

熱電對의 設置狀態에 따른 溫度測定 誤差에 관한 研究

宣 洋 來*

A Study on the Temperature Accuracy due to Conditions of Thermocouple Installation.

Yangrae Seon

Abstract

In the equipments of industrial plant and marine engine, an exact temperature measurement is indispensable.

Temperature measurement errors are induced by electrical and heat errors, and the insufficient immersion length of thermowell exerts an important effect to the heat error.

In this paper, the author analyses the relation between temperature errors and the rate of immersion length to outside diameter(L/D) in order to reduce the heat errors.

1. 序 論

熱電溫度計로 溫度를 測定할 때 發生하는 誤差는 電氣的인 誤差와 熱的인 誤差로 區分할 수 있다.

電氣的인 誤差는 比較的 容易하게 原因을 究明하여 이를 除去할 수 있다. 그러나, 熱的 誤差는 熱電對의 插入深度의 不充分으로 因한 熱傳導誤差, 熱電對와 이를 둘러싼 物體와의 輻射 energy의 授受, 保護管(thermowell)에 dust 및 酸化鐵의 粉塵 等の 附着으로 因한 熱抵抗의 增加 및 空氣의 侵入 等 複雜한 要因에 依해 發生한다. 이 중에서 熱傳導誤差가 熱的 誤差의 大部分을 이루고 있다.

熱的 誤差를 減少시키기 위해서는 우선 被測

定物과 熱電對를 充分히 熱的 接觸을 시키고 誤差要因을 除去할 수 있는 處를 擇하여 熱電對를 設置한다. 그러나 熱電對의 插入深度가 짧으면 熱電對를 設置한 壁 또는 外界의 溫度의 影響을 받아 熱電對 및 保護管의 熱傳導에 依하여 熱電對의 測溫接點이 被測定溫度보다 低溫으로 되어 熱傳導誤差가 發生한다.

熱電對의 插入深度가 짧은 경우에는 保護管 外周溫度(爐外溫度)分布를 測定하여 補正함으로써 熱傳導誤差를 除去하는 方法과 小型電氣爐를 使用하여 保護管外周를 補償加熱함으로써 外界溫度의 影響을 除去하는 方法을 생각할 수 있다. 그러나 產業界에서는 熱電對의 溫度檢出個所마다 保護管外周를 補償加熱하여 溫度誤差를 除去한다든지, 또는 保護管外周溫度를 일일이

* 正會員, 慶熙大學校 工科大學

補正하기 어려우므로 熱傳導로 인한 溫度誤差를 減少시키기 위한 熱電對 및 保護管의 插入深度를 實驗의으로 求하였다.

2. 理論的 考察

—Nomenclature—

- a. Cross-sectional area of thermowell wall
- D. Outside diameter of well
- h. Heat transfer coefficient
- K. Thermal conductivity of well material
- L. Effective immersion length of thermowell
- Q₁. Conductive heat flow along thermowell
- Q₂. Conductive heat flow into or out of thermowell
- T_w. Temperature variable in thermowell
- T_f. Temperature of process fluid
- T_b. Temperature of sensing point
- T_a. Ambient temperature
- T_e. Temperature error (=T_f-T_b)
- x. Distance variable

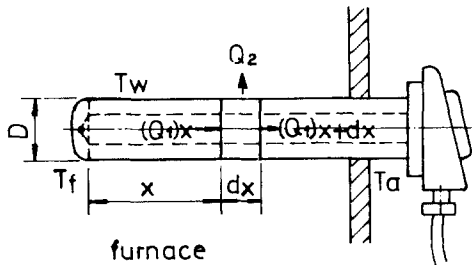


Fig.1 熱電對 및 保護管의 設置例

Fig.1과 같이 爐內에 熱電對가 設置되어 있는 경우를 생각한다.

