

광열변위의 최소위상을 이용한 열확산계수 측정

이은호[†] · 이광재* · 전필수** · 유재석*** · 김기현***
(2000년 4월 12일 접수, 2001년 1월 10일 심사완료)

Measurement of Thermal Diffusivity Using Minimum Phase Based on the Photothermal Displacement

Eunho Lee, Kwangjai Lee, Pilsoo Jeon, Jaisuk Yoo and Ki-hyun Kim

Key Words: Photothermal Displacement Method(광열변위법), Thermal Diffusivity(열확산계수), Phase Angle(위상각), Deformation Gradient(변형구배), Thermal Diffusion Length(열확산길이)

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. From the minimum position of phase of measured deflection with respect to the pump beam, the thermal diffusivity of the materials can be obtained. The position where phase has the minimum value is determined using multiparameter least-square regression fitting. The experimental values for different samples obtained by applying the new method are in good agreement with the literature values.

1. 서론

광열효과는 재료표면의 연구, 고체와 유체의 열물성 측정 그리고 재료의 비파괴 검사 등에 있어서 매우 유용하다. 이러한 광열효과와 가장 중요한 특징으로는 재료에 대하여 기계적이나 전기적인 접촉이 없고 재료의 연구에 있어서 응용이나 적용이 쉽다는 것이다. 광열효과를 이용한 여러 가지 실험적 방법이 재료의 열확산계수를 측정하기 위하여 제시되었으며 계속해서 많은 연구가 진행중이다. 특히 광열변위법은 Olmstead 등⁽¹⁾이 제시한 이래 현재 활발하게 연구되고 있다.

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 기울기의 위상각을 계산하였으며 실험결과와 비교한 결과를 바탕으로 광열변위를 이용하여 열물성을 계측할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 1991년에 Li 등⁽²⁾은 사각파로 변조한 가열빔을 가지는 3차원 모델을 제시하여 한 지점에서 가열빔의 변조주파수를 변화시키면서 구한 변형의 크기를 최대 변형의 크기로 나누어 무차원화한 후 무차원 변형의 크기가 급격하게 감소하기 시작하는 변조주파수를 특성주파수로 정의하였다. 이들은 특성주파수와 열확산계수, 시편의 두께 그

† 책임저자, 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail : leeeh@krri.re.kr

TEL : (031)219-2352 FAX : (031)213-7108

* 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

** 아주대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

리고 가열빔 반경의 관계를 이용하여 열확산계수를 구할 수 있는 간단한 관계식을 제시하였지만 특성주파수의 기준이 모호하고 실제로 실험을 통하여 정량적인 열물성을 구하지 못하였다. 같은 해에 Balageas 등⁽³⁾은 열확산계수를 알고 있는 기준물질과 미지 재료에 대하여 가열빔의 변조주파수에 따른 무차원 변형의 크기에 대한 기울기의 비와 두 재료에 대한 열확산계수의 비가 일정하다는 원리를 이용하여 열확산계수를 결정하였다. 하지만 이 방법은 열확산계수를 알고 있는 기준 물질을 필요로 하며 변형의 크기에 대한 기울기를 결정하는 기준이 모호하다. 1999년에 이은호 등⁽⁴⁾은 가열빔의 파형이 싸인파로 변조된 2차원 모델을 제시하고 변형구배와 변형구배의 위상각을 계산하였으며 일정한 변조주파수에서 가열빔과 검사빔의 상대위치를 변화시키면서 구한 위상곡선과 이론에 의한 위상곡선의 비교를 통하여 Fe, Cu 그리고 Ni의 열확산계수를 측정하였다. 이 방법은 이론의 열확산계수를 2분법을 이용하여 변화시키면서 실험에서 구한 위상곡선을 만족하는 열확산계수를 결정하기 때문에 분석방법이 매우 복잡하고 많은 시간이 소요되는 문제가 있다.

기존의 연구에서는 주로 변형의 크기나 기울기 그리고 위상곡선 등을 이용하여 열확산계수를 측정하였다. 변형의 크기와 기울기는 비교적 측정하기가 어려우며 실험결과의 분석에 있어서 복잡한 이론식을 필요로 한다. 위상곡선을 이용하는 방법은 기준물질을 필요로 하거나 그 한계나 기준이 모호하기 때문에 실제 열확산계수를 측정하는데는 많은 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 재료의 열확산계수를 열탄성변형의 최소위상각과 열확산길이의 관계를 이용하여 매우 간편하게 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 이론 및 측정원리

2.1 이론

시편내의 온도분포와 변형구배를 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 r방향으로는 무한하고 z방향으로는 유한한 길이를 가지는 2차원 고체 모델을 선정하였다. 온도해석에서는 대류나 복사에 의한 열전달을 고려하지 않고 단지 전도만을 고려하였다.⁽⁵⁾ 지배방정식은 식 (1)과 같이 열원이 있는 2

차원 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. 경계조건은 식 (2)에 나타내었는데, 가열빔의 지름을 특성길이라고 보았을 때 Bi 수가 0.01보다 매우 작기 때문에 고체표면에서 대류에 의한 열전달은 무시할 수 있으며, 일반적인 금속재료의 경우에 공기에 비하여 금속의 열전도계수가 매우 크기 때문에 경계면에서 전도에 의한 열손실을 무시할 수 있다.

