

광열변위의 위상곡선을 이용한 금속재료의 열확산계수 측정

이은호* · 이광재* · 유재석**
(2000년 3월 31일 접수)

Thermal Diffusivity Measurement for Metal Using Phase Curve of Photothermal Displacement

Eunho Lee, Kwangjai Lee and Jaisuk Yoo

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

Abstract

As the technology has developed and new materials have been produced, it is important to measure the thermal diffusivity of material and to predict the heat transfer in the solid subject to thermal processes. This measurement can be done in a non-contact way using photothermal displacement spectroscopy. In this study, photothermal displacement method was used to measure the thermal diffusivity quantitatively. The specimens used in this study were the pure materials. The Ar-ion laser was used as an energy source and the periodical deformation induced by this pump laser was detected by the He-Ne laser. The magnitude and the phase angle of deformation gradient were measured. The thermal diffusivity was obtained by analyzing the phase angle of deformation gradient. As the result, comparing with the literature value, the thermal diffusivities of materials measured were showed about 2% error.

기호설명

a : 가열빔의 반경 (m)

f : 변조주파수 (Hz)

J_1 : 1차 Bessel 함수

K : 열전도계수 (W/m·K)

L : 시편의 두께 (m)

L_{th} : 열확산길이 (m)

P : 가열빔의 출력 (W)

T : 온도 (K)

r : 반경방향의 거리 (m)

u, U : 변위 백터

z : 시편의 두께방향의 거리 (m)

α : 열확산계수 (m^2/s)

α_{th} : 열팽창계수 ($1/K$)

β : 광흡수계수 ($1/m$)

θ : 검사빔의 편향각 (rad)

ν : Poisson 비

ψ : 위상각 (degree)

ω : Angular frequency ($=2\pi f$)

1. 서론

고체 재료에 있어서 열확산계수를 측정하는 것은 기존 재료의 개량, 신소재의 개발, 위성체의 열적문제 그리고 태양 에너지 등의 분야에서 매우 중요한 부분의 하나이다. 최근 비교적 오차가 크고 측정의 제약이 많은 기존의 접촉식 열확산계수 측정방법의 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 비접촉 열확산계수 측정방법이 제시되고

* 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

E-mail: transleh@hanmail.net

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

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

** 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

있다. 그 중에서도 광열효과를 이용한 방법은 재료의 크기나 형태에 있어서 비교적 제약이 적으며 비접촉으로 높은 정밀도를 가지고 열확산계수를 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

광열효과에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다. 재료의 표면에 일정한 주기로 빛 에너지를 조사(irradiation)하면 일부는 흡수하고 일부는 반사하게 된다. 이 때 재료의 표면에서 흡수된 에너지는 국부적인 온도의 상승을 야기하여 온도구배가 발생하고 이러한 온도구배는 열탄성 변형을 일으킨다. 이와 같이 발생한 열탄성 변형의 주기는 재료에 조사되는 빛 에너지의 주기와 동일하며 재료의 열적 또는 광학적인 특성에 따라 그 변형의 크기나 위상각이 다르게 나타난다. 따라서 변형의 크기나 위상각을 측정하면 재료의 열적 특성을 결정할 수 있다.

광열효과를 이용하여 열물성을 측정하는 방법에는 Chen⁽¹⁾ 등에 의하여 연구된 photothermal radiometry, Fournier⁽²⁾ 등에 의하여 연구된 photothermal refraction, Bertolotti⁽³⁾ 등에 의하여 연구된 photothermal deflection 그리고 Olmstead⁽⁴⁾ 등에 의하여 연구된 광열변위법 등이 있다. 본 연구에서는 1983년 Olmstead 등에 의하여 그 이론이 정립되어 사용되고 있는 광열변위법을 사용하였다. Olmstead 등은 싸인파로 변조한 가열빔을 가지는 2차원 모델을 제시하고 표면의 변형각과 기울기의 위상각을 계산하였으며 실험결과와 비교한 결과를 바탕으로 광열변위를 이용하여 열물성을 측정할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 1991년 Bingchen⁽⁵⁾ 등은 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 그리고 가열빔 반경의 관계를 이용하여 열확산계수를 구할 수 있는 간단한 관계식을 제시하였지만 특성주파수의 기준이 모호하고 실제로 실험을 통하여 정량적인 열물성을 구하지 못하였다. 같은 해에 Balageas⁽⁶⁾ 등은 열확산계수를 알고 있는 기준물질과 미지 재료에 대하여 가열빔의 변조주파수에 따른 무차원 변형의 크기에 대한 기울기의 비와 두 재료에 대한 열확산계수의 비가 일정하다는

