

## 광열편향법을 이용한 열확산계수 결정에 대한 이론적 연구

전필수 · 이은호 · 유재석\* · 목재균\*\* · 최강윤\*\*

아주대학교 대학원 기계공학과, \*아주대학교 기계 및 산업공학부

\*\*한국철도기술연구원

### A Theoretical Study for the Thermal Diffusivity Measurement Using Photothermal Deflection Scheme

Pilsoo Jeon, Eunho Lee, Jaisuk Yoo\*, Jaikyun Mok\*\* and Kangyoun Choe\*\*

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Ajou University

\*Division of Mechanical & Industrial Engineering, Ajou University

\*\*Korea Railroad Research Institute

#### 요 약

재료의 열확산계수를 비접촉적인 방법으로 구하기 위하여 광열편향법에 대한 3차원 모델을 해석하였다. 이 방법은 가열빔이 재료에 광학적으로 흡수될 때 검사빔의 초기궤적이 시편과 시편주위 매질의 온도상승으로 인하여 나타나는 굴절지수의 구배에 의하여 검사빔이 편향되는 원리를 이용하는 것이다. 기존의 연구에서는 주로 가열빔과 검사빔의 상대거리를 변화시키면서 편향의 위상각을 측정하여 열확산계수를 결정하였다. 하지만 본 연구에서는 고정된 상대거리에서 가열빔의 변조주파수를 변화시키면서 편향의 위상각을 계산하여 열확산계수를 구할 수 있는 관계식을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 열확산계수 결정 방법은 다른 방법에 비하여 실험과 해석이 간단하고 비교적 측정하기가 어려운 상대거리에 영향을 받지 않는 방법이다.

**Abstract** — A three-dimensional theoretical model for the photothermal deflection method has been developed to measure the thermal diffusivity of material. The heat diffusion in both the sample and the surrounding medium by the absorption of energy from a light beam incident on the sample produces gradient of the refractive index, which deflects a probe beam from its initial trajectory. In previous works, thermal diffusivity was determined by phase angle of deflection as the relative position between the heating and probe beams. In this study, however, we proposed the new analysis method based on the phase angle of deflection as the modulation frequency with fixed the relative position between two beams. It is very simple and easy to determine the thermal diffusivity in experiment and independent of the relative position.

#### 1. 서 론

열전도계수 및 열확산계수와 같은 열물성의 측정은 기초산업에서부터 첨단산업에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있는 중요 기술 분야이다. 특히 에너지 산업에 있어서 시스템의 열전달 특성을 예측하거나 개선하기 위해서는 간편하고 정확한 열물성 측정 기술의 확립이 중요하다 할 수 있다. 이러한 열물성을 측정하는데 있어서 기존의 접촉식 측정방법보다 비교적 정확하고 제약이 적은 비접촉식 방법이 최근에 많이 연구되고 있다.

특히 비접촉식 열물성 측정방법들 중에 높은 정밀도와 넓은 측정범위를 가지는 광열효과를 이용한 열물성 측정방법에 대한 연구가 최근에 활발하게 이루어지고 있다. 광열효과를 이용하여 열물성을 계측하는 방법으로는 크게 광열변위법(photothermal displacement)<sup>[1]</sup>, 광열복사법(photothermal radiometry)<sup>[2]</sup>, 광열반사법(photothermal reflection)<sup>[3]</sup> 그리고 광열편향법(photothermal deflection)<sup>[4]</sup> 등이 있다. 전통적인 열물성 측정 방법과 비교하여 광열효과를 이용한 방법은 측정하고자하는 재료에 극부적인 비접촉 가열을 이용하여 열물성을 측정하기 때문에

재료의 크기나 형상에 거의 제약을 받지 않으며 측정후에도 재료에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 게다가 광열효과를 이용한 열물성 측정방법은 광에너지를 일정한 주기로 가열하므로 재료의 온도상승이 크지 않기 때문에 온도변화에 따른 열물성의 변화를 무시할 수 있고, 온도에 민감한 재료의 열물성 측정도 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 광열효과를 이용한 여러 가지 열물성 측정방법 중에서 광열편향법에 대하여 해석적 연구를 수행하였다. 다른 광열효과를 이용한 열물성 측정방법에 비하여 광열편향법은 박막, 반투명한 재료, 투명한 재료 그리고 다공성 재료에 대하여 열물성을 측정할 수 있는 장점이 있다. 광열편향법은 일정한 주기를 가지는 가열빔이 재료에 광학적으로 흡수되어 온도상승을 야기하고, 재료와 재료주위의 매질에 굴절지수(refractive index)의 변화를 야기한다. 이런 굴절지수의 변화는 검사빔의 초기 궤적을 편향시키는데 이 편향된 양이나 위상각을 측정하여 재료의 열물성을 구하는 방법이다. 광열편향법은 사용하는 방법에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 가열빔과 검사빔을 평행하게 배열하는 평행법(collinear method)으로 검사빔이 시편을 관통하게 위치시켜서 검사빔이 시편을 통과하면서 편향되는 양을 측정하는 방법이다. 따라서 이 방법은 검사빔이 통과할 수 있는 투명한 재료에 사용이 한정된다. 두 번째 방법은 본 연구에서 사용한 방법으로 Fig. 1에서처럼 가열빔은 시편에 수직으로 조사되고 검사빔은 시편에 평행하게 지나가는 횡단법(transverse method)이다.

