

接着型 薄膜 測溫 게이지式 熱流 센서의 開發에 關한 研究

한 용 교 / 박 두 원, 최 규 철* / 노 병 욱 / 이 명 호
한양대학교 정밀기계공학과/한양대학교 대학원 정밀기계공학과
/현대전자 산업과학연구소/서울 산업대학 기계설계학과

ABSTRACT

In this study on the development of the heat flux sensor, unlike common heat flux sensor with thermocouple, the heat-treated adhesive type film nickel gauge(Ni-Gauge) for measuring temperature was used, and this Ni-gauge is not only comparable for platinum gauge(Pt-Gauge) in linearity, but also economically cheap.

And from this viewpoint, numerical analysis is essential to investigate characteristics of sensor, since this analysis is capable of simulating precise boundary conditions and practical conditions and so on.

By the way, there are many types of heat flux sensor, of which adhesive type flux sensor is most common, in the study this type of heat flux sensor was chosen, and analysis of the sensor is considered as a kind of open cavity figure, performed by SIMPLER algorithm.

As a result, through temperature distribution of the sensor by numerical analysis in steady and unsteady state, the characteristics of the adhesive type heat flux sensor(1st heat flux sensor) according to heat flux, that is, outvoltage, sensitivity, and responsibility could be evaluated, in addition, those of improved heat flux sensor(2nd heat flux sensor) could be predicted from the reflection of proper operating temperature(150 °C) of the Ni-Gauge.

I. 서 론

最近, 熱의 問題는 에너지面에서 嚴格하게 檢討할 必要가 커져서, 當연한 結果로서 熱의 移動量 즉 "熱流值"를 正確히 把握할 필요가 생겼다. 종래에 이들의 熱流值는 각각 溫度 計測值를 기본으로 熱傳導 方程式으로 계산되었다.¹⁾²⁾

그런데, 方程式을 사용해서 熱流의 크기를 구하는 方法은, 상당히 큰 評價誤差를 가져올 우려가 있으므로, 이러한 誤差가 수십% 정도로 수습되는 예는 오히려 좋은 편이며, 評價誤差를 10% 이내로 수습하는 것이 비교적 용이한 수가 많아서 熱流의 直接 測定에 意義³⁾가 있는 것이다.

그런데, 종래의 表面溫度를 알기 위한 測溫게이지로서는 白金 센서가 가장 精密 正確度 좋은 게이지도 알려져 있으나, 경제적 側面에서 일부분에서만 實用化가 이루어져 있는 실정이고, 따라서 表面溫度의 測定이 더욱 要求되는 熱流센서에서는 抵抗變化式 熱流센서보다는 열전쌍을 이용한 熱流센서가 대부분을 차지하고 있다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

이에 대해, 本 研究에서는 熱流센서의 주류를 이루는 기존의 열전쌍을 이용한 熱流센서(슈미트형 熱流센서나 보일델의 熱流센서 등)와는 달리, 本 研究室에서 研究된 바 있는, 白金센서에 상응하는 精密 正確度的 直線性을 가지면서도 經濟的으로도 저렴한 熱流值를 接着型 薄膜 測溫 게이지式⁵⁾⁷⁾⁸⁾를 이용한 接着型 薄膜 測溫 게이지式 熱流센서의 開發에 따른 特性에 關한 精確한 境界條件 등의 完確한 情報나 실제적인 條件등의 모사가 가능한 數值의 方法을 통하여 평가하여 보았다.

熱流센서에는 여러 형태의 熱流센서가 있으며, 그 가운데 가장 일반적인 表面 附着型 熱流센서의 형태를 고려하였으며, 이것은 바깥쪽의 放熱面이 공기중에 노출되어 있는 상태이므로 일종의 오픈 케비티¹¹⁾¹³⁾의 형상이되며, 바깥면은 自然對流에 의해 熱傳導이 이루어진다. 이러한 경우에는 심플러 알고리즘¹²⁾이 적용될 수 있다.