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

열원은 공간에 대하여 Gaussian 분포를 가지는 레이저빔으로 변조주파수, $f (= \omega/2\pi)$,로 단속되고, 최대 강도의 $1/e$ 이 되는 지점까지를 반의 반지름, a , 으로 고려하였으며, 광에너지가 시편에 흡수되는 깊이를 나타내는 광흡수계수, λ , 는 광흡수의 지수법칙을 이용하여 정의하였다.

$$Q(r, z, t) = \frac{\lambda P_0 (1-R)}{4\pi a^2} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2} - \lambda z\right) \times (1 + \cos(\omega t)) \quad (3)$$

여기서 P_0 는 가열빔의 출력, R 은 반사율이나, 열원 $Q(r, z, t)$ 는 시간에 독립적인 항과 일정한 수기를 가지고 계속해서 진동하는 항으로 구성된다. 시간에 대하여 독립적인 항은 변형의 위상각 영향을 주지 않으므로 고려하지 않고 시간에 대하여 종속적인 부분만을 고려하였다.

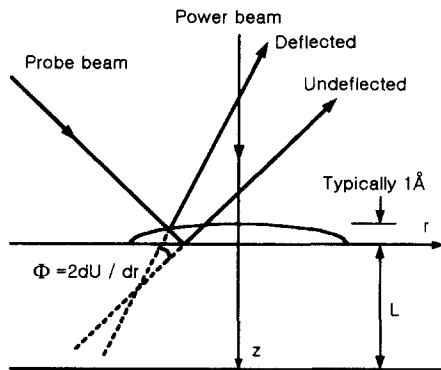


Fig. 1 Principle of measurement and theoretical model

열전도 미분방정식은 적분변환법을 이용하여 풀 수 있다. 식 (1)의 해는 일반해와 특해의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 F와 ξ 는 다음과 같다.

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

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

식 (5)에서 $P(=P_0 \times (1-R))$ 는 시편에 흡수된 에너지를 나타낸 것으로 가열빔의 출력과 시편의 반사율에 의하여 결정된다. 계수 A와 B는 식 (2)의 경계조건을 적용하여 구하였다. 식 (4)에 식 (5)와 (6) 그리고 계수 A와 B를 대입하여 시간에 대하여 종속적인 온도분포를 구하면 다음과 같다.

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

식 (7)의 온도분포를 이용하여 열탄성 변형에 대한 관계식을 구하기 위하여 식 (8)과 같은 지배방정식을 사용하였고 시편 주위에는 외력이 작용하지 않는다고 가정하였다.⁽⁶⁾

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

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

여기서 ν 는 Poisson 비, α_{th} 는 열팽창계수, 그리고 σ 는 응력을 나타낸다.

열탄성 방정식의 해는 식 (10)와 같이 일반해 \vec{u}_h 와 특해 \vec{u}_p 의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 \vec{u}_p 는 다시 열탄성 포텐셜함수 $\nabla \phi$ 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{u} = \vec{u}_p + \vec{u}_h = \nabla \phi + \vec{u}_h \quad (10)$$

식 (10)을 식 (8)에 대입하여 정리하면, 식 (11)과 (12)와 같이 표현할 수 있다. 또한 식 (12)는 Love함수 ϕ 를 적용하여 정리하면 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_{th} T \quad (11)$$

$$(1-2\nu) \nabla^2 \vec{u}_h + \nabla(\nabla \cdot \vec{u}_h) = 0 \quad (12)$$

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad (13)$$

식 (9)의 경계조건은 일반해와 특해에 대한 성분의 합으로 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (14)의 일반해와 특해에 대한 응력 성분은 식 (15)와 같이 ϕ 와 ψ 의 함수로 표현할 수 있다. 여기서 G는 횡탄성계수이다. 식 (11)의 해는 식 (16)에 나타난 2차원 원통좌표계에 대한 Green 함수⁽⁷⁾를 사용하여 구하였다. 여기서 $\eta_p = p\pi/L$ 이고 $J_0(\delta r)$ 은 영차 Bessel 함수이다.

