

<論 文>

非定常 熱線法에 의한 流體의 熱傳導率 測定

高 尙 根* · 梁 翔 植** · 盧 承 卓***

(1984年 2月 17日 接受)

Measurement of thermal conductivity of fluid by unsteady hot wire method

Sangken Kauh, Sangsik Yang and Sung Tack Ro

Abstract

A modified technique of the transient hot wire method to measure the thermal conductivity of fluid has been described in this paper.

The thermal conductivity of fluid can be obtained by acquiring wire temperature as a function of time. Multiplication of the inverse slope of the temperature versus logarithm of time by an instrumental constant gives the thermal conductivity. The constant voltage was applied to Wheatstone bridge circuit. The wire temperature can be measured as a function of time precisely with the aid of the data acquisition system composed of a microprocessor and an analog-digital converter. The thermal conductivity of the electrically conducting fluid has been measured with the insulated hot wire coated by electrically non-conducting material. The effect of the coated insulation layer on the thermal conductivity has been examined, in which it is confirmed that the thermal conductivity of electrically conducting liquid can be determined by the transient coated hot wire method.

Thermal conductivities of methanol, carbontetrachloride, Freon-22 and glycerin have been measured at room temperature in the pressure from 0.1MPa to 35.1MPa. The experiment has been performed to compare the data from the bare and the coated wires, and the results are satisfactory.

記 號 說 明

- a : 熱線의 半徑
- c : 比熱
- k : 주위 液體의 熱傳導率
- k_c : 熱線被覆層의 熱傳導率
- L : 熱線 전체의 길이
- q : 熱線 단위 길이 당 熱流束
- R_w : 熱線의 抵抗값
- R_s : 熱線과 직렬 연결되는 標準抵抗값

- $\frac{dR}{dT}$: 熱線의 溫度抵抗係數
- r : 熱線中心에서 半徑方向 거리
- T : 時間 t 에서의 熱線의 溫度
- t : 時間
- T_c : 熱線被覆層의 溫度
- V : 電壓
- V_s : 定電壓電源의 電壓
- α : 熱擴散係數
- α_c : 熱線被覆層의 熱擴散係數
- β : 熱線의 溫度抵抗係數
- γ : 오일러 常數의 지수값

* 正會員, 서울大學校 大學院 機械工學科

** 서울大學校 大學院 機械工學科

*** 正會員, 서울大學校 工科大學

- δ : 熱線被覆層의 두께
- τ : 無次元 時間 $\frac{at}{a^2}$
- w : $2 \times (\rho c)_{\text{fluid}} / (\rho c)_{\text{wire}}$

1. 序 論

에너지의 效率的 利用과 관련된 많은 問題는 熱傳達 解析을 수반하게 되고, 이에 중요한 熱物性值인 熱傳導率은 熱機器의 設計時 필수적인 資料이다. 그러므로 本 研究에서는 非正常 熱線法으로 液體의 熱傳導率 測定에 關한 研究을 시도하였다.

1931年 Stälhane⁽¹⁾이 非正常 熱線法으로 熱傳導率을 測定할 수 있다는 것을 發表한 이래 많은 研究가 이루어졌다. Horrocks와 McLaughlin⁽²⁾이 液體에 對해서 엄밀한 理論의 및 實際의 條件과 實驗結果를 發表하였다. 그 이후 많은 研究가 行하여졌지만 機械的 X-Y 펜 記錄裝置를 使用하였으므로 極히 짧은 時間에 依存하는 非正常狀態를 記錄하는 데에는 不正確하였다. 그러나 1974年에 와서 Kestin⁽³⁾ 등은 電氣的인 獨自의 方法으로 精密한 測定을 하였으며, 최근 電子 기술의 발달로 디지털 測定裝置에 依한 연구⁽⁴⁻⁸⁾가 發表되었다.

非正常 熱線法에서 熱傳導率은 白金加熱線에 一定한 熱量이 供給되면서부터 時間의 變化에 따른 熱線 溫度의 上昇率로부터 구할 수 있다. 이때 溫度의 變化와 時間의 로그값과의 關係가 直線으로 언어지며 그 直線 기울기의 逆數가 測定하려는 物質의 熱傳導率과 比例한다. 이 測定方法의 長點은 다른 物質의 熱傳導率과 比較하여 測定하는 것이 아니라 독자적으로 熱傳導率을 測定할 수 있는 絶대적 測定方法이라는 점에 있다.

