

<論 文>

불꽃試驗用 標準試片의 熱擴散係數

車京玉* · 李寬洙** · 李興周***

(1983年 5月 11日 接受)

The Thermal Diffusivity of Standard Pieces for Spark Test

Kyung-Ok Cha, Kwan-Soo Lee and Hung Joo Lee

Abstract

The thermal diffusivity of one of the series of standard pieces for spark test are determined by the flash method. The standard pieces are composed with carbon steels, structural carbon steels, alloy steels and high speed tool steels.

In order to compute the thermal conductivity of the standard pieces, their specific heats are measured by a differential scanning calorimeter. The thermal conductivities are calculated from the data of specific heat, density and thermal diffusivity.

To increase the accuracy of data for the thermal diffusivity by data reduction excursion method in the flash method, the governing heat diffusion equation, which is closely described experimental conditions with the finite pulse and the heat loss from the sample surfaces, is solved. In this analysis an integral transform is used.

記 號 說 明

a : 試片半徑(m)
 A_{nn} : 式 (15b)에서 정의된 값
 B_{nn} : 式 (15c)에서 정의된 값
 C : 比熱(J/kg·k)
 h_i : 輻射熱傳達係數
 H_i : 式(7)에서 정의된 값
 I_{nn} : 式(15a)에서 정의된 값
 J_0 : 第1種 Bessel 函數
 k : 熱傳導係數(W/m·k)
 l : 試片의 두께(m)
 $N(\lambda_n)$: 式 (12a)에서 정의된 norm
 $N(\beta_n)$: 式 (12b)에서 정의된 norm
 $q(r, z, t)$: 式 (13)에서 정의된 熱源函數熱(W/m³)
 Q : 熱源으로 부터 試片前面에 공급된 單位面積當

에너지(J/m³)
 \bar{q} : 式 (9b)에서 정의된 $q(r, z, t)$ 의 積分變換
 r : 半徑座標(m)
 $R_n(r)$: 式 (5a)에서 정의된 固有函數
 t : 時間(s)
 $t_{1/2}$: Half time(s)
 $t_{1/2}^{measured}$: 實驗에서 Pulse 가 발사된 때로부터 측정된 half time
 t_{max} : Maximum time(s)
 $t_{max}^{measured}$: 實驗에서 Pulse 가 발사된 때로부터 측정된 maximumtime
 t_c : 補正時間(s)
 t_p : Xenon flash tube 에서 發生된 熱源의 最大強 度時間
 T_∞ : 試片의 주위온도(K)
 u : 式 (3)에서 정의된 溫度(K)
 \bar{u} : 式 (9a)에서 정의된 u 의 積分變換
 V : 式 (17)에서 정의된 無次元溫度

* 正會員, 明知大學 機械工學科
 ** 正會員, 漢陽大學校 機械工學科
 *** 正會員, 陸軍士官學校 兵器工學科

- z : 軸方向座標(m)
- $Z_n(z)$: 式 (5b)에서 정의된 固有函數
- α : 熱擴散係數(m²/s)
- β_n : 式 (6b)에서 계산되는 固有值
- σ : Stefan-Boltzman 常數(5.669×10⁻⁸ W/m²·k)
- ϵ : 表面 放射率
- λ_n : 式 (6a)에서 계산되는 固有值
- ρ : 密度(kg/m³)
- $\delta(z)$: Kronecker delta 函數

下添字 i

- 1 : 試片의 前面
- 2 : 試片의 後面
- 3 : 試片의 半徑面

1. 緒 論

金屬의 性質은 組織에 영향을 받고 그 組織은 材料를 構成하는 化學成分에 따라 크게 달라진다. 그렇기 때문에 材料의 性質을 정확히 알기 위해서는 材料를 構成하고 있는 元素의 상대적인 量 및 상호간 결합상태를 分析하여야 한다. 이러한 일련의 分析過程은 材料의 성질을 정확히 규정하는데 많은 도움을 주는 것은 사실이지만 分析이 複雜하고 어려움이 많을 뿐만 아니라, 많은 시간이 소요되므로 製品을 生産하고 加工하는 작업현장에서는 사용하기 간편하고 신속한 測定法이 요구되는 것이다. 이러한 要求條件을 충족시키는 方法의 하나로 불꽃試驗이 사용되는데 이것은 精密한 化學分析은 못되지만 숙련공에 의해서 比較的 정확하게 材料의 成分을 區別할 수 있기 때문에¹⁾ 生産工程에 많이 利用될 것으로 전망된다.

불꽃試驗은 材料의 成分을 정확히 알고 있는 標準試片과 化學成分을 알고져 하는 未知의 試片을 研削숫돌이나 電氣的인 스파크(spark)에 의하여 동시에 불꽃이 튀게 한 후 불꽃의 모양과 색깔을 相互比較하여 成分을 알아내는 것이다. 불꽃試驗을 잘 할려면 우선 標準試片의 成分과 熱物性值를 정확히 알아야 한다. 왜냐하면 불꽃을 튀게 할 때 받는 熱에 의하여 불꽃의 모양과 색깔이 바뀌어 질 수 있기 때문이다²⁾.

本 研究에서는 鐵鋼材料의 成分을 分析하는데 많이 사용되는 純鐵, 機械構造用炭素鋼, 炭素工具鋼, 合金工具鋼 및 高連成工具鋼의 熱擴散係數와 比熱을 測定하였다. 閃光法으로 熱擴散係數를 求할 때는 正確性을

높이기 위하여 試驗時 熱源때문에 발생하는 finite pulse time effect와 試片의 표면에서 그 주위로 放出하는 열손실을 고려한 熱傳達 支配方程式을 解析한다.