$$\sigma_{rz}|_{z=0,L} = \sigma_{rzp}|_{z=0,L} + \sigma_{rzh}|_{z=0,L} = 0$$

$$\sigma_{zz}|_{z=0,L} = \sigma_{zzp}|_{z=0,L} + \sigma_{zzh}|_{z=0,L} = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rzp} &= 2G \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \\ \sigma_{zzp} &= 2G \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \nabla^2 \phi \right) \\ \sigma_{rzh} &= \frac{2G}{1-2\nu} \left[(1-\nu) \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial r} - \frac{\partial^3 \psi}{\partial r \partial z^2} \right] \\ \sigma_{zzh} &= \frac{2G}{1-2\nu} \left[(2-\nu) \frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial z} - \frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{1}{\pi L} \int_0^\infty \delta d\delta J_0(\delta r) J_0(\delta r') \times \sum_{p=1}^\infty \frac{\sin(\eta_p z') \sin(\eta_p z)}{\delta^2 + \eta_p^2} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 구한 식 (11)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{r}, z) &= -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2\alpha_{th}}{L} \int_0^\infty r' dr' \int_0^L dz' \\ &\times \int_0^\infty \delta d\delta J_0(\delta r) J_0(\delta r') T(\mathbf{r}', z') \\ &\times \sum_{p=1}^\infty \frac{\sin(\eta_p z') \sin(\eta_p z)}{\delta^2 + \eta_p^2} \end{aligned} \quad (17)$$

또한 식 (13)의 일반적인 해는 다음과 같다.

$$\phi(\mathbf{r}, z) = \int_0^\infty J_0(\delta r) [(A + B \delta z) \sinh(\delta z) + (C + D \delta z) \cosh(\delta z)] d\delta \quad (18)$$

식 (18)의 계수 A, B, C 그리고 D는 식 (14)의 경계조건을 적용하여 구할 수 있다. 이러한 결과들을 이용하여 최종적인 변형구배식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Optical & physical properties of specimens

	Thermal diffusivity (m ² /s) × 10 ⁵ at 25 °C	Poisson ratio	Thermal conductivity (W/m · K) at 25 °C	Reflectivity	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁶ at 25 °C	Absorption coefficient × 10 ⁶
Copper(99.98%)	11.6	0.35	398	0.6403	16.6	70
Iron(99.90%)	2.3	0.28	80.3	0.6102	12.0	99
Zinc(99.80%)	4.4	0.35	113	0.747	35.0	97

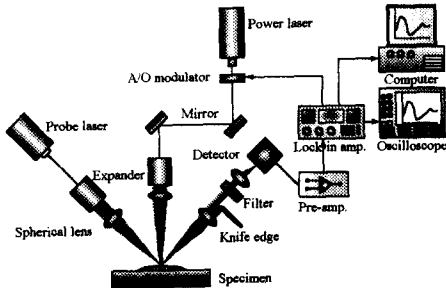


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} \Big|_{z=0} = \frac{(1+\nu)\alpha_{th}P\lambda^2}{2\pi kL} \int_0^\infty \frac{\delta^2 dJ_1(\delta r)}{\lambda^2 - \xi^2} \times \sum_{p=1}^\infty \frac{\eta_p^2 \text{He}^{-\delta^2 a^2/4} [(-1)^p - \cosh(\xi L)]}{\xi(\delta^2 + \eta_p^2)(\xi^2 + \eta_p^2) \sinh(\xi L)} \quad (19)$$

$$H = \frac{\sinh^2(\delta L) + \delta L \sinh(\delta L) \cos(\delta \pi)}{\delta^2 L^2 - \sinh^2(\delta L)} \quad (20)$$

2.2 측정원리

Fig. 1은 광열변위법을 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.

$$\phi = 2 \frac{du}{dr} \Big|_{z=0} \quad (21)$$

여기서 du/dr은 변형의 기울기이다.