本 研究에서는 高精密 아날로그-디지털 變換器와 마이크로 프로세서(microprocessor) Intel 8085를 使用하여 非正常 아날로그(analog) 信號를 歪曲이 없이 디지털량으로 직접 變換하여 資料처리하였다.

또한 非正常 熱線法은 熱線에 電流를 加하여 熱線이 熱源이며 同時에 溫度計의 두 가지 역할을 하므로, 電氣傳導性이 있는 液體는 적합하지 못한 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 熱線에 얇은 絕緣被覆層을 입혀 電氣傳導性 液體의 熱傳導率을 測定할 수 있는 가능성에 대한 研究를 시도하였다.

2. 理論解析

2.1 基本解析

무한히 寬고 有限 半徑 a 를 가지는 線이 無限한 流

體에 잠겨 平衡狀態에 있을 때, 단위 길이 當 一定한 熱量이 熱線에 加해질 때의 熱線주위의 流體溫度 T 에 대한 熱傳導 方程式 및 境界條件은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

$t \leq 0$ 에 대하여

$$T(r, t) = 0 \tag{2}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(r, t) = 0 \tag{3}$$

$r = a$ 에서

$$-2\pi ak \frac{\partial T}{\partial r} = q - \pi a^2 (\rho c)_w \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4}$$

식 (1)의 解는 Carslaw와 Jaeger⁽⁹⁾에 의하여 다음과 같이 주어져 있다.

$$T(a, \tau) = \frac{q}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\tau}{\gamma} + \frac{1}{2\tau} + \frac{w-2}{2w\tau} \ln \frac{4\tau}{\gamma} + \dots \right\} \tag{5}$$

여기서 w 는 유체와 熱線의 熱容量의 비이며, γ 는 Euler 상수(0.5772...)의 指數값으로서 $\gamma = 1.7811$ 이다. 식 (5)에서 時間 τ 가 充分히 크면 제 2항과 제 3항은 무시될 수 있고

$$T(a, \tau) = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\tau}{\gamma} \tag{6}$$

로 쓸 수 있고 이를 그림으로 표시하면 Fig. 1의 직선 구간에 해당한다.

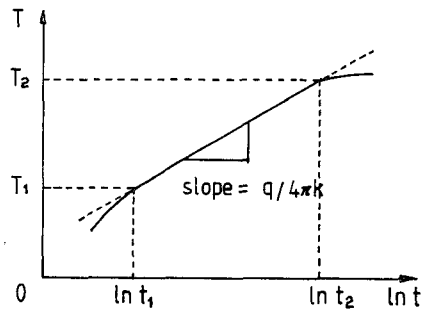


Fig. 1 Diagram of temperature rise Versus logarithm of time

이는 熱線온도의 변화와 시간의 로그값을 측정하면 熱傳導率 k 를 구할 수 있음을 의미한다. 실험의 초기 단계에서는 熱容量의 영향이 무시될 수 없고 지나치게 긴 시간이 경과하면 自然對流의 발생이 예상되므로 측정에서는 적절한 시간 간격 τ_1 과 τ_2 사이에서의 온도 변화 T_1, T_2 로부터 熱傳導率

$$k = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} / \Delta T \tag{7}$$

을 구한다. 여기서 ΔT 는 $T_2 - T_1$ 을 표시한다.

2.2. 被覆熱線에서의 解析

半徑이 a 인 熱線에 두께가 δ 인 絕緣被覆層이 있을 때, 熱線에서의 단위 길이당 一定한 熱量이 加해지면 關係式은 다음과 같으며, 첨자 c 는 皮복층을 뜻한다.

i) $a \leq r < a + \delta$

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} + \frac{1}{\alpha_c} \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (8)$$

$t=0$ 에서

$$T_c(r, t) = 0 \quad (8a)$$

$r=a$ 에서

$$q = \pi a^2 (\rho c)_w \frac{\partial T_c}{\partial t} = -2\pi a k_c \frac{\partial T_c}{\partial r} \quad (8b)$$

ii) $a + \delta \leq r$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

$t=0$ 에서

$$T(r, t) = 0 \quad (9a)$$

$r=a+\delta$ 에서

$$T_c = T \quad (9b)$$

$$k_c \frac{\partial T_c}{\partial r} = k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (9b)$$