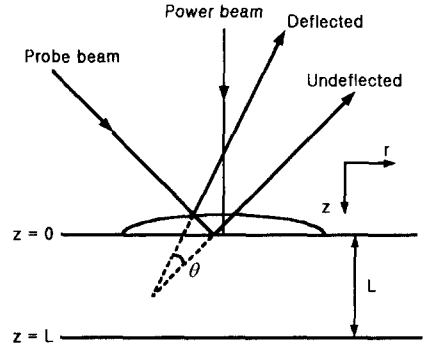


Fig. 1 Theoretical model and principle

원리를 이용하여 열확산계수를 결정하였다. 하지만 이 방법은 열확산계수를 알고 있는 기준 물질을 필요로 하며 변형의 크기에 대한 기울기를 결정하는 기준이 모호하다.

이상의 연구들은 광열변위법을 이용하여 열확산계수를 측정할 수 있는 가능성을 제시하거나 실험결과를 이용하여 열확산계수를 결정하는 기준이 모호하기 때문에 실제 적용이 어려웠다. 따라서, 기준물질이나 열확산계수의 결정 기준이 모호한 특성주파수를 사용하지 않고 위상곡선에서 위상각이 감소하는 부분의 기울기를 이용하여 열확산계수를 정량적으로 결정하였다.

2. 이론 및 측정원리

2.1 이론

광열변위법의 개략적인 측정원리와 이론적인 모델은 Fig. 1에 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 두께가 L 인 재료의 표면에 수직으로 조사되는 가열빔은 임의의 주파수 f 로 변조되며 검사빔은 가열빔과 일정한 각도를 가지고 시편의 표면에 조사된다. 시편의 표면에 가열빔이 조사되지 않을 때에는 검사빔의 입사각과 반사각이 동일하지만 가열빔이 시편에 조사되면 탄성변형에 의하여 검사빔의 입사각과 반사각은 다르게 나타난다. 시편의 표면에 표형이 발생하였을 때 검사빔의 편향각 θ 는 변형구배 du/dr 의 2배가 된다. 여기서 u 는 표면 변형의 수직성분을 의미한다.

Fig. 1과 같이 두께가 두꺼운 무한 평판의 경우, 열전도 방정식과 열탄성 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$Q(r, z, t) = (P\beta/2\pi a^2) e^{-r^2/a^2} e^{-\beta z} \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$\nabla^2 U + \frac{\nabla(\nabla \cdot U)}{1-2\nu} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_{th} \nabla T \quad (3)$$

여기서 K 는 열전도계수, α 는 열확산계수, P 는 가열빔의 출력, β 는 광흡수계수, a 는 Gaussian 분포를 가지는 가열빔의 $1/e$ 반경, ω ($=2\pi f$)는 angular frequency, ν 는 poisson ratio 그리고 α_{th} 는 열팽창계수이다. 본 연구에서는 모든 표면에서 단열이며 z 방향의 응력이 존재하지 않는다는 가정하에 다음과 같이 Olmstead⁽⁴⁾에 의해 제시한 해를 이용하여 결과를 분석하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial r}(r, 0) = -\frac{\alpha_{th}\beta P(1+\nu)}{16\pi K(1-\nu)} \times \left[\int_0^\infty \frac{q^2 dq J_1(qw/L) \exp(-q^2 a^2/4L^2)}{\sinh(q) \{ (\beta L)^2 - S^2 \}} \times \{ R(-\beta L) + C_1 R(-S) + C_2 R(S) \} \right] \quad (4)$$

여기서 R 과 $C_{1,2}$ 는

$$R(x) = \left[\frac{e^x - e^q}{x - q} - \frac{e^x - e^{-q}}{x + q} \right] + B_1 \left[\frac{e^{x+q/2} - e^{-q/2}}{x + q} - \frac{e^{x-q/2} - e^{q/2}}{x - q} \right] + B_2 \left[\frac{e^{x+q/2} - e^{-q/2}}{x + q} - \frac{e^{x-q/2} - e^{q/2}}{x - q} \right]$$

$$C_{1,2} = \frac{\beta L \{ \exp(-\beta L) - \exp(\pm S) \}}{S \times 2 \sinh(S)}$$

$$B_1 = \frac{-\sinh(q/2) [q - (1-2\nu)\sinh(q)]}{q + \sinh(q)}$$

$$B_2 = \frac{\cosh(q/2) [q + (1-2\nu)\sinh(q)]}{q - \sinh(q)}$$

$$S^2 = q^2 + i(2L^2 / L_{th}^2) \quad (5)$$

여기서 $L_{th} = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 는 열확산 길이이다.

