

고체표면에 도포한 도료 박막의 열전도율과 열확산율의 측정법

김은영* · 박수천** · 김병문*** · 이덕봉****
(1998년 4월 8일 접수)

The Measurement Method of Thermal Conductivity and Diffusivity of Thin Paint Layer Sprayed on Solid Surface

Eun-young Kim, Soo-Chun Park, Byung-Mun Kim and Doug-Bong Lee

Key Words: Thermal Conductivity(열전도율), Thermal Diffusivity(열확산율, 온도전도율), Thin Black Paint Layer(흑색도료층), Absorptivity(흡수율)

Abstract

The thermal conductivity λ_b , thermal diffusivity α_b of the thin black paint layer sprayed on solid surface and absorptivity a for laser beam are measured by applying a non-contact measurement method of the thermophysical properties of solids. The values of $a=0.67$, $\lambda_b=1.45$ W/mK and $\alpha_b=1.24 \times 10^{-6}$ m²/s are obtained for the sprayed layer thickness $z_b \approx 40$ μ m. Furthermore, for the $z_b \approx 24$ μ m thick layers which are formed by rubbing with a glass rod after spraying, the values of $a=0.73$, $\lambda_b=1.85$ W/mK and $\alpha_b=1.09 \times 10^{-6}$ m²/s are obtained. It is also shown that the present thermal diffusivity α_b for $z_b \approx 40$ μ m is about 30~80% larger than those obtained by Araki et al. for the thicker layer $z_b \approx 150 \sim 248$ μ m. This method could be applied to the measurement of thermophysical properties of thin layer on solids.

1. 서 론

최근의 재료 개발은 눈부신 발전을 거듭하고 있으며, 특히 주위 환경에 대한 내구성을 향상시키기 위한 여러 가지 방법이 제안되고 있다. 주위 조건의 급격한 변화에 대하여 사용 기기의 내구성을 좋게 하면서 그 자체의 기능을 유지하기 위한 방법 중, 기본 재질의 표면에 얇은 막을 입히는 피막법이 많은 관심을 모으고 있다. 실제로 적용되고 있는 대표적인 예로서 대기권 진입 시의 항공기의 표면이나, 내연기관 내의 연소실 내

부에서 내열성이 요구되는 일부 표면 및 피스톤 상단부 등이 있다. 그러나, 피막 층에 사용되는 재료로서 C&C, Epoxy수지 등이 있고, Bulk상태에서의 측정된 몇 가지 대표적인 열물성치는 자료로서 제공되어 있으나 층분치 못하며⁽¹⁾, 기본 재료에 피막 된 상태에서 측정된 값과는 차이가 있으리라 생각된다. 또한, 최근의 열물성치 측정법도 측정의 편리성과 신뢰도에 있어서 많은 발전을 보이고 있다. 그 가운데 투명시료와 같이 반사율이 큰 시료의 열물성치를 레이저후래쉬법 등의 비접촉법으로 측정하는 경우, 시료 표면에는 레이저 광의 흡수율 좋게 하기 위한 흡수층(흑색 도료층)을 만든다. 이 도료 층의 두께는 일반적으로 수십 μ m 정도이며, 시료의 두께(수 mm정도)와 비교하면 상당히 얇다. 이 때문에 종래의 측정에서는 시료의 열물성치에 미치는 흡수층의 영향을 고려하지 않거나 무시하였으며, 도

* 회원, 시립인천전문대학 기계과
** 회원, 충주산업대학교 기계공학과
*** 큐수대학교
**** 회원, 시립인천대학교 기계공학과

료 층의 피막 상태에서의 물성치도 명확하지 않았다.

근래, 荒木⁽¹⁾, ⁽²⁾은 레이저후래쉬법으로 층상 시료의 열확산율 측정에서 있어서 예상되는 문제점을 검토하여, 시료와 그 표면에 형성시킨 탄소도료(dry graphite)의 흡수율을 2층 시료로 간주한 해석과 실험을 실시하였다. 그 결과 동(copper)과 같은 고열확산율의 시료는 측정치에 미치는 흡수율의 영향이 크다는 것과, 탄소도료의 열확산율은 $6.47 \times 10^{-7} \sim 9.37 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 이라는 것을 보고하였다. 그러나, 이 측정값은 도료 층의 두께가 150~248 μm 로 상당히 두껍고, 밀도가 $0.78 \times 10^{-3} \sim 0.95 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{m}^3$ 의 조건이며, 일반적으로 사용되는 수십 μm 의 경우에도 이러한 값들이 타당할 것인가를 검토할 필요가 있다.

