 사용될 수 있다. 이를 그림으로 표시하면 그림 4와 같다.

설계변수는 써모파일 센서의 주요 각 부분의 치수이며 구체적으로 표시하면 다음 식(22)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$X = \{t_m, w_m, t_w, d_1, d_2, d_4, d_5, d_6, B\} \\ = \{X_1, X_2, \dots, X_9\} \quad (22)$$

여기서는 전부 9개의 설계변수를 설정한다. 각 설계변수는 상한값 및 하한값 X_i^{\max} 및 X_i^{\min} 를 가지며, 이들의 한계값에 대한 제한조건의 소속함수는 다음 식(23)과 같이 정의 된다.

$$\mu_{g_i}(X) \\ = 1 - \frac{|g_i(X)| - b_i}{p_i} \quad (b_i \leq |g_i(X)| \leq b_i + p_i) \quad (23)$$

여기서 b_i 는 각 제한조건에 대한 한계값이며, p_i 는 적절히 선정된 한계값의 가능변화 영역이다. 제한조건에 대한 소속함수는 그림 5에 도시되어 있다.

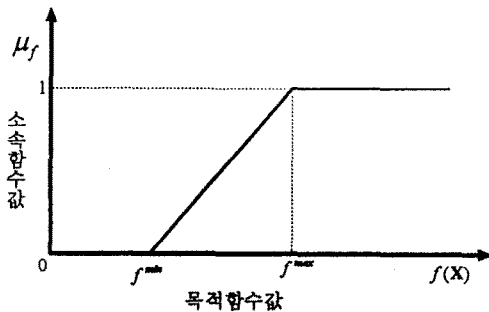


그림 4. 목적함수에 대한 선형 소속함수.
Fig. 4. Linear membership function of objective function.

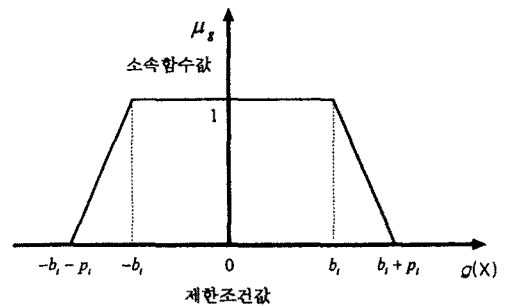


그림 5. 제한조건에 따른 선형 소속함수.
Fig. 5. Linear membership function of constraint function.

기타 기하학적인 제한조건과 웨이퍼와 패키지 및 본딩을 고려한 기하학적 제한조건, 그리고 외부의 온도변화에 따른 패키지로의 열전달량 $\Delta Q_{out} = A_p \lambda_p (T_e - T_i) / t_e$ 에 대하여 대류와 전도에 의한 내부의 열전달량의 변화에 대한 제한조건은 다음 식(24)와 같다.

$$\begin{aligned} 2d_5 &< d_4 \\ w_m &< d_4 \\ t_w &\leq d_1 + t_m \\ \frac{\Delta Q_{cv} + \Delta Q_p}{\Delta Q_{out}} &< b_{k+1} \\ X_i^{lower} &\leq X_i \leq X_i^{upper}, i=1, \dots, 9 \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 A_p 및 λ_p 는 패키지부의 단면적과 열전도도를 각각 나타내며, X_i^{upper} 및 X_i^{lower} 는 설계변수의 상한값과 하한값을 각각 나타낸다. 외부 온도변화에 대한 출력전압의 변화는 실제로 센서가 사용될 때 잘못된 신호를 발생시킬 수 있는 원인을 제공하므로, 이를 줄이기 위하여 온도변화를 $\pm 10 K$ 기준으로 하였을 때 센서의 출력전압변화를 0.3 mV/W로 설정하였다. 이러한 제한조건들에 의하여 정의되는 소속함수들과 목적함수들에 의해 정의된 소속함수를 사용하여 퍼지 가용영역을 구하고, 이들로 부터 퍼지 최적해 X^* 를 얻을 수 있다. 즉, 퍼지 최적화문제는 다음 식(25)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned} \mu_D(X^*) \\ = \max \mu_D(X) \\ = \min \{ \mu_{f_1}, \mu_{f_2}, \mu_{f_3}, \mu_{g_1}, \dots, \mu_{g_9} \} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 퍼지 설계영역 D 는 다음 식(26)과 같다.

$$D = \{ \bigcap_{i=1}^3 \mu_{f_i}(X) \} \cap \{ \bigcap_{j=1}^k \mu_{g_j}(X) \} \quad (26)$$