시편의 표면에서 열탄성 변형이 발생하면 가열빔의 중심으로부터 거리가 멀어질수록 위상지연이 발생하여 위상각이 다르게 나타난다. 이러한 위상각은 식 (19)이 복소수로 구성되어 있기 때문에 적분항내의 값에만 의존하며 위상각 θ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta(r, f, a, \alpha) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Imag} [du/dr]_{z=0}}{\text{Real} [du/dr]_{z=0}} \right] \quad (22)$$

실험에서는 가열빔과 검사빔의 상대 거리(r), 위상각(θ), 시편의 두께(L), 가열빔의 반경(a) 그리고 변조주파수를 측정할 수 있기 때문에 미지수는 열확산계수만이 남게 된다. 본 연구에서는 가열빔의 변조주파수와 시편의 열확산계수에 의하여 결정되는 열확산길이, $\mu=(a/\pi f)^{1/2}$,와 위상각이 최소가되는 가열빔과 검사빔의 상대거리, p_{min} ,을 이용하여 열확산계수를 결정하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타났다. 가열빔은 488nm 파장의 연속파이며, 지름 1.3mm의 Gaussian 분포를 가지는 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 가열빔은 Lock-in 증폭기에 의하여 제어되는 A/O(acoustic-opto) 변조기를 이용하여 싸인파로 변조하였다. 변조된 가열빔은 빔을 확대하고 빔의 분포를 균일하게 만들어주는 collimator와 빔의 크기를 적절한 크기로 줄일 수 있는 볼록렌즈를 통과하여 시편의 표면 위에는 약 0.12mm 정도의 지름을 가지게 된다. 시편은 각각 1/60도와 0.5 μ m의 분해능을 가지는 회전이송장치와 직선이송장치에 고정하였다.

검사빔은 출력 5mW, 파장 632.8nm 그리고 지름 0.8mm를 가지는 He-Ne 레이저를 사용하였다. 검사빔도 가열빔과 마찬가지로 collimator와 볼록렌즈

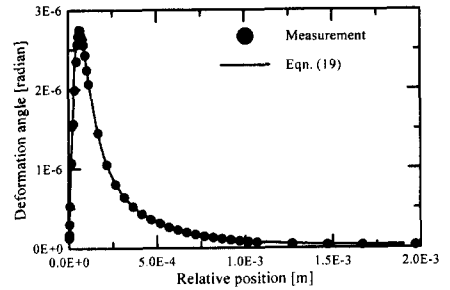
를 통과하여 시편 표면에서 약 0.055mm 정도의 크기를 가지도록 조절하였다. 시편으로부터 반사된 검사빔은 한 개의 볼록렌즈를 통과한 후 knife edge에 의하여 광량의 반을 제거하고 검사빔의 과장만을 통과시키는 여과기를 통과한 후 또 다른 하나의 볼록렌즈를 지나 실리콘 광 다이오드 검출기로 들어간다. 검출기에서 나온 신호는 증폭기를 거친 후 가열빔의 변조주파수와 동기시켜 lock-in 증폭기로 측정하였다. 이 때 전원에 의한 잡음을 제거하기 위하여 60Hz와 120Hz의 신호성분을 제거하여 실험에서의 오차를 줄였다. 신호의 크기와 위상차는 RS232C 통신프로그램을 이용하여 컴퓨터에 저장한 후 자체 제작한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

가열빔과 검사빔의 지름은 Knife-edge 방법⁽⁸⁾을 사용하여 결정하였다. 이 방법은 knife-edge로 빔을 점차적으로 가리면서 광량의 변화를 측정하는 것이다. 이 방법으로 측정된 검출기의 출력은 오차 함수의 형태를 가지는데 이것을 미분하면 Gaussian 분포를 얻을 수 있다. 빔의 반경은 Gaussian 분포에서 최대값의 1/e가 되는 지점까지의 거리이다. 이러한 방법을 통하여 가열빔의 지름은 대략 0.120mm 그리고 검사빔의 지름은 0.055mm로 조절하였다.

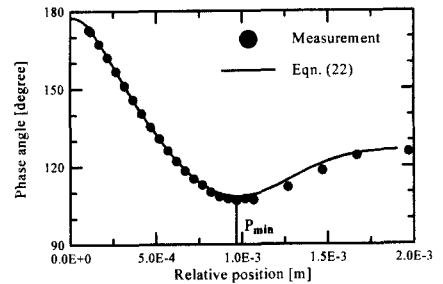
3.2 실험방법

본 연구에서 사용한 시편은 순도가 높은 구리, 철 그리고 아연이며, 물리적 특성과 광학적 특성은 Table 1에 나타냈다. 모든 시편은 광학적 특성의 국부적인 변화를 줄이기 위하여 알루미늄 분말로 연마하여 경면상태로 만든 후 사용하였다. 시편의 두께는 10 μ m의 분해능을 가지는 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

실험은 검사빔이 가열빔에 의한 변형의 중심선을 따라 이동하도록 상대위치를 조절한 후 변형의 중심선을 따라 두 빔의 상대위치를 0.5 μ m 분해능을 가지는 이송장치를 이용하여 10~100 μ m 정도의 간격으로 변화시키면서 수행하였다. 본 연구에서는 열확산계수와 가열빔의 변조주파수에 의하여 결정되는 열확산길이를 재료의 두께로 나눈 비를 0.1~1.0범위에서 0.1 간격으로 조절하면서 실험을 수행하였다. 실험결과는 한 지점에서 50개 정도의 결과를 취득한 후 최대값과 최소값을 제외한 나머지를 산술 평균하여 사용하였다.