2. 측정 방법

앞에서 기술한 피막층 및 후색 도료층(박막)의 열전도율과 열확산율의 동시측정을 위한 원리를 확립하기 위하여, 저자가 제안한 고체의 열물성치 측정법의 일부를 적용하였다. 여기서, 피막층은 후색 도료 스프레이로 50 μm 이하의 얇은 막을 만들었으며, 도료층 밑의 기준재료는 물성치를 알고 있는 것을 사용함으로써 2층 모델을 제작하였다. 본 측정법과 이전에 제안한 방법⁽³⁾과의 차이점은

(1) 열물성치를 알고 있는 시료와 열물성치를 모르는 후색 도료로 구성되는 2층 모델을 적용, 주어진 범위의 변수에 대하여 수치해석을 행한 결과, 도료층 표면 온도의 시간에 따른 변화를 나타내는 기준곡선군이 얻어진다.

(2) 도료층 표면온도의 실험 측정치를 무차원화한 값이 과정 (1)에서 준비한 기준곡선군과 일치하도록 열전도율, 열확산율 및 후색도료층의 레이저광 흡수율을 조정하는 프로그램으로 가장 적합한 값을 산출한다.

본 측정법의 원리로부터 후색도료층의 열전도율 λ_b 와 열확산율 α_b 를 동시에 구할 수가 있다. 여기서 과정 (2)에서는 우선 레이저광의 흡수율 a 를 가정하고, 그 흡수율에 대한 최적값 $\lambda_{b,ac}$, $\alpha_{b,ac}$ (ac : 아크릴 수지) 및 $\lambda_{b,vc}$, $\alpha_{b,vc}$ (vc : 열화비닐 수지)를 구한다.

그리고 흡수율 a 를 변화시키며 같은 방법을 반복하면 $\lambda_{b,ac}$, $\alpha_{b,ac}$ 와 $\lambda_{b,vc}$, $\alpha_{b,vc}$ 를 구한다. 다음 식

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{|\lambda_{b,ac} - \lambda_{b,vc}|}{\lambda_{b,vc}} + \frac{|\alpha_{b,ac} - \alpha_{b,vc}|}{\alpha_{b,ac}} \right) \quad (1)$$

로 주어진 각 물성치의 오차 평균값 δ 가 최소로 되었을 때의 a , λ_b , α_b 의 최종 값을 다음 식으로부터 구한다.

$$\lambda_b = \frac{1}{2} (\lambda_{b,ac} + \lambda_{b,vc}) \quad (2)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{2} (\alpha_{b,ac} + \alpha_{b,vc}) \quad (3)$$

3. 수치 해석

3.1 물리 모델

본 측정법에서 도료피막층의 열물성치를 측정하는데 필요한 수치해석 모델을 Fig.1에 나타내었으며, 이에 대한 수치해석의 계산 scheme은 시간미분에 대해 음해법을 또한 공간미분에 대해서는 중심차분법을 적용하고 시간mesh와 공간mesh에는 부등mesh를 이용하였다. 온도 T_∞ 의 정지된 공기 중에 놓여진 열전도율 λ_b , 열확산율 α_b , 반경 r_s , 두께 z_b 의 기준시료 표면 위에 열전도율 λ_b , 열확산율 α_b , 두께 z_b 의 후색도료층이 있다. 레이저 광에 의해 도료표면층이 다음 식 (4)로 나타내는 조건에 의해 스텝상 국소적 가열을 한다.

$$q(r) = q_0 \exp\{-2.3(r/r^*)^2\} \quad (4)$$

이 조건은 4절에서 설명하는 레이저광 출력 분포 측정 결과로부터 얻어진 것이다. 여기서, 가열 반경 r^* 는 열유속 값이 최대가 되는 중심값 즉, $q(0) = q_0$ 의 10%에 해당하는 지점까지의 반경을 나타낸다.

3.2 기초식 및 조건

본 실험에 사용된 시료에서, 10mm×10mm의 후색도료 부분의 중심에서 각 변까지의 최단거리(5mm)는 레이저광 외 가열반경(0.71mm)의 약 7배이며, 본 측정의 가열시간인 약 4초 이내에서

는 도료의 외측 부분의 온도가 상승하지 않는다. 따라서 본 실험에서는 제작이 용이한 시료(Fig. 6)를 제작하였으며, 이 때 흑색도료층과 고체시료에 대한 무차원 비정상 열전도 방정식은 다음 식으로 주어진다.

