

광열변위법의 변형각을 이용한 열확산계수 측정

전필수[†] · 이광재^{*} · 유재석^{**} · 박영무^{**} · 이종화^{**}
(2001년 8월 9일 접수, 2001년 11월 18일 심사완료)

Measurement of Thermal Diffusivity Using Deformation Angle Based on the Photothermal Displacement Method

Pilsoo Jeon, Kwangjai Lee, Jaisuk Yoo, Youngmoo Park, and Jonghwa Lee

Key Words: Photothermal Displacement Method(광열변위법), Thermal Diffusivity(열확산계수), Phase Angle(위상각), Deformation Angle(변형각), Thermal Diffusion Length(열확산 길이), Zero-Crossing Position(제로 교차점)

Abstract

A new method of measuring the thermal diffusivity of solid material at room temperature using photothermal displacement is proposed. The influence of the parameters, such as radius and modulation frequency of the pump beam and the sample thickness, was studied. In previous works, thermal diffusivity was determined by the deformation angle and phase angle as the relative position between the heating and probe beams. In this study, however, we proposed the new analysis method based on the real part of deformation angle as the relative position between two beams. From the zero-crossing position of real part of deformation angle with respect to the pump beam, the thermal diffusivity of the materials can be obtained. The experimental values for different samples obtained by applying the new method are in good agreement with the literature values.

기호설명

a	: 가열빔의 반경 (m)
f	: 변조주파수 (Hz)
ω	: 각주파수(=2 πf) (Hz)
J_0, J_1	: 0차, 1차 Bessel 함수
k	: 열전도계수 (W/m·K)
L	: 시편의 두께 (m)
L_{th}	: 열확산 길이 (m)
P	: 가열빔의 출력 (W)
T	: 온도 (K)
r	: 반경방향의 거리 (m)

u	: 변위 벡터 (m)
α	: 열확산계수 (m ² /sec)
α_{th}	: 열팽창계수 (1/K)
λ	: 광흡수계수 (1/m)
ν	: Poisson 비
β, δ	: 적분변수
Φ	: 변형각
θ	: 위상각 (degree)

1. 서론

광열효과를 이용한 방법은 신소재의 개발, 재료표면의 연구, 재료의 비파괴 검사 그리고 고체와 유체의 열물성 측정 등에 있어서 매우 유용하다. 이러한 광열효과와 가장 중요한 특징으로는 재료에 대하여 기계적이나 전기적인 접촉이 없는 방법으로 기존의 접촉식 방법보다 비교적 정확하고 제약이 적으며,

[†] 책임저자, 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail : lkj1126@madang.ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2350 FAX : (031)213-7108

^{*} 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail : storm94@orgio.net

^{**} 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

재료의 연구에 있어서 응용이나 적용이 쉽다는 것이다. 광열효과를 이용한 광열변위법,⁽¹⁾ 광열방사법,⁽²⁾ 광열굴절법⁽³⁾ 그리고 광열편향법⁽⁴⁾ 등의 여러 가지 방법이 재료의 열확산계수를 측정하기 위하여 제시되었으며 계속해서 많은 연구가 진행중이다.

광열변위법은 일정한 주기를 가지는 광 에너지가 재료의 표면에 조사되면 그 일부가 흡수되어 열탄성 변형을 야기하는데 이러한 변형의 위상각이나 변형각의 측정에 그 기초를 두고 있다. 고체재료의 열확산계수를 결정하기 위한 광열변위법의 이론적인 분석과 실험적인 분석은 많은 연구자들에 의하여 수행되었다.