또한 위의 수치적 해석의 결과로부터 얻은 온도의 定常的, 非定常的 溫度分布는 바로 熱流센서의 特性에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 이로부터 熱流센서에 대한 特性을 豫測 評價할 수 있었다.

II. 理 論

2.1 熱流센서의 測定原理

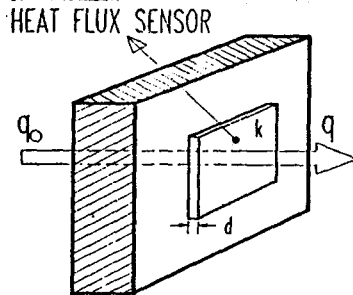


Fig. 1 Measurement Principle of Heat Flux Sensor

Fig. 1과 같이 熱傳達이 되고 있는 固體表面에, 熱傳導率이 k ($W/(m \cdot ^\circ C)$)이고 두께 $d(m)$ 가 충분히 작은 薄板을 부착했다고 하면, 薄板의 두께가 충분히 작을 경우 그 放熱面에서의 放散 熱流 密度도 $q \approx q_a$ 로 되어서 그 값이 구해진다. 以上이 현재 가장 많이 사용되는 薄板型 熱流센서의 原理이다.

2.2 어댑터(Adaptor) 회로의 구성

接着型 薄膜 測溫 계이지는 보통 다음과 같이 어댑터를 부착하여 感度를 충분히 低下시키도록 하는 構造로 사용된다.

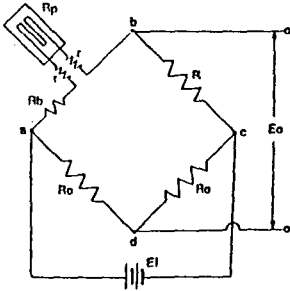


Fig. 2 Circuit of 2 Line Type Adaptor (for 1 Active Gauge Method)

여기서 α 와 α' 의 關係는, 브릿지의 平衡條件에 따라

$$R_{Total} = R_P + R_b \text{ (Lead線 抵抗無視)} \quad (1)$$

가 되며, 溫度變化에 따른 抵抗變化를 ΔR_b 로 한 경우, ΔR 은,

$$\Delta R = \Delta R_P$$

$$\alpha' = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R}{\Delta R_P} \frac{\Delta R_P}{R_P} \frac{R_P}{R} \dots \dots \quad (2)$$

이고, $\alpha = \Delta R_b / R_b$, $R = n R_b$, $\Delta R / \Delta R_b = 1$ 로되는 關係式에서

$$\alpha' = \frac{1}{n} \alpha \dots \dots \quad (3)$$

가 되고, 이것은 α 가 $1/n$ 만큼 감소된 것을 보이고 있다.

2.3 表面 附着式 熱流센서의 熱傳達 解析

本 센서의 正常 및 非定常狀態의 解釋을 하기 위해서는 열류가 센서의 수열면에 가해지고, 그 열이 센서의 방열면으로 흐르도록 사방이 단열되었고, 방열면은 공기에 접해있다고 생각되므로 아래의 Fig. 3과 같은 幾何學의 形象으로 나타낼 수 있으며, 이것은 2次元 層流 自然對流로서 일종의 오픈 케비티(Open Cavity)의 模樣이 되며, 數値的으로 解釋될 수 있다.

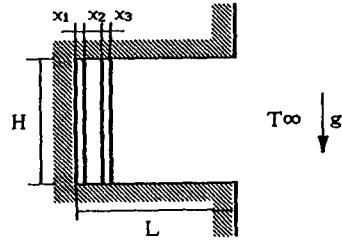


Fig. 3 Open Cavity Geometry with Heat Flux Sensor at the Left

2.3.1 支配方程式

本 研究에 따르는 假定은 Boussinesque 近似 (Boussinesque Approximation)와 一定 물성치(Constant Properties)의 條件이며, 다음과 같은 支配方程式(Governing Equations)가 適用된다.