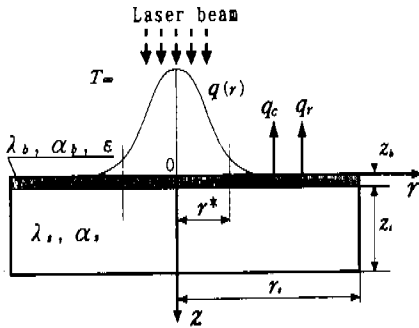


Fig.1 Physical model for numerical calculation.

$$\frac{\partial \theta_b}{\partial F_o} = P_a \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \theta_b}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta_b}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 \theta_b}{\partial Z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial F_o} = \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_s}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Z^2} \quad (6)$$

초기 조건은 전 영역이 주위 공기 온도 T_∞ 와 같도록 주었다. 경계 조건으로는, 대칭축상 ($R=0$), 측면 ($R=R_s$), 뒷면 ($Z=Z_b+Z_s$)에서 단열 조건을, 또한 표면 ($Z=0$)에서는, 레이저 광에 의한 가열과 흑색도료층 내부로의 열전도 및 주위 공간으로의 자연대류(q_c)와 복사(q_r)로 인한 방열과의 열평형을 다음 식으로 주었다.

$$-P_\lambda \frac{\partial \theta_b}{\partial Z} \Big|_{z=0} = \exp(-2.3R^2) - Bi \theta_w - Rc \theta_w \quad (7)$$

여기서, $\theta_w = \theta_b(F_o, R, 0)$ 이다. 또한, 도료층과 시료의 경계면 ($Z=Z_b$)에서는, 열유속과 온도의 연속성으로부터 다음과 같은 접합 조건을 주었다.

$$P_\lambda \frac{\partial \theta_b}{\partial Z} \Big|_{z=Z_b} = \frac{\partial \theta_s}{\partial Z} \Big|_{z=Z_b}, \quad \theta_b(F_o, R, Z_b) = \theta_s(F_o, R, Z_b) \quad (8)$$

식 (5)~(8)에 포함된 무차원 값들의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{T - T_\infty}{q_p r^* / \lambda_s}, \quad F_o = \frac{\alpha_s t}{r^{*2}}, \\ R &= \frac{r}{r^*}, \quad Z = \frac{z}{r^*} \\ P_\lambda &= \frac{\lambda_b}{\lambda_s}, \quad P_a = \frac{\alpha_b}{\alpha_s}, \\ B_i &= \frac{h r^*}{\lambda_s}, \quad Rc = \frac{4 T_\infty^3 \epsilon \sigma r^*}{\lambda_s} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, F_o 는 Fourier수, t 는 시간, P_λ 는 열전도율비, P_a 는 열확산율비, B_i 는 Biot수, h 는 열전달계수, Rc 는 전도-복사변수, ϵ 는 흑색도료의 전복사율, σ 는 Stefan-Boltzmann정수($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)을 나타낸다. 여기서, 본 논문에서 평가하는 흑색도료층의 레이저 광에 대한 흡수율 a 는 알곤 이온 레이저의 가시광(파장 514.5mm)에 대한 단색 흡수율이며, 식 (9)의 Rc 에 포함된 전복사율 ϵ 과는 다른 값이다.

3.3 계산 조건

본 측정에서는 도료층의 열물성치 측정에 있어서 기준 재료로 비교적 열물성치가 정확한 아크릴수지($\lambda_s=0.21\text{W/mK}$, $\alpha_s=0.21 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)⁽⁵⁶⁾와 열화비닐수지($\lambda_s=0.16\text{W/mK}$, $\alpha_s=0.21 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)⁽⁶⁰⁾을 택하였다. 이들의 물성치와 탄소도료에 관한 荒木⁽¹⁾, ⁽²⁾의 측정결과를 참고하여 열확산율비와 열전도율비는 $P_a=1, 3, 5, 8, 15$, $P_\lambda=1, 3, 6, 10, 15$ 로 주었다. 또한, 실험조건을 고려하여 Biot수, 전도-복사변수, 흑색도료층 및 시료의 무차원 두께에 대해서는 $B_i=(0.5\sim 1.5) \times 10^{-1}$, $Rc=(1.5\sim 5.6) \times 10^{-2}$, $Z_b=3.5 \times 10^2$, $Z_s=14.1$ 을 적용하였다. 여기서, 이들 값은 $h=15\text{W/m}^2\text{K}$, $r^*=0.71\text{mm}$, $T_\infty=293\text{K}$, $\epsilon=0.98$, $Z_b=25, 40$

μm를 참고로 한 것이다.

3.4 기준 곡선

이전 논문⁽⁴⁾에서 나타낸 바와 같이 무차원 표면온도 $\theta_w = \theta_b(Fo, R, o)$ 에 포함된 q_b 를 다음에 나타내는 정미평균열유속

$$q_n = \frac{1}{\pi r^* \cdot 2} \int_0^{r^*} [q(r) - h(T_w - T_\infty) - \epsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4)] 2\pi r dr \quad (10)$$

으로 대치한 $\theta_n (= \theta_w q_b / q_n)$ 를 도입하고 가열반경내의 이 온도에 대한 면적평균값을 다음 식,

$$I_{th} = \frac{1}{\pi r^* \cdot 2} \int_0^{R^*} \theta_n 2\pi R dR \quad (11)$$

로부터 구하면, Bi 수와 Rc 의 범위에 의존하지 않는 Fo 와의 관계곡선⁽³⁾, 즉 기준곡선을 얻을 수 있다.