식 (4)에서 적분항 내부의 값은 복소수로 구성 되어 있으며, 열확산계수, 시편의 두께, 가열빔의 반경 그리고 변조주파수를 알면 반경방향의 거리 r 의 함수인 $f(r)$ 로 표현할 수 있다. 그러므로 반경 방향의 거리 r 에 따른 위상각은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(r) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Imag} [f(r)]}{\text{Real} [f(r)]} \right] \quad (6)$$

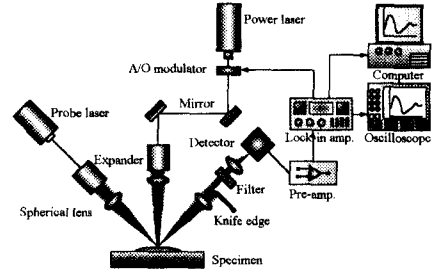


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

실험에서는 반경 방향의 거리(r), 위상각(ϕ), 시편의 두께(L), 가열빔의 반경(a) 그리고 변조주파수(f)를 측정할 수 있기 때문에 미지수는 열확산계수만이 남게 된다. 따라서 본 연구에서는 실험에서 측정된 위상각과 식(6)의 위상각의 비교를 통하여 열확산계수를 구하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 가열빔은 488 nm 파장의 연속빔으로 직경 1.3 mm의 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 μm 가 되도록 조절하였다. 검사빔은 633 nm의 파장을 갖고 출력이 5 mW 인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 검사빔도 가열빔과 마찬가지로 광학용 거울, collimator 그리고 볼록렌즈를 지나 시편상에서 지름이 약 40 μm 가 되도록 조절하였다. 모든 실험장치는 실험의 정밀도를 높이기 위하여 광학실험대 위에 설치하였다.

시편은 가열빔과 수직을 이루도록 하였고 검사빔과는 45°의 각을 유지하도록 1/60°의 분해능을 가지는 회전 이송장치와 0.5 μm 의 분해능을 가지는 이송장치 위에 고정시켰다. 시편에서 반사된 검사빔은 knife-edge에 의해 광량의 반이 가려지도록 만든 후 실리콘 photodiode로 들어간다.

Table 1 Optical & physical properties of specimens

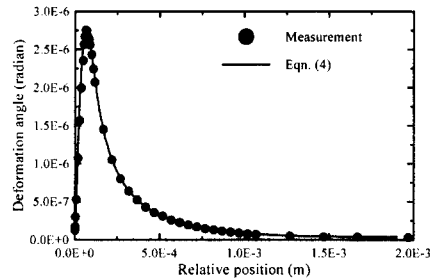
	Poisson ratio	Thermal conductivity (W/m°C) at 25°C	Reflectivity	Thermal expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁶ at 25°C	Optical absorption coefficient × 10 ⁶	Thermal diffusivity (m ² /s) × 10 ⁵ at 25°C
Iron(99.90%)	0.28	80.3	0.6102	12.0	99	2.3
Nickel(99.90%)	0.31	89.9	0.6147	13.0	84	2.3
Copper(99.98%)	0.35	398	0.6403	16.6	70	11.6
Zinc(99.80%)	0.35	113	0.7470	35.0	98	4.4
Silver(99.90%)	0.38	427	0.9250	19.0	73	17.3

Photodiode에서 나오는 신호는 1차 증폭기를 거친 후 lock-in 증폭기에서 A/O 변조기의 신호와 동기시켜 위상을 측정하여 컴퓨터로 저장하였다.