2次元 層流 流動을 支配하는 連續方程式과 運動量方程式 그리고 에너지方程式은 점성 소산이 없는 경우 다음과 같다.

Continuous Equation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0 \quad \dots \dots \quad (4)$$

Momentum Equation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u v) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \dots \dots \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v^2) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \dots \dots \quad (6)$$

Energy Equation :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v c_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad \dots \dots \quad (7)$$

또한, 垂直方向으로는 陰의 方向으로 重力이 作用하고 있으므로, 方程式(6)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) = -\frac{\partial(p-p_\infty)}{\partial y}(\rho-\rho_\infty)g + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (8)$$

2.3.2 境界條件 및 數值的인 接近解析

2次元的으로 둘러싸인 自然 對流에 對한 研究는 數值的問題에 서 스트림 函數나 速度를 變數로서 使用하고 있으나, 境界가 오 른되어 있는 境遇에는 스트림 函數(Stream Function)나 渦度 (Vorticity)를 考慮할 수 없다. 그러므로 한가지 接近方法으로는 오픈되어 있는 入口 밖까지 計算領域을 擴張시키는 것이며, 本 論文에서는 메모리 空間 및 計算時間을 줄이는 方法으로서 캐비 타이내로 計算領域을 制限하였으며, SIMPLER(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised) 알고리즘을 使用 하였다.

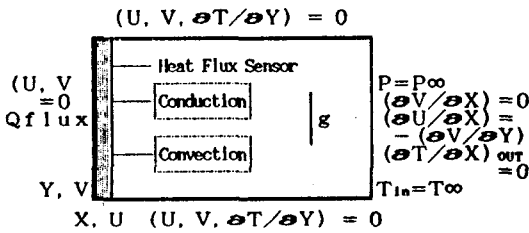


Fig. 4 Boundary Condition for Open Cavity with Heat Flux Sensor at the left

Fig. 4는 本 研究에서의 境界條件을 보여주고 있다. 그림에서 왼쪽 壁面에서는 일정한 熱流가 공급되고 斷熱되어 있으며, 위와 아래의 수평 壁面 또한 斷熱되어 있고, 주위로 부러는 물어오는 流體는 공기이며 常溫(25°C)으로 설정되어 있으며, 境界面 밖으로 나가는 流體의 온도는 上昇條件(Uplwind Condition)을 만족하고 있으며 對流가 지배적이라고 가정하였다.

또한 그리드 포인트는 20×50의 엇갈린 격자망(Staggered Grid System)으로 하였고, 그림에서 點은 센서부분에서의 傳導에 의한 다음 對流에 의해 傳導된다.