Fig. 2는 앞에서 기술한 변수 P_a, P_λ, Z_b 의 각 경우에 따라 계산된 50개의 기준곡선 중 일부를 나타내고 있다. 여기서, 흑색도료의 열확산율 및 열전도율을 산출하기 위하여 각 기준곡선을 Fo 수의 다항식 $G(Fo)$ 로 근사시킨 결과를 산출 프로그램에 사전에 입력시켜 놓는다. 또한 열확산율을 구하기 위하여 다항식으로부터 $Fo=0 \sim Fo_1$ 구간에 대한 적분값을 구하는 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{th} = \int_0^{Fo_1} I_{th} dFo \approx \int_0^{Fo_1} G(Fo) dFo \quad (12)$$

4. 실험

Fig. 3은 본 측정 방법에 사용된 실험장치의 개요도를 나타낸 것이다. 서터⁽³⁾이 부착된 파장 514.5mm, 가열반경 0.71mm의 알곤이온레이저⁽⁴⁾에 의해 시료⁽¹⁾의 흑색도료표면을 국소 가열한다. 레이저의 출력은 조절기⁽⁵⁾로 조정하며, 측정

전후에 powermeter⁽²⁾와 전압측정기⁽¹⁰⁾로 확인하였다. 레이저의 출력정도는 0.1mW이며, 가열전후에서의 출력변동율은 ±1%이다. 시료표면 온도 분포의 시간적 변화는 표면 2차원 측정이 가능한 적외선 온도계 및 부착장치^{(6)~(9)}를 사용하여 1/30초의 실시간 속도로 측정하였다. 온도계의 측정 범위는 20~40℃로 설정하였으며, 이 때 온도 분해도의 사양은 0.1K이지만 실제로는 0.2K의 변동이 보였다. 또한, 온도계의 측정면 분해도는 실제 길이로 0.1mm×0.1mm이다.

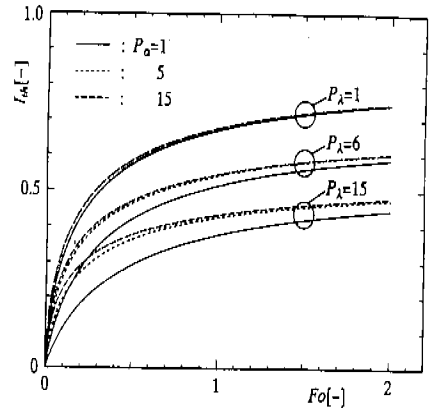


Fig. 2 Nondimensional mean surface temperature variation.

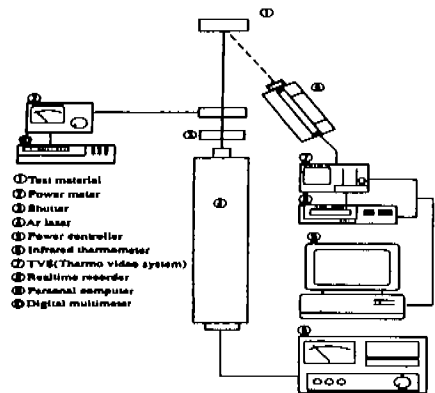


Fig. 3 Schematic of experiment apparatus.

본 실험을 시작하기 전에 알곤이온레이저광의 출력 분포를 측정할 간단한 장치의 개요도를 Fig. 4에 나타내었다. Photodiode(浜松photonics製

S-1133)와 직경 $10\mu\text{m}$ 의 pinhole을 장착한 이 장치의 측정시료와 동일한 거리에 위치한 3차원 이동장치에 고정시켰다. Fig. 5는 측정결과로서, pinhole을 레이저광의 중심점으로부터 각각 수직(\square) 및 수평(\triangle)으로 $20\mu\text{m}$ 씩 왕복이동 시키면서 출력전압 V 를 측정한 후, 중심 최대값 V_p 와의 비로 나타낸 것이다. 이 결과로부터 레이저광의 출력분포에 대한 가우스분포식(4)을 얻을 수 있다.

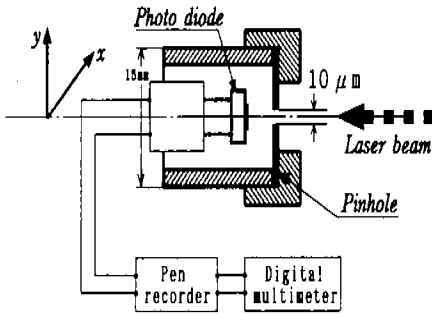


Fig. 4 Apparatus for measuring laser beam intensity.