(a) Deformation curve

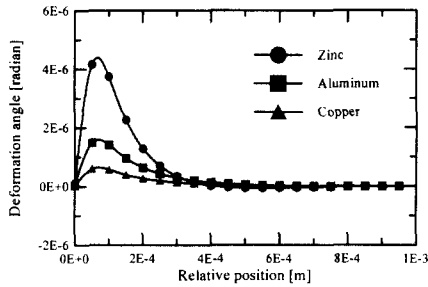


(b) Phase curve

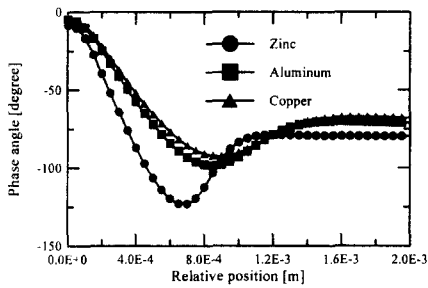
Fig. 3 The deformation curve and phase curve of copper in radial direction (frequency=300Hz, power=0.33W, thickness=0.95mm)

4. 결과 및 검토

광열변위법에 의하여 측정된 대표적인 신호는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 변형각은 가열빔 반경의 대략 0.7배까지는 급격히 증가하다가 서서히 감소하며 위상각은 두 빔의 상대위치가 증가함에 따라 감소하다가 증가하여 임의의 값에 수렴한다. Fig. 3은 변형의 중심선상에서 한쪽편만을 나타낸 것으로 반대쪽은 대칭인 모양을 가진다. 본 연구에서는 위상각이 최소가 되는 위치를 p_{min} 으로 정의하였다. p_{min} 은 측정된 실험결과를 여러 가지 방법으로 맞춤곡선을 시도해 본 결과 5차 polynomial 맞춤곡선이 실험결과를 가장 잘 만족하는 것으로 나타났기 때문에 5차 polynomial 맞춤곡선을 이용하여 위상각이 최소가 되는 위치를 결정하였다. p_{min} 에 영향을 주는 인자는 열확산계수, 시편의 두께, 가열빔의 반경 그리고 변조주파수이다. 따라서 p_{min} 을 이용하여 열확산계수를 결정하기 위하여 p_{min} 에 영향을 주는 인자들의 영향을 살펴보았다.



(a) Deformation curve



(b) Phase curve

Fig. 4 Deformation gradient and phase of various materials

4.1 열확산계수의 영향

서로 다른 열확산계수를 가지는 구리, 알루미늄 그리고 아연에 대하여 가열빔과 검사빔의 상대위치에 대한 변형각과 위상각을 Fig. 4에 나타냈다. 이 결과는 시편의 두께가 1mm, 가열빔의 반경이 60 μ m, 재료에 흡수된 에너지가 0.33W 그리고 변조주파수를 500Hz로 설정하여 계산한 결과이다. Fig. 4(a)에서 변형각의 최대값은 가열빔의 반경 부근에서 나타나며, 열확산계수가 큰 재료일수록 변형각이 최대값을 가지는 위치는 열원의 중심으로부터 멀어지지만 그 정도는 미약함을 볼 수 있다. Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 위상각은 최소점까지는 감소하다가 증가하여 임의의 값에 수렴한다. 열확산계수가 큰 재료일수록 최소점의 위치가 열원의 중심에서 멀어지고, 최고점과 최저점의 차이가 작아짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 열확산계수가 큰 재료일수록 열확산계수가 작은 재료에 비하여 흡수된 에너지가 넓은 면적으로 확산되기 때문에 위상각이 최소가 되는 위치가 가열빔의 중심에서 멀어지는 것으로 사료된다.

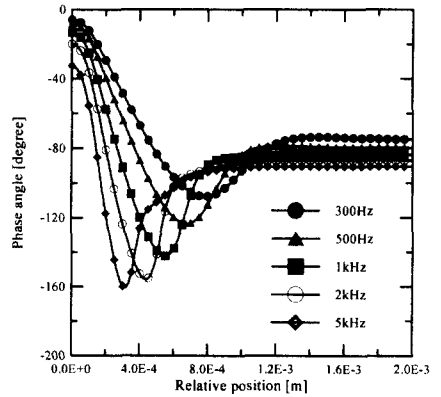


Fig. 5 Phase of zinc for various frequencies.