식(25)에 의하여 정의되는 센서의 최적화문제는 일종의 최대최소(max-min)문제로 수학적 계획법인 비선형 계획법(nonlinear programming)을 이용하여 해를 구할 수 있다. 여러개의 파레토 최적해를 구하는 방법으로 가장 유용한 방법은 목적함수간에 가중치를 곱하여 가중치의 변화에 따른 해를 파레토 최적해를 구하는 방법이다. 즉, 각 목적함수에 대한 소속함수에 대

여 가중치를 적용시켜 다양한 w_i, μ_{f_i} 값을 설정함으로써 여러 가지 해를 구할 수 있다. 여기서 w_i 는 가중치로서 $\sum w_i = 1$ 을 만족한다. 가중치를 사용하지 않았을 경우에는 각 목적함수의 단위를 고려하지 않았으므로 임의의 한가지 해를 구하게 된다.

IV. 결과 및 고찰

설계대상인 씨모파일 센서로는 알루미늄과 다결정 실리콘으로 열전쌍배열이 구성되어 있고, 열차단막은 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 로 이루어진 것으로 하였다. 열전쌍의 개수는 20 개이며, 그 선폭은 $16 \mu\text{m}$ 이고, 다결정 실리콘과 알루미늄의 두께는 각각 800 nm와 500 nm로 증착된 것을 기준으로 한다. 열전쌍의 제백계수는 $130 \mu\text{V/K}$ 로 하였다. 센서의 구조는 초기에 전체가 박막으로 구성되어 있는 것을 대상으로 하였으나, 전체박막의 1/4에 대하여만 고려하였으므로 치수의 변화에 따라 빔의 구조를 가질 수도 있게 하였다. 각 제한조건의 변화가 능영역은 설정된 값의 5%로 정한다. 패키지 가스는 건조된 공기로 가정하였으며, 외부온도는 300 K로 설정하였고 박막의 평균 복사율은 0.3으로 가정하였다. 표 1에 각 설계변수에 대한 상한값과 하한값 그리고 최적설계에 사용된 초기 설계값을 나타내었다.

표 2에는 실제로 설계된 수치결과의 몇개의 대표값을 나타내었으며, 그림 6 및 그림 7에 감도-열시정수 특성 및 검출능-열시정수 특성을 각각 나타내었다.

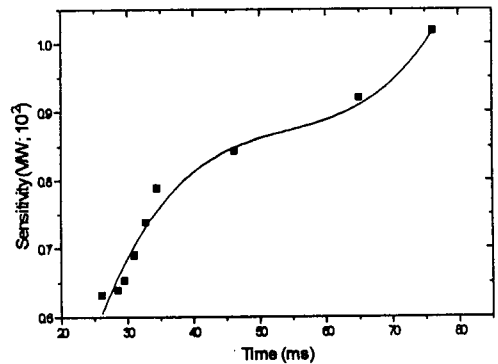


그림 6. 감도-열시정수간의 최적설계 곡선.
Fig. 6. Optimal design curve of sensitivity-thermal time constant relation.

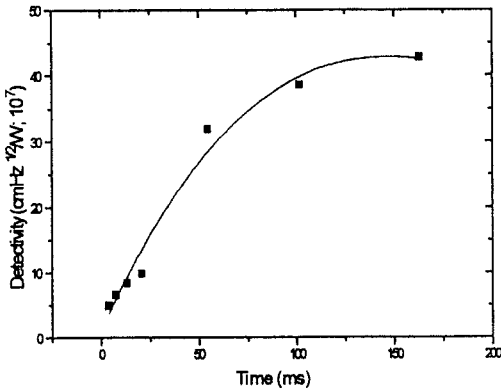


그림 7. 검출능-열시정수간의 최적설계 곡선.
Fig. 7. Optimal design curve of detectivity-thermal time constant relation.