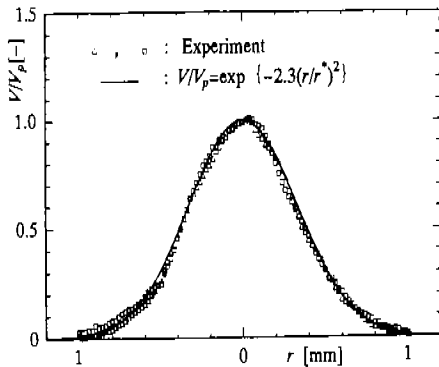


Fig. 5 Distribution of laser beam intensity.

Fig. 6은 본 실험에 사용된 시료의 개요도이다. 흑색도료의 열물성치를 평가하기 위해 기준재료로서 아크릴 수지 및 염화비닐 수지를 사용하였으며, 기준재료의 중심부 $10 \times 10\text{mm}^2$ 의 범위를 흑색도료 스프레이를 사용하여 도료층 박막을 만들었다. 본 연구에서는 도료층의 열물성치 및 레이저 광에 대한 정미흡수율을 평가하였으며, 도

료층 내부의 밀도변화 및 표면상태가 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 즉, 스프레이로 분무시켜 도포한 상태(Fig. 7(a), $Z_b \approx 40\mu\text{m}$)와 분무 부착시킨 후 유리봉으로 표면을 경화시킨 상태((Fig. 7(b), $Z_b \approx 24\mu\text{m}$)에 대하여 가열 실험을 하였다. 상태(a)는 사진에서 보이듯이 표면이 거칠며 내부가 다공질 구조로 되어 있다고 추측된다. 그러나, 상태(b)는 표면이 비교적 평균화되었으며, 두 가지 조건에 대해 도료층의 무게 및 두께 측정으로부터 밀도가 커졌음을 알 수 있다(5절, 표1). 참고로 본 실험에서 사용된 흑색도료는 내열용 스프레이로 성분은 실리콘 수지(밀도: $1.88 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 열전도율: 0.5W/mK)⁽⁷⁾, 안료(graphite; 밀도: $2.26 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 비열: 0.693kJ/kgK , 열전도율: 16W/mK)⁽⁸⁾, 유기용제로 되어 있다.

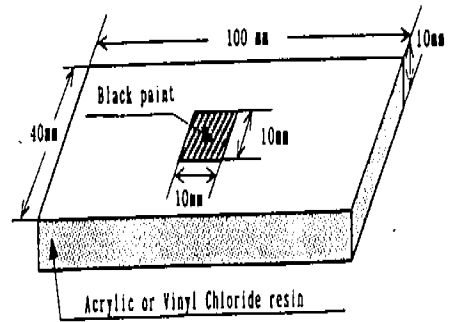
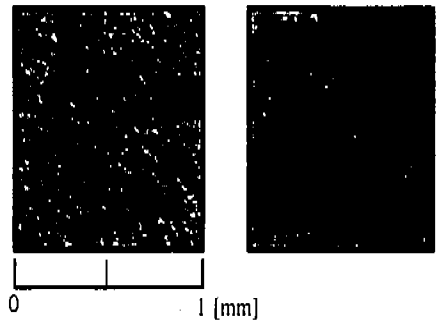


Fig. 6 Schematic of test piece.



(a) Sprayed (b) Sprayed and rubbed

Fig. 7 Surface of black paint layer.

5. 열물성치의 산출과정 및 레이저광 흡수율

도료층의 열물성치를 산출하기 위한 실험결과 정리에 있어서, 레이저 광에 대한 도료 층의 흡수율 a 의 가정치를 정할 필요가 있다. 가정치 a 와 레이저출력 및 표면온도 측정 결과로부터 식(10)에서 정의한 정미열유속 q_w 을 계산할 수 있다. 또한 표면온도의 측정 결과에 대하여 식(11)에 대응하는 평균표면온도

$$i_{ex} = \frac{1}{\pi r^*{}^2} \int_0^{r^*} \Delta T_w 2\pi r dr \quad (13)$$

을 구할 수 있으며, i_{ex} 의 시간 t 에 대한 변화를 다항식으로 구한 것을 $g(t)$ 라 하면 식(12)에 대하여 다음 식

$$a_{ex} = \int_0^t i_{ex} dt \approx \int_0^t g(t) dt \quad (14)$$

을 대응시킬 수 있다.