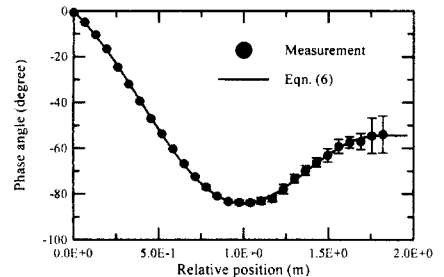
3.2 실험방법

본 연구에서는 변형의 중심선을 따라 검사빔의 위치를 변화시키면서 위상각을 측정하였기 때문에 변형 중심의 위치를 찾는 것이 필요하다. 광열변위법에 의하여 측정된 신호는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 변형각은 가열빔 반경의 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. 이러한 결과에 기초하여 두 빔의 상대위치를 0.5 μm 간격으로 변화시키면서 변형의 중심을 찾았다.

본 연구에서 사용한 시편은 순도가 높은 철, 니켈, 구리, 아연 그리고 은을 사용하였으며 물리적인 특성과 광학적 특성은 Table 1에 나타났다. 모든 시편은 극부적인 광학적 특성의 변화를 줄이기 위하여 알루미늄 분말로 연마하여 경면처리를 한 후 사용하였다. 시편의 두께는 10 μm의 분해능을 가지는 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다. 가열빔과 검사빔의 크기는 Bayazitoglu⁽⁷⁾ 등에 의하여 제시된 Knife-edge 방법을 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. 열확산길이에 영향을 주는 변조주파수는 열확산길이가 가열빔의 지름보다 작은 범위에서부터 가열빔 지름의



(a) Deformation curve



(b) Phase curve

Fig. 3 The deformation curve and phase curve of copper in radial direction.(frequency=300Hz, power=0.7W, thickness=0.95mm)

2.5배 정도까지 변화시키면서 측정하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 열확산길이의 영향

구리와 철의 가열빔의 변조주파수에 반비례하는 열확산길이에 따른 위상각의 영향은 Fig. 4와

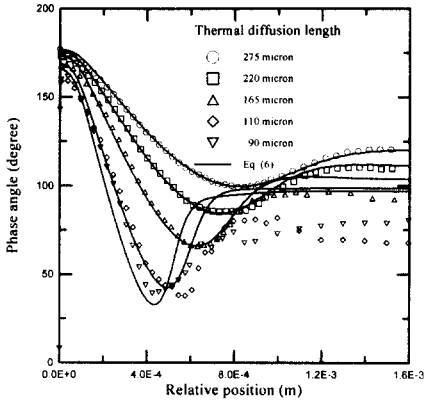


Fig. 4 Phase curves of copper for various thermal diffusion length

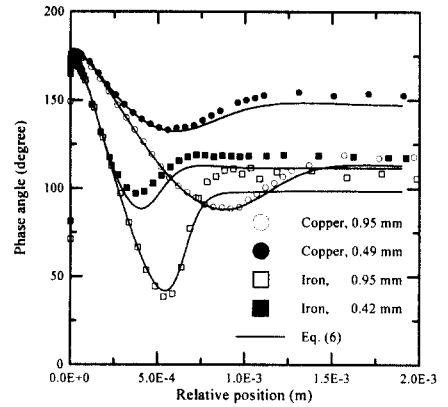


Fig. 6 The phase curves of copper & iron for different thickness.

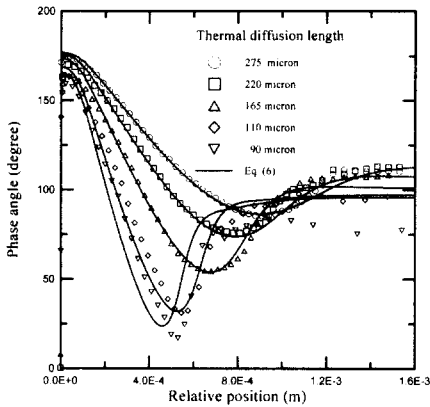


Fig. 5 Phase curves of iron for various thermal diffusion length

Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 열확산길이가 증가하면 위상각의 최대값과 최소값의 차는 감소하였고, 위상각이 최소가 되는 상대위치는 변형의 중심에서 멀어진다. 그리고 열확산길이가 가열빔의 직경과 비슷하거나 작은 경우에는 실험결과와 이론 곡선이 잘 맞지 않았지만 열확산길이가 가열빔 직경의 대략 1.5배 이상인 경우에는 비교적 이론 곡선과 실험결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히 위상각이 감소하는 영역에서 이러한 현상은 뚜렷하게 나타난다.