광열편향법에 대한 연구동향은 다음과 같다. Jackson 등<sup>1)</sup>은 가열빔의 파형을 싸인파로 가정하여 2차원 모델에 대한 해석을 수행하였으며 실험 결과와 비교하여 열물성의 측정이 가능함을 제시하였다. 그러나 이들은 열물성을 정량적으로 구할 수 있는 관계식을 제시하지는 못하였다. Salazar 등<sup>2)</sup>과 Bertolotti 등<sup>3)</sup>은 검사빔이 시편과 평행으로 지나가는 횡단법에 대한 이론적인 해석을 수행하였으며 가열빔과 검사빔의 상대거리나 가열빔의 변조주파수에 대한 함수로 위상각의 점선방향 기울기를 결정하여 열확산계수를 계산할 수 있는 경험적인 관계식을 제시하였다. 이들이 제시한 관계식은 가열빔과 검사빔의 상대거리에 대한 위상의 기울기를 이용하는 방법으로 매우 간단하나 기울기를 결정하는 가열빔과 검사빔의 상대거리의 구간에 따라 기울기가 상당한 차이를 보이기 때문에 정확한 기울기를 결정하는 기준이 모호하며 측정된 열확산계수에 비교적 큰 오차를 수반한다.

현재 국내에서도 열물성 측정에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 아직 그 결과는 미비한 상태이며 특히 광열변위법의 경우에는 어느 정도 연구결과가 발표되고 있으나 이 방법은 불투명한 재료에 한정되고 다공성 재료

에 대해서는 적용이 불가능하다. 본 연구에서는 비교적 재료의 형상이나 투과율에 영향을 받지 않고 다공성 재료의 열물성을 측정할 수 있는 광열편향법에 대한 연구를 수행하여 좀 더 간단하고 정확하게 열물성을 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 측정 원리 및 이론

### 2-1. 측정원리

Fig. 1(a)는 검사빔이 시편과 평행하게 이동하는 방식의 광열편향법을 개략적으로 나타낸 것이다. 이 방법은 임의의 주파수로 변조된 가열빔이 재료에 수직으로 조사되면 시편과 시편 위의 매질 모두에서 주기적인 온도구배가 발생한다. 이러한 온도구배는 시편의 열적 특성에 따라 다르게 나타나며 시편 위의 매질에 굴절지수의 구배를 야기한다. 시편에 가열빔이 가해지지 않았을 때는 검사빔이 직진하지만 가열빔이 시편에 조사되어 시편 위의 매질에 굴절지수의 구배가 발생하면 검사빔은 편향된다. 검사빔이 편향된 양이나 위상각은 굴절지수의 구배에 따라 다르게 나타나기 때문에 이로부터 열물성

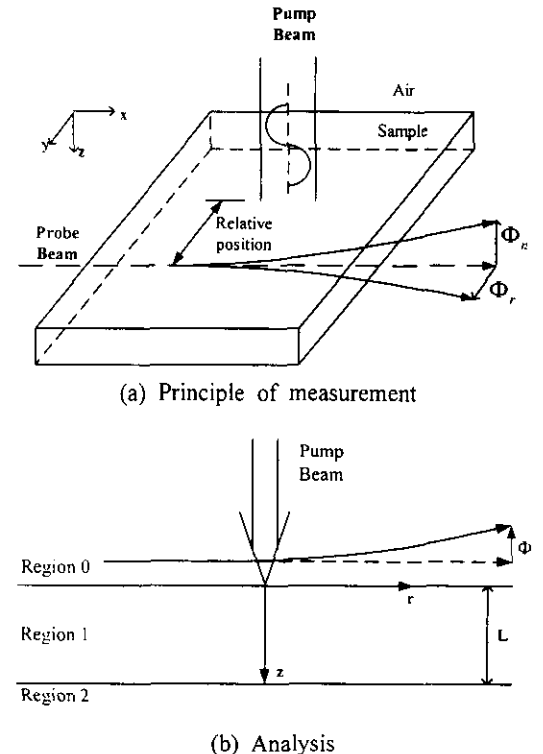


Fig. 1. Model for the principle of measurement and analysis with transverse photothermal deflection scheme.

을 결정할 수 있다.