2. 理論 解析

閃光法은 均質材料로 만들어진 圓板모양의 얇은 試片 前面에 순간적으로 強烈한 熱을 加한 후 試片後面에서 증가되는 溫度의 時間변화를 기록하고, 이것을 데이터(data)消去法으로 材料의 熱物性值를 얻어내는 方法이다³⁾. Fig. 1에서 보는 바와 같이 시편두께가 l , 반경 a 인 試片 前面($z=0$)에 加해진 熱流速이 試片 前面에 측정되고, 試片의 表面에서 熱損失을 고려하면, 試片의 에너지方程式은

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{q(r, z, t)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{1}$$

이고, 初期 및 境界條件은

$$t=0 \text{ 일때 } u=0 \tag{2a}$$

$$z=0 \text{ 일때 } -k \frac{\partial u}{\partial z} + h_1 u = 0 \tag{2b}$$

$$z=l \text{ 일때 } k \frac{\partial u}{\partial z} + h_2 u = 0 \tag{2c}$$

$$r=a \text{ 일때 } k \frac{\partial u}{\partial r} + h_3 u = 0 \tag{2d}$$

$$r=0 \text{ 일때 } u = \text{finite}$$

이다. 여기서

$$u = T(r, z, t) - T_\infty \tag{3}$$

이고, h_i 는 輻射熱傳達係數로써

$$h_i = 4\sigma\epsilon_i T_\infty^3 (i=1, 2, 3) \tag{4}$$

이다⁴⁾. 위 問題의 解를 integral transform으로 解析

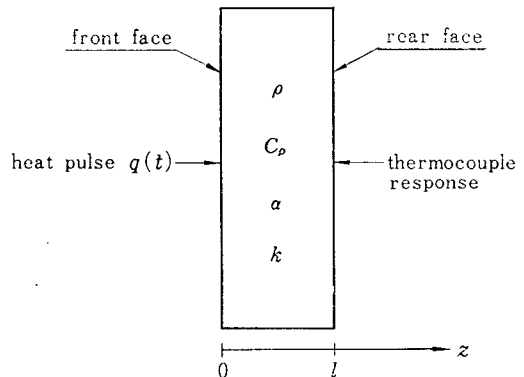


Fig. 1 Schematic diagram of sample

하기 위하여 먼저 固有函數(eigenfunction)를 求하여 야 한다. 方程式 (1)과 式 (2)에 해당하는 固有值 問題(eigenvalue problem)를 풀면 다음과 같은 固有函數가 얻어진다.⁵⁾

$$R_n(r) = J_0(\lambda_n r) \quad (5a)$$

$$Z_n(z) = \beta_n \cos(\beta_n z) + H_1 \sin(\beta_n z) \quad (5b)$$

여기서 λ_n 과 β_m 은

$$-\lambda_n J_1(\lambda_n a) + H_3 J_0(\lambda_n a) = 0 \quad (6a)$$

$$\tan(\beta_m l) = \frac{\beta_m (H_1 + H_2)}{\beta_m^2 + H_1 \cdot H_2} \quad (6b)$$

의 根이고,

$$H_i = \frac{h_i}{k} \quad (i=1, 2, 3) \quad (7)$$

이다. 이 固有函數를 利用하여 式 (1)과 式 (2)를 integral transform 한다. 즉 式 (1)과 式 (2)의 兩邊에 $rR_n(r) \cdot Z_m(z)$ 을 곱한 後에 r 과 z 에 關하여 積分하면 다음과 같다.

$$\frac{d\bar{u}}{dt} + \alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)\bar{u} = \frac{\alpha}{k} \bar{q} \quad (8a)$$

$$t=0 \text{ 일 때 } \bar{u}=0 \quad (8b)$$

여기서

$$\bar{u} = \int_{z=0}^l \int_{r=0}^a r R_n(r) \cdot Z_m(z) u dr dz \quad (9a)$$

$$\bar{q} = \int_{z=0}^l \int_{r=0}^a r R_n(r) \cdot Z_m(z) q dr dz \quad (9b)$$

이다. 方程式 (8)을 풀면 解는 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{u} = \frac{\alpha}{k} \exp[-\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)t] \frac{1}{\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)} \left\{ \exp[\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)t] \bar{q} - \int_0^t \exp[\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)t] d\bar{q} \right\} \quad (10)$$

式 (8)을 inverse integral transform 하면 $u(r, z, t)$ 는 다음과 같다.

$$u(r, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_n(r) \cdot Z_m(z)}{N(\lambda_n) \cdot N(\beta_m)} \bar{u} \quad (11)$$

여기서

$$\frac{1}{N(\lambda_n)} = \frac{2}{J_0^2(\lambda_n a)} \cdot \frac{\lambda_n^2}{a^2(H_3^2 + \lambda_n^2)} \quad (12a)$$

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = 2 \left[(\beta_m^2 + H_1^2) \left(l + \frac{H_2}{\beta_m^2 + H_2^2} \right) + H_1 \right]^{-1} \quad (12b)$$

이다.

