

열확산도 측정을 위한 광열 신기루 기법 개발

김동식[†] · 최선락^{*} · 이주철^{**}

Development of photothermal mirage technique for measuring thermal diffusivity

Dongsik Kim, Sun Rock Choi and Joochul Lee

Key Words : Photothermal mirage technique (광열신기루법), Thermal diffusivity (열확산도), Thermal-wave-coupling method (열파결합법)

Abstract

This paper introduces a novel scheme for determining the thermal diffusivity of solids using the photothermal mirage technique. The suggested scheme extends the thermal-wave coupling method, employing the solution to the heat conduction equation in close proximity to the pump beam. Therefore, determination of thermal diffusivity is possible by detecting the mirage signal with small separation between the probe and pump beams, with enhanced intensity of the mirage signal. Though the method requires information about the probe-beam height, the absolute transverse position of the probe beam need not be known as it is automatically evaluated by the iterative-computation procedure. The thermal diffusivity of Ni is measured by the proposed scheme and the result demonstrates good agreement with the literature value to within 5 %.

기호설명

a : 가열광의 반지름, m
 C : 탐사광의 위치에 따라 결정되는 수정 계수
 L : 선형 상관도
 h : 시편의 두께, m
 f : 가열광의 주파수, Hz
 $\Delta f^{1/2}$: $f^{1/2}$ 의 증분, Hz^{1/2}
 i : 허수단위, $\sqrt{-1}$
 \hat{j} : y 방향 단위 벡터

k_s, k_{air} : 시편, 공기의 열전도도, W/m K
 m : y_0, z_0 에서 $\arg(\Phi) - f^{1/2}$ 그래프의 기울기, s^{1/2}
 Δm : $y_0, y_0 + \Delta y_0$ 지점의 $\varphi(\Phi) - f^{1/2}$ 그래프에서 기울기차, rad/Hz^{1/2}
 N : 실험에서 얻은 데이터 개수
 n_{air} : 주위온도에서 공기의 굴절률
 $n_{air,0}$: 주위 공기의 평형상태에서의 굴절률
 P_0 : 시편에 유입되는 가열광의 출력, 시편에 유입되는 가열광의 출력, W
 T_s, T_{air} : 벌크 시편, 공기에서의 온도장, K
 T_0 : $y=0, z=0$ 에서의 온도장의 크기, K
 t : 시간, s

[†] 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : dskim87@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2179 FAX : (054)279-3199

^{*} 포항공과대학교 기계공학과

^{**} 포항공과대학교 기계공학과

- x, y, z : 가열광의 중심을 원점으로 한 좌표축, m
- y_0 : 가열광의 중심을 원점으로 한 좌표축에서 탐사광의 y 방향 절대위치, m
- Δy_0 : 측정하려는 두 지점 사이의 거리, m
- z_0 : 가열광의 중심을 원점으로 한 좌표축에서 탐사광의 z 방향 절대위치, m

그리스문자

- α_s, α_{air} : 벌크 시편, 공기의 열확산도, m^2/s
- β_s, β_{air} : $\beta_s = \sqrt{\delta^2 + (i\omega/\alpha_s)}$
 $\beta_{air} = \sqrt{\delta^2 + (i\omega/\alpha_{air})}$
- δ : 적분변수, m^{-1}
- φ : 기준신호에 상대적인 일정한 위상차, rad
- λ : 레이저의 파장, m
- Φ_{air} : 탐사광의 휨각, rad
- Φ_0 : $y=0, z=0$ 에서 벌크 시편에 의해 발생하는 탐사광의 휨각, rad
- $\Phi_{air,y}$: 탐사광의 y 방향 휨각, rad
- χ : 광학적 흡수 계수, m^{-1}
- ω : 각속도, s^{-1}

1. 서론

고체의 열확산도는 열시스템의 수행에 영향을 미치는 중요한 성질이다. 따라서 고체의 열확산도를 측정하기 위한 많은 방법들이 제안되었다[1,2]. 이러한 방법들 중 광열 신기루 기법은 실험 시 광학적인 조정이 어렵다는 단점이 있으나, 측정이 비접촉식 기법으로 이루어진다는 점과 시편의 표면 특성에 관계없이 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

열확산도를 측정하기 위해 신기루 신호를 분석하는 다양한 방법이 제시되어 왔다. 그 중에서 가장 전형적인 방법은 Salazar 등이 제안한 영점 교차법(zero-crossing method)이다[3,4]. 영점 교차법은 가열광의 주파수를 바꿔가면서 신기루 신