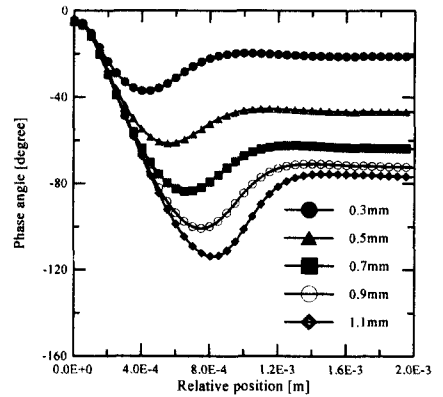


Fig. 6 Phase of zinc for various thickness (frequency=300Hz, power=0.33W)

4.2 변조주파수에 따른 영향

Fig. 5는 가열빔의 변조주파수를 300Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz 그리고 5kHz로 변화시켰을 때 반경 방향에 대한 위상각을 나타낸 것이다. 변조주파수가 커질수록 위상각의 최소값은 더 작아지고, 최소가 되는 상대위치는 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 0.3mm, 0.5mm, 1mm, 1.5mm 그리고 2mm로 변화를 주었을 때 반경방향에 대한 위상각을 Fig. 6에 나타냈다. 시편의 두께가 두꺼워질수록 위상각의 최소값은 더 작아지고 최소점의 위

치는 가열빔의 중심에서 멀어지며, 위상각이 급격히 감소하는 부분의 기울기는 유사한 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 위상각이 최소가 되는 위치를 재료의 두께로 나누어 무차원화시킨 p_{min}/L 에 대하여 열확산계수와 가열빔의 변조주파수에 관계된 열확산길이를 마찬가지로 재료의 두께로 나누어 무차원화시킨 L_{th}/L 을 나타낸 것이다. 무차원 열확산길이가 증가할수록 무차원 최소위상각은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 시편 두께의 영향은 무차원 열확산길이가 증가함에 따라 감소하였으며 이러한 관계는 재료의 종류에는 관계없이 가열빔의 지름과 재료의 두께가 일정하면 동일하게 나타났다.

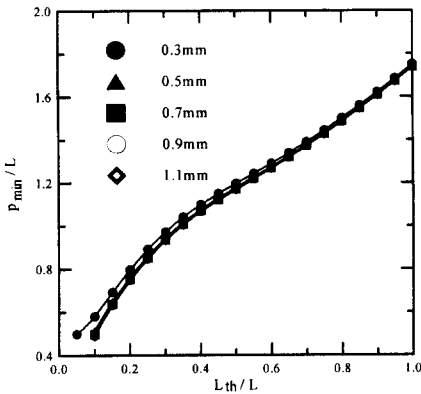


Fig. 7 Normalized minimum position, p_{min}/L , versus normalized thermal diffusion length, L_{th}/L , for different thickness of sample at radius of pump beam $a=110\mu m$

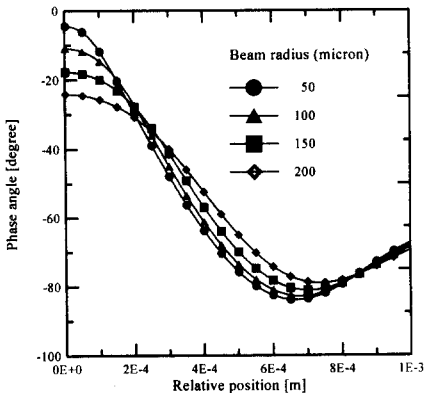


Fig. 8 Phase of zinc for various pump beam radius

4.4 가열빔의 크기에 따른 영향

Fig. 8은 가열빔의 반경을 변화시켰을 때 반경 방향에 대한 위상각을 나타낸 것이다. 가열빔의 반경이 커질수록 최소점의 상대위치는 흡수된 에너지가 확산되는 면적이 증가하기 때문에 중심에서 멀어지지만 위상각이 급격히 감소하는 부분의 기울기는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 위상각이 최소가 되는 위치를 재료의 두께로 나누어 무차원화시킨 p_{min}/L 에 대하여 열확산계수와 가열빔의 변조주파수에 관계된 열확산길이를 마찬가지로 재료의 두께로 나누어 무차원화시킨 L_{th}/L 을 나타낸 것이다. 그림에서 무차원 열확산길이가 증가할수록 무차원 최소위상각은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 가열빔 크기의 영향은 무차원 열확산길이가 증가함에 따라 감소하였으며 이러한 관계는 재료의 종류에는 관계없이 가열빔의 지름과 재료의 두께가 일정하면 동일하게 나타났다.