$r \rightarrow \infty$ 에서

$$T(r, t) = 0 \quad (9c)$$

식 (8), (9)의 解析의인 解는 구하기 어려울 것으로 생각되나 유한차분법에 의한 수치해석으로 시간에 따른 온도 분포 $T_c(r, t)$ 와 $T(r, t)$ 를 구할 수 있다. (10) 이종 현재 필요로 하고 있는 문제는 熱線에서의 온도, 즉, 被覆層의 內面溫度인 $T_c(r=a, t)$ 이다. 식 (8)와 (9)에서 볼 수 있듯이 皮복층의 內面溫度 $T_c(r=a, t)$ 는 熱線과 주위유체의 열물성치 열전도율, 밀도, 비열 등과 작동조건인 열유속 q 에 의존함은 被覆이 없는 熱線에서의 다름이 없으나 또한 被覆物質의 성질 및 두께에 따라 서로 달라진다. 따라서 다른 모든 상태를 동일하게 유지하고 被覆이 없는 熱線과 被覆이 있는 경우를 비교하는 것이 被覆에 의한 영향을 평가하는데 편리하다. 被覆의 有無에 따른 온도의 변화에 가장 큰 영향을 주는 인자는 皮복층 유체와 被覆物質의 熱傳導率, 被覆物質의 두께이다.

Fig. 2는 수치해석에 의한 식 (8)와 (9)의 해중에서 熱線의 온도를 시간의 함수로 나타낸 것이다.

Fig. 2의 실선은 被覆이 없는 熱線에 대한 것이며 두 점선은 被覆熱線에 대한 것이다. 미리 예측할 수 있듯이 皮복층의 열전도율이 주위유체의 열전도율보다 낮은 경우 熱線의 온도는 상승되고 (Fig. 2에서 윗쪽 점선), 그 반대의 경우 온도가 裸線보다 낮아진다(Fig.

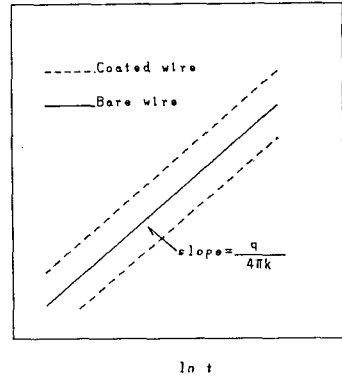


Fig. 2 Temperature rise of hot wire versus log of time

2의 아랫쪽 점선). 被覆層의 두께에 따라서도 온도의 상승 또는 강하현상은 위와 유사하게 나타난다. 다만 여기서 특기할 사항은 被覆에 의한 熱線의 온도변화가 袖線의 경우와 비교할 때 시간에 무관하게 一定한 온도차를 유지한다는 것이다. 즉 Fig. 2의 모든 점선에 평행으로 표시된다. 이는 皮복열선의 온도가

$$T(a, \tau) = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\tau}{r} + \Delta T_c \quad (10)$$

로 표시될 수 있다는 것이다. 이 식에서 ΔT_c 는 皮복 재료의 두께 및 물성치와 연관된 양으로 취급할 수 있다. 따라서 유체의 熱傳導率은 식 (7)에서와 같은 방식으로 구할 수 있다.

3. 實驗

3.1. 實驗裝置 및 測定回路

測定容器는 이재현 등(6)에서 사용된 直徑 25mm, 길이 160mm의 stainless 鋼容器이다. 이 용기內에 白金熱線, 電流端子, 測定流體의 초기溫度를 測定하기 위한 Chromel-Alumel 熱電對가 裝置된다.

白金加熱線은 길이가 약 100mm, 直徑이 30~50μm이고, 熱線을 평평하게 하고 鉛直을 이루도록 하기 위하여 3g 정도의 鉛錐를 熱線下端에 부착하였다.

非定常 熱線法에서 重要한 問題는 時間의 函數로서 加熱線의 溫度를 測定하는 것이며, 溫度는 加熱線의 抵抗을 測定함으로서 구할 수 있다. 固定抵抗 3개와 熱線을 휘이트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)로 연결하여 브리지 兩端에 定電壓 電源을 가한다. Fig. 3에 브리지 回路가 나타나 있다.