本 實驗에서 熱源으로 Xenon flash lamp을 사용하였기 때문에 熱源의 函數를 다음과 같이 놓을 수 있다.⁶⁾

$$q(r, z, t) = Q \delta(z) \frac{t}{t_p^2} e^{-t/t_p} \quad (13)$$

여기서 t_p 는 xenon flash lamp에 의해서 發生된 熱의

peak-time으로서, photodiode을 이용하여 測定된다. 式 (13)과 같은 熱源을 사용할때 式 (11)은 다음과 같다.

$$u(r, z, t) = Q a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_n(r)}{N(\lambda_n)} \cdot \frac{Z_m(z)}{N(\beta_m)} e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)t} \cdot \frac{\alpha}{k} I_{mn} \quad (14)$$

여기서

$$I_{mn} = \frac{A_{mn}}{\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)} \left\{ \frac{t}{t_p} e^{\beta_m n t} - \frac{1}{B_{mn} \cdot t_p^2} \left[(e^{\beta_m n t} - 1) \left(1 + \frac{1}{B_{mn} \cdot t_p} \right) - \frac{t}{t_p} e^{\beta_m n t} \right] \right\} \quad (15a)$$

$$A_{mn} = \frac{\beta_m}{\lambda_n} J_1(\lambda_n \cdot a) \quad (15b)$$

$$B_{mn} = \alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2) - \frac{1}{t_p} \quad (15c)$$

이다. 따라서 試片의 後面中心溫度는

$$u(0, l, t) = Q a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{Z_m(l)}{N(\lambda_n) \cdot N(\beta_m)} e^{-\alpha(\lambda_n^2 + \beta_m^2)t} \cdot \frac{\alpha}{k} I_{mn} \quad (16)$$

이고, 이 溫度를 試片後面의 最大上昇溫度 $u_{\max} = u(0, l, t_{\max})$ 로 無次元化 하면 V 는 다음과 같다.

$$V = \frac{u(0, l, t)}{u(0, l, t_{\max})} \quad (17)$$

여기서 t 는 實驗에서 測定되는 時間으로서 閃光이 투사된 때로부터 試片後面 中央部の 溫度가 上昇하는데 所要된 시간이고, t_{\max} 는 試片後面 中央部の 溫度가 最大로 上昇하는데 所要되는 시간이다.

3. 實 驗

3.1. 實驗方式에 對한 考察

理論解析에서 求한 式 (17)을 이용하여 熱擴散係數 α 를 求하기 위해서는 우선 試片의 두께 l 을 測定한 후 閃光法으로 half time($t_{1/2}$)과 maximum time(t_{\max})을 測定하여야 할뿐만아니라 ϵ 의 값도 알아야 한다. 式 (17)을 가지고 data 消去法으로 α 를 求하고자 할 때에는 $\epsilon, t, t_{1/2}$ 및 t_{\max} 는 앞에서 說明한 값을 사용하고 V 의 값은 0.5로 한다. 왜냐하면 $V=0.5$ 에서 시간과 溫度의 測定上 誤差가 data 消去에 의한 熱擴散係數 결정에 최소의 영향을 미치기 때문이다⁷⁾.

ϵ 의 값은 文獻(8)에서 求한 값 0.08을 편의상 사용하였다. 왜냐하면 실험이 20°C에서 실시하였고, Table 3에서 보는 바와같이 實驗이 비교적 짧은 시간에 종결되므로 試片表面의 熱損失에 의한 영향이 거의 무시

될 수 있기 때문이다⁹⁾. 그러나 高溫에서는 輻射에 의한 熱損失이 크기 때문에 적합한 ϵ 의 값을 사용하여야 한다.

3.2. 試驗片

本 實驗에 使用된 試片은 日本山本 科學工具研究社에서 製作한 "D" type의 불꽃試驗用 標準試片인 材料를 가지고 얇은 圓板 모양으로 精密加工한 後 熱擴散係數 測定 試驗試片을 만들었다. 또한 이 標準片의 化學成分은 Table 1과 같으며, 試驗試片의 크기는 Table 2와 같다.

3.3. 實驗裝置

實驗은 20°C에서 실시 하였으며 試片의 熱擴散係數를 測定하기 위한 閃光法의 實驗裝置로서는 얇은 圓板모양의 試片을 세워 놓을 수 있는 holder와 試片前面에 強熱한 熱을 加할 수 있는 熱源, 그리고 試片의 後面에서 上昇하는 溫度를 測定할 수 있는 probe와 그 溫度를 記錄하고 유지하는 記錄裝置 및 이들을 制御할 수 있는 制御裝置로 大別된다.

本 研究의 實驗에서 使用된 實驗裝置의 概略圖는 Fig. 2와 같으며 熱源으로는 xenan flash tube가 사용 되었다. PET4032 microcomputer로 1000 μ sec마다 sampling 하여 측정 한 이 tube의 heat pulse peak time은 0.33 millisecond 이고, 그에 대한 波形은 Fig. 3과 같다.

3.4. 實驗方法

(1) 熱擴散係數

試片의 後面 中央部의 溫度를 측정하는 probe으로 는 Omega Engineering Inc.에서 제작한 20 μ m의 직경을 갖는 chromel-alumel thermocouple이 사용되었으며, 이 thermocouple은 spot welder에 의하여 試片後面 中心에 接觸되었다. 熱電對에서 溫度上昇으로 발생된 signal은 Tokyo Baldwin Co.에서 제작한 gain 20000이 되고, cut-off frequency가 10Hz 되는 model MD-1032 DC amplifier와 low-pass filter를 사용하여 增幅되었고, 不必要한 noise signal은 제거되었다. 이 증폭된 signal은 Nicholet Instrument Co.에서 만든 model 2090-30/206-2 digital storage oscilloscope에

Table 1 Chemical composition of specimen (weight percent)