1983년 Olmstead 등⁽¹⁾은 싸인파로 변조한 가열빔을 가지는 2차원 모델을 제시하고 표면의 변형각과 위상각을 계산하였으며, 실험통한 결과를 비교하여 광열변위를 이용한 열물성을 계측할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 1991년에 Li 등⁽⁵⁾은 사각파로 변조한 가열빔을 가지는 2차원 모델을 제시하여 한 지점에서 가열빔의 변조주파수를 변화시키면서 구한 변형의 크기가 급격하게 감소하기 시작하는 변조주파수를 특성주파수로 정의하였다. 특성주파수와 열확산계수, 시편의 두께 그리고 가열빔 반경의 관계를 이용하여 열확산계수를 구할 수 있는 관계식을 제시하였지만, 특성주파수의 기준이 모호하고 실험을 통하여 정량적인 열물성을 구하지 못하였다. 2001년에 이은호 등⁽³⁾은 가열빔의 파형이 싸인파로 변조된 2차원 모델을 제시하고 변형각과 위상각을 계산하였으며, 재료의 열확산계수를 열탄성변형의 최소위상각과 열확산길이의 관계를 이용하여 간편하게 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 실험결과로부터 최소위상이 나타나는 상대거리를 찾기가 어렵기 때문에 적용에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 재료의 열확산계수를 변형각의 실수부값이 0이 되는 상대거리와 열확산길이의 관계를 이용하여 매우 간편하게 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 이론 및 측정원리

2.1 이론

시편 내의 온도분포와 변형구배를 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 r 방향으로는 무한하고 z 방향으로는 유한한 길이를 가지는 2차원 고체 모델을

선정하였다. 온도해석에서는 가열빔에 의한 시편의 온도상승이 매우 작기 때문에 대류나 복사에 의한 열전달을 고려하지 않고 단지 전도만을 고려하였다.^(6,7) 지배방정식은 식 (1)과 같이 열원이 있는 2차원 원통좌표계의 열전도방정식을 사용하였다.

$$\nabla^2 T(r, z, t) + \frac{Q(r, z, t)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 $T(r, z, t)$ 는 온도, k 는 열전도계수, α 는 열확산계수 그리고 $Q(r, z, t)$ 는 가열빔에 의하여 발생하는 열원을 나타낸다. 적용되는 경계조건은 식 (2)에 나타낸 것처럼 주위공기보다 급속의 열전도계수가 매우 높기 때문에 경계면에서 열손실은 무시하였다.

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, L} = 0 \quad (2)$$

열원은 반경방향(r)에 대하여 Gaussian 분포를 가지고 두께방향(z)으로는 지수함수의 형태로 감소하는 레이저빔으로 변조주파수(f)로 단속되고, 최대 강도의 $1/e$ 이 되는 지점까지를 빔의 반지름(a)으로 고려하였으며, 광에너지가 시편에 흡수되는 깊이를 나타내는 광흡수계수(λ)는 광흡수의 지수법칙을 이용하여 정의하였다.

$$Q(r, z, t) = \frac{\lambda P}{4\pi a^2} e^{-r^2/a^2} e^{-\lambda z} e^{i\omega t} \quad (3)$$

여기서 P 는 시편에 흡수된 에너지를 나타낸 것으로 가열빔의 출력과 시편의 반사율에 의하여 결정된다. 열원 $Q(r, z, t)$ 는 시간에 독립적인 항과 일정한 주기를 가지고 계속해서 진동하는 항으로 구성된다. 시간에 대하여 독립적인 항은 변형의 위상에 영향을 주지 않으므로 고려하지 않고 시간에 대하여 종속적인 부분만을 고려하였다.

열전도 미분방정식은 적분변환법을 이용하여 풀 수 있다. 식 (1)의 해는 일반해와 특해의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 β 는 적분변수이며, F 와 G 는 식 (5)와 (6)에 나타내었다.

$$T(r, z, t) = \int_0^\infty \beta d\beta J_0(\beta r) e^{i\omega t} [F e^{-\lambda z} + A \sinh(\xi z) + B \cosh(\xi z)] \quad (4)$$