$t=0^+$ 인 瞬間에 스위치 SW를 ON시켜서 熱線에 電流가 흐르면 브리지 回路가 평형상태에 있으므로 端子

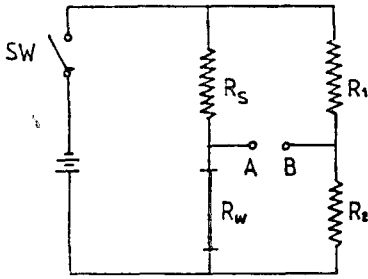


Fig. 3 Wheatstone bridge circuit

A-B 間의 電壓이 0V 이고 時間이 경과함에 따라 熱線의 抵抗이 上昇되어 A-B 間의 電壓이 上昇한다. 이 信號를 時間 t에 따라 記錄하는 것이 非正常熱線法에서 가장 重要한 것이다. 이것이 곧 時間의 變化에 따른 溫度의 變化를 나타내는 것이다. 이때 時間의 變化는 流體의 對流現象이 發生하기 前까지만 가능하므로 보통 1~2초 정도이다. 그러므로 빠른 기록장치를 필요로하며, 本 研究에서는 아날로그-디지털(analog-digital) 변환기와 마이크로 프로세서 Intel 8085를 사용하여 자료처리 시스템을 구성하였다. 測定系統圖가 Fig. 4에 나타나 있다.

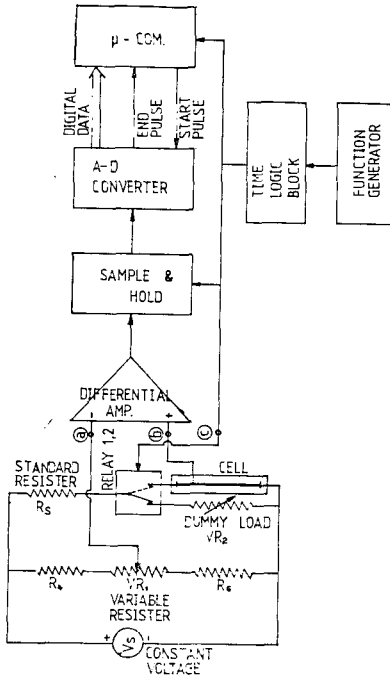


Fig. 4 Block diagram of electrical apparatus

식 (6)에서 열전도율을 알기 위하여 실측 가능한 인자들로 구성된 형태로 변형하면

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{d}{dT} \ln t$$

$$= \frac{q}{4\pi} \frac{d(\ln t)}{dV} \frac{dV}{dR_w} \frac{dR_w}{dT}$$
(11)

가 된다.

백금 가열선의 온도에 따른 저항변화는

$$R_w = R_0(1 + \beta T)$$

로 표시할 수 있으므로

$$\frac{dR_w}{dT} = R_0 \beta$$

이다. 여기서 R_0 는 0°C 에서의 백금선의 저항값, β 는 온도저항계수이다. 또한

$$\frac{dV}{dR} = \frac{V_s}{R_s + R_w}$$

$$q = \frac{V_s^2 R_w}{(R_s + R_w)^2 L}$$

이므로 결과적으로 다음 관계가 얻어진다.

$$R = \frac{1}{4\pi L} \frac{V_s^3 R_w \cdot \beta R_0}{(R_s + R_w)^3} \frac{d \ln t}{dV}$$
(12)

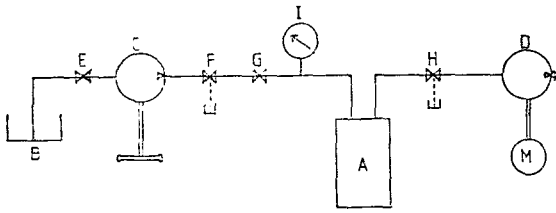
따라서 열전도율 k 를 알기 위하여서는 β , L , V_s , R_0 , R_w , R_s 과 $d \ln t / dT$ 를 측정하여야 한다.

βR_0 는 항온조의 온도를 변화시켜 저항의 온도에 따른 변화를 실측하여 알 수 있으며, 熱線의 길이 L 은 $\frac{1}{100}$ mm 精密도를 가지고 있는 버니어(Vernier)형 Traversing microscope을 사용하여 측정되었다. R_w 와 R_s 은 1mA 전류를 가하여 兩端의 電壓을 測定하고 휘이트스톤 브리지에 가하여진 V_s 를 實測하여 計算하였다. 저항 및 전압을 測定하기 위하여 精密度, 0.02%인 직류 정밀 전위차계(DC precision potentiometer)를 사용하였다. 대기 온도 및 측정용기의 溫度를 測定하기 위하여는 역시 직류 정밀 전위차계를 사용하여 열전대의 기전력을 측정하여 換算하였다. 이와같은 變數들은 靜的인 상태에서 측정이 가능하므로 비교적 精密하게 측정이 가능하지만, $d \ln t / dV$ 은 시간에 따른 전압의 변화인 非正常信號이므로 아날로그-디지털 변환기와 마이크로 컴퓨터로 구성된 자료처리 시스템을 사용하여 精密측정을 시도하였다.