열확산길이가 가열빔의 지름과 비슷하거나 작은 경우에 이론과 실험이 잘 맞지 않는 것은 가열빔의 변조주파수가 높아지면 변형의 크기가 작아지기 때문에 전체적으로 신호의 크기가 작아져

서 신호의 크기에 대하여 주변의 노이즈와 시편에서 반사된 빔을 knife-edge를 사용하여 절반을 차단하였을 때 산란에 의한 영향이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

모든 실험에 있어서 변형각의 변화가 급격하게 나타나는 변형의 중심부근에서 이론과 실험이 차이를 보이는 이유는 이론식에서는 검사빔의 크기가 하나의 점이라고 고려되지만 실제로 본 연구에서는 검사빔의 지름이 약 40 μm 정도였기 때문에 검사빔이 차지하는 면적의 평균값이 계속되었기 때문이다. 따라서 실험결과의 오차를 줄이기 위해서는 검사빔의 크기를 작게 조절하는 것이 필요하다. 위상각이 증가하여 수렴하는 부분에서는 가열빔에 의한 영향이 거의 존재하지 않기 때문에 신호의 크기가 작아서 위상각이 불안정하게 나타났다.

4.2 시편 두께의 영향

Fig. 6은 가열빔의 변조주파수가 500 Hz일 때 두께가 0.49 mm와 0.95 mm인 구리와 0.42 mm와 0.95 mm인 철에 대한 위상각을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 두께가 증가함에 따라 위상각의 최대값과 최소값의 차이가 증가하였고 위상각이 최소값이 되는 상대위치는 변형의 중심에서 멀어진다. 일반적으로 시편의 두께가 열확산길이보다 두꺼우면 그 시편은 열적으로 두껍다고 고려할 수 있으며, 그렇지 않으면 열적으로 얇다고 고려할 수 있다. 구리와 철 모두 두께가 두꺼운 경우에 이론과 실험이 비교적 잘 일치

Table 2 Comparison of the measured thermal diffusivity and the literature value⁽⁸⁾

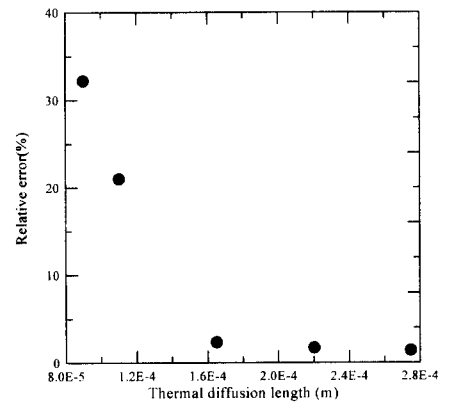
Material	Thickness (mm)	Thermal diffusion length (mm)	Thermal diffusivity (m^2/s) $\times 10^2$		Error(%)
			Literature value	Measured value	
Iron(99.90%)	1.03	0.275	2.3	2.332	1.39
Nickel(99.90%)	0.56	0.275	2.3	2.327	1.17
Copper(99.98%)	0.85	0.275	11.6	11.54	0.52
Zinc(99.80%)	0.78	0.275	4.4	4.428	0.64
Silver(99.9%)	0.58	0.275	17.3	17.58	0.62

하는 것으로 나타났다. 가열빔의 변조주파수가 500 Hz일 때 구리의 열확산길이는 0.272 mm이며 철의 열확산길이는 0.121 mm이다. 시편의 두께가 0.49mm인 구리의 경우에는 열확산길이와 두께의 비가 0.555이며 두께가 0.95 mm인 경우에는 0.286이다. 따라서 두께가 0.95 mm인 구리가 열적으로 더 두꺼운 재료라고 할 수 있다. 식 (4)는 시편의 두께가 두껍고 모든 표면이 단열되어 있다는 가정하에 유도된 것이기 때문에 시편의 두께가 두꺼운 경우에 실험결과와 이론이 더 잘 일치한다. 따라서 열확산길이에 비하여 시편의 두께가 두꺼울 때 즉, 재료가 열적으로 두꺼울 때 이론의 경계조건을 만족하기 때문에 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

4.3 열확산계수의 결정

본 연구에서 시편의 표면에서 열탄성 변형이 발생하였을 때, 반경방향의 거리 r 에 따라서 위상 지연이 발생하는 것을 이용하여 열확산계수를 결정하였다. 각 재료에 대하여 측정된 위상 곡선에서 비교적 이론과 실험이 잘 일치하는 구간은 검사빔의 위치가 가열빔의 지름정도 떨어진 부근에서부터 위상각이 감소하여 최소가 되는 부근까지이다. 따라서 본 연구에서는 변형의 중심으로부터 위상차가 최소가 되는 곳까지의 거리에 대하여 중심에서부터 1/4부터 3/4이 되는 범위에서 측정된 데이터만을 사용하여 열확산계수를 결정하였다. 열확산계수는 식 (6)에 의하여 계산한 위상각과 측정된 위상각 사이의 상대 오차가 10^6 이하로 줄어들 때까지 식 (6)의 열확산계수를 Bisection 방법으로 변화시켜서 결정하였다.