그림 6 및 그림 7이 보여주는 바와 같이 열시정수를 줄이기 위해서는 검출능 및 센서감도의 감소를 감수해야 하므로, 설계자는 이들 값으로부터 우선 중요시되는 목적함수를 설정하여 설계하여야 한다. 감도와 검출능 사이에서는 서로 민감한 변화관계가 없다. 실제의 설계치 선정에 있어서는 가중치 변화에 따른 목적함수간의 변화를 고찰한 후에 한 개의 목적함수, 예

를 들면 열시정수를 다시 제한조건으로 설정하여 두 개의 목적함수, 감도와 검출능에 대하여 최적설계를 수행하는 것이 편리한 것으로 보인다. 물론, 세 개의 목적함수에 대하여 전체적인 가중치의 변화에 의한 최적치 변화를 구해감으로써 설계치를 선택해도 된다. 그러나 가중치는 정확히 목적함수값의 변화와 일치하지는 않으므로 여러 가지로 변화시켜보아야 한다. 표 2에는 여러 가지의 가중치 변화에 따른 설계해들 중에서 일부를 나타낸 것이며, 이들중 마지막 값은 최종적으로 선정된 설계치를 보여준다. 참고문헌 [2]에 나와 있는 실제 제작된 센서의 감도, 검출능 및 열시정수값을 살펴보면 $S=180 \text{ V/W}$, $D^*=5.5 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ 및 $t=19 \text{ msec}$ 로써 최종설계치에 비하여 시정수는 약간 크지만 감도는 매우 좋은 것으로 나와있다. 참고문헌 [14]의 결과를 보면 $S=72 \text{ V/W}$, $D^*=0.24 \times 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ 및 $t=10\text{-}20 \text{ msec}$ 로써 설계치에 비해 열시정수는 비슷하지만 검출능은 떨어지고 상대적으로 감도는 약간 좋은 것으로 보인다. 따라서, 표 2에 제시된 설계치는 일관된 결과를 보여 주고 있으며, 결국 최종적인 선택은 설계자의 판단에 따라 결정됨을 알 수 있다. 센서 제작후의 열시정수 및 감도의 변경은 센서의 외부 설계변수인 d_1 및 d_2 에 의하여 어느정도 조

표 1. 각 설계변수의 상한값, 하한값 및 초기값.
Table 1. Upper, lower and initial values of design parameters.

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| X^{upper} | 200 | 1000 | 1000 | 300 | 200 | 0.5 | 100 | 200 | $6e^4$ |
| X^{lower} | 700 | 10000 | 10000 | 4000 | 10000 | 4.0 | 10000 | 700 | $8e^7$ |
| $X^{initial}$ | 600 | 5000 | 3500 | 1000 | 2000 | 2.0 | 2000 | 600 | $8e^6$ |

(단위: μm)

표 2. 최적설계된 수치예.
Table 2. Numerical examples of optimal solutions.

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | S | D^* | t |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 700.0 | 10000 | 10000 | 300 | 2000 | 0.5 | 100 | 700.5 | 0.06 | 266.4 | 58.5 | 2410 |
| 700.0 | 5128.5 | 2203.5 | 949.5 | 2000 | 0.5 | 100 | 700.5 | 0.19 | 85.6 | 185.8 | 772.6 |
| 200.0 | 4990.3 | 3355.5 | 1667.8 | 1620.9 | 2.6 | 2000 | 202.6 | 6.67 | 0.096 | 4.79 | 3.98 |
| 274.5 | 5000.0 | 3286.6 | 1606.9 | 1739.5 | 0.5 | 1907.0 | 275.0 | 6.13 | 111.0 | 28.2 | 65.0 |
| 200.0 | 4992.0 | 3354.0 | 1632.9 | 1654.6 | 2.5 | 1974.5 | 202.5 | 6.45 | 37.62 | 8.84 | 15.7 |

(단위: $X_i, \mu\text{m}$; S, V/W; D^* ; $10^8 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$; t, msec)

정이 가능하므로, 이미 제작이 완료된 센서라도 패키지의 변경에 의하여 감도 및 열시정수의 조정이 가능하다. 또한, 제작공정상의 난점으로 설계된 수치의 열차단용 멤베레인두께를 정확히 만들기 어려운 경우에는 멤베레인의 면적의 변경을 통해 충분히 원하는 설계치를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 패키지 가스를 공기로 설정하였으나, 불활성 가스 또는 진공 등 사용 가스를 변수로 설정함으로써 최적의 패키지 환경을 선택할 수도 있을 것으로 보인다.