2.3.3 SIMPLER 알고리즘

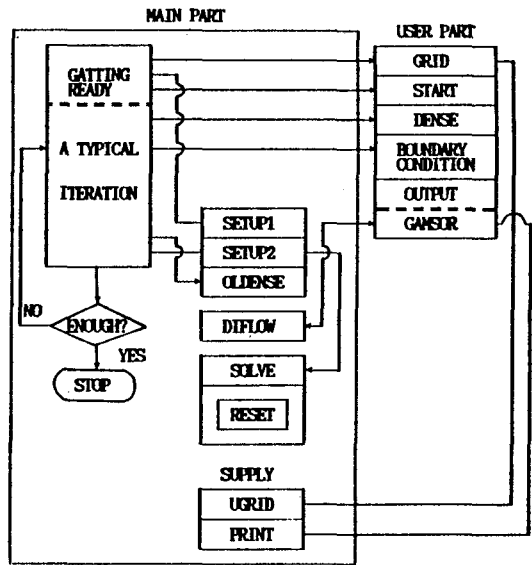


Fig. 5 Structure of Computer Program using SIMPLER Algorithm

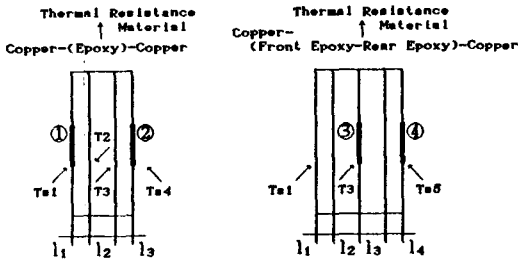
Fig. 5는 本 研究에서 使用한 프로그램의 구조이며, 메인 프로그램과 서브루틴 프로그램으로 이루어져 있으며, Setup1과 Setup2는 각각 幾何學的 情報計算 및 離散化(Discretization)하는 과정을 하고 있으며, Diflow에서 方程式의 형태를 결정하게 된다.

또한 數值計算의 간단한 節次는 다음과 같다.

1. 從屬變數(U, V, P, T)의 初期值를 設定하거나 豫測한다.
2. 運動量 方程式의 係數들을 計算하고, 가상 速度를 얻는다.
3. 壓力場을 計算한다.
4. 새로운 壓力場을 근거로 하여 運動量 方程式을 푼다.
5. 質量 生成式을 計算하고, 壓力修正方程式을 푼다. 그리고 速度場을 計算한다. 이때 壓力은 修正하지 않는다.
6. 새로운 速度場을 사용하여 새로운 溫度場을 決定한다.
7. 수렴해를 얻을 때 까지 위의 순서 2로 가서 반복 計算한다.

2.4 接着型 薄膜 濕溫 計이치式 熱流센서의 構造

Fig. 6은 1·2次 熱流센서의 斷面에서의 濕溫計이치의 位置를 보이고 있다.



①, ②, ③, ④ : Contact-Film Temperature Gauge
 (a) First Heat Flux Sensor (b) Second Heat Flux Sensor
 Fig. 6 Cross-Section Schematic Diagram
 of Contact-Film Temperature Gauge Type Heat Flux Sensor

本 研究에서 試作한 接着型 薄膜 測溫 計이식式 熱流센서는 다음에 나타낸 Fig. 7과 같이 熱流密度를 測定하기 위한 定電壓 위 이브스톤 브릿지(Constant-voltage Wheatstone Bridge)의 2억 티브(Active) 계이지法으로 어댑터 回路를 적용한 구조를 하고 있으며, 이 후의 결과도 Fig. 8의 구조의 가정하에 계산하였다.

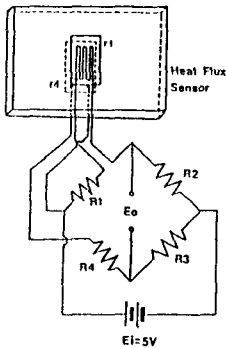


Fig. 7 Schematic Diagram of Component Circuit of Contact-Film Temperature Gauge Type Heat Flux Sensor

그림에서 $(R_1+r_1)R_3 = R_2(R_4+r_4)$ 가 만족되어 平衡이 이루어지고, $E_0 = 0$ 가 된 후, (R_1+r_1) 과 (R_4+r_4) 가 變化하여 Δr_1 과 Δr_4 로 變化하게 되면, 出力電壓 ΔE_0 는 다음式으로 된다.

$$\Delta E_0 = \frac{(R_1+r_1+\Delta r_1)R_3 - R_2(R_4+r_4+\Delta r_4)}{(R_1+r_1+\Delta r_1+R_2)(R_3+R_4+r_4+\Delta r_4)} E_1 \quad (9)$$

Higher-order 項을 無視하고 $r = (R_1+r_1)/R_2$ 로 하면, 式(9)는 다음과 같이 되어 브릿지의 出力電壓은 抵抗變化에 對한 線型 函數가 된다.

$$\Delta E_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta r_1}{R_1+r_1} - \frac{\Delta r_4}{R_4+r_4} \right] E_1 \quad (10)$$

길이 위의 式으로부터, 熱流센서의 바깥 表面 溫度의 變化值의 差異에 比例하는 出力電壓을 얻을 수 있도록 되어 있다.