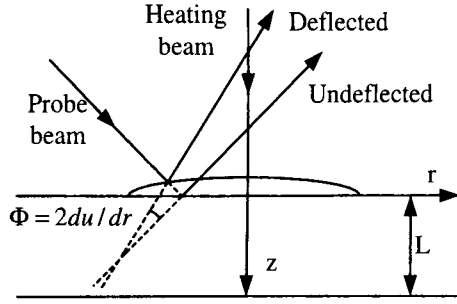


Fig. 1 The Principle of a measurement and theoretical model

$$F = -\frac{P\lambda}{8\pi k} \frac{e^{-\beta^2 a^2/4}}{\lambda^2 - \xi^2} \quad (5)$$

$$\xi = (\beta^2 + i\omega/\alpha)^{1/2} \quad (6)$$

식 (4)에서 계수 A와 B는 식 (2)의 경계조건을 적용하여 구하였다. 식 (4)에 F 그리고 계수 A와 B를 대입하여 시간에 대하여 종속적인 온도분포를 구하면 다음과 같다.

$$T(r, z, t) = -\frac{P\lambda}{8\pi k} e^{i\omega t} \int_0^\infty \frac{\beta d\beta J_0(\beta r)}{\lambda^2 - \xi^2} e^{-a^2\beta^2/4} \times \left[e^{-\lambda z} + \frac{\lambda}{\xi} \left\{ \frac{\sinh(\xi z)}{\tanh(\xi L)} + \frac{e^{-\lambda L}}{\sinh(\xi L) \cosh(\xi z)} \right\} \right] \quad (7)$$

식 (7)의 온도분포를 이용하여 열탄성 변형에 대한 관계식을 구하기 위하여 식 (8)과 같은 지배 방정식을 사용하였고 시편 주위에는 외력이 작용하지 않는다고 가정하였다.^(5,8,9)

$$\nabla^2 \vec{u} + \frac{\nabla(\nabla \cdot \vec{u})}{1-2\nu} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_{th} \nabla T \quad (8)$$

$$\sigma_{rz}|_{z=0,L} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0,L} = 0 \quad (9)$$

식 (8)의 열탄성방정식과 식 (9)의 경계조건을 이용하여 최종적인 변형구배식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} \Big|_{z=0} = \frac{(1+\nu) \alpha_{th} P \lambda^2}{2\pi k L} \int_0^\infty \frac{\delta^2 d\delta J_1(\delta r)}{\lambda^2 - \xi^2} \times \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\eta_p^2 H e^{-\delta^2 a^2/4} [(-1)^p - \cosh(\xi L)]}{\xi(\delta^2 + \eta_p^2)(\xi^2 + \eta_p^2) \sinh(\xi L)} \quad (10)$$

$$H = \frac{\sinh^2(\delta L) + \delta L \sinh(\delta L) \cos(p\pi)}{\delta^2 L^2 - \sinh^2(\delta L)} \quad (11)$$

$$\eta_p = \frac{p\pi}{L} \quad (12)$$

여기서 δ 는 적분변수를 나타내며, J_1 은 1차 Bessel 함수를 나타낸다.

2.2 측정원리

Fig. 1은 광열변위법의 측정원리를 개략적으로 나타낸 것이다. 임의의 주파수로 변조된 가열빔이 시편의 표면에 조사되면 단속된 에너지의 일부는 반사되고 일부는 시편내부로 흡수되어 온도변화를 야기시킨다. 이러한 온도변화는 시편내의 체적상호간의 팽창으로 인한 열탄성으로 인하여 시편 표면의 변형을 유발시킨다. 이러한 열탄성 변형은 재료의 열확산계수와 같은 열적 성질과 광흡수계수와 같은 광학적 성질에 따라 다르게 나타난다. 시편 표면 위의 공기에 의한 굴절을 무시하면, 검사빔의 입사각과 반사각의 차이는 변형의 기울기에 비례한다.

$$\theta = 2 \frac{du}{dr} \Big|_{z=0} \quad (13)$$

여기서 du/dr 은 변형의 기울기이다.

일반적으로 광열변위법을 이용하여 열확산계수를 결정하는 방법에는 식 (10)과 같이 시편의 표면에서의 변형각을 이용하는 방법과 열탄성 변형이 발생하면 가열빔의 중심으로부터 거리가 멀어질수록 위상지연이 발생하여 나타나는 위상각을 이용한다. 이러한 위상각은 식 (13)이 복소수로 구성되므로 적분항내의 값에만 의존하며 위상각 θ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta(r, f, a, \alpha) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[\Phi]}{\text{Re}[\Phi]} \right) \quad (14)$$

변형각과 위상각을 이용하는 방법은 실험과 이론해석을 통하여 얻은 결과를 비교하여 열확산계수를 결정한다. 본 연구에서는 변형각의 성분중에서 실수부값, $\text{Re}(\Phi)$ 을 이용하여 열확산계수를 계산할 수 있는 관계식을 제시하였다.