검사빔이 굴절지수의 구배가 존재하는 매질을 통과하면서 편향되는 정도를 나타내는 편향각  $\Phi$ 는 일반적으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>14</sup>. 이 식에서  $n$ 은 굴절지수,  $\partial n/\partial T$ 는 굴절지수의 온도계수,  $\nabla_s T$ 는 검사빔의 경로에 수직인 온도구배,  $s$ 는 검사빔의 경로를 나타낸다.

$$\Phi = \int_{\text{path}} \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) \nabla_s T \, ds \quad (1)$$

식(1)과 같은 검사빔의 편향에 대한 표현을 구하기 위해서는 먼저 시편과 시편주위의 공기에 대한 온도분포의 해석이 수행되어야 한다. 온도해석을 통하여 구한 온도분포에 대한 결과를 검사빔의 편향에 대한 식(1)에 대입하여 최종적인 검사빔의 편향각 및 위상각을 구하였다.

2-2. 온도해석

Fig. 1(b)는 온도해석에 사용한 이론적 모델의 개략도를 나타낸 것이다. 온도해석에서는 원통좌표계(cylindrical coordinate)를 사용하였으며 흡수되는 광에너지가 원주방향( $\theta$ )에 대하여 대칭이므로 반경방향( $r$ )과 높이방향( $z$ )만을 고려하여 해석을 수행하였다. 시편의 전면과 후면에 해당하는 영역 0과 2는 광에너지를 흡수하지 않는 매질로써 일반적으로 많이 사용하는 공기로 설정하였고, 측정의 대상이 되는 영역 1은 레이저에 의한 광에너지를 흡수하는 매질로써 박막, 기체, 액체 또는 고체가 될 수 있다. 해석을 간편하게 하기 위하여 시편의 모든 영역에 대하여 반경방향으로는 길이가 무한하고 가정하였다. 이러한 가정은 가열빔의 크기가 시편의 반경방향의 크기에 비해 상당히 작기 때문에 타당하다.

세 영역에 대한 시편의 온도분포는 식(2)의 열전도 방정식을 이용하여 구할 수 있다<sup>17</sup>.

$$\nabla^2 T_0 - \frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \quad (2a)$$

$$\nabla^2 T_1 - \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{1}{k_1} Q_1 \quad (2b)$$

$$\nabla^2 T_2 - \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0 \quad (2c)$$

여기서  $T_i$ 는 각 영역의 온도,  $k_i$ 는 각 영역의 열전도계수 그리고  $\alpha_i$ 는 각 영역의 열확산계수를 나타낸다. 열원  $Q_1$ 은 가열빔의 광에너지로 인하여 시편에 흡수되는 단위부피 당 에너지로 공간에 대하여 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 레이저빔으로 주파수는  $f(= \omega/2\pi)$ 로 단속되고, 최대 강도의  $1/e$ 이 되는 지점까지를 빔의 반지름,  $a$ 로 고려하였고, 광흡수계수,  $\lambda$ 는 광에너지가 시편에 흡수되는 깊이,  $P_0$ 는 가열빔의 출력,  $R$ 은 재료의 표면에서

가열빔의 반사율을 나타낸다.

$$Q_1 = \frac{(1-R)P_0\lambda}{4\pi a^2} e^{-r^2/a^2 - \lambda z} [1 + \cos(\omega t)] \quad (3)$$

적용되는 경계조건은 식(4)에 나타난 것처럼 각 영역의 경계면에서의 온도와 열유속(heat flux)이 동일하다는 조건을 사용하였다. 가열빔의 광에너지의 흡수로 인하여 상승되는 온도가 매우 낮기 때문에 복사나 대류의 영향을 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_0|_{z=0} &= T_1|_{z=0}, \quad k_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} \\ T_1|_{z=L} &= T_2|_{z=L}, \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=L} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=L} \end{aligned} \quad (4)$$

열전도 방정식의 해석은 시간에 주기적인 함수를 정상상태 함수로 변화시켜 해석을 간단하게 하고, 편향의 위상각을 손쉽게 구하기 위해서 복소변환법(complex method)를 사용하여 식(2)를 복소수형태로 변형한 후 적분변환법을 이용하여 해를 구하였다. 각각의 영역에 해당하는 온도분포는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다. 식(5)에서  $J_0(\beta r)$ 은 일차 Bessel 함수,  $\beta$ 는 적분변수,  $L$ 은 시편의 두께,  $\omega$ 는 각주파수를 각각 나타낸다.

$$T_0 = \int_0^\infty \beta d\beta J_0(\beta r) A e^{\beta_0 z} e^{i\omega t} \quad (5a)$$

$$T_1 = \int_0^\infty \beta d\beta J_0(\beta r) [F e^{-\beta_1 z} + B_1 e^{-\beta_1 z} + B_2 e^{\beta_1 z}] e^{i\omega t} \quad (5b)$$

$$T_2 = \int_0^\infty \beta d\beta J_0(\beta r) C e^{-\beta_2(L-z)} e^{i\omega t} \quad (5c)$$