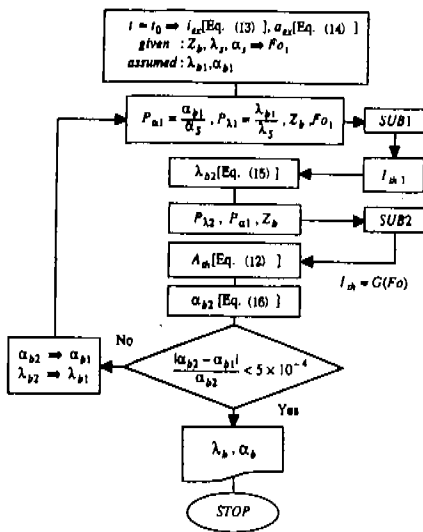


Fig. 8 Flow chart for evaluating thermal conductivity and diffusivity of thin black paint layer.

이상의 조건과, 가정된 흡수율 a 를 적용하여 흑색도료층의 열전도율과 열확산율을 산출하는 과정을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에 산출과정을 간단히 설명하면,

(1) 측정시간 t 와 그 시간에서의 평균표면온도 i_{ex} , 그리고 시간에 대한 적분값 a_{ex} , 기준재료의 열물성치 λ_s, α_s , 무차원 시간 F_{O_1} , 도료 층의 무차원 두께 Z_b , 앞으로 도료 층 열물성치의 가정치 $\lambda_{b1}, \alpha_{b1}$ 을 초기 조건으로 주어지면 열물성치비를 나타내는 $P_{\lambda 1}$ 와 $P_{\alpha 1}$ 이 결정된다.

(2) 부프로그램 SUB1에 의해서, $P_{\lambda 1}$ 와 $P_{\alpha 1}$ 에 대응하며, 시간 F_{O_1} 에서의 무차원 평균온도 I_{th1} 을 보간법으로 구한다.

(3) 가열실험으로부터 계산되는 i_{ex} 와 과정(2)에서 구해진 I_{th1} 와의 관계를 나타내는 다음 식

$$\lambda_{b2} = \frac{I_{th1} r^*}{i_{ex}} P_{\lambda 1} \quad (15)$$

으로 도료층 열전도율의 첫 번째 근사값을 구할 수 있다.

(4) SUB2로부터 $P_{\lambda 2}(= \lambda_{b2} / \lambda_s), P_{\alpha 1}, Z_b$ 을 만족하는 다항식 $I_{th} = G(F_{O_1})$ 을 보간법으로 구한 후, 식(12)에 의하여 적분값 A_{th2} 를 구할 수 있다.

(5) 식(14)로부터 계산되는 a_{ex} 와 과정(4)의 결과 A_{th2} 의 관계를 나타내는 다음 식(16)

$$\alpha_{b2} = \frac{A_{th2}}{(\lambda_s / r^*{}^3) a_{ex}} P_{\alpha 1} \quad (16)$$

으로 도료 층 열확산율의 첫 번째 근사값을 구할 수 있다.

(6) 과정(1)에서 가정한 α_{b1} 과 과정(5)에서 구해진 α_{b2} 의 관계, 즉 상대오차가 주어진 조건을 만족할 때까지 α_{b1} 에 α_{b2} 를 대치하여 상기의 과정 (1)~(5)를 반복한다.

위에서, SUB1은 Fig.2에 표시한 master plot에

서 반복과정 중의 파라메타 $P_{\lambda 1}$, $P_{\alpha 1}$ 에 대하여 시간 Fo 에서의 무차원 평균표면온도 I_{01} 를 내삽법으로 구하는 부프로그램이며, SUB2는 반복과정 중의 파라메타 $P_{\lambda 2}(= \lambda_{b2}/\lambda_s)$, $P_{\alpha 1}$, Z_b 에 대한 master plot을 smoothing화하는 다항식 근사함수 $G(Fo)$ [Fo 에 관한 4차식]의 계수를 구해 식(12)를 기준으로 그 적분값 A_{b2} 을 구하는 부프로그램이다.

본 실험에서는, 산출과정(1)에서 초기조건으로 주어지는 표면온도의 측정 시간을 $t=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ 초 ($Fo=0.36, 0.48, 0.60, 0.71$)로 하여, 각 시간에 대해 산출된 λ_b , α_b 의 평균값을 흡수율 a 에서의 최종값으로 출력된다. 또한 2점에서 언급한 바와 같이, 아크릴 수지 염화비닐 수지를 기준재료로하여 각 조건을 만족하는 흡수율 a 도 결정된다.

Table 1은 본 측정방법에 의한 결과이다. S_A 와 S_B 는 각각 Fig. 7의 (a)의 (b)의 조건을 의미한다. 여기서 밀도 ρ_b 는 $30 \times 30 \times 0.5 \text{mm}^3$ 의 아크릴 필름 표면 $10 \times 10 \text{mm}^2$ 에 두께 z_b 로 흑색도료를 도포한 후 질량을 측정된 결과로부터 구한 값이다. 단, 표에 나타난 밀도 값은 $z_b=41, 45, 58 \mu\text{m}$ 와, $z_b=14, 26, 32, 45 \mu\text{m}$ 의 조건에 대하여 구한 결과의 평균값이다. 여기서, S_B 의 조건에서 구한 밀도가 Graphite의 값($2.36 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)⁽⁸⁾에 가깝다는 것을 알 수 있다. S_A 와 비교할 때, S_B 의 열전도율 λ_b 는 약 30% 증가하고, 열확산율 α_b 는 약 15% 감소하며, 흡수율 a 는 약 10% 증가한 것을 알 수 있다.