호의 실수부가 영이 되는 두 지점을 찾아 열확산도를 측정하는 방법이다. 이들은 또한 광 침투 깊이와 열 침투 깊이에 관계없이 열확산도를 측정할 수 있는 일반적인 이론을 제안하였다. Rantala 등은 다인자 조정법(multiparameter fitting method)을 개발하여 낮은 열확산도를 가지는 물질까지 광열 신기루 법을 적용하여 폴리머의 열확산도를 측정하였다[5]. 최근 Wong 등은 박막의 열확산도를 측정하기 위한 열과결합법 (thermal-wave-coupling method)을 개발하였다[6,7]. 열과결합법은 기층의 특성이 박막의 열확산도 계산에 있어서 필요하지 않기 때문에 박막의 열확산도 측정에 있어서 유용하지만, 벌크 재료에 적용시 재료의 두께, 측정 위치의 선정에 따라 열확산도의 측정값이 달라지는 단점이 있다

위와 같은 광열 신기루 기법은 넓은 범위의 재료에 적용이 가능하지만 일반적으로 신기루 신호의 세기가 작기 때문에 열확산도의 정확한 측정을 위해서는 잡음으로부터 신기루 신호를 효과적으로 계측하는 것이 필요하다. 따라서 일반적으로 신기루 신호의 세기를 증가시키기 위하여 가열광의 세기를 높게 된다. 그러나 이 같은 방법은 일반적으로 열확산도가 온도에 의존하는 성질이기에 때문에 부적절하다. 신기루 신호의 세기를 증가시키기 위한 다른 방법은 가열광 근처에서 실험을 하는 것이다. 그러나 이 경우에 실험적인 결과로부터 단순히 열확산도를 측정할 수가 없어 이 구간에서 측정한 방법은 없다.

본 연구에서는 정확한 열전도해를 이용하여 박막 측정에 유용한 기존의 열과결합법을 가열광 근처에서 까지 확대 적용하여 시편의 두께와 탐사광의 위치에 관계없이 열확산도를 측정하는 일반적인 기법을 개발하였다. 그리고 위 방법을 이용하여 열확산도 값이 일반적으로 잘 알려진 시편의 열확산도를 측정함으로써 위 방법의 신뢰성을 확인하였다.

2. 이론

주기적으로 변조된 레이저가 시편 표면에 조사될 때, 가열광과 같은 주파수를 가지는 열파(thermal wave)가 시편 내부에 발생된다. 시편 표면을 따라 전파되는 열파로 인해 시편 표면 위의 매질(공기)근처에 굴절률 구배장이

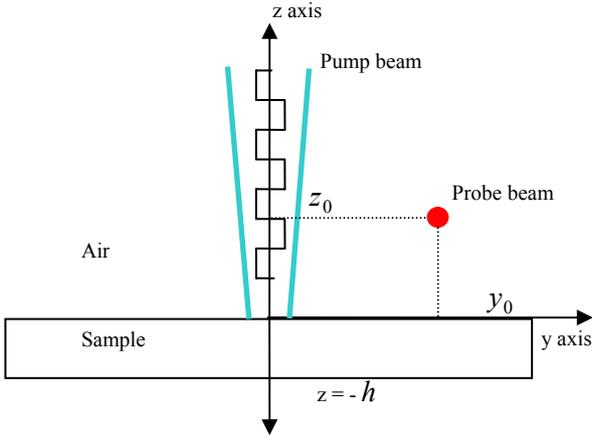


Fig.1 Geometry of the mirage experiments.

생성되며, 이때 시편 표면에 평행하게 지나가는 탐사광은 신기루 효과(mirage effect)로 인해 y , z 방향으로 휘게 된다. 이러한 탐사광의 신기루 신호는 시편의 열확산도와 관련되어 있고, 이로부터 시편의 열확산도를 구할 수 있다.

Fig. 1 과 같은 기하학적 시스템에서 y 방향으로 반 무한(semi-infinite) 벌크 시편을 고려하자. 사인파로 변조된 가열광이 시편 표면에 수직으로 입사될 때 공기중의 온도분포는 다음과 같다[6,7].

$$T_{\text{air}} = T_0 \exp\left(-y_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} - z_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{\text{air}}}}\right) \times \cos\left(\omega t - y_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} - z_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{\text{air}}}}\right) \quad (1)$$

휨각이 상대적으로 작으면 식(1)에 의해 유발되는 휨각은 이론적으로 다음과 같다[6,7].