Material	Sam- ple No	Spec. of STDS*		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	V	Co
		KS	JIS										
Pure iron	1	SUY	SUY	0.02	0.24	0.22	0.005	0.007	0.02	0.02			
Structural and carbon steel	2-1	SM10C	S10C	0.10	0.19	0.43	0.009	0.010	0.056	0.16			
	2-2	SM15C	S15C	0.16	0.29	0.49	0.012	0.090	0.018	0.015			
	2-3	SM20C	S20C	0.21	0.27	0.41	0.009	0.019	0.020	0.016			
	2-4	SM30C	S30C	0.32	0.22	0.70	0.017	0.021	0.016	0.032			
	2-5	SM40C	S40C	0.42	0.23	0.75	0.018	0.013	0.016	0.024			
	2-6	SM50C	S50C	0.49	0.27	0.83	0.015	0.023	0.051	0.093			
Carbon tool steel	3-1	STC3	SK2	1.16	0.24	0.46	0.013	0.017	0.051	0.087			
	3-2	STC5	SK5	0.88	0.28	0.36	0.020	0.013	0.044	0.093			
Alloy tool steel	4-1	STS2	SKS2	1.07	0.29	0.59	0.017	0.005		0.62	1.03		
	4-2	STS3	SKS3	0.97	0.23	1.01	0.019	0.010		0.88	0.75		
	4-3	STS4	SKS4	0.52	0.34	0.47	0.017	0.008		0.89	0.85		
High speed tool steel	5-1	SKH2	SKH2	0.80	0.32	0.31	0.018	0.013		4.05	7.50	0.94	
	5-2	SKH4A	SKH4A	0.80	0.26	0.28	0.021	0.004		4.14	17.56	1.22	9.59

* Spec of STDS=Specification of standards

Table 2 Dimension and weight of samples

Sample No	Thermal diffusivity		Specific heat		
	Diameter(m)	Thickness(m)	Diameter(m)	Thickness(m)	Weight(kg)
1	0.0127	8.8×10^{-4}	6.1×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.93×10^{-4}
2-1	0.0127	8.8×10^{-4}	6.1×10^{-3}	9.4×10^{-4}	2.06×10^{-4}
2-2	0.0128	9.0×10^{-4}	6.1×10^{-3}	8.8×10^{-4}	2.00×10^{-4}
2-3	0.0129	9.2×10^{-4}	6.1×10^{-3}	9.0×10^{-4}	2.05×10^{-4}
2-4	0.0128	8.6×10^{-4}	6.17×10^{-3}	8.8×10^{-4}	2.06×10^{-4}
2-5	0.0129	8.6×10^{-4}	6.1×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.91×10^{-4}
2-6	0.0126	8.4×10^{-4}	6.19×10^{-3}	8.8×10^{-4}	2.07×10^{-4}
3-1	0.0124	8.2×10^{-4}	6.08×10^{-3}	8.7×10^{-4}	1.96×10^{-4}
3-2	0.0127	8.4×10^{-4}	6.33×10^{-3}	8.6×10^{-4}	2.11×10^{-4}
4-1	0.0128	8.8×10^{-4}	6.21×10^{-3}	8.8×10^{-4}	2.11×10^{-4}
4-2	0.0128	9.2×10^{-4}	6.17×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.97×10^{-4}
4-3	0.0128	8.2×10^{-4}	6.09×10^{-3}	8.0×10^{-4}	1.84×10^{-4}
5-1	0.0127	8.8×10^{-4}	6.14×10^{-3}	8.5×10^{-4}	2.18×10^{-4}
5-2	0.0128	9.2×10^{-4}	6.16×10^{-3}	8.9×10^{-4}	2.35×10^{-4}

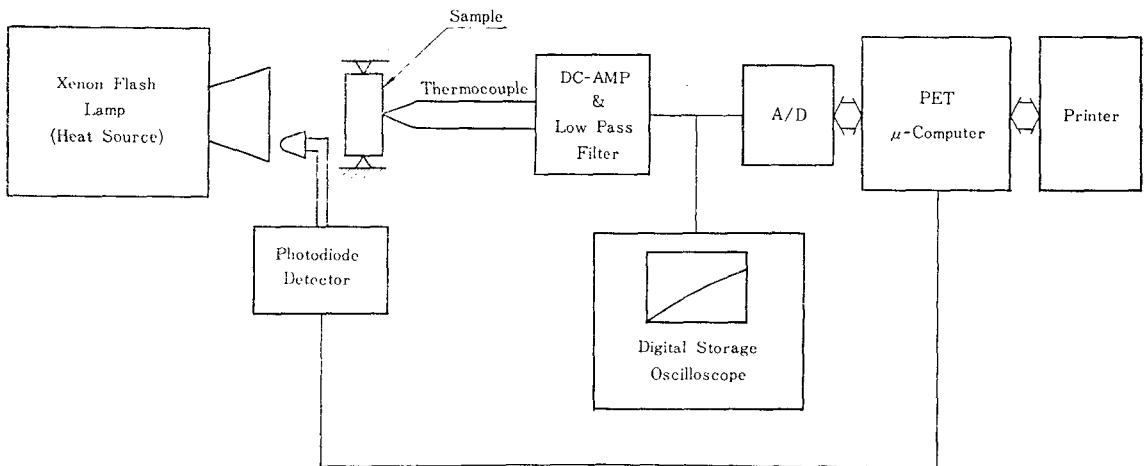


Fig. 2 The schematic drawing of experimental apparatus

나타난 signal 을 flexydisk 에 저장시키면서 monitoring 될과 동시에 Connecticut Microcomputer Inc.의 model AIM-16 A/D converter 에 의하여 analog-signal 을 digital 로 바뀌어 PET 4032 microcomputer 으로 1000 μ sec 마다 sampling 되었다. A/D converter 는 8Bit로 서 channel 당 maximum conversion time 이 100 μ sec