Table 1 Absorptivity, thermal conductivity and diffusivity of thin paint layer.

Condition	$z_b [\mu\text{m}]$	$\rho_b [\text{kg/m}^3]$	$a [-]$	$\lambda_b [\text{W/mK}]$	$\alpha_b [\text{m}^2/\text{s}]$
S_A	40	1.6×10^3	0.67	1.45	1.24×10^{-6}
S_B	24	2.3×10^3	0.73	1.85	1.09×10^{-6}

현재의 경우, 단순히 도료를 분무 도포한 경우 (a)와 비교하였을 때, 분무 도포한 층을 유리봉으로 문지른 경우(b)가 레이저광의 흡수율이 크게 나타난 원인은 해명되지 않았으며 차후의 연구과제라고 생각된다.

여기서, 두 조건(S_A 와 S_B)에서의 비열이 동일하다고 가정할 경우, 밀도, 열전도율, 열확산율의 관계를 나타내는 다음 식,

$$\frac{\alpha_{bA}}{\alpha_{bB}} = \frac{\lambda_{bA} \rho_{bB}}{\lambda_{bB} \rho_{bA}} \quad (17)$$

로부터 계산하면, 좌측 항의 값은 1.14, 우측 항의 값은 1.13이 얻어짐에 따라 본 측정 결과에 타당성이 있다고 생각된다. 즉, 단위질량당으로 정의된 비열에 관해서는 기계적인 압축의 영향을 받지 않는 것으로 생각하기 때문에 식 (17)이 성립하며, 밀도 변화에 따른 흑색도료층의 열전도율 λ_b 와 열확산율 α_b 의 실측치는 이러한 관계를 거의 만족하고 물성치에 미치는 기계적인 압축의 영향을 타당하게 반영하고 있다. 荒木^{(1), (2)}은, 기준시료 표면에 두께 $z_b = 150 \sim 248 \mu\text{m}$ 으로 도포한 조건에서의 결과로서, $\alpha_b = (6.74 \sim 9.37) \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 를 얻었다.

측정결과와 타당성을 검증하기 위하여, Fig. 9에 가열 개시 후 3초에 측정된 도료표면온도분포 θ_s 에 대한 실험값과 수치해석 값을 비교한 결과를 나타내었다. 이것은 조건 S_A 에서의 결과이며, 기호 “○”와 “△”는 각각 아크릴 수지 염화비닐 수지를 나타내며, 가열 실험에서 측정된 표면 온도 (ΔT_w)를 흡수율 $a=0.67$ 로 무차원화 한 값이다. 실선과 파선은 산출된 값 (λ_b, α_b)으로 계산된 결과이다. 양쪽 결과의 일치성은 양호한 편으로, 본 실험의 측정 방법에서 얻어진 결과(열불성 값)가 실제 온도 분포를 잘 반영하고 있다고 판단된다. 또한 도료 층이 두꺼워짐에 따라 일점해선과 기호 “●”에서 알 수 있듯이 수치해석 결과가 실험값보다 약간 낮게 나타났다. 본 측정법에서는 가열반경 내에서 평균한 무차원평균표면온도의 시간변화에 대한 측정치이지만, 계에 대응하는 모델을 기준으로 사전에 수치해석으로부터 구한 이론치에 일치할 수

있도록 열전도율과 열확산율이 결정될 수 있도록 하고 있다. 따라서 Fig. 9에 막 두께가 두꺼운 69 μm 인 경우 해석결과가 측정치보다 약간 작게 나타나는 경향을 보이는 것은 해석상의 오차문제가 아니라, 흑색도료층의 두께가 40 μm 인 경우에 얻어진 레이저광 흡수율 a 와 열전도율 λ_b 및 열확산율 α_b 을 이용하였기 때문이라 생각된다.

Fig. 10은 같은 방법으로 조건 S_B의 경우에 해당하며, $a=0.73$ 으로 무차원화 한 실험값 (“○”, “△”)과 Table 1의 산출값(λ_b, α_b)으로 행한 수치해석 계산 결과(실선, 파선)는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 마지막으로, 본 실험에서 사용한 기준재료 이외에 Bakelite를 기준재료로 사용하여 동일한 가열실험을 함으로서 도료

층에 대한 산출 결과를 검증하였다. 그 결과를 Fig. 10의 일점쇄선과 기호 “□”로 나타냈다.