4.5 열확산계수의 결정

광열변위법을 이용하여 열확산계수를 결정하는 방법으로는 실험으로 측정된 위상 곡선과 이론의 위상 곡선을 열확산계수를 변화시키면서 오차가 최소가 되도록 하는 방법과 특성주파수를 이용하는 방법 등이 주로 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법들은 분석시간이 많이 소요되며 비교적 오차도 크다.

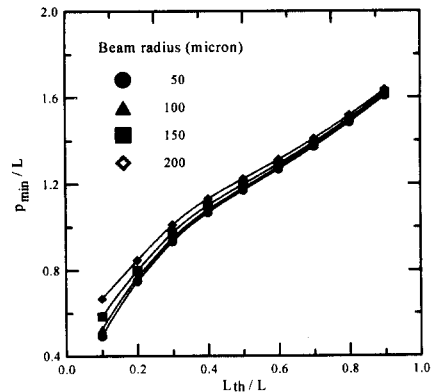


Fig. 9 Normalized minimum position, p_{min}/L , versus normalized thermal diffusion length, L_{th}/L , for different radius of pump beam at thickness of sample $L=0.7mm$

Table 2 Comparison of the measured thermal diffusivity and literature value⁽⁹⁾

	Thickness (mm)	Pump beam diameter (μm)	Measured Thermal diffusivity ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^5$	Literature value ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^5$	Error(%)
Copper	0.82	110	11.5	11.6	1.27
Iron	1.04	110	2.29	2.3	0.60
Zinc	0.78	110	4.39	4.4	0.25

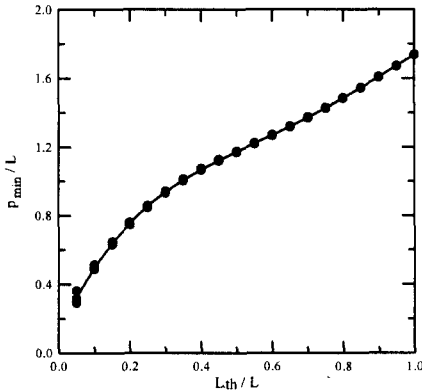


Fig. 10 Normalized minimum phase position versus normalized diffusion length

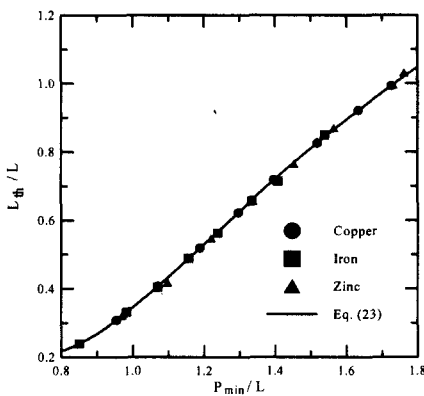


Fig. 11 Comparison of experimental and theoretical result

본 연구에서는 위상각이 최소가 되는 위치가 펌프빔의 반경, 변조 주파수 그리고 재료의 두께에만 의존하는 특성을 이용하여 Fig. 10에 나타낸 바와 같은 관계를 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 위상각이 최소가 되는 위치와 펌프빔의 변조주파수와 재료의 열확산계수에 의하여 결정되는 열확산길이를 재료의 두께로 나누었을 때 재료에 관계없이 동일한 결과가 나타남을 알 수

있었다. 이러한 관계로부터 가열빔의 변조주파수와 재료의 두께가 결정되면 위상각이 최소가 되는 위치를 찾음으로서 열확산계수를 쉽게 결정할 수 있다. 식 (23)은 무차원 열확산길이가 무차원 최소위상각의 관계를 나타낸 것이다.

$$\frac{L_{th}}{L} = \sum_{n=0}^5 A_n \left(\frac{P_{min}}{L} \right)^n \quad (23)$$

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

$$\alpha = \pi f L^2 \left[\sum_{n=0}^5 A_n \left(\frac{P_{min}}{L} \right)^n \right]^2 \quad (24)$$

가열빔의 지름이 110 μm 이고 재료의 두께가 0.5~1mm인 경우에 $A_n(n=0,1,\dots,5)$ 은 2.93, -10.29, 13.77, -8.11, 2.29 그리고 -0.25이다.

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 위상각을 측정하였다. 위상각이 최소가 되는 위치는 맞춤곡선을 이용하여 구하였다. 이러한 방법으로 구한 p_{min} 을 L로 나눈 후 식 (24)에 대입하여 열확산계수를 결정하였다.