熱電對가 들어있는 thermowell은 爐壁과 直角方向(x方向)에 對해서만 變化하는 것으로 한다.

dx周圍의 heat balance는 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$(Q_1)_x = (Q_1)_{x+dx} + Q_2 \dots \dots \dots (1)$$

$$-Ka \left(\frac{dT_w}{dx} \right)_x = -Ka \left(\frac{dT_w}{dx} \right)_{x+dx} + \pi Dh(T_w - T_f)dx \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 thermowell과 內部사이에 熱傳導 또는 熱傳違이 없다고 假定한다.

$$\text{但, } a = \frac{\pi}{4} D^2$$

x 및 x+dx에 있어서의 Taylor series 展開를 適用하고 이를 簡單히 하면 式(3)과 같다.

$$\frac{d^2(T_w - T_f)}{dx^2} = \frac{\pi Dh}{Ka} (T_w - T_f) \dots \dots \dots (3)$$

一般解는

$$T_w - T_f = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx} \dots \dots \dots (4)$$

여기서

$$m = \sqrt{\frac{\pi Dh}{Ka}} = \sqrt{\frac{4h}{KD}}$$

boundary condition을 使用하여

$$\frac{T_w - T_f}{T_a - T_f} = \frac{\cosh mx + \frac{h}{Km} \sinh mx}{\cosh mL + \frac{h}{Km} \sinh mL} \dots \dots \dots (5)$$

$\frac{h}{Km}$ 가 小이며, x=0에서 T_w=T_b일 때

$$\frac{T_b - T_f}{T_a - T_f} = \frac{1}{\cosh mL} \dots \dots \dots (6)$$

故로 溫度誤差는 式(7)로 表示할 수 있다.

$$T_e = T_f - T_b = \frac{T_f - T_a}{\cosh mL} \dots \dots \dots (7)$$

$\cosh mL = \frac{1}{2}(e^{mL} + e^{-mL})$ 이며 e^{-mL}을 無視하면

$$T_e = \frac{2(T_f - T_a)}{e^{mL}} \dots \dots \dots (8)$$

式(8)에서 溫度誤差를 減少시키기 위해서는 $mL = \sqrt{\frac{4h}{KD}} \cdot L$ 를 크게(大)하여야 하므로 thermowell의 插入深度 길이 L가 길고 또한 熱傳導係數가 작은(小) 非金屬保護管의 경우에 溫度誤差가 小어진다.

그러므로 熱傳導係數가 서로 相異한 非金屬保護管인 磁器管과 金屬保護管인 steel 및 stainless steel에 對하여 保護管의 插入深度를 變更하면서 溫度誤差를 實驗하였다.

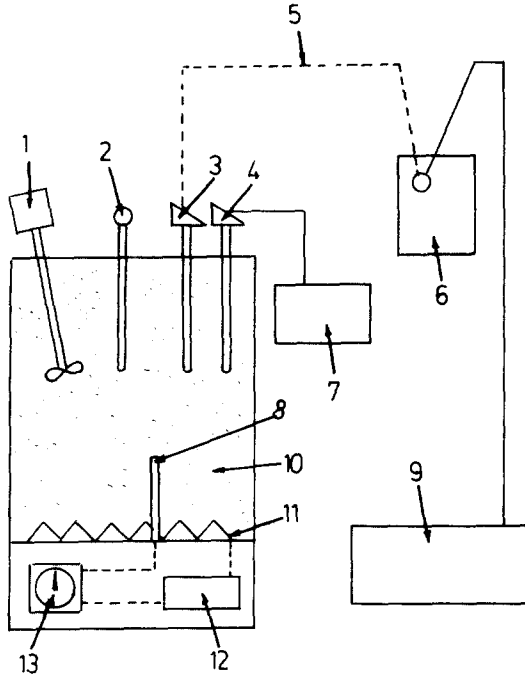
3. 實 驗

3.1 實驗裝置

本 研究에서 實驗을 수행하는데 使用한 裝置의

概要는 Fig.2에 表示한 바와 같다.

恒溫槽는 silicon oil bath이며 oil을 加熱하므로서 槽內溫度分布가 一定하고 좋은 溫度特性을 갖출 수 있다.



1. Extruder
2. Glass thermometer(standard)
3. Thermocouple w. thermowell for testing
4. Standard thermocouple
5. Compensation lead wire
6. Cold junction box
7. Temperature recorder
8. Thermocouple for control loop
9. High sensitive recorder
10. Silicone oil
11. Heater
12. Thyristor regulator
13. Temperature controller