Fig. 7은 이러한 방법으로 결정한 열확산계수의 상대오차를 열확산길이의 변화에 따라 나타낸 것

**Fig. 7** The variation of thermal diffusivity for thermal diffusion length of iron.

이다. Fig. 5에서와 마찬가지로 열확산길이가 가열빔 지름과 비슷하거나 작은 경우에는 그 오차가 대략 20~30%까지 나타났다. 하지만 열확산길이가 가열빔의 지름보다 1.5배 이상인 경우에는 그 오차가 2.35% 이하로 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과로 볼 때 가능한 열확산길이가 가열빔의 지름보다 크게 가열빔의 변조주파수를 조절하여야만 좀더 정확한 열확산계수를 구할 수 있다고 사료된다.

Table 2는 열확산길이가 가열빔 지름의 2.5배가 되도록 설정하였을 때 각 재료에 대한 열확산계수를 나타낸 것이다. 열확산길이가 재료의 두께에 비하여 작은 열적으로 두꺼운 조건을 만족하기 때문에 그 오차들이 대략 2% 이내로 나타났다. 이러한 결과로부터 광열변위의 위상을 이용하여 열확산계수를 결정하는데 있어서 열확산길이를 가열빔의 크기보다는 크고 재료의 두께보다는 작게 설정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 광열효과를 이용하여 열확산계수를 비접촉 방법으로 측정하는 방법을 확립하기 위하여 가열빔의 변조주파수에 의하여 결정되는 열확산길이와 시편의 두께에 따른 위상각의 영향을 알아보았으며, 이러한 결과를 토대로 정량적인 열확산계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가열빔의 변조주파수에 반비례하는 열확산 길이가 가열빔의 지름보다 약 1.5배 이상 큰 경우에 실험결과와 이론이 비교적 잘 일치한다. 특히 위상각이 감소하는 영역에서 이러한 현상은 뚜렷하게 나타난다.

(2) 재료가 열적으로 두꺼울 때, 즉 재료의 두께가 열확산길이보다 두꺼울 때 실험결과와 이론이 잘 맞는다.

(3) 열확산길이를 가열빔의 크기보다는 크고 재료의 두께보다는 작게 설정하였을 때 약 2%의 오차범위에서 정확하게 열확산계수를 결정할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

(1) 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.

(2) Fournier, D., Boccara, A. C., Skumanich, A. and Amer, N. M., 1986, "Photothermal Investigation of Transport in Semiconductors: Theory and Experiment," *J. Appl. Phys.* Vol. 59.

(3) Bertolotti, M., Liakhov, G., Voti, R. L., Sibilia, C. and Sparvieri, N., 1995, "A Cryostatic Setup for The Low-Temperature Measurement of Thermal Diffusivity with The Photothermal Method," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 66, No. 12.

(4) Olmstead, M. A., Amer, N. M. and Kohn, S., 1983, "Photothermal Displacement Spectroscopy : an Optical Probe for Solids and Surfaces," *J. Appl. phys(A)*, Vol. 32, pp. 141~154.

(5) Bingcheng, L., Zhaoxin, Z. and Shunhua, H., 1991, "Modulated Photothermal Deformation in Solids," *Appl. Phys.* 24.

(6) Balageas, D. L., Boscher, D. M., Deon, A. A. and Enguehard, H., 1991, "Photoacoustic Microscopy by Photodeformation Applied to Thermal Diffusivity Deformation," *High Temperatures - High Pressure*, Vol. 23, 517~528.

(7) Bayazitoglu, Y. and Ozisik, M., 1988, *Elements of Heat Transfer*, McGraw Hill, New York.

(8) Shackelford J. F., 1994, *CRC Material Science and Engineering Handbook*, CRC Press.