시편의 표면에서의 변형각의 실수값은 상대거리, 시편의 두께, 가열빔의 변조주파수, 열확산계수, Poisson 비, 열팽창계수, 열전도계수, 광흡수계수의 함수이다. 실험을 통하여 얻은 변형각과 위상각을 이용하여 실험에서의 변형각의 실수부 값

을 결정할 수 있고, 이론해석을 통하여 얻은 $Re(\Phi)$ 값과 비교하여 열확산계수의 결정이 가능하다. 그러나 식 (10)의 적분 밖에 있는 Poisson 비, 열팽창계수 그리고 열전도계수는 단순히 변형각의 크기를 증폭시키거나 감소시키는 상수 역할을 한다. 특히 이 변수들은 변형각의 실수값이 0이 되는 상대위치에는 전혀 영향을 주지 않는다. 본 연구에서는 가열빔의 변조주파수와 시편의 열확산계수에 의하여 결정되는 열확산길이($= (a/\pi f)^{1/2}$)와 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리(r_0)를 이용하여 열확산계수를 결정할 수 있는 관계식을 제시하고 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 검증하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 가열빔은 488nm 파장의 연속빔으로 직경 1.3mm의 Gaussian 분포를 가지는 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 시편에 조사되는 가열빔은 lock-in 증폭기에 의하여 제어되는 A/O (acousto-optic) 변조기를 이용하여 사인파로 변조시켰다. 사인파로 변조된 가열빔은 광로를 조절하기 위한 광학용 거울과 빔의 분포를 고르게 하는 collimator를 통과한 후 볼록렌즈를 지나면서 시편상에 직경이 약 110~120 μ m가 되도록 조절하였다. 검사빔은 633nm의 파장을 갖고 출력이 5mW 인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 검사빔도 가열빔과 마찬가지로 광학용 거울, collimator 그리고 볼록렌즈를 지나 시편상에서 지름이 약 40 μ m가 되도록 조절하였다. 모든 실험장치는 실험의 정밀도를 높이기 위하여 광학실험대 위에 설치하였다.

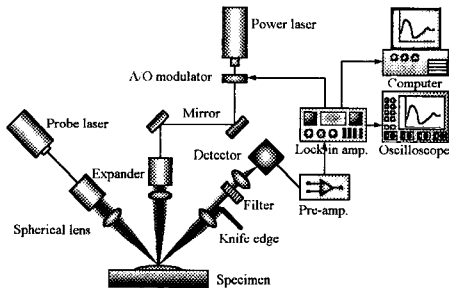
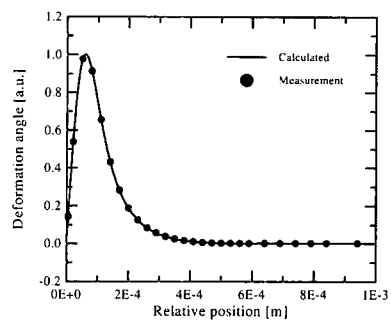
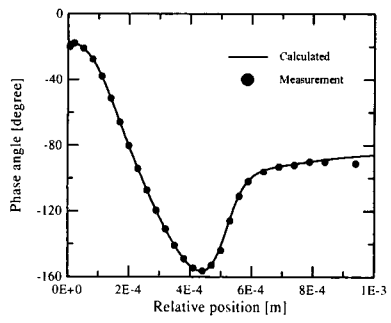