Fig.2 實驗裝置의 構成

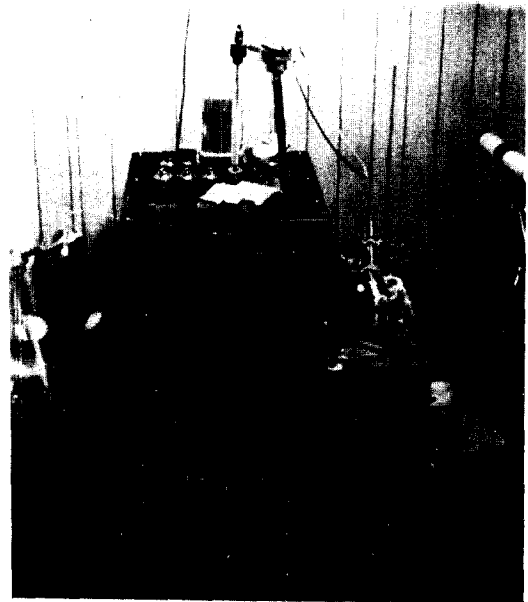
槽內 溫度 control loop는 controller (range 0~300°C)에서 設定한 溫度와 熱電對에서 檢出한 溫度를 比較하여 電流操作信號에 依해 thyristor regulator를 驅動함으로써 heater의 加熱을 增減시켜 一定溫度를 維持한다.

또한 extruder(model AP-FI₂)로 silicon oil (TSF 451-1000)를 교환시켜 均一한 溫度分布를 이루게 하였다.

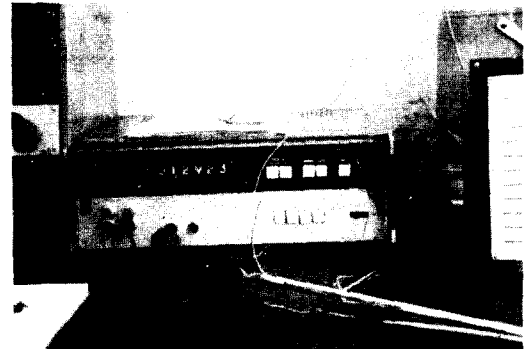
槽內溫度는 標準 glass thermometer로 감시하고 別途로 精密級 熱電對와 溫度 recorder(range 0~600°C, 1 pen)로 自動 記錄하였다.

本 實驗에서 使用한 實驗用 熱電對는 Chromel-alumel($\phi 2.3$)이며 保護管은 非金屬材料인 磁器管과 金屬材料인 steel 및 stainless steel 管을 使用하고 溫度測定值를 記錄하는 recorder는 high sensitive recorder (model EL8800, 測定 range 및 chart speed selective, 2-pen recorder)를 利用하여 精密測定을 도모하였다.

實驗에 使用한 裝置를 Fig.3에 表示한다.



(a) 實驗裝置



(b) 高感度指示記錄計

Fig.3 實驗裝置

3.2 實驗方法

恒溫槽의 溫度를 250°C로 一定하게 維持시키면서 外徑 15mm 內徑 13mm(thickness 2mm) 길이 500mm의 同一規格인 stainless steel(SUS 304) 및 steel(STP 35)의 保護管과 非金屬材料인 磁器管(HB, $Al_2O_3 > 55\%$)의 3種類를 對象으로 實驗하였다.

먼저 保護管에 Chromel-alumel 熱電對를 封入하고 길이 500mm인 것을 50, 100, 150, 200, 250, 300mm 挿入하여 各 挿入길이에 있어서의 恒溫槽 溫度 250°C에 對한 檢出溫度를 測定하였다.

처음 方法으로 實驗한 結果, 溫度誤차가 減少되는 部分에서 더욱 具體적으로 實驗하기 위하여 挿入길이 100mm 以上에서 부터 再次 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300mm로 細分하여 前과 同一한 方法으로 實施하고 各 實驗後에는 保護管의 溫度가 50°C 以下로 下降한 後에 다음 實驗을 實施하도록 時間을 두었다.

溫度測定은 熱電對의 起電力 $e \cdot m \cdot f$ (mV)를 測定하여 이를 溫度로 換算하였다.

Table 1. 槽內檢出溫度

挿入深度 (L) (mm)	槽內檢出溫度 (各保護管挿入深度別)			備考 L/D
	磁器管 (HB)	stainless steel 管 (SUS304)	steel 管 (STP35)	
(mm)	(°C)	(°C)	(°C)	
50	190.0	175.4	163.9	2.94
100	216.1	242.8	233.6	5.88
125	219.5	245.4	242.1	7.35
150	250.0	249.3	246.5	8.80
175		249.7	248.9	10.29
200		249.9	249.7	11.76
225		250.0	250.0	13.24

4. 結果 및 考察

熱傳導에 의한 溫度誤차는 (8)式에서 爐外溫度(T_0)에도 關係되나 $\frac{1}{e \cdot m \cdot f}$ 에 比例한다. 또한

$mL = \sqrt{\frac{4H}{KD}} \cdot L$ 이므로 溫度誤차를 左右하는 變數는 保護管挿入 길이의 外徑에 對한 比(L/D)와 材料의 熱電導係數(K)를 들 수 있다.