3.2. 被覆이 없는 熱線으로 常溫, 高壓에서의 측정

Fig. 5에 測定用 壓力容器와 그 周邊裝置의 配列이 나타나 있다. A는 측정용기, B는 測定할 流體가 담긴 容器, C는 高壓펌프, D는 진공펌프, E, F, G, H는 밸브, I는 50MPa까지 測定할 수 있는 壓力計이다.

처음에 진공펌프를 利用하여 용기 및 관내의 공기를 排 후 測定流體를 넣는다. 정상상태가 된 후 0.1MPa



A : Measuring vessel
 B : Tank of measured liquid
 C : High pressure generating pump
 D : Vacuum pump
 E, F, G, H : High pressure precision valves
 M : Motor to vacuum

Fig. 5 Schematic diagram of arrangement

에서 5MPa씩 압력을 높이면서 35.1MPa 까지 측정한다. 고압펌프로 5MPa 을 높이면 단일압축의 결과로 온도가 조금 상승하여 정상상태가 될 때까지 약 30 분간 기다린 후 측정한다. 모든 자료는 마이크로 컴퓨터에 의하여 자동적으로 얻어져 컴퓨터의 메모리에 저장된다.

常溫, 高壓 狀態에서의 測定結果를 Table 1 에 나타내었다. 測定流體로서 메타놀(methanol), 사염화탄소(CCl₄), Freon-22 (CCl₂F₂), 글리세린(glycerin)을 사용하였으며 壓力을 0.1MPa에서 35.1MPa 까지 5.0 MPa씩 증가시켜 結果를 얻었다. 이 測定結果는 오차 해석에서 알 수 있듯이 ±1%의 정밀도를 갖는 것으로 생각된다. 기존의 열전도를 측정치⁽⁴⁾와 비교할 때 현재의 측정치는 사염화탄소의 경우 상압상태에서 4% 정도의 차이가 있다.

Table 2 는 사염화탄소의 測定例이다. 여기서 各 時間에서의 熱傳導率 값은 最小自乘法로 기울기를 구해 나가는 과정에서 얻어진 것으로 溫度와 時間의 로 그값과의 直線性을 나타내는 尺度가 된다. V는 시간에 따른 측정전압이고, v는 식 (6)으로 계산된 값이며 측정치와 계산치와의 차이는 평균 0.5%이내이고, 시간 구간별 직선성에 의한 k변화가 초기 2구간을 제외하고는 ±1%이내에 있다.

3.3. 피복에 있는 熱線으로 상온상압에서의 측정

백금선은 50μm 을 사용하였으며, 피복재료는 수지를 주성분으로 하는 전기절연성 물질로서 열전도율은 약 0.1wm/k 로 추정되며 피복층 두께는 약 3.9μm 이고, 피복층의 전기저항은 MΩ 단위 이상이다. 피복층의 두께는 전자현미경에 의하여 裸線과 피복선을 동일한 배

Table 1 Experiment results of conductivity measurement (W/mK)

| Pressure (MPa) | Glycerin (at 26°C) | Freon-22 (at 28°C) | Methanol (at 23°C) | Carbontetrachloride |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0.1 | 0.2860 | *0.0875 | 0.1951 | 0.0946(16.5°C) |
| 5.1 | 0.2869 | 0.0910 | 0.1990 | 0.0956(19.0°C) |
| 10.1 | 0.2875 | 0.0940 | 0.2008 | 0.0974(16.0°C) |
| 15.1 | 0.2890 | 0.0972 | 0.2020 | 0.0987(15.5°C) |
| 20.1 | 0.2891 | 0.1000 | 0.2051 | 0.1001(15.0°C) |
| 25.1 | 0.2892 | 0.1025 | 0.2073 | 0.1006(18.0°C) |
| 30.1 | 0.2900 | 0.1058 | 0.2099 | 0.1017(17.5°C) |
| 35.1 | 0.2908 | 0.1085 | 0.2120 | 0.1032(17.5°C) |