실험은 L_{th}/L 가 0.1~1.0 정도의 범위에서 수행하였으나, L_{th}/L 가 0.2보다 작은 경우에는 신호의 크기가 작기 때문에 위상각이 불안정하게 나타나서 측정이 어려웠다. 그리고 L_{th}/L 가 0.8보다 큰 경우에는 두 빔의 상대위치 변화에 따른 위상각의 변화가 너무 작기 때문에 위상각이 최소가 되는 위치를 결정하기가 어려웠지만 신호가 안정되게 측정되기 때문에 열확산계수를 결정하는 데는 큰 문제가 없었다. 하지만 L_{th}/L 가 0.3에서 0.8 범위에 있을 때 실험에서 신호가 안정되게 측정되었고 위상각이 최소가 되는 위치를 결정하는 것이 용이하므로 이 구간에 대한 결과를 이용하여 열확산계수를 결정하였다. 이러한 방법으로 결정한 열확산계수는 참고문헌 [9]에 나타나있는 값들과 비교하였을 때 오차가 최대 3% 정도이다.

Fig. 11은 구리, 철 그리고 아연에 대하여 실험으로부터 구한 결과를 식 (24)와 같이 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (24)는 재료에는 무관함을 알 수 있었고 식 (23)에 나타낸 바와 같은 이론에 의한 결과와 실험결과가 정량적으로 잘 맞고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 다른 방법에 비하여 측정방법이 간단하고 정확도도 우수한 것으로 나타났다. Table 2에는 본 연구에서 제시한 무차원 열확산길이와 무차원 최소위상각의 관계를 이용하여 구한 열확산계수와 참고문헌의 값을 비교하여 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 광열효과를 이용하여 좀 더 간편하고 정확하게 열확산계수를 측정하기 위하여 변형의 위상각이 최소가 되는 위치에 영향을 주는 가열빔의 반경과 변조 주파수, 재료의 두께 그리고 열확산계수의 관계를 연구하였고 이러한 결과를 토대로 정량적인 열확산계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열탄성 변형의 위상각은 재료의 열확산계수, 두께, 가열빔의 크기 그리고 변조주파수에만 영향을 받는다.

(2) 위상각이 최소가 되는 위치는 재료의 열확산계수, 두께 그리고 가열빔의 크기에는 비례하여 증가하지만 가열빔의 변조주파수에는 반비례한다.

(3) 위상각이 최소가 되는 위치와 열확산길이를 재료의 두께로 나누어 무차원화시키면 재료의 종류에 관계없이 동일한 선형적인 관계를 가진다.

(4) 무차원 열확산길이가 증가할수록 가열빔 크기의 영향은 감소하였으며 이러한 경향은 두께에 대해서도 마찬가지로 나타났다. 하지만 가열빔의 자름보다는 재료의 두께가 영향이 작은 것으로 나타났다.

(5) 무차원 열확산길이가 0.3에서 0.8 사이에 있을 때 실험에서 신호가 안정되게 측정되었고 위상각이 최소가 되는 위치를 결정하는 것이 용이하였다.

(6) 본 연구에서 제시한 열확산계수 측정방법은 다른 방법에 비하여 비교적 간단하며 상대오차 3% 이내에서 정확하게 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 위상각으로부터 결정하기 때문에 가열빔의 출력과 재료의 광흡수계수, 반사율, Poisson 비 그리고 열팽창계수 등에 독립적이라는 것이다.

후 기

본 연구는 아주대학교의 연구비 지원과 서울대학교 터보동력기계 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

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) Li, B., Zhen, Z. and He, S., 1986, "Modulated Photothermal Deformation in Solids," *Appl. Phys. D*, Vol. 24, pp. 2196~2209.
- (3) Balageas, D. L., Boscher, D. M., Deon, A. A. and Enguehard, F., 1991, "Photoacoustic Microscopy by Photodeformation Applied to Thermal Diffusivity Determination," *ETPC Proceedings*, Vol. 23, pp. 517~528.
- (4) 이은호, 이광재, 유재석, 1999, "광열효과를 이용한 Fe, Cu 그리고 Ni의 열확산계수 결정," 대한기계학회 열공학부문 추계학술대회 논문집, pp. 121~128.
- (5) Ozisik, M. N., 1983, *Heat Conduction*, 2nd ed., Wiley Interscience.
- (6) Nowacki, W., 1986, *Thermoelasticity*, 2nd ed, Pergamon Press.
- (7) Melnikov, Y. A., 1995, *Green's Functions in Applied Mechanics*, Computational Mechanics Publications.
- (8) Bayazitoglu, Y. and Ozisik, M., 1988, *Elements of Heat Transfer*, McGraw Hill, New York.
- (9) Shackelford J. F., 1994, *CRC Material Science and Engineering Handbook*, CRC Press.