따라서 溫度誤차를 減少시키는 方案은 (8)式에서 溫度誤차를 計算하여 補正하는 方法과 上記 實驗에 依해 얻어지는 結論과 같이 保護管의 材質에 따라 充分한 挿入 길이를 주어 設置함으

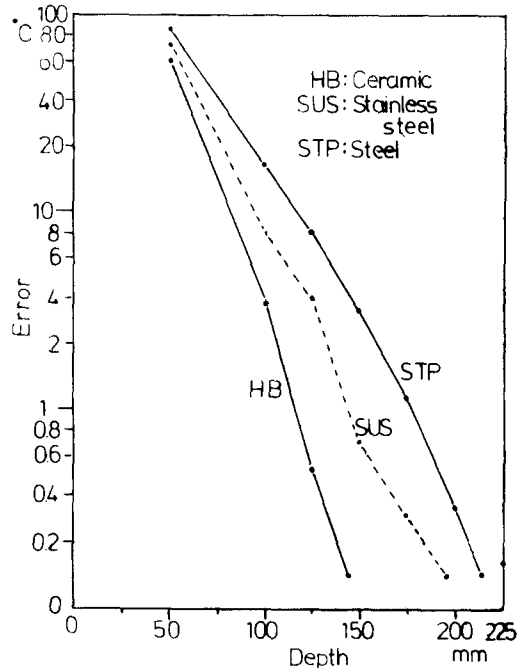


Fig. 4 保護管의 挿入 길이에 對한 溫度誤差

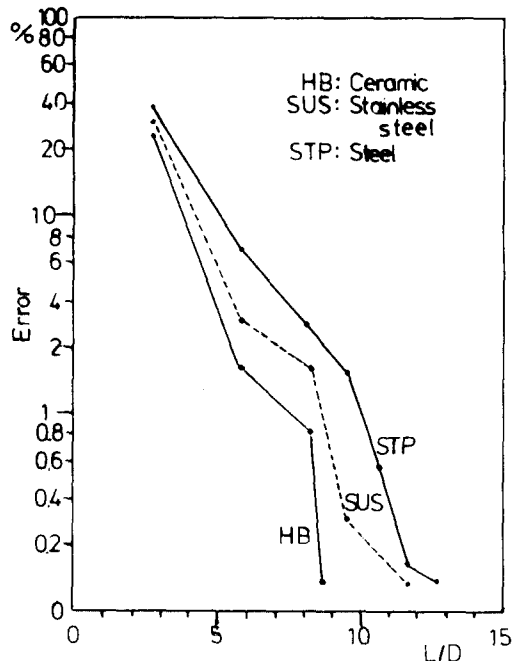


Fig. 5 L/D에 對한 溫度誤差率(%) (L: 保護管의 挿入 길이, D: 保護管의 外徑)

로써 誤差를 減少시킬 수 있다. 實驗結果는 Table 1과 같으며 保護管의 挿入길이(L)에 對한 溫度誤差(°C) 및 L/D에 따른 溫度誤差率(%)은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

溫度誤差는 3種類의 保護管 모두 挿入深度比 L/D가 클 수록 顯著하게 減少한다. 또한 同一 挿入深度比 L/D에 對해서는 材料의 熱傳導係數가 第一 작은 磁器管(K_{HB})의 경우에 溫度誤差가 가장 작으며 熱傳導係數가 第一 큰 steel(K_{STP}) 管일 때 溫度誤差가 크다(K_{STP} > K_{SUS} > K_{HB}).

溫度誤差가 거의 zero에 가까운(0.1% 以下) 保護管의 挿入 深度比 L/D는 非金屬材料인 磁器管(HB)에서는 8.5倍, 金屬材料인 steel(STP)에서는 12.5倍, stainless steel(SUS)에서는 11倍 임을 알 수 있다.

그러나 이 實驗은 液体中の 溫度測定의 경우 이므로 氣體나 空氣中 霧團氣에서 L/D는 若干 커질 것이다.