이다.

microcomputer 로 sampling 할 때에는 xenon flash tube 에서 pulse 가 발생한 시간을 sampling 시작시간 으로 하였다. 이때 sampling 한 digital data 를 電算 處理하여 試片後面 中央部의 溫度가 最大值에 도달하 는데 소요된 maximum time 과 最大值의 誤에 도달하

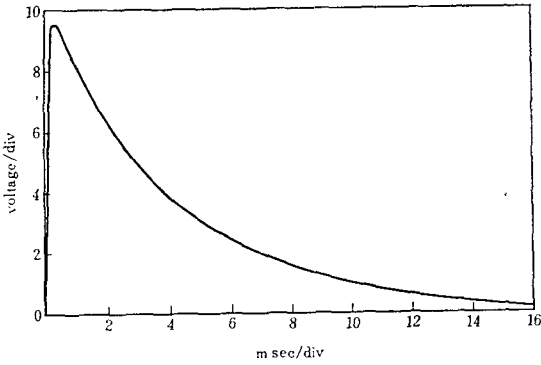


Fig. 3 Photodiode output of the xenon flash tube ($t_p=0.33m/sec$)

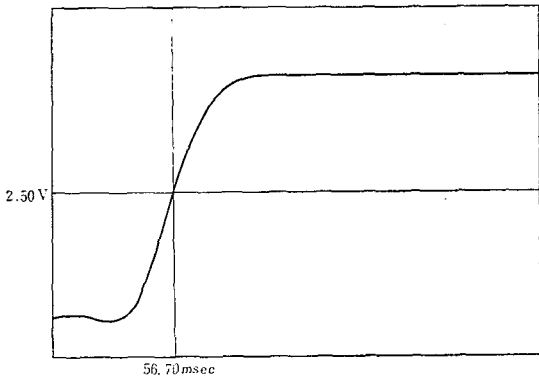


Fig. 4 Temperature rise Vs time for SKS3 sample 는데 所要된 half time 을 各各 求하였다.

Fig. 4는 SKS-3의 half time을 보인 것으로써 56.70ms는 PET 4032 microcomputer에 의하여 測定된 maximum를 나타내는 4.497volt와 base-line을 나타내는 0.503 volt의 差에 半인 1.997volt가 base-line에서 上昇한 값 즉, 2.50 volt를 나타낼 때에 시간을 보이는 half-time이다. 이처럼 halftime과 maximum time은 試片後面 中央部의 溫度上昇과 下降을 xenon flash tube에서 microcomputer에 의하여 sampling adress 22000개를 pulse가 발사된 때로부터 1000 μ sec의 간격으로 sampling한 data를 tape에 수록한 후 이들 data로부터 전산처리하여 求하였다. 이와같이 試片의 熱擴散係數 測定時 사용된 各試片의 後面 中央에서 시간에 따라 上昇한 溫度를 相互比較할 수 있도록 storage oscilloscope의 CRT에 나타낸 것 중에서 機械構造用炭素鋼 S10C, S15C, S40C 및 S50C의 溫度上昇 軌跡을 하나의 例로 Fig. 5에 보였다.

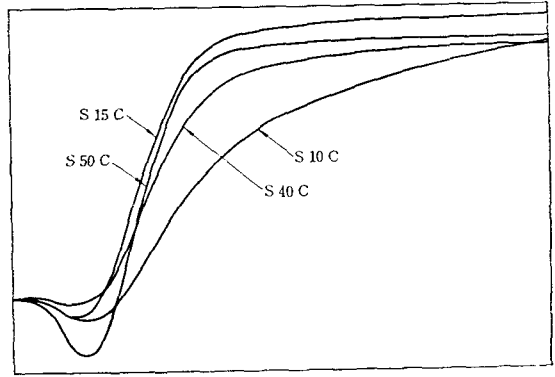
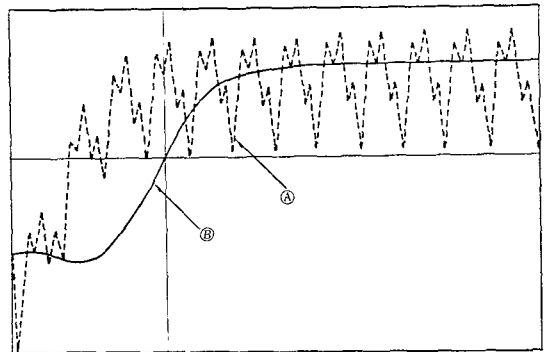


Fig. 5 Various shape of temperature rise showing different half time for S10C, S15C, S40C and S50C

Fig. 4와 Fig. 5에서 thermocouple output signal이 시작점으로 부터 下降하였다가 上昇하는 이유는 다음과 같다. Thermocouple output을 100Hz의 Cut-off frequency를 가지는 low-pass filter를 통과시켰을 때 波形(A)와 10Hz의 low-pass filter를 통과시켰을 때 波形(B)를 동시에 나타낸 Fig. 6에서 波形(A)가 波形(B)보다 filtering frequency가 높으므로 실제파형에 더욱 가까울 것이다. 波形(A)에서 signal이 갑자기 떨어져 deep valley가 생기는 이유는 xenon flash tube에서 heat pulse가 발생할 때 순간적으로 매우 큰 電流가 flash tube의 filament에 흐르므로 tube 부근에는 磁氣場(magnetic field)의 變化가 순간적으로 크게 일어난다. 따라서 thermocouple도 一種의 導線 역할을 하므로 이 때 誘導起電力(induced electromotive force)이 발생한다. 그러므로 試片의 溫度上昇에 기인한 起