6. 결 론

고체 표면에 두께 40 μm 내로 형성된 박막의 열전도율과 열확산율을 동시에 비접촉 상태에서 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하기 위하여, 열표면성질을 알고 있는 기준재료를 사용하는 측정 원리를 검토 및 검증하였다. 기준 재료(아크릴 수지, 염화비닐 수지)표면에 박막의 대응으로 흑색도료를 부착시킨 시료를 사용함과 동시에 동일한 모델에 대한 수치계산을 행하였다. 그 결과 도포한 도료 층의 두께가 $x_b=40 \mu\text{m}$ 인 경우에 $\lambda_b=1.45\text{W/mK}$, $\alpha_b=1.24 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ ($a=0.67$)이며, $x_b=24 \mu\text{m}$ 인 경우에는 $\lambda_b=1.85\text{W/mK}$, $\alpha_b=1.09 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ ($a=0.73$)가 얻어졌다. 전자의 결과 중에서 α_b 는 荒木^{(1),(2)}이 보고한 $\alpha_b=(6.74\sim 9.37) \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ ($x_b=150\sim 248 \mu\text{m}$)와는 30~80%정도 외 큰 차이가 있다.

본 연구에서는 일반적으로 수십 μm 로 되어 있는 레이저광 흡수층(흑색도료층)의 흡수율 a 와 열전도율 λ_b 및 열확산율 α_b 의 측정과 여기에 미치는 총밀도의 영향을 검토하는 것이 목적이다. 따라서 荒木 등이 이용한 흑색도료층과 동일한 조건에서의 측정과 검토는 측정방법이 상이함으로 인한 영향도 있음으로 차후의 연구과제라고 생각된다.

이상의 결과로부터, 고체표면의 박막에 대한 열전도율 및 열확산율을 동시에 측정할 수 있는 비접촉 측정법에 대한 기초 원리를 제안하였으며, 시료 및 실험조건에 따라 기준곡선군을 구하는 수치해석의 조건을 변경하면 모델 변화에 대한 응용도 가능하다고 생각된다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

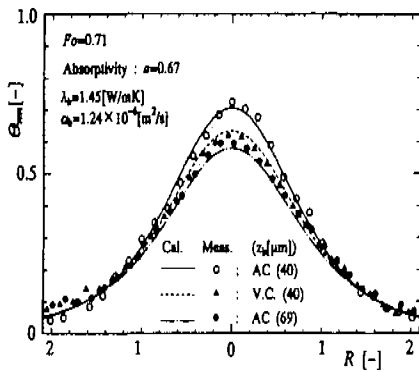


Fig. 9 Surface temperature distribution at t=3s(sprayed).

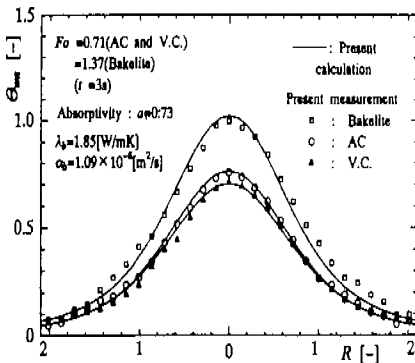


Fig. 10 Surface temperature distribution at t=3s (sprayed and rubbed).

참고문헌

- (1) 荒木信幸, 牧野, 三原順, 1988, “Laser Flash법에 의한 충상시료의 열확산율 측정에 있어서의 문제점”, 제9회 일본 열물성심포지움논문집, pp.179.
- (2) N. Araki, A. Makino and J. Mihara, 1992, “Measurement and Evaluation of the Thermal Diffusivity of Two-Layered Materials”, Int. J. Thermophysics, Vol. 13-2, pp.331.
- (3) 藤井不夫, 富村壽夫, 張興, 朴壽泉, 藤井哲, 1992, “고체의 열전도율과 열확산율의 비접촉 동시측정법”, 제13회 일본열물성심포지움논문집, pp.245.
- (4) M. Fujii, T. Tomimura, X. Zhang, S. Park and T. Fujii 1992, “A Non-Contact Measurement of Thermal Conductivity and Diffusivity of Solids”, ATPC, pp.120.
- (5) 傳熱工學資料(개정 제4판), 1986, 日本機械學會, pp.321.
- (6) 열물성핸드북, 1990, 日本熱物性學會, 養賢堂, pp.272.
- (7) 열물성핸드북, 1990, 日本熱物性學會, 養賢堂, pp.274.
- (8) 열물성핸드북, 1990, 日本熱物性學會, 養賢堂, pp.19.
- (9) 열물성핸드북, 1990, 日本熱物性學會, 養賢堂 pp.292, 305.