V. 결론

실리콘 써모파일 센서의 최적설계를 하였다. 센서의 모델링은 열전달의 거의 모든 항을 고려하였으며, 열전쌍을 구성하는 물질은 미리 정해진 것으로 보고 기하학적 치수의 최적화를 수행하였다. 최적화 기법은 다목적 함수를 최적화하는 방법을 사용하였는데, 특히 설계자의 전체 시스템 설정에 매우 유용한 방법인 퍼지 설계방법을 적용시켰다. 이는 기존의 모델링된 여러 가지 식으로 부터 직관적으로나 또는 여러 가지 그래프를 그려 적당히 설계치를 정하는 방법이 아닌 수학적 계획법에 의한 주어진 제한조건하에서 가장 좋은 설계치를 직접 수치로 정해주는 실용적인 방법이다. 실제로 수행된 설계결과를 보면 본 연구에서 설정한 목적함수인 감도, 검출능 및 열시정수에 대하여 여러문헌에 나타난 수치와 비교하였을 때 합리적인 결과를 주고있음을 알 수 있으며, 설계자의 선택에 따라 여러 가지 해들중에서 최적의 해를 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 제한조건 설정시 여러가지 제작상황에 따른 제한조건들을 첨가함으로써 실제 설계에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

FEM 등을 사용하여 보다 정확한 모델링을 통한 전체시스템의 상세해석과 기타의 전기적 잡음 및 물질선택에 따른 제한조건 등을 모두 고려하여 최적설계를 수행한다면 써모파일 센서 설계자는 다수의 실험을 통하지 않고도 보다 정확한 센서의 성능을 예측할 수 있고, 이로부터 보다 빠르고 정확한 센서설계가 이루어질 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] A .W. van Herwaarden and P. M. Sarro,

"Thermal sensors based on the Seebeck effect," *Sensors and Actuators A*, vol. 10, pp. 321-346, 1986.

[2] F. Völklein, A. Wiegand and V. Baier, "High sensitivity radiation thermopiles made of Bi-Sb-Te films," *Sensors and Actuators A*, vol. 29, pp. 87-91, 1991.

[3] A. W. van Herwaarden, D. C. van Duyn, B. W. van Oudheusden and P. M. Sarro, "Integrated thermopile sensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 21-23, pp. 621-630, 1989.

[4] K. Kuhl and W. Lang, "A thin film polysilicon-aluminum thermocouple," *Sensors and Materials*, vol. 2, pp. 247-251, 1991.

[5] G. R. Lahiji and K. D. Wise, "A batch-fabricated silicon thermopile infrared detector," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 14-22, 1982.

[6] T. Elbel, "Miniaturized thermoelectric radiation sensors," *Sensors and Materials*, vol. 3, pp. 97-109, 1991.

[7] T. Elbel, R. Leggenhager and H. Baltes, "Model of thermoelectric radiation sensors made by CMOS and micromachining," *Sensors and Actuators A*, vol. 35, pp. 101-106, 1992.

[8] F. Völklein and H. Baltes, "Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors," *Sensors and Actuators A*, vol. 36, pp. 65-71, 1993.

[9] U. Dillner, "Thermal modeling of multilayer membranes for sensor applications," *Sensors and Actuators A*, vol. 41-42, pp. 260-267, 1994.

[10] U. Birkholz, R. Fettig and J. Rosenzweig, "Fast semiconductor thermoelectric devices," *Sensors and Actuators A*, vol. 12, pp. 179-184, 1987.

[11] W. Stadler, "Multicriteria optimization in mechanics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 37, pp. 271-286, 1984.

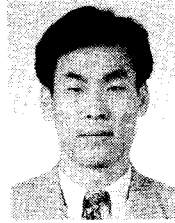
- [12] H. J. Zimmermann, "Fuzzy mathematical programming," *Comp. & Oper. Res.*, vol. 13, pp. 291-298, 1983.
- [13] A. K. Dhingra, S. S. Rao and V. Kumar, "Nonlinear membership functions in multiobjective fuzzy optimization of mechanical and structural systems," *AIAA*, vol. 30, pp. 251-260, 1992.
- [14] R. Lenggenhager, H. Baltes and T. Elbel, "Thermoelectric infrared sensors in CMOS technology," *Sensors and Actuators A*, vol. 37-38, pp. 216-220, 1993.

 著 者 紹 介



이준배

1966년 10월 13일생. 1989년 서울대 공과대학 조선공학과 졸업(학사). 1991년 KAIST 기계공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1996년~ 현재 LG전자기술원 선임연구원. 주관심분야 : 반도체 가속도계, 써모파일 센서, MEMS



김태윤

1960년 생. 1984년 한양대 무기재료공학과 졸업(학사). 1993년 고려대 전자공학과 졸업(석사). 1987년~ 현재 LG전자기술원 MA그룹 선임연구원. 주관심분야 : 실리콘 센서, 마이크로 시스템