또한, Higher-order 項을 考慮하게 되면, ΔE_0 는 $\Delta R/R$ 의 非線型 函數로 다음과 같이 表現된다.

$$\Delta E_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta r_1}{R_1+r_1} - \frac{\Delta r_4}{R_4+r_4} \right] (1-\eta) E_1 \quad (11)$$

여기서, η 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r+1}{\frac{\Delta r_1}{R_1+r_1} + \frac{\Delta r_4}{R_4+r_4}}} \quad (12)$$

III. 結果 및 考察

3.1 薄膜 測溫計이식의 抵抗測定

Fig. 8은 恒溫槽에서 熱流센서에 부착된 測溫計이식의 溫度變化에 따른 抵抗變化의 特性을 보이고 있다. 그래프에서 測溫計이치는 두께에 따라 그 기울기가 약간 증가함을 알 수 있으며, 이것은 線型係數가 큰 에폭시 수지가 두께의 증가로 測溫計이치에 약간의 영향을 미치지 때문이라고 생각된다. 그러나 전체적으로는 기울기가 크게 다르지 않고, 또한 고려하는 에폭시 수지의 두께도 1~3mm이므로 시뮬레이션의 데이터로는 이 그래프 전체의 平均으로 하였다.

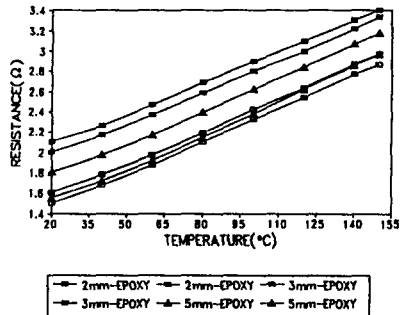


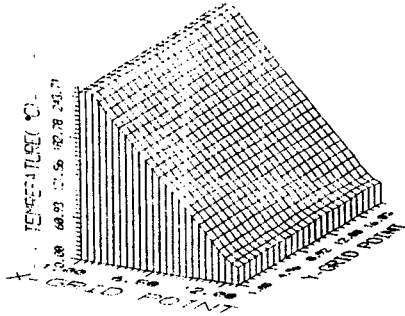
Fig. 8 Relation of Resistance and Temperature of Film Temperature Gauge Attached to Heat Flux Sensor

3.2 1次 熱流센서의 特性

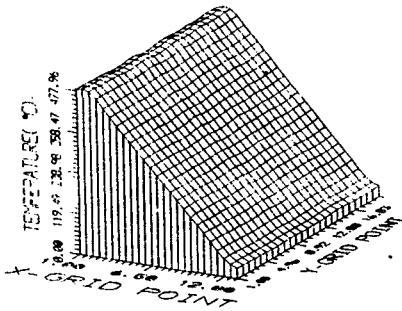
3.2.1 定常狀態에서의 熱流센서의 特性

3.2.1-1 定常狀態에서의 센서의 溫度分布

Fig. 9의 (a), (b)는 定常狀態에서의 橫斷面에서의 一定 熱流(40Watt/m²)에 대한 溫度分布를 나타내고 있다. 그림에서 Y방향으로는 그리드 포인트(Grid Point) 20까지가 각각 센서의 높이 10cm에 해당하며, (a)에서는 X방향 그리드 포인트 12까지가 두께 1mm에, (b)에서는 두께 2mm에 해당한다. 그림에서 (a), (b) 모두 X방향으로의 증가에 따라 온도가 감소하고 있으며, 특히 Y방향으로는 미소하나 그리드 포인트의 증가와 더불어 溫度가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 공기가 對流함으로써 오는 결과라고 생각된다. 때문에 測溫게이지의 附着 位置에 따라 약간의 溫度差가 발생할 것이며, 또한 熱流가 증가함에 따라 이 영향은 상당히 증대할 것이다. 앞으로의 結果는 Y방향의 그리드 포인트 가운데 중앙의 11포인트에 測溫게이지가 위치해 있다고 생각하고 結果를 考察한다.