여기서

$$F = \frac{(1-R)P_0\lambda e^{-a^2\beta^2/4}}{8\pi k \lambda^2 - \alpha_1^2} \quad (5d)$$

$$g_i^2 = \beta^2 + i\omega/\alpha_i \quad (i = 0, 1, 2). \quad (5e)$$

미지의 계수  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  그리고  $C$ 는 식(4)에서 나타낸 4개의 경계조건을 적용하여 구할 수 있다.

$$A = F + B_1 + B_2 \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= F \{ e^{-\beta_1 L} (\chi_0 - \chi_1) (\chi_2 - \chi_1) \\ &\quad - e^{\beta_1 L} (\chi_0 + \chi_1) (\chi_1 + \chi_2) \} / \{ e^{-\beta_1 L} (\chi_0 - \chi_1) (\chi_2 - k_1 \lambda) \\ &\quad - e^{\beta_1 L} (\chi_1 + \chi_2) (\chi_0 + k_1 \lambda) \} \end{aligned} \quad (6b)$$

$$B_2 = -F \frac{\chi_0 + k_1 \lambda}{\chi_0 - \chi_1} - B_1 \frac{\chi_0 + \chi_1}{\chi_0 - \chi_1} \quad (6c)$$

$$C = F e^{-\beta_1 L} + B_1 e^{-\beta_1 L} + B_2 e^{\beta_1 L} \quad (6d)$$

$$\chi_i = g_i k_i \quad (i = 0, 1, 2) \quad (6e)$$

### 2.3. 검사빔의 편향

검사빔의 편향의 해석은 Fig. 1a에 나타난 것처럼 직교좌표계(rectangular coordinate)를 사용하였다. 검사빔의 편향은 벡터 구조를 가지기 때문에 시편에 대하여 평행한 접선방향(lateral direction)과 시편에 수직인 수직방향(normal direction)으로 나누어 구할 수 있다. 여기서 접선방향은 좌표계의 y 방향에 해당하며 수직방향은 z 방향에 해당한다. 검사빔이 시편위의 공기 즉 영역 0를 통과하기 때문에 사용되는 굴절지수와 굴절지수의 온도계수는 공기에 대한 값을 사용한다. 그리고 적분내의 온도 또한 영역 0의 온도식을 사용하여 계산하면 접선성분과 수직성분은 식(7)처럼 나타낼 수 있다.

$$\Phi_r = \frac{1}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial T_0(r, z, t)}{\partial y} dx \quad (7a)$$

$$\Phi_n = \frac{1}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial T_0(r, z, t)}{\partial y} dx \quad (7b)$$

식(7)에서 적분내에 있는 미분은 직교좌표계와 원통좌표계의 관계인  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 를 이용하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_r &= \frac{1}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial T_0(r, z, t)}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} dx \\ &= -\frac{2}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} e^{i\omega t} \int_0^{\infty} \beta^2 d\beta A e^{\beta_0 z} \\ &\quad \times \left[ \int_0^{\infty} \frac{J_1(\beta(x^2 + y^2)^{1/2})}{(x^2 + y^2)^{1/2}} y dx \right] \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_n &= \frac{2}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} e^{i\omega t} \int_0^{\infty} \beta d\beta A g_0 e^{\beta_0 z} \\ &\quad \times \left[ \int_0^{\infty} J_0(\beta(x^2 + y^2)^{1/2}) dx \right] \end{aligned} \quad (8b)$$

여기서  $J_0(\beta(x^2 + y^2)^{1/2})$ 와  $J_1(\beta(x^2 + y^2)^{1/2})$ 은 각각 영차와 일차 Bessel 함수이고,  $n_0$ 와  $[\partial n / \partial T]_{\text{air}}$ 는 공기의 굴절지수와 굴절지수의 온도계수를 나타낸다. 이 함수들은 모두 y 축에 대하여 대칭이 되므로, 적분구간을 0에서  $\infty$ 로 바꿀 수 있다. 또한 Bessel 함수의 적분은 식(9)처럼 삼각함수로 간단하게 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_r &= -\frac{2}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} e^{i\omega t} \int_0^{\infty} \beta d\beta A e^{\beta_0 z} \sin(\beta y) \\ \Phi_n &= \frac{2}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{\text{air}} e^{i\omega t} \int_0^{\infty} \beta d\beta A g_0 e^{\beta_0 z} \cos(\beta y) \end{aligned} \quad (9)$$

본 연구에서는 식(9)를 이용하여 검사빔의 각 방향의

편향각과 위상각을 구하였다. 위상각은 적분항내의 값들이 복소수로 구성되어 있기 때문에 실수부와 허수부와 의 비를 이용하여 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

광열편향법을 이용한 열물성의 결정은 일반적으로 편향의 크기(편향각)와 편향의 위상차(위상각)를 이용한다. 본 연구에서는 수치적분시 가열빔과 검사빔의 상대거리(relative position)를 변화시키는 방법과 검사빔과 가열빔의 상대거리를 일정하게 유지한 상태에서 가열빔의 변조주파수를 변화시키는 방법으로 각각에 대한 편향각과 위상각의 변화를 알아보았다.