溫度誤差를 減少시키기 위해서는 우선 測定對象과 檢出端(sensor)을 充分하게 熱的 接觸을 하여야 하고 檢出端의 熱容量이 작아야 한다. 그리고 保護管 設置部 附近을 保溫하여 保護管을 따라서 出入하는 熱傳導損失을 減少시킨다.

測溫接点에 있어서 測溫對象으로 부터 保護管(測溫部附近)에의 熱傳達이 좋아야 하며 靜止에 가까운 流体의 溫度를 測定할 경우에는 조금이라도 흐름이 빠른 곳을 선택하여 熱電對의 設置場所로 擇한다.

保護管의 熱傳導에 依한 溫度誤差를 줄이기 위하여 L/D의 値를 上記 實驗結果 以上으로 維持한다 管의 外徑과 挿入길이 關係는 서로 相對的이나 保護管의 徑 및 檢出素子를 작게 하고 挿入深度를 길게 하여야 한다. 管의 挿入길이를 크게 할 수 있을 때는 相對的으로 管의 徑을 작게하여 溫度誤差가 減少하도록 L/D의 値를 維持시킨다.

그러나 L/D의 値가 너무 크게 保護管을 挿入하면 高溫, 高流速, 高流体壓 等の 測定對象에서는 流速에 依한 굽힘(bending)應力, 流速에 依해서 發生하는 Kármán渦의 發生周波數와 保護管의 固有振動數와의 共振으로 破損될 念慮가 있다.

이때 保護管에 작용하는 抗力(R) 및 發生하는 굽힘應力(σ)은 다음과 같으며 굽힘應力을 計算하여 檢討한다.

$$R = C_D \frac{\rho}{2g} \epsilon v^2 \dots\dots\dots(9)$$

여기서 C_D는 抗力係數, ρ 및 v는 流体의 比重量 및 流速, s는 管의 流速方向의 投影面積, g는 重力의 加速度이다.

$$\sigma = \frac{8C_D \rho v (D_1 + D_2) D_1 l^2}{\pi(D_1^4 - d^4)} \dots\dots\dots(10)$$

여기서 D₁, D₂ 및 d는 保護管의 根元 및 先端의 外徑과 管의 內徑이다.

또한 Karman渦의 發生周波數(f)는 式(11)과 같다.

$$f = s_t \frac{v}{D} \dots\dots\dots(11)$$

여기서 s_t는 Strouhal數, D는 外徑이다. 그러므로 保護管의 固有振動數를 計算하여 共振與否를 檢討한다.

本 實驗은 silicon oil의 恒溫槽에서 行하였으므로 保護管의 強度 및 共振에 對해서는 檢討할 必要가 없었다.

5. 結 論

溫度計測에서 誤差는 熱傳導誤差가 大部分을 이루고 있다. 이를 減少시키기 위해서는 保護管의 外周를 補償加熱하여 熱傳導損失을 除去하는 方法, 溫度誤差를 計算하여 補正하는 方法 等도 있으나 保護管을 設置할 때 挿入深度를 充分하게 取하여 挿入함으로써 解決할 수 있다.

實驗結果는 保護管의 材質에 따른 熱傳導係數(K)와 挿入深度比(L/D)에 따라 決定되며 液体에 對한 實驗이었으므로 氣體나 空氣中 霧團氣 等を 考慮하여 非金屬材料에서는 10倍, 金屬保護管에서는 15倍의 挿入深度比(L/D)를 取하여 設置하는 것이 좋다.

그리고 設置場所의 與件으로 充分한 挿入이 不可能할 때에는 保護管의 外徑을 相對的으로 작게하여 L/D의 比를 維持시킨다.

參 考 文 獻

1. D. W. Richmond, Selecting thermowells for accuracy and endurance, In. Tech., February 1980, pp.59-63
2. 西山昭三, 熱電對의 熱傳導誤差의 除去에 對하여, 計測, 第1卷 第5號, 1951.
3. 井戸川, 渡部, 熱電對에 依한 溫度測定의 熱傳導誤差, 計測, 第2卷 第5號, 1952.
4. J. P. Holman, Heat Transfer(fourth edition), 1976.
5. 工業計測技術大系編輯委員會, 溫度, 1961.
6. (株)橫河電機製作所, 溫度의 測定, July 1975.
7. (株)千野製作所, 溫度의 計測, February 1979.
8. 木村昭男, 熱電對 故障要因과 그의 對策, 計量管理, Vol.17, No.2 pp.56-63.
9. 計量管理協會, 溫度計測機器의 管理, 1978.