(a) Thickness of Heat Flux Sensor(Copper+Epoxy+Copper):1.2mm



(b) Thickness of Heat Flux Sensor(Copper+Epoxy+Copper):2.2mm

Fig. 9 Steady-state Temperature Distribution of Heat Flux Sensor

3.2.1-2 熱流센서의 出力電壓과 感度

Fig. 10은 熱流와 熱流센서의 出力電壓의 關係를 나타내며, Fig. 11은 에폭시 수지의 두께 변화에 따른 센서의 感度を 나타내고 있다. 위의 두 結果는 워트스톤은 브릿지에 5V(이하 모두 5V의 定電壓을 인가하였을 때의 出力을 나타낸다.)의 定電壓을 인가하였을 때의 結果이며, 熱流에 따라 센서의 出力電壓이 비례해서 증가하며, 두께의 증가에 의하여 感度が 증가함을 알 수 있다.

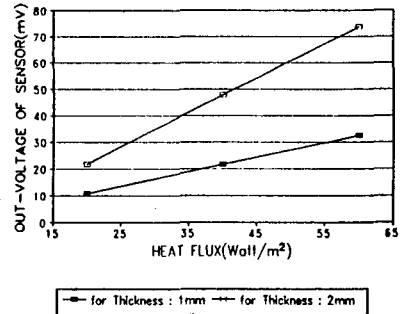


Fig. 10 Relation of Out-Voltage of Sensor and Heat Flux

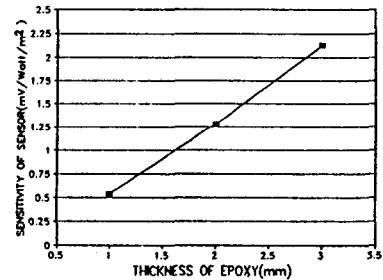
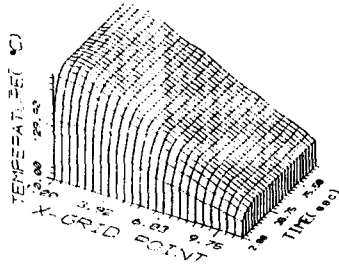


Fig. 11 Relation of Sensitivity of Sensor and Thickness of Epoxy

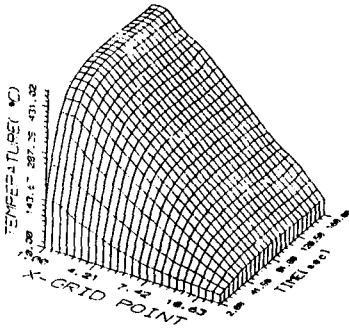
3.2.2 非定常狀態에서의 熱流센서의 特性

3.2.2-1 熱流센서의 非定常過程

Fig. 12의 (a), (b)는 非定常狀態에서의 각 그리드 포인트에서의 一定 熱流(40Watt/m²)의 시간의 변화에 대한 溫度 커브를 나타내고 있다. 그림에서 放熱面 쪽으로부터 放熱面 쪽으로 가면서 定常狀態에 이르는데 까지의 시간이 더 소요되며, 두께에 따라서는 Fig. 12의 (a)보다는 (b)에서 전반적으로 더욱 지연된 非定常過程을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Thickness of Heat Flux Sensor(Copper+Epoxy+Copper):1.2mm



(b) Thickness of Heat Flux Sensor(Copper+Epoxy+Copper):2.2mm

Fig. 12 Unsteady-state Temperature Curve of Each Grid Point of Heat Flux Sensor

3.2.2-2 熱流센서의 非定常過程과 應答性

Fig. 13은 센서의 非定常過程을 보이고 있으며, Fig. 14는 두께와 센서의 應答性 關係를 나타내고 있다. Fig. 13, 14로부터 豫測된 바와 같이 두께의 증가와 더불어 應答性도 遲延되고 있음을 알 수 있다.