전술한 바와 같이 영역 0의 매질은 공기로 설정하였으며 영역 1은 서로 다른 열물성을 가지는 은, 구리, 마그네슘 그리고 아연을 사용하였으며, 영역 2는 영역 0과 마찬가지로 공기의 물성을 사용하였으며 이에 대한 자세한 내용은 Table 1에 나타났다.

해석은 재료의 두께를 3 mm, 가열빔의 반경을 60  $\mu\text{m}$ , 재료내부로 흡수된 에너지는 0.33 W, 재료의 표면과 검사빔의 수직 거리를 0.1 mm 그리고 변조주파수를 10 Hz로 설정하여 수행하였다.

#### 3-1. 가열빔과 검사빔의 상대거리에 따른 편향각과 위상각

Fig. 2는 열확산계수가 다른 여러 가지 재료에 대하여 가열빔과 검사빔의 상대거리에 대한 편향각과 위상각의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 접선방향의 편향각은 가열빔의 중심선을 따라 서로 대칭으로 나타나기 때문에 가열빔의 중심에서 접선방향의 편향은 발생하지 않으며 가열빔과 검사빔의 상대거리가 증가함에 따라 가열빔 반경의 두 배정도 되는 지점까지는 증가하다가 이 지점을 지나면 서서히 감소한다. 열

Table 1. Thermal and optical properties of materials at 25°C<sup>[8]</sup>.

	Thermal diffusivity (cm <sup>2</sup> /s)	Thermal conductivity (W/m · K)	Absorption coefficient $\times 10^{-6}$
Ag	1.73	427	72.7
Cu	1.16	398	70.1
Au	1.27	315	28.1
Al	0.97	237	140.3
Si	0.95	83.5	2.7
Mg	0.88	159	74.6
Zn	0.44	113	97.7
Ni	0.23	89.9	84.3

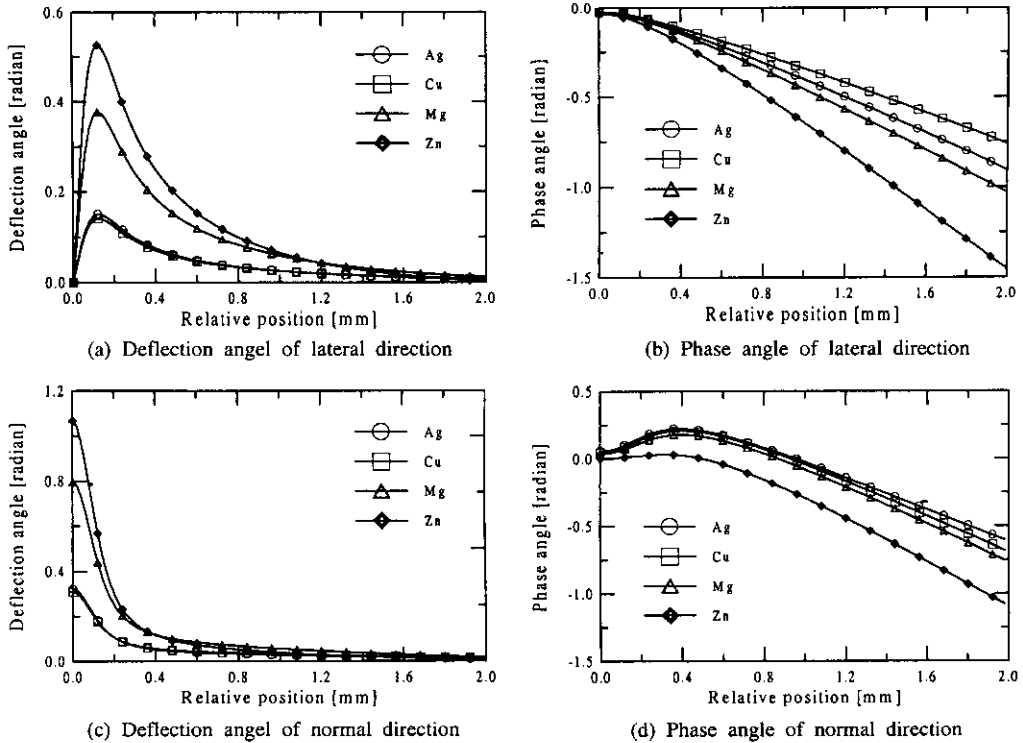


Fig. 2. Photothermal deflection angle and phase angle as a function of relative position for different samples.

확산계수가 서로 다른 재료에 대한 접선방향의 편향각은 열확산계수가 큰 재료일수록 최대값은 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 열확산계수가 큰 재료는 재료에 흡수된 에너지가 재료 내부로 많이 흡수되어 표면의 온도가 적게 상승되고 공기층의 온도구배 또한 작아지기 때문이다. 접선방향의 위상각은 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 열확산계수가 증가함에 따라 그 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 열확산계수가 큰 재료는 열확산계수가 작은 재료에 비하여 흡수된 에너지가 넓은 면적으로 확산되기 때문에 동일한 상대거리에서 위상각이 작게 나타난다.