(A) : With 100Hz Cut-off frequency
(B) : With 10Hz Cut-off frequency

Fig. 6 Filtered thermocouple output

電力 보다 dominant 하게 誘導起電力效果가 amplifier 로 증폭되어 나타내게 된다. 그러나 heat pulse 가 순간적으로 發生 하였다가 指數函數의으로 소멸하므로 이 誘導起電力의 대부분은 heat pulse 의 peak time 인 0.33 msec 정도에서 없어진다. 왜냐하면 heat pulse 에 의한 tube 부근의 磁氣場의 급격한 변화는 heat pulse 의 peak time 보다 적은 시간에 일어나기 때문이다. deep valley 가 생긴 이후에는 溫度上昇에 의한 起電力만 나타나서 정상적인 上昇曲線이 溫度만을 나타내게 된다. 위와 같이 波形이 10Hz low-pass filter 을 통과하면 60Hz line noise 가 없어지고 위의 deep valley 도 좀더 완만하게 나타내는 동시에 遲延效果(delay effect)가 나타나 波形Ⓐ와 같이 얻어지게 된다. Fig. 7에서 10Hz 로 filtering 한 波形과 photodiode 에 의한 heat pulse 에 해당하는 波形을 나타내었는데 여기에서 위의 사실이 명확함을 알 수 있다. 이와같은 實驗下에서 밝혀진 사실을 근거로 하여 Fig. 4의 SKS-3에 대한 half time 50.70msec 는 실제로 補正時間을 빼주어야만 정확한 SKS-3의 half time 이 求하여진다. 補正時間에 대해서 고찰하여 보면 다음과 같다. 測定된 half time 은 thermocouple 의 時定數(time constant)와 low-pass filter 의 遲延效果 때문에 filter 를 사용할 때에는 intensity 의 變化率을 나타내는 slope 이 (+)가 될때 trigger 를 시작하였으므로 試片後面 中央部의 溫度가 實際上 昇하는 시간 보다 먼저 시간을 計算하므로 이 補正時間과 遲延時間을 합한 시간만큼 측정된 시간에서 빼주어야 한다. Fig. 7에서 보이는 것처럼 波形Ⓐ으로 부터 trigger 에 의한 補正時間과 filtering 에 의한 遲延時間을 합한 修正時間 만큼 PET4032 micro-computer

에 의한 測定時間에서 빼야만 한다. Trigger 에 의한 補正時間은 약 30msec 로 쉽게 알 수 있지만 filter delay time 은 정확히 알 수 없다. 그러나 다음과 같이 두가지 方法으로 修正時間 t_c 를 산출할 수 있다.

(i) 式 (17)을 利用하는 方法

α 를 알고 있을 때 式 (17)에서 $t_{1/2}$, t_{max} , $t_{1/2}^{measured} - t_c$, $t_{max}^{measured} - t_c$ 로 代入하고, $V=0.5$ 로 놓으면 t_c 만이 未知數로 남게된다. 왜냐하면 $t_{1/2}^{measured}$ 와 $t_{max}^{measured}$ 는 PET4032 microcomputer 에 의해서 sampling 하게 되면 half time 과 maximum time 이 測定되고, t_c 는 trigger 에 의한 補正時間과 filtering 에 의한 遲延時間의 合인 未知의 값이기 때문이다. 이 未知數 t_c 는 computer 에 의한 data 消去法으로 求할 수 있다.

(ii) Parker 式을 利用하는 方法

α 를 알고 있을 때 Parker³⁾의 熱擴散係數 算出式 $\alpha=0.139l^2/t_{1/2}$ 에서 實驗으로 부터 測定된 試片의 두께 l 를 사용하면 $t_{1/2}$ 를 求할 수 있고, 이 $t_{1/2}$ 를 實驗으로 測定된 $t_{1/2}^{measured}$ 에서 빼어주면 修正時間 t_c 를 求할 수 있다.

本 研究에서는 SKS 3를 기준재료로 선정하여 文獻 (10)으로 부터 求한 熱擴散係數 $1.10 \times 10^{-5} m^2/s$ 를 가지고 앞의 두가지 方法으로 修正時間을 산출한 결과 式 (17)을 이용하였을 때는 45.36msec 이었고, Parker 式을 利用할 때는 46.01msec 이었다.

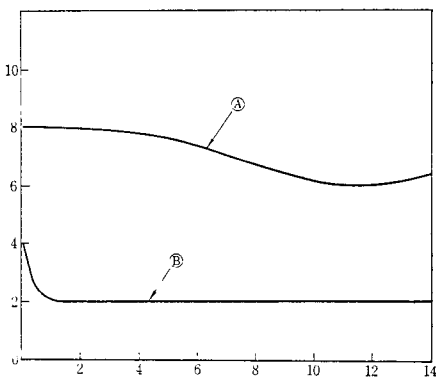
(2) 比 熱

比熱 測定은 differential scanning calorimeter 에 의하여 측정하였다. 즉 aluminum pan 에 약 5mm 직경과 1mm 의 두께를 갖는 disk 형의 標準試片인 Saphire 를 넣어 voltage 의 變化를 측정하고 이 voltage 의 變化에 따른 溫度를 기준으로 동일한 aluminum pan 에 측정하고자 하는 試片을 넣고 voltage 의 變化를 saphire 의 voltage 變化값과 相互比較한 후 saphire 의 比熱값으로 부터 兩者의 무게 비율을 가지고 換算하였다.