* Values at saturated state

Table 2 Typical measurement of Carbon-tetrachloride

| Time (ms) | Measured volt. V (V) | Calculated volt. v (V) | Thermal conductivity (W/mK) | (v-V)/v (%) |
|-----------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-------------|
| 331.37 | 2.477 | 2.4582 | | 0.764 |
| 441.17 | 3.233 | 3.2714 | 0.1122 | 1.174 |
| 551.17 | 3.980 | 3.9004 | 0.1006 | -2.041 |
| 661.17 | 4.364 | 4.4133 | 0.1055 | 1.117 |
| 771.17 | 4.830 | 4.4863 | 0.1056 | 0.337 |
| 881.17 | 5.176 | 5.2210 | 0.1062 | 0.863 |
| 991.17 | 5.505 | 5.5513 | 0.1047 | -0.788 |
| 1101.17 | 5.834 | 5.8465 | 0.1048 | 0.213 |
| 1211.17 | 6.099 | 6.1133 | 0.1048 | 0.234 |
| 1321.17 | 6.359 | 6.3568 | 0.1074 | -0.034 |
| 1431.17 | 6.603 | 6.5808 | 0.1044 | -0.338 |
| 1541.17 | 6.796 | 6.7880 | 0.1043 | -0.118 |
| 1651.17 | 7.012 | 6.9809 | 0.1040 | -0.446 |
| 1761.17 | 7.131 | 7.1612 | 0.1042 | 0.423 |
| 1871.17 | 7.331 | 7.3306 | 0.1043 | -0.006 |

P=35.1MPa
 V_s=3.03196V
 T_r=16.58°C(at 771.17 ms)
 R_s=20.000Ω
 T_{air}=13.7°C
 L=10.200cm
 R_w=21.731Ω

율로 확대촬영하여 구한 것이며 Photo 1 과 Photo 2 에 나타나 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 에 各 各 글리세린 및 엔진오일 測定에 있어서의 時間에 따른 溫度變化를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 경우 모두 測定點들은 충분히 直線에 의하여 表示되는 것으로 생각되며 被覆에 의한 영향은 약간의 溫度上昇에 따른 平行線으로 나타났다. 따라서 이들의 기울기에 의한 熱傳導率 測定이 가능하다. Table 3 와 Table 4 에 被覆된 熱線과 被覆

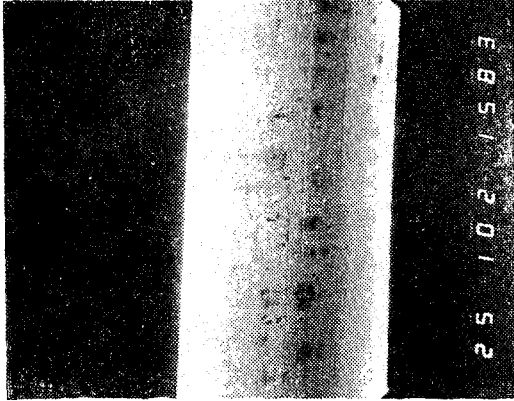


Photo 1 Photograph of bare wire

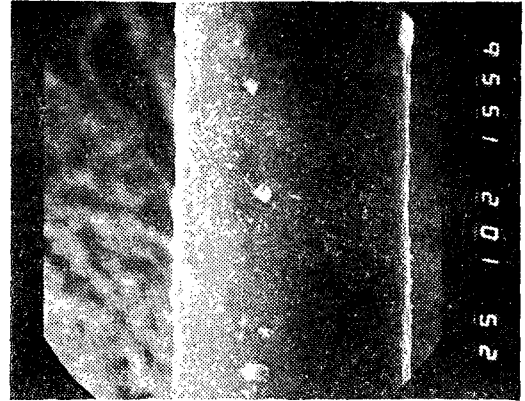


Photo 2 Photograph of coated wire

Table 3 Comparison of experimental values of thermal conductivity k of glycerin.

| Exp. No. | Bare wire | | | Coated wire | | |
|----------|-----------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|
| | Thermal conductivity (W/mK) | Deviation (%) | Reference temperature (°C) | Thermal Conductivity (W/mK) | Deviation (%) | Reference temperature (°C) |
| 1 | 0.2865 | 0.24 | 18.8 | 0.2809 | 0.31 | 16.9 |
| 2 | 0.2858 | 0.31 | 1.90 | 0.2768 | 0.40 | 16.8 |
| 3 | 0.2842 | 0.25 | 19.1 | 0.2795 | 0.28 | 16.8 |
| 4 | 0.2869 | 0.31 | 19.1 | 0.2751 | 0.21 | 18.9 |
| 5 | 0.2837 | 0.29 | 19.1 | 0.2798 | 0.35 | 18.9 |
| 6 | | | | 0.2800 | 0.36 | 16.9 |
| Average | 0.2854 | 0.28 | | 0.2787 | 0.32 | |