Fig. 2(c)에 나타난 수직방향의 편향각은 접선방향과는 다르게 가열빔의 중심에서 편향각이 가장 크고 가열빔과 검사빔의 상대거리가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 가열빔의 중심을 검사빔이 통과할 때 온도구배에 의한 영향을 가장 많이 받기 때문이다. 열확산계수가 서로 다른 재료에 대한 수직방향의 편향각은 접선방향과 마찬가지로 열확산계수가 큰 재료가 열확산계수가 작은 재료에 비하여 최대값의 크기가 작은 것을 알 수 있다. Fig. 2(d)에 나타난 편향의 위상각은 상대거리가 0.4 mm 이후의 직선구간에서의 기

울기가 열확산계수가 큰 재료일수록 작은 재료에 비하여 증가한다.

일반적으로 광열편향법을 이용한 열확산계수의 측정 방법은 실험과 이론의 편향각과 위상각을 비교함으로써 구할 수 있다. 실험적으로는 열확산계수를 제외한 시편의 두께, 가열빔과 검사빔의 상대거리, 가열빔의 크기와 변조주파수는 측정이 가능하게 된다. 그러므로 이 때 측정된 편향각과 위상각을 이론적으로 계산된 결과와 비교함으로써 열확산계수를 구할 수 있다. 이러한 방법은 분석에 있어서 많은 시간이 소요되는 문제가 있다.

가열빔과 검사빔의 상대거리에 따른 편향각을 이용한 방법으로는 Fig. 2의 (a)와 (c)의 결과에서 열확산계수가 큰 재료일수록 편향각의 크기가 감소하는 관계를 이용하여 열확산계수를 결정할 수 있다. 하지만 실험적으로 최대값을 정확하게 측정하는 것은 일반적으로 쉽지 않다. 또한 표면의 광학적 특성에 따라 반사되거나 흡수되는 양이 달라지기 때문에 이 방법은 실제적으로 적용이 불가능하다.

접선방향에 대한 위상각의 기울기와 열확산길이( $L_{th} = (\alpha/\pi f)^{1/2}$ )와의 관계를 이용하여 열확산계수를 구할 수 있는 관계식은 식(10)과 같이 제시되어 있다<sup>10)</sup>.

$$\alpha = \frac{\pi f}{S_r} \tag{10}$$

여기서  $S_r$ 은 가열빔과 검사빔의 상대거리에 대한 접선 방향 위상각의 기울기를 나타낸다. 이때 기울기는 0.6 mm에서 1.2 mm의 상대거리 범위에서 결정하였다. 이 방법은 기울기를 계산하는 가열빔과 검사빔의 상대거리의 범위에 따라 기울기가 민감하게 변하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

**3-2. 가열빔의 변조주파수에 따른 편향각과 위상각**

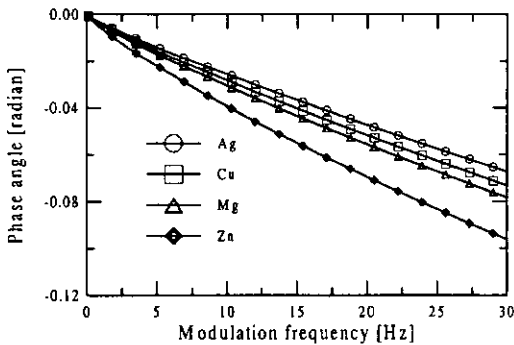
Fig. 3은 열확산계수가 다른 여러 가지 재료에 대하여 가열빔의 변조주파수에 대한 접선방향과 수직방향의 위상각을 나타낸 것이다. 가열빔의 변조주파수의 변화에 따른 수평성분과 수직성분의 위상각은 가열빔과 검사빔의 상대거리에 대한 영향이 거의 없으나, Fig. 2의 (a)와 (c)에서 알 수 있듯이 상대거리에 대한 접선성분의 위상각은 가열빔과 검사빔의 상대거리가 가열빔 반경의 두배가 되는 지점에서 가장 신호가 크며 수직성분의 편향각은 가열빔의 중심에 가까울수록 편향각이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가열빔

과 검사빔의 상대거리를 가열빔의 반경의 1.1배가 되는 66  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 해석을 수행하였다.