$$\Phi_{\text{air}} = \Phi_0 \exp\left(-y_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} - z_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{\text{air}}}}\right) \times \cos\left(\omega t - y_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_s}} - z_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{\text{air}}}} + \varphi\right) \quad (2)$$

따라서 휨각의 가열광에 대한 상대적인 위상은 다음과 같게 된다.

$$\arg(\Phi_{\text{air}}) = \left(-\frac{y_0}{\sqrt{\alpha_s}} - \frac{z_0}{\sqrt{\alpha_{\text{air}}}}\right) \sqrt{\pi f} + \varphi \quad (3)$$

여기서 $\arg(\Phi_{\text{air}}) - \sqrt{f}$ 사이의 기울기 m 은 다음과 같다.

$$m = \left(-\frac{y_0}{\sqrt{\alpha_s}} - \frac{z_0}{\sqrt{\alpha_{\text{air}}}}\right) \sqrt{\pi} \quad (4)$$

α_{air} , y_0 , z_0 를 알면 α_s 는 식 (4) 로부터 구할 수 있다. 그러나 y_0 와 z_0 를 직접 측정하는 것은 어렵지만 Δy_0 는 상대적으로 쉽게 측정할 수 있으므로 z_0 를 고정 시키고 y_0 , $y_0 + \Delta y_0$ 를 각각 측정한 다음 Δm 을 계산하여 아래의 식으로부터 열확산도를 구할 수 있다.

$$\alpha_s = \frac{\Delta y_0^2}{\Delta m^2} \pi \quad (5)$$

위 방법은 Wong 등이 벌크 재료의 열확산도를 구하기 위해 제안한 방법이다[6,7]. 그러나 위 식은 가열광의 크기, 탐사광의 위치, 시편의 두께 및 열적 광학적 특성에 대한 고려가 없으므로 실제 실험조건과 다르므로 위 방법의 적용범위가 제한되어 있다.

실제 시편에서의 온도장은 아래의 3 차원 열전도식의 해이다.

$$\nabla^2 T_{\text{air}} - \frac{1}{\alpha_{\text{air}}} \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 T_s - \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\frac{1}{k_s} \left(\frac{P_0 \chi}{\pi a^2}\right) \exp(\chi z) \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a^2}\right)^{1/2} \exp(i\omega t) \quad (7)$$

여기서 식 (6)는 공기 중에서 열전도식이고, 식 (7)은 시편에서의 열전도식이다.

위 식의 다음의 경계조건을 주어진다면 공기 중에서의 온도장을 구할 수 있다.

$$T_{\text{air}}(z=0) = T_s(z=0) \quad (8)$$

$$k_{\text{air}} \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial z} \Big|_{z=0} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (9)$$

위 열전도식에서 구하여진 온도장을 아래의 식에

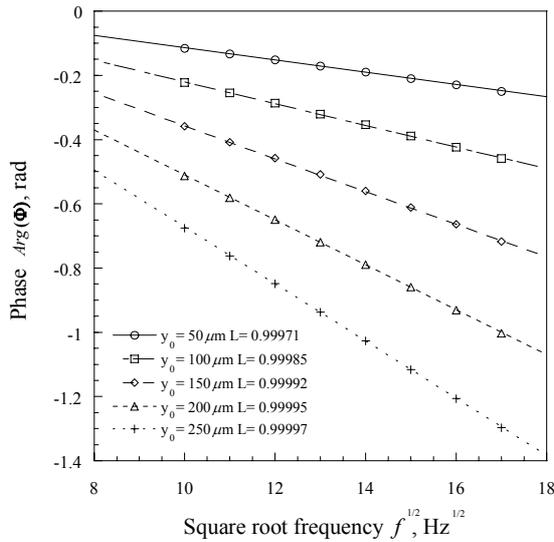


Fig.2 $\arg(\Phi) - f^{1/2}$ curve of bulk Ni sample calculated by the theoretical formula.

대입하면 공기 중에서 신기루 신호를 구할 수 있다.

$$\Phi_{\text{air},y} = -\frac{1}{n_{\text{air},0}} \frac{dn_{\text{air}}}{dT_{\text{air}}} \int_0^\infty \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial y} dx \hat{j} \quad (10)$$

위 식의 해는 Salazar 등[3]에 의하여 구하여졌고, 광학적으로 불투명한 시편에 대해 아래와 같은 해를 가진다.