Table 4 Comparison of experimental values of thermal conductivity k of engine oil

| Exp. No. | Bare wire | | | Coated wire | | |
|----------|-----------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|
| | Thermal conductivity (W/mK) | Deviation (%) | Reference temperature (°C) | Thermal Conductivity (W/mK) | Deviation (%) | Reference temperature (°C) |
| 1 | 0.1362 | 0.04 | 16.7 | 0.1349 | 0.09 | 16.9 |
| 2 | 0.1356 | 0.05 | 16.7 | 0.1343 | 0.07 | 17.0 |
| 3 | 0.1355 | 0.07 | 16.7 | 0.1343 | 0.06 | 17.1 |
| 4 | 0.1354 | 0.05 | 16.7 | 0.1340 | 0.05 | 17.1 |
| Average | 0.1357 | 0.05 | | 0.1344 | 0.07 | |

되지 않은 熱線과의 熱傳導率 測定值가 비교되었다.

式 (6)의 우변의 $\frac{d \ln t}{dT}$ 항의 계수는 회로상에서 구해질 수 있는 定數에 각 因子의 측정오차로 인한 이 계수의 오차는 0.6%이다. $\frac{d \ln t}{dT}$ 는 최소자승법으로 구하여 글리세린의 경우 0.2~0.4%, 엔진오일의 경우 0.05~0.09%의 편차를 갖는다.

따라서 熱傳導率의 정밀도는 글리세린의 경우 1.0% 이내이고, 엔진오일의 경우 0.7% 이내이다. 실험으로부터 얻어진 熱傳導率값들의 표준편차는 글리세린을

측정액체로 하였을 때 피복층이 없는 熱線의 경우 0.5%, 被覆층이 있는 熱線의 경우 0.8%이고, 엔진오일을 測定액체로 하였을 때 피복층이 없는 熱線의 경우 0.2%, 被覆층이 있는 熱線의 경우 0.3%이므로 熱傳導率測定값들은 대체로 추정된 오차범위 내에 들어 있다고 볼 수 있다.

4. 精密度 및 誤差解析

誤差는 系統誤差와 無作爲誤差로 나눌 수 있다. 系

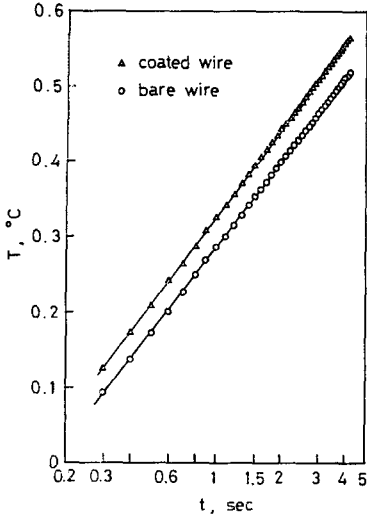


Fig. 6 Temperature rise of hot wire versus time for glycerin.

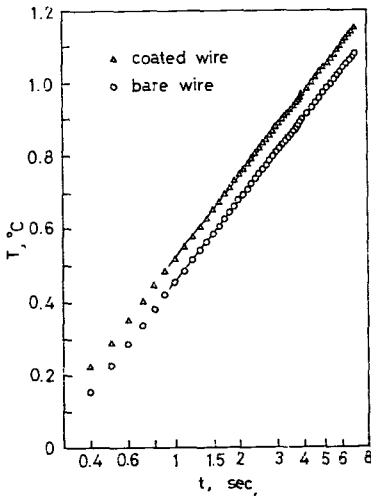


Fig. 7 Temperature rise of hot wire versus time for engine oil.

統誤차는 數學的 모델에서 發生하는 誤差, 使用機器, 機器의 補正, 實驗者의 技巧 등으로 항상 再現可能한 不正確性이고, 無作爲誤차는 實驗의 有限한 精密度로 因한 結果의 不正確性 則 反復되는 實驗에 대한 結果의 偏差의 尺度이다.

式 (6)의 誘導에는 다음과 같은 假定이 있다.

(가) 熱線은 線熱源에 가깝다.

(나) 熱線의 熱容量은 대단히 작고, 熱線의 熱傳導率은 無限히 커서 熱線內部의 溫度는 均一하다.

(다) 容器의 바깥지름은 式에 영향을 미치지 못할만큼 크다.

(라) 熱線은 無限히 길어 端末영향이 없다.

(마) 對流의 영향은 없다.

(바) 熱線과 液體와의 接觸抵抗이 없다.