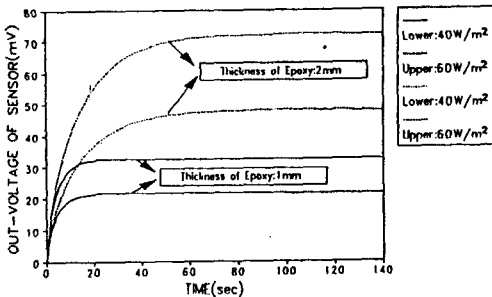


Fig. 13 Unsteady-state Out-Voltage Curve of Heat Flux Sensor

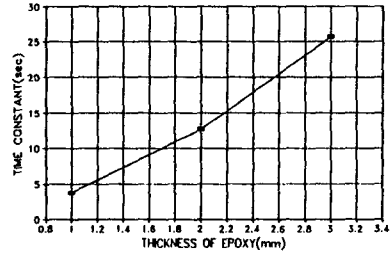


Fig. 14 Relation of Thickness of Epoxy and Time Constant

3.3 2次 熱流센서의 特性

3.2.1-1節의 Fig. 9에서의 값이 一定 熱流 40Watt/m^2 에서 예폭시 수지 1mm, 2mm에서의 收熱面의 溫度는 각각 250°C , 477°C 이다. 지금까지의 結果는 니켈 測溫게이지의 測定 使用溫度를 고려하지 않고 계산한 것이다.

그러나 測溫게이지의 測定 使用溫度를 150°C 로 생각할 때, 收熱面에 그대로 부착시켜 사용할 수는 없으므로 보다 높은 熱流量의 측정과 게이지의 測定 使用溫度를 고려하여 예폭시 수지 내부에 게이지를 기계시킴으로써 熱流量의 測定을 개선할 수 있다.

Fig. 15는 예폭시 수지 2mm인 경우에 放熱面의 게이지는 고정시킨 상태에서 收熱面으로 부터 測溫게이지의 위치를 이동시켰을 때의 出力電壓의 時定數를 나타내고 있으며, 위치의 증가에 따라 時定數가 증가함을 알 수 있다.

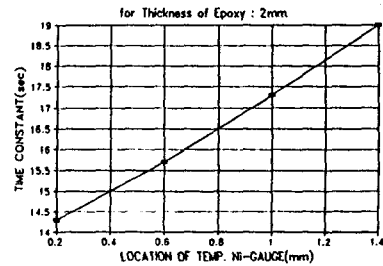


Fig. 15 Relation of Location of Temperature Ni-Gauge and Time Constant

또한, Fig. 16은 공급되는 熱流에서 150°C 가 되는 위치를 나타내고 있는 것으로서, 예를 들어, 收熱面에 공급되는 熱流가 40Watt/m^2 에서는 예폭시 수지 1mm, 2mm의 경우 각각 약 0.62, 1.73의 위치 이후에서 게이지의 測定 使用溫度를 만족시키게 된다.