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

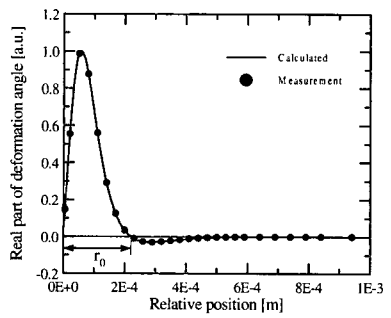
시편은 가열빔과 수직을 이루도록 하였고 검사빔과는 45°의 각을 유지하도록 1/60°의 분해능을 가지는 회전 이송장치와 0.5 μ m의 분해능을 가지는 이송장치 위에 고정시켰다. 시편에서 반사된 검사빔은 Knife-edge에 의해 광량의 반이 가려지도록 만든 후 실리콘 photodiode로 들어간다. Photodiode에서 나오는 신호는 1차 증폭기를 거친 후 lock-in 증폭기에서 A/O 변조기의 신호와 동기시켜 위상을 측정하여 컴퓨터로 저장하였다.



(a) Deformation angle



(b) Phase angle



(c) Real part of deformation angle

Fig. 3 The deformation angle, phase angle, and real part of of deformation angle of iron in radial direction (frequency=450Hz, thickness =1mm, beam radius=60 μ m)

3.2 실험방법

본 연구에서 사용한 시편은 순도가 99.98% 이상인 철, 구리, 그리고 아연을 사용하였다. 모든 시편은 국부적인 광학적 특성의 변화를 줄이기 위하여 알루미늄 분말로 연마하여 경면처리를 한 후 사용하였다. 시편의 두께는 10 μ m의 분해능을 가지는 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 가열빔과 검사빔의 크기는 Knife-edge 방법⁽¹⁰⁾을 이용하여 측정하였다. 이 방법은 Knife-edge로 빔을 점차적으로 가리면서 광량의 변화를 측정하는 것으로 오차함수의 형태를 가지는 검출기의 출력을 미분하여 Gaussian 분포로 만든 후 최대값의 1/e가 되는 지점까지의 거리가 빔의 크기이다.

실험은 검사빔이 가열빔에 의한 변형의 중심선을 따라 이동하도록 상대거리를 조절한 후 변형의 중심선을 따라 두 빔의 상대거리를 0.5 μ m 분해능을 가지는 이송장치를 이용하여 10~100 μ m 정도의 간격으로 변화시키면서 수행하였다. 실험 결과는 한 지점에서 50개 정도의 결과를 취득한 후 최대값과 최소값을 제외한 나머지를 산술 평균하여 사용하였다.

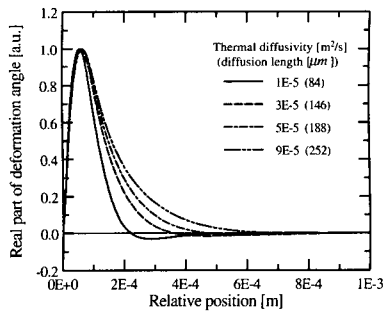


Fig. 4 Real part of deformation angle of various thermal diffusivity samples

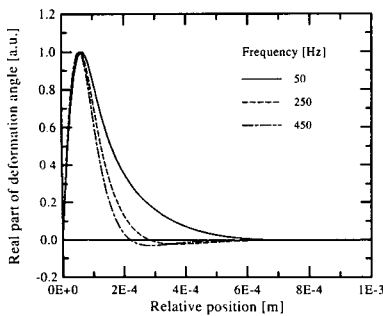


Fig. 5 Real part of deformation angle of various modulation frequencies

4. 결과 및 검토

광열변위법에 의하여 측정된 대표적인 신호는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 변형각은 대략 가열빔 반경부근까지는 급격히 증가하다가 서서히 감소하며 위상각은 두 빔의 상대위치가 증가함에 따라 감소하다가 증가하여 임의의 값에 수렴한다. 변형의 중심선상에서 한쪽편만을 나타낸 것으로 반대쪽은 대칭인 모양을 가진다.

본 연구에서는 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리를 r_0 (zero-crossing position)로 정의하였다. Zero-crossing position을 사용하여 열확산계수를 결정하는 방법은 실험과 이론해석을 통하여 구한 변형각의 실수성분의 비교를 위해서 normalizing을 수행해야 하는 복잡한 과정이 필요로 하지 않기 때문에 상당히 편리한 방법으로 판단된다.