3.5. 實驗結果

Pulse 가 발사된 때로부터 試片後面 中央部에서 溫度가 上昇하는 時間을 PET 4032 microcomputer 로 sampling 하여 測定된 $t_{1/2}^{measured}$ 와 $t_{max}^{measured}$ 에서 式 (17) 과 Parker 의 熱擴散係數 算出式으로 求한 修正時間을 $t_{1/2}$ 와 t_{max} 및 이들을 이용하여 求한 α 와 k 를 表로 나타내면 Table 3과 같다. Table 3에서 熱傳導係數는 $k=\alpha\rho c$ 의 關係式으로 부터 計算하였다.

式 (17)에 各 試片 $t_{1/2}$ 와 t_{max} 를 代入하고 $V=0.5$ 로 하면 computer 에 의한 data 消去法으로 求한 α 값과



(A : 5m sec/div, 1V/div)
(B : 5m sec/div, 50mV/div)

Fig. 7 ㉑ : Thermocouple output with 10Hz filter
㉒ : Trigger pulse

Table 3 The thermophysical properties of materials used in samples at 293K

Sample No	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	$\rho \times c_p$ (J/m ³ ·K)	Measured time*		With FPTE+ and HL++				Without FPTE and HL				α Deviation (%)
				$t_{1/2}$ (msec)	t_{max} (msec)	$t_{1/2}$ (sec)	t_{max} (sec)	k (W/m·K)	a (m ² /sec)	$t_{1/2}$ (sec)	t_{max} (sec)	k (W/m·K)	a (m ² /sec)	
1	7854	446	3.50	50.70	5901.70	5.34 × 10 ⁻³	5856.34 × 10 ⁻³	80.70	23.058 × 10 ⁻⁶	4.69 × 10 ⁻³	5.85	80.22	22.9 × 10 ⁻⁶	0.43
2-1	7848	451	3.54	101.60	6336.80	56.24 × 10 ⁻³	6291.44 × 10 ⁻³	6.76	1.932 × 10 ⁻⁶	55.59 × 10 ⁻³	6.29	6.83	1.93 × 10 ⁻⁶	0
2-2	7840	454	3.56	55.55	8225.25	10.19 × 10 ⁻³	8179.89 × 10 ⁻³	42.02	11.803 × 10 ⁻⁶	9.54 × 10 ⁻³	8.18	41.72	11.8 × 10 ⁻⁶	0
2-3	7840	457	3.58	57.80	7504.90	12.44 × 10 ⁻³	7459.54 × 10 ⁻³	35.70	9.973 × 10 ⁻⁶	11.79 × 10 ⁻³	7.45	35.72	9.97 × 10 ⁻⁶	0
2-4	7834	458	3.58	63.55	6086.25	18.19 × 10 ⁻³	6040 × 10 ⁻³	20.95	5.853 × 10 ⁻⁶	17.54 × 10 ⁻³	6.04	21.03	5.86 × 10 ⁻⁶	-0.17
2-5	7829	465	3.64	61.60	7595.60	16.24 × 10 ⁻³	7550.24 × 10 ⁻³	23.98	6.588 × 10 ⁻⁶	15.59 × 10 ⁻³	7.55	23.99	6.59 × 10 ⁻⁶	-0.15
2-6	7822	466	3.64	55.90	6417.25	10.54 × 10 ⁻³	6371.89 × 10 ⁻³	36.11	9.921 × 10 ⁻⁶	9.89 × 10 ⁻³	6.37	36.08	9.91 × 10 ⁻⁶	0.10
3-1	7788	479	3.74	68.10	7393.10	22.74 × 10 ⁻³	7347 × 10 ⁻³	15.74	4.224 × 10 ⁻⁶	22.09 × 10 ⁻³	7.34	15.78	4.23 × 10 ⁻⁶	-0.23
3-2	7806	468	3.64	55.00	5817.85	9.64 × 10 ⁻³	5772.49 × 10 ⁻³	39.87	10.924 × 10 ⁻⁶	8.99 × 10 ⁻³	1.77	39.82	10.1 × 10 ⁻⁶	0
4-1	7947	471	3.74	53.90	5747.05	8.54 × 10 ⁻³	5701.69 × 10 ⁻³	51.11	13.667 × 10 ⁻⁶	7.89 × 10 ⁻³	5.70	50.90	13.6 × 10 ⁻⁶	0
4-2	7876	475	3.74	56.70	6745.85	11.34 × 10 ⁻³	6700.49 × 10 ⁻³	41.15	11.003 × 10 ⁻⁶	10.68 × 10 ⁻³	6.69	41.15	11.0 × 10 ⁻⁶	0
4-3	7910	460	3.64	52.62	7001.25	7.26 × 10 ⁻³	6955.89 × 10 ⁻³	51.36	14.11 × 10 ⁻⁶	6.64 × 10 ⁻³	6.95	50.94	14.0 × 10 ⁻⁶	-0.71
5-1	8674	402	3.48	60.60	8225.30	15.24 × 10 ⁻³	8179.94 × 10 ⁻³	25.64	7.370 × 10 ⁻⁶	14.59 × 10 ⁻³	8.17	23.43	7.37 × 10 ⁻⁶	0
5-2	8892	396	3.52	62.15	6170.85	16.79 × 10 ⁻³	6125.49 × 10 ⁻³	25.64	7.282 × 10 ⁻⁶	16.14 × 10 ⁻³	6.12	25.63	7.28 × 10 ⁻⁶	0