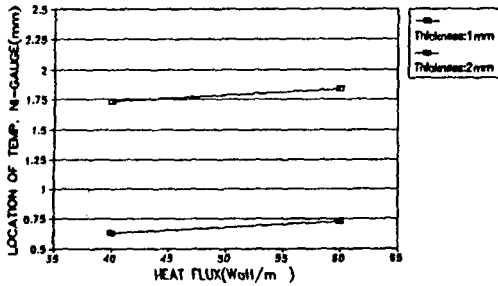


Fig. 16 Relation of Heat Flux and Proper Location of Tem Gauge

IV. 糸吉 昌命

接着型 薄膜 測溫게이지의 熱流센서에 관한 特性을 評價하는 데 있어 심플러 알고리즘을 이용하고, 이로 부터 얻은 結果에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

[1] 이상의 결과에서 예폭시 수지의 두께가 증가하면 定常狀態에서 보이는 出力電壓, 感度는 좋으나 수지내부의 溫度는 증가하여 測定熱流의 範圍가 좁아지고, 非定常過程에서 나타나는 應答性이 떨어지며, 따라서 測定熱流의 範圍나 다른 應答特性이 要求되면, 센서의 전체 두께나 게이지의 위치 등의 構造 選擇이 필요하며 이를 고려함으로써 실질적인 측정에 접근시킬 수 있음을 알 수 있었다.

[2] 本 研究의 熱流센서의 一定 熱流에 대한 溫度分布로부터 熱流센서의 定常, 非定常에서의 예폭시 수지 1mm, 2mm, 3mm에 대하여 出力電壓과 感度(각각 0.54, 1.28, 2.13 [mV/Watt/m²]), 應答特性(각각 4.2, 13.1, 26.3[sec])의 센서의 特性에 대하여 알 수 있었다(1次 熱流센서).

[3] 薄膜 나열 게이지의 溫度 特性으로 인하여 本 熱流센서는 測定 熱流量에 따라 使用範圍가 한정되며, 일부에 대하여 測定 熱流量에 따른 測定 位置의 條件(예폭시 수지 1mm, 2mm의 경우 40Watt/m²까지 測定하기 위해서는 收熱面으로부터 0.62, 1.73mm이후로 게이지의 위치를 선택)을 계산할 수 있었다(2次 熱流센서).

參 考 文 獻

- 1) 炭槍貞夫, 熱センサ入門, 啓學出版, pp123~214, 1984.
- 2) 社団法人 計量管理協會, 計測センサ利用技術調査研究委員會, センサの原理と使い方(3)<溫度·化學センサ>, コロナ社, pp130~148, 1984.
- 3) 栗原至道, 新開發フォイル型熱流流計について, 關西造船協會誌, No.153, pp1~8, 1974.
- 4) 金谷英一, 熱流計(2), 空氣調和·衛生工學 52(11), pp59~65, 1978.
- 5) 戶川達男, Sensor for Biomedical Measurement, Corona Publishing Co., LTD., pp329~334, 1986.

- 6) 轉應教外 3名, 接着形 薄膜 測溫게이지의 溫度特性에 關한 研究, 空氣調和·冷凍工學 論文集 第 2卷 第4號, pp327~339, 1990.
- 7) 轉應教外 1名, Foli Stain Gauge의 國産化 및 接着技術에 關한 研究, 漢陽大 産業科學研究所 論文集 第 29集, pp145~156, 1980.
- 8) 轉應教外 2名, Sputter加工法을 이용한 스트레인게이지의 開發 및 特性에 關한 研究, 韓國非破壞檢査學會誌 第 16號 Vol.9 No.2, pp50~60, 1989.
- 9) 越川泰直, 薄膜白金溫度センサSTD-101, Electronic Monthly, No.202, pp1~4, 1982.
- 10) 緒方一雄, 薄膜白金溫度センサ, センサ技術2, No.9, pp111~113, 1982.
- 11) Y.L.Chan, C.L.Tien, A Numerical Study of Two-dimensional Natural Convection in Square Open Cavities. Numerical Heat Transfer, Vol.8, pp.65~80, 1985.
- 12) Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow
- 13) Y.L.Chan, C.L.Tien, A Numerical Study of Two-dimensional Laminar Natural Convection in Shallow Open Cavities. Int.J.Heat Mass Transfer. Vol.28, No.3, pp.603~612, 1985.