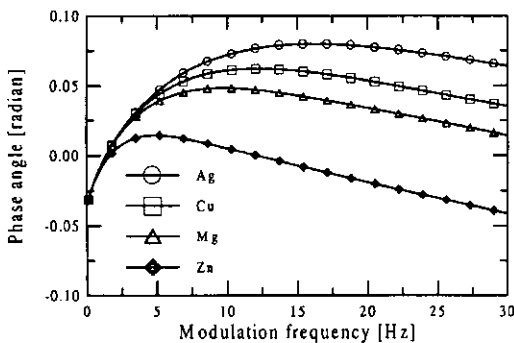
Fig. 3(a)는 접선방향의 위상각을 나타낸 것으로 가열빔의 변조주파수가 증가함에 따라 위상각이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 열확산계수가 큰 재료일수록 열확산계수가 작은 재료에 비하여 기울기가 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 3(b)는 열확산계수가 다른 재료에 대하여 수직방향의 위상각을 나타낸 것으로 가열빔의 변조주파수가 증가함에 따라 위상각이 어느 지점까지는 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 열확산계수가 큰 재료가 작은 재료에 비하여 위상각의 최대값이 더 크게 나타났으며 열확산계수와 위상각이 최대가 되는 변조주파수가 비례하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 가열빔의 변조주파수가 10~20 Hz의 범위에서 접선방향의 위상곡선이 직선에 가까운 것을 알 수 있다. Fig. 4는 이 구간에서 은, 금, 구리, 알루미늄, 실리콘, 마그네슘, 아연 그리고 니켈을 재료에 대한 해석결과를 사용하여 위상각의 기울기와 열확산계수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 접선방향의 기울기와 열확산계수가 일정한 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 관계를 여러 가지 방법으로 맞춤곡선을 시도해 본 결과 4차 다항식 맞춤곡선(polynomial fitting)이 해석결과와 가장 잘 만족하는 것으로 나타났기 때문에 4차 다항식 맞춤곡선을 이용하여 식(11)과 같이 단순화된 식으로 표현할 수 있다. 따라서 재료의 두께와 가열빔의 반경이 결정되면 접선성분에 대한 위상곡선의 기울기의 관계를 나타낸 식(11)을 이용하여 열확산계수를 결정할 수 있다.

$$\alpha = \sum_{m=0}^4 B_m S_n^m \tag{11}$$

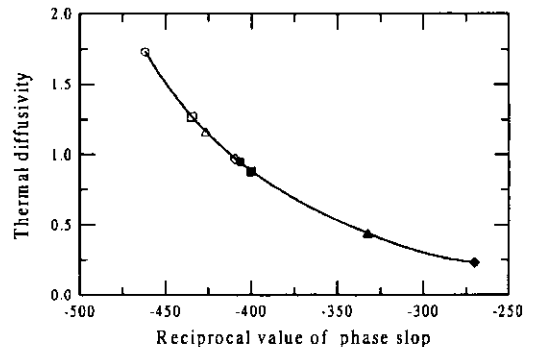


(a) Phase angle of lateral direction



(b) Phase angle of normal direction

**Fig. 3. Photothermal deflection phase angle as a function of modulation frequency for different sample.**



**Fig. 4. The relation of thermal diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) and reciprocal value of phase slope for lateral direction : Ag ( $\circ$ ), Cu ( $\square$ ), Au ( $\triangle$ ), Al ( $\diamond$ ), Si ( $\bullet$ ), Mg ( $\blacksquare$ ), Zn ( $\blacktriangle$ ), Ni ( $\blacklozenge$ ).**

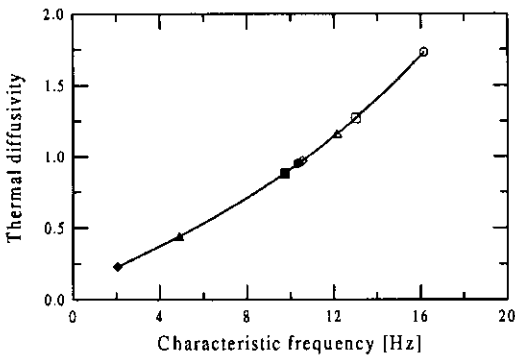


Fig. 5. The relation of thermal diffusivity (cm<sup>2</sup>/sec) and characteristic frequency of phase for normal direction : Ag (○), Cu (□), Au (△), Al (◇), Si (●), Mg (■), Zn (▲), Ni (◆).

여기서 S<sub>n</sub>은 가열빔의 변조주파수에 대한 점선성분 위상각의 기울기를 나타내며 B<sub>m</sub>(m=0, 1, ...4)은 1.65×10<sup>-3</sup>, 1.94×10<sup>-5</sup>, 8.57×10<sup>-8</sup>, 1.67×10<sup>-10</sup>, 그리고 1.25×10<sup>-13</sup>이다. 이러한 결과는 가열빔과 검사빔의 상대거리에 무관하다.