열확산계수, 변조주파수, 시편의 두께, 그리고 가열빔의 반경이 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리에 미치는 영향을 살펴보았다.

4.1 열확산계수의 영향

서로 다른 열확산계수를 가지는 재료에 대하여 가열빔과 검사빔의 상대거리의 변화에 따른 변형각의 실수부값에 대한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이 결과는 시편의 두께가 1mm, 가열빔의 반경이 60 μ m, 재료에 흡수된 에너지가 0.33W 그리고 변조주파수를 450Hz로 설정하여 계산한 결과이다. Fig. 4에서 열확산계수가 큰 재료일수록 변형각이 0이 되는 상대위치가 가열빔의 중심에서 멀어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 열확산계수가 큰 재료일수록 열확산계수가 작은 재료에 비하여 흡수된 에너지가 넓은 면적으로 확산되기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

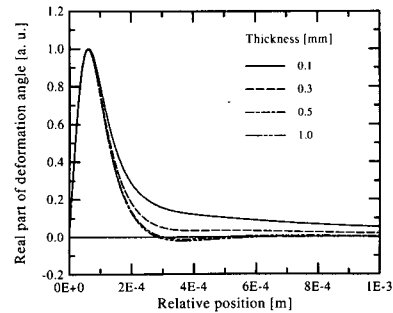


Fig. 6 Real part of deformation angle for various thicknesses

Table 1 Comparison of the measured thermal diffusivity and literature value⁽⁸⁾

	Thickness (mm)	Frequency (Hz)	Zero-crossing position (μm)	Measured Thermal diffusivity ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^5$	Literature value ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^5$	Error(%)
Copper	0.87	3052	276.2	11.29	11.6	2.64
Iron	1.03	904	233.5	2.36	2.3	2.52
Zinc	0.78	1157	275.5	4.26	4.4	3.23

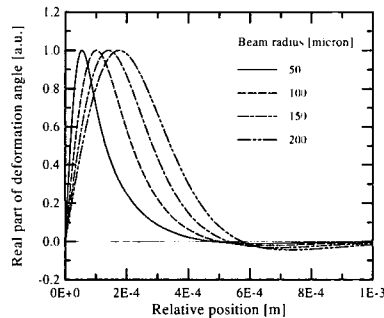


Fig. 7 Real part of deformation angle of various radius

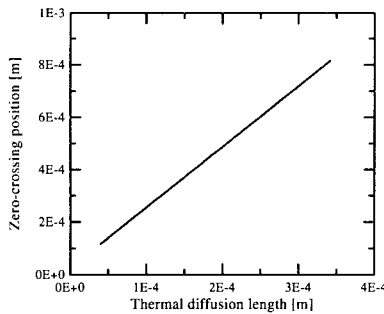


Fig. 8 Zero-crossing position versus thermal diffusion length (beam radius=55 μm)

4.2 변조주파수에 따른 영향

Fig. 5는 가열빔의 변조주파수를 50Hz, 250Hz, 그리고 450Hz로 변화시켰을 때 반경방향에 대한 변형각의 실수값을 나타낸 것이다. 이 결과는 시편의 두께가 1mm, 가열빔의 반경이 60 μm , 재료에 흡수된 에너지가 0.33W 그리고 열확산계수를 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 설정하여 계산한 결과이다. 변조주파수가 커질수록 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리는 펌프빔의 중심에 가까워진다. 이러한 현상은 가열빔의 변조주파수가 증가하면 한 주기 당 재료에 흡수되는 에너지가 감소함으로 인하여 흡수된 에너지가 확산되는 면적이 작아지기 때문인 것으로 사료된다.

4.3 시편의 두께에 따른 영향

재료의 두께를 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm, 그리고 1mm로 변화를 주었을 때 반경방향에 대한 변형각의 실수부를 Fig. 6에 나타냈다. 해석결과는 열확산 길이를 113 μm 로 설정하여 계산한 것으로 열확산 길이에 대한 두께(L/L_{th})의 비가 5이상인 두께에서는 변형각의 실수부의 값이 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 시편의 두께를 L/L_{th} 의 값이 5 이상이 되도록 하면 시편 두께의 영향을 무시할 수 있기 때문에 실험적으로 오차가 많은 두께측정에서의 불확실도를 무시할 수 있다.