* Time was measured in experiment
 ** Correction time determined by eq(17) was used ($t_c=45.36msec$).
 *** Correction time determined by parker's equation of $\alpha=0.139t^2/t_{1/2}$ was used ($t_c=46.01msec$)
 **** Thermal diffusivity deviation by percent based on equation (17).
 + FPTE=Finite Pulse Time Effect
 ++ HL=Heat Loss

Parker의 熱擴散係數 算出式으로 求한 α 값을 相互比較할 수 있도록 Table 3에 함께 提示하였다. Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 式 (17)과 Parker의 式으로 求한 α 값의 差異가 크지 않는 이유는 finite pulse time effect가 修正時間 45.36msec와 46.01msec의 차이로 相互補完 되었고 試片의 熱損失이 적기 때문이다.

試片의 熱損失이 적은 이유는 Fig. 4와 Table 3에서 볼 수 있는 바와같이 試片은 溫度上昇 後 後 一定한 溫度를 유지하고 있기 때문이다. 即 試片의 溫度上昇 後 오랜동안 일정한 溫度를 유지하고 있으므로 常溫에서 실시한 本 實驗에서는 試片의 熱損失은 無視될 수 있었다. 그러나 實驗이 高溫에서 수행 되었다면 試片의 熱損失은 式 (4)에서 볼 수 있는 바와같이 크기 때문에 式 (17)에 큰 영향을 미치므로 반드시 고려되어야 할 것이다.

4. 結 論

純鐵, 機械構造用炭素鋼, 炭素工具鋼, 合金工具鋼 및 高速度工具鋼의 熱物性值(熱擴散係數, 比熱, 熱傳導係數)를 求한 本 研究의 結果를 요약하면 다음과 같다.

1. 試片前面에 xenon flash tube의 熱源이 作用하고 試片의 前後面과 半徑面에서 열손실이 있는 材料에 대한 熱擴散方程式을 해석 하였기 때문에 computer에 의한 data 消去法으로 熱擴散係數을 求할 때 finite pulse time effect에 의한 誤差를 줄일 수 있으며, 輻射熱損失이 많은 高溫에서도 高真空裝置를 가진 閃光法 熱擴散係數 測定裝置를 사용하므로써 정확히 열확산계수를 求할 수 있다.

2. 常溫에서 鐵鋼의 熱擴散係數 측정을 위하여 閃光法으로 實驗을 수행할 때는 鐵鋼種類의 放射率 ϵ 이 작고, 實溫度가 낮기 때문에 試片表面에서 일어나는 輻射熱損失을 無視할 수 있다.

3. 熱源으로 xenon flash를 사용할 때에는 half time과 pulse의 peak time의 比가 작을 경우에는 finite pulse time effect를 반드시 고려하여야 한다. 그러나 기준재료로 선정하여 修正時間을 補償하면 그 效果를 감소시킬 수 있다.

4. 純鐵의 熱擴散係數는 $2.30 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 인 반면에 鋼에서는 첨가원소의 量에 따라 $1.93 \times 10^{-6} \sim 1.41 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 의 다양한 값을 갖는다.

5. 比熱은 $396 \text{W}/\text{m} \cdot \text{k}$ 에서 $476 \text{W}/\text{m} \cdot \text{k}$ 까지 각각의 鋼에서 첨가원소에 따라 相異한 값을 가지며 텅스텐

(tungsten)이 첨가됨에 따라 그 값은 현저히 감소한다. 그러나 密度는 텅스텐이 첨가됨에 따라 크게 증가한다.

6. 純鐵과 鋼의 體積熱容量(valumetric heat capacity, ρc)는 $3.61 \times 10^{-6} \text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{k}$ 에서 $\pm 0.31 \times 10^{-6} \text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{k}$ 의 범위내에 있다.

References

1. L. David and Shangle, "Spark Testing of Ferrous Alloys", American Society for Metal, Metals Handbook, 8th Edition, Vol 11, pp. 271-276, 1976.
2. Yamamoto Scientific Tool Laboratory Co. Ltd, Catalogue, "Standard Piece for Spark Test."
3. W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Bulter, and G. L. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity", Heat Capacity, and Thermal Conductivity, J. Appl. phys. 32(9), pp.1679-1684, 1961.
4. H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 2nd Edition, pp.21, 1959.
5. M. N. Ozisik, Heat Conduction, John Wiley, Chap2. 3and 13, 1980.
6. K.B. Larson and K. Koyama, "Correction for Finite Pulse Time Effects in very thin Samples using the Flash Method of Measuring Thermal Diffusivity", J. Appl. Vol 38(2), pp.465-474, 1967.
7. H. J.Lee, "Thermal Diffusivity in Layered and Dispered Composites", Ph. D. Thesis, Purdue University, 1975.
8. R.C. Birkebak, J.P. Hartnett, and R.G. Eckert, ASME Second Symposium on Thermophysical Properties, Princeton, N.J., pp.563-74, 1962.
9. R.L. Rudkin, R.J. Jenkins, and W.J. Parker, "Thermal Diffusivity Measurements of Metals at High Temperatures", The Review of Scientific instruments, Vol (33) pp.21-23, 1962.
10. K.S. Lee, "A study of the Measurement of Thermal Diffusivity of Layered Composite Materials by Flash Method", Ph. D. Thesis, Han Yang University, 1981.