Fig. 5는 열확산계수가 다른 여러 가지 재료의 물성값을 이용하여 가열빔과 검사빔의 상대거리를 일정하게 유지한 상태에서 가열빔의 변조주파수를 변화시켰을 때 수직방향에 대한 위상각이 최대가 되는 변조주파수와 재료의 열확산계수와의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 위상각이 최대가 되는 가열빔의 변조주파수를 특성주파수(characteristic frequency), F<sub>c</sub>로 정의하였다. 그림에서 알 수 있듯이 수직방향에 대한 위상각이 최대가 되는 특성주파수가 열확산계수와 일정한 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 특성주파수와 열확산계수와의 관계를 3차 다항식 맞춤곡선을 통하여 식(12)와 같은 관계식을 나타낼 수 있다. 또한 이 관계식은 가열빔과 검사빔의 상대거리와 무관함을 알 수 있었다.

$$\alpha = \sum_{m=0}^3 C_m F_c^m \tag{12}$$

여기서 C<sub>m</sub>(m=0, 1, ..., 3)은 9.50×10<sup>-6</sup>, 6.39×10<sup>-6</sup>, 9.12×10<sup>-8</sup> 그리고 8.73×10<sup>-9</sup>이다.

따라서 재료의 두께와 가열빔의 반경이 결정되고 측정된 수직성분의 위상각이 최대가 되는 특성주파수만 결정되면 식(11)을 통하여 열확산계수의 결정이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 두 가지 방법은 기존의 방법에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있다. 대부분의 기존 방법들은 가열빔과 검사빔의 상대거리를 변화시키면서 실험을 하여야 하기 때문에 실험에 많은 시간이 소요되며 분석에 있어서도 분석 구간을 설정하는데 따라서 그 값

이 많은 차이를 보인다. 그리고 결과를 분석하는데 있어서 비교적 많은 오차를 수반하는 가열빔과 검사빔의 상대거리를 사용하는 문제가 있다. 하지만 본 연구에서 제시한 방법은 가열빔과 검사빔의 상대거리를 고정된 상태에서 가열빔의 변조주파수만을 변화시키기 때문에 실험에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있으며 상대거리의 변화가 결과에는 영향을 미치지 않기 때문에 비교적 결정이 어려운 상대거리를 조절할 필요가 없다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 광열편향법을 이용하여 열확산계수를 측정하기 3차원 모델에 대하여 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열확산계수가 큰 재료일수록 열확산계수가 작은 재료에 비하여 가열빔과 검사빔의 상대거리에 대한 점선 방향과 수직방향에 대한 편향각의 크기는 모두 감소한다. 하지만 점선방향과 수직방향의 위상곡선에서 직선구간의 기울기는 증가한다.

(2) 가열빔과 검사빔의 상대위치를 고정된 상태에서 가열빔의 변조주파수에 따른 점선방향에 대한 위상곡선의 기울기는 열확산계수가 증가할수록 비례하여 증가하는 것을 알 수 있었으며, 수직방향의 위상각이 최대가 되는 변조주파수의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

(3) 가열빔과 검사빔의 상대거리를 고정된 상태에서 변조주파수에 대한 점선방향 위상각의 기울기와 열확산계수가 일정한 관계를 가지며 이러한 관계를 이용하여 재료의 두께와 가열빔의 반경이 결정되면 열확산계수를 결정할 수 있다.

(4) 가열빔과 검사빔의 상대거리를 고정된 상태에서 수직방향의 위상각이 최대가 되는 특성주파수와 열확산계수와 일정한 관계를 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 비교적 측정이 용이한 재료의 두께와 가열빔의 반경이 결정되면 열확산계수를 간편하게 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 열확산계수 결정 방법은 가열빔과 검사빔의 상대거리를 고정된 상태에서 구한 점선방향의 기울기나 특성주파수를 이용하기 때문에 다른 방법에 비하여 실험과 해석이 간단하고 비교적 측정하기가 어려운 상대거리에 영향을 받지 않는 방법이다.

#### 참고문헌

1. Olmstead, M.A. et al.: "Photothermal displacement spectroscopy : an optical probe for solids and surfaces", Appl. Phys. A32, pp. 141-154, (1983).

2. Chen, Z. and Mandelis, A.: "Thermal diffusivity measurements of ultrahigh thermal conductors with use of scanning photothermal rate-window spectrometry : Chemical-vapor-deposition diamonds", *Phys. Rev.*, Vol. B46 (1992).
3. Fournier, D. *et al.*: "Photothermal investigation of transport in semiconductors: Theory and experiment", *J. Appl. Phys.* 59, pp. 787 (1986).
4. Jackson, W.B. *et al.*: "Photothermal deflection spectroscopy and detection", *Appl. Opt.*, Vol. 20, No. 8, pp. 1333-1344 (1981).
5. Salazar, A. *et al.*: "Thermal diffusivity measurements in solids by the mirage technique : experimental result", *J. Appl. Phys.*, Vol. 69, No. 3, pp. 1216-1223 (1991).
6. Bertolotti, M. *et al.*: "On the photodeflection method applied to low thermal diffusivity measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, No. 6, pp. 1576-1583 (1993).
7. Ozisik, M.N.: "Heat conduction", 2nd ed, Wiley Interscience (1983).
8. Shackelford, J.F.: "CRC Material Science and Engineering Handbook", CRC Press (1994).