이러한 假定들이 系統誤차를 유발시키는 것으로서 (가), (나), (다)의 가정은 참고문헌 (1)에서, (라)의 가정은 참고문헌 (1), (11)에서, (마)의 가정은 참고문헌 (12), (13)에서 研究되어 이를 근거로 할 때 系統誤차는 무시할 수 있다.

無作爲誤차는 精密度에 영향을 주는 것으로서 式 (12)에서 相對誤差 $\Delta k/k$ 는

$$\left| \frac{\Delta k}{k} \right| = \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + 3 \left| \frac{\Delta V_s}{V_s} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \frac{\Delta B}{B} \right| + \left| \frac{\Delta C}{C} \right| \quad (13)$$

이며, 여기서 $A = \frac{dR}{dT}$, $B = \frac{R_p}{(R_s + R_w)^3}$

$$C = \frac{d}{dV} (\ln t) \text{이다.}$$

기울기 C 를 구할 때 資料處理는 最小自乘法을 使用하였으며 이때 直線의 기울기에 대한 표준편차 σ_c 도 함께 계산하여 이것을 ΔC 로 하였다. 本 研究에서는 精密度를 높이기 위하여 모든 使用機器를 精密하게 補正하였으며, 結果적으로 本 實驗에서 얻은 精密度는 1%이내라고 할 수 있다.

5. 結 論

被覆없는 熱線으로 상온, 고압상태에서의 熱傳導率을 사염화탄소, 메타놀, 글리세린과 Freon-22에 대하여 測定하였으며, 被覆이 없는 熱線과 피복이 있는 熱線을 동일조건하에서 글리세린과 엔진오일에 대하여 熱傳導率을 測定하였다.

測定은 휘이트스톤 브리지 회로를 이용한 정전압법을 채택하여 아나로그-디지털 변환기와 마이크로프로세서를 이용하여 간이하고 精密한 디지털 測定을 可能하게 하였다. 또한 백금 가열선에 被覆을 입혀 전해물질의 경우에도 熱傳導率 測定이 可能함을 보였다.

後 記

本 研究는 韓國科學財團의 지원으로 이루어졌으며 이에 심심한 감사를 표합니다.

참고 문헌

- (1) B. Stålhane and S. Pyk, Tekn. Tidsch., Vol. 28, No. 61, p. 389, 1931.
- (2) J.K. Horrocks and E. McLaughlin, Non-steady-state measurement of liquid polyphenyls, Proc.

- Roy. Soc. Lon., Ser. A, Vol. 273, p.259, 1963.
- (3) J.J. De Groot, J. Kestin and H. Sookiazian, Instrument to measure the thermal conductivity of gases, *Physica*, Vol. 75, p.454, 1974.
- (4) Walter N. Trump, Harold W. Luebke, Lewis Fowler and Edward M. Emery, Rapid measurement of liquid thermal conductivity by the transient hot wire method, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 48, No. 1, 1977.
- (5) Y.H. Julia, J.F. Renaud and D.J. Ferrand, Device for automatic thermal conductivity measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 48, No. 12, 1977.
- (6) 이재현, 이택식, 노승탁, 비정상 열선법에 의한 Freon-12와 Freon-22의 고압상태에서의 열전도율 측정, 대한기계학회논문집 제 2권 제 1호, p.12, 1978.
- (7) J. Kestin, S.T. Ro and W. A. Wakehan, The transport properties of binary mixtures of hydrogen with CO, CO₂ and CH₄, *Physica*, Vol. 119A, p.615, 1983.
- (8) 고상근, 비정상 열선법에 의한 액체의 고압상태에서의 열전도율 측정, 서울대학교 대학원, 공학석사 학위논문, 1980.
- (9) H.S. Carslaw and J.C Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", 2nd Ed., Oxford Univ. Press, London, 1959.
- (10) 오명도, 비정상 열선법에 있어 절연피막층 영향에 대한 연구, 서울대학교 대학원, 공학석사 학위논문, 1981
- (11) W.T. Kierkus, N. Mani and J.E.S. Venart, Radial-axial transient heat conduction in a region bounded internally by a circular cylinder of finite length and applicable heat capacity, *Can. J. Phys.*, Vol. 51, p.1182, 1973
- (12) J.R. Parsons, Jr. and J.C. Mulligan, Transient free convection from a suddenly heated horizontal wire, *J. Heat Transfer*, *Trans. ASME.*, Vol. 100, p.423, 1978.
- (13) 최만수, 유정열, 노승탁, 수직열선 근처의 과도 열전달에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 논문집 제 7권 제 4호, p.461 1983.