4.4 가열빔의 크기에 따른 영향

Fig. 7은 가열빔 반지름의 영향을 알아보기 위하여 반지름의 크기를 50, 100, 150, 그리고 200 μm 로 변화시키면서 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 시편의 두께가 2mm, 가열빔의 반경이 60 μm , 재료에 흡수된 에너지가 0.33W, 가열빔의 변조주파수는 400Hz 그리고 시편의 열확산계수를 $5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 설정하여 계산한 결과이다.

가열빔의 반지름의 크기가 증가하게 되면 에너지가 확산되는 면적이 증가하기 때문에 변형각의 실수값이 최대인 상대거리는 가열빔의 중심에서 멀어지는 것을 알 수 있다. 그러나 r_0 는 반경의 크기 변화에 비하여 그 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 특히 실제적으로 실험에 적용되는 반지름의 영역인 50~60 μm 에서는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

4.5 열확산계수의 결정

광열변위법을 이용하여 열확산계수를 결정하는 방법으로는 실험으로 측정한 위상곡선 또는 변형각 곡선을 이론해석에서 열확산계수를 변화시키면서 오차가 최소가 되도록 하는 방법과 특성주파수를 이용하는 방법 등이 주로 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법들은 분석시간이 많이 소요되며 비교적 오차도 크다.

본 연구에서는 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리가 가열빔의 반경, 변조주파수에만 의존하는 특성을 이용하여 고정된 가열빔의 반경에 대하여 Fig. 8에 나타낸 바와 같은 관계를 얻을 수 있었다. 즉, 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리와 가열빔의 변조주파수와 재료의 열확산계수에 의하여 결정되는 열확산길이와 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 관계로부터 가열빔의 변조주파수가 결정되면 변형각의 실수값이 0이 되는 상대거리를 찾음으로써 열확산계수를 쉽게 결정할 수 있다. 변형각의 실수값이 0이 되는 zero-crossing position은 시편의 두께가 열확산길이보다 2.5배 이상인 열적으로 두꺼운(thermally thick) 재료의 경우에 존재하며, L_{th}/L 이 5 이상의 영역에서 식 (15)과 같이 선형적인 관계식을 얻을 수 있다.

$$r_0 = C_1 L_{th} + C_2 \quad (15)$$

식 (23)을 열확산길이의 정의로부터 열확산계수에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$a = \pi f \left(\frac{r_0 - C_2}{C_1} \right)^2 \quad (16)$$

가열빔의 지름이 $110\mu\text{m}$ 인 경우에 C_1 과 C_2 는 2.3178, 2.3344×10^{-5} 이고 지름이 $120\mu\text{m}$ 인 경우에는 C_1 과 C_2 는 2.3044, 2.7485×10^{-5} 이다.

이상의 결과를 검증하기 위하여 열확산계수가 서로 다른 구리, 철 그리고 아연에 대하여 실험을 수행하였다. 각 재료에 대하여 가열빔의 여러 가지 변조주파수에 대하여 가열빔과 검사빔의 상대위치에 따른 변형각과 위상각을 측정하였다. 측정된 변형각과 위상각의 값을 이용하여 변형각의 실수값이 0이 되는 zero-crossing position을 구하였으며, 식 (16)를 이용하여 열확산계수를 결정하였다.

이러한 방법으로 결정한 열확산계수는 참고문헌 (11)에 나타나 있는 값들과 비교하였을 때 오차가 최대 5% 정도이다.

Table 1에는 본 연구에서 제시한 열확산길이와 zero-crossing position과의 관계를 이용하여 구한 열확산계수와 참고문헌의 값을 비교하여 나타낸 것이다. 이러한 결과는 다른 방법에 비하여 측정방법이 간단하고 정확도도 우수한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 광열효과를 이용하여 좀 더 간편하고 정확하게 열확산계수를 측정하기 위하여 변형각의 실수부값이 0이 되는 상대거리에 영향을 주는 열확산계수, 가열빔의 반경과 변조 주파수, 그리고 재료의 두께의 관계를 연구하였고 이러한 결과를 토대로 정량적인 열확산계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Zero-crossing position은 열확산계수가 증가할수록 가열빔의 중심으로부터 멀어지고, 변조주파수가 증가할수록 가열빔의 중심에 가까워진다.

(2) 열확산길이에 대한 두께(L/L_{th})의 비가 5 이상인 두께에서는 변형각의 실수부의 값이 두께의 변화에 관계없이 일정한 것을 알 수 있다.

(3) 변형각의 실수값이 최대인 상대거리는 가열빔의 중심에서 멀어지는 것을 알 수 있다. 그러나 r_0 는 반경의 크기 변화에 비하여 그 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다.

(4) L_{th}/L 이 5 이상의 영역에서 열확산길이와 r_0 와의 선형적인 관계로부터 열확산계수를 구할 수 있는 간단한 관계식을 제시하였다. 반면 L/L_{th} 가 2.5에서 5 사이의 구간에서는 열확산길이와 r_0 와의 관계가 5 이상에서처럼 직선적으로 나타나지 않으며, 실험조건에 따라 다른 관계를 나타내므로 적용에 어려움이 있다.

(5) 본 연구에서 제시한 열확산계수 측정방법은 다른 방법에 비하여 비교적 간단하며 상대오차 5% 이내에서 열확산계수를 결정할 수 있다.

이 방법은 다른 방법에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있다. 예를들면, 열확산계수를 결정하기 위하여 비교적 측정하기가 어려운 변형의 크기나 복잡한 이론을 필요로 하지 않는다. 더 중요한 것은 열확산계수를 신호의 크기를 이용하지 않고 크기가 0이 되는 상대거리를 이용하여 결정하기 때문에 가열빔의 출력과 재료의 광흡수계수, 반사율, Poisson 비 그리고 열팽창계수 등에 독립적이라는 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원 국가지정연구실 사업(기계 열물성 측정에 관한 연구)에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Olmstead, M. A., Amer, N. M. and Kohn, S., 1983, "Photothermal Displacement Spectroscopy : An Optical Probe for Solids and Surfaces," *Appl. Phys. A*, Vol. 32, pp. 141~154.
- (2) Chen, Z. and Mandelis, A., 1992, "Thermal Diffusivity Measurements of Ultrahigh Thermal Conductors with Use of Scanning Photothermal Rate-Window Spectrometry : Chemical-Vapor-Deposition Diamonds," *Phys. Rev.*, Vol. B46.
- (3) Fournier, D., Boccara, A. C., Skumanich, A. and Amer, N. M., 1986, "Photothermal Investigation of Transport in Semiconductors: Theory and Experiment," *J. Appl. Phys.* 59, p. 787.
- (4) Salazar, A., Sanchez-Lavega, A. and Fernandez, J., 1991, "Thermal Diffusivity Measurements in Solids by the Mirage Technique: Experimental Result," *J. Appl. Phys.*, Vol. 69, No. 3, pp. 1216~1223.
- (5) Li, B., Zhen, Z. and He, S., 1986, "Modulated Photothermal Deformation in Solids," *Appl. Phys. D*, Vol. 24, pp. 2196~2209.
- (6) 이은호, 이광재, 전필수, 유재석, 김기현, 2001, "광열변위의 최소위상을 이용한 열확산계수 측정," 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제3호, pp. 296~304.
- (7) Ozisik, M. N., 1983, *Heat Conduction*, 2nd ed., Wiley Interscience.
- (8) Nowacki, W., 1986, *Thermoelasticity*, 2nd ed, Pergamon Press.
- (9) Melnikov, Y. A., 1995, *Green's Functions in Applied Mechanics*, Computational Mechanics Publications.
- (10) Bayazitoglu, Y. and Ozisik, M., 1988, *Elements of Heat Transfer*, McGraw Hill, New York.
- (11) Shackelford J. F., 1994, *CRC Material Science and Engineering Handbook*, CRC Press.