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{air},y} = & -\frac{1}{n_{\text{air},0}} \frac{dn_{\text{air}}}{dT_{\text{air}}} \frac{P_0}{2\pi k_{\text{air}}} \exp(i\omega t) \\ & \times \int_0^\infty \delta \sin(\delta y) \exp\left(-\frac{(\delta\alpha)^2}{4}\right) \\ & \times \frac{1}{\beta_s} \left(\frac{1 + \exp(-2\beta_s h)}{1 - \exp(-2\beta_s h)} \right) \exp(-\beta_{\text{air}} z) d\delta \hat{j} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 이론해를 위치에 따라 나타내었을 때 Fig. 2 같이 $\arg(\Phi_{\text{air}}) - \sqrt{f}$ 관계가 선형적으로 나타남을 알 수가 있다. 따라서 일반적으로 가열광 근처에서 적용이 불가능한 열과결합법에 수정계수 C 를 도입함으로써 신기루 신호가 커서 실험이 용이한 가열광 근처까지 열과결합법을 적용할 수 있게 된다.

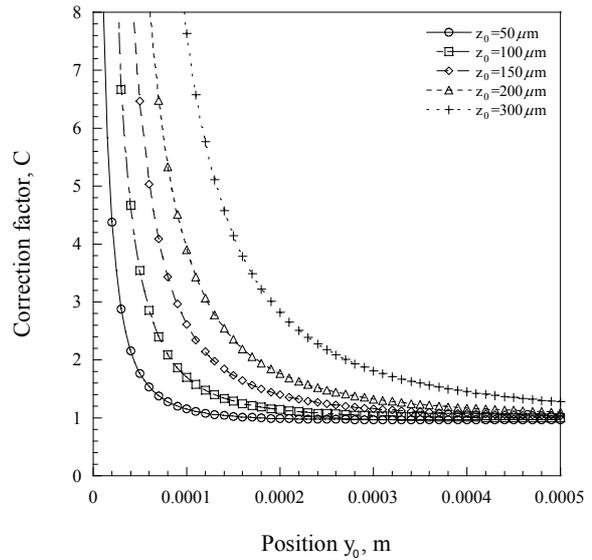


Fig.3 $C - y_0$ curve of bulk Ni sample.

$$m = \left(-\frac{y_0}{\sqrt{\alpha_{\text{air}}}} - \frac{z_0}{\sqrt{\alpha_s}} \right) \sqrt{\frac{\pi}{C}} \quad (12)$$

식 (12)에서 열확산도를 구하는데 있어서 C 의 영향을 알아보기 위해 문헌 값에 수록된 니켈의 열확산도를 사용하여 y_0, z_0 에 대한 C 의 이론적 관계를 각각 Fig. 3 나타내었다. 니켈 시편에서 C 의 값은 y_0 가 증가함에 따라 감소하다가 1로 수렴함을 알 수 있다. 또한 같은 y_0 에서도 z_0 에 따라서 C 의 값이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 즉, Wong 등이 제안한 식 (5)는 탐사광과 가열광 사이의 거리가 충분히 멀리 떨어진 영역($C=1$)에 위치할 때만 사용할 수 있고 탐사광과 가열광 사이의 거리가 가까워 질수록 수정계수 C 가 필요함을 알 수 있다.

만약 z_0 를 안다면 m 는 실험으로 측정할 수 있으므로 y_0 의 절대 위치와 C 를 알면 식 (12)으로부터 열확산도를 구할 수 있다. 그러나 실제로 y_0 와 시편의 열확산도는 모르는 값이므로 y_0, α_s, C 구하기 위해 다음과 같은 반복계산을 실행하였다.

- (1) N 개의 y_0 에 대해 측정한 m 로부터 식 (12)을 이용하여 α_s 를 계산한다. 이때 $C=1$ 로 가정한다.
- (2) 1 에서 계산한 α_s 와 N 개의 m 를 이용하여 y_0 의 절대 위치를 찾아낸다. 이때 각각의

m_0 로부터 y_0 의 절대 위치를 찾은 다음 평균한 값을 y_0 의 절대 위치로 채택한다.

(3) 1에서 구한 α_s 를 이용하여 Fig. 3와 같은 $C - y_0$ 그래프를 그리고 2에서 구한 y_0 에 대한 C 값을 찾는다.

(4) 2의 과정에서 각각의 m 으로부터 구한 y_0 에 대한 C 값을 찾고 식 (12)를 이용하여 새로운 α_s 를 계산한다.

(5) 2의 과정과 마찬가지로 4에서 구한 α_s 와 3에서 구한 C 값을 이용하여 새로운 y_0 를 구한다.

(6) 3, 4, 5의 과정을 수렴할 때까지 반복한다.

z_0 를 알면 위의 확장된 기법으로 측정하기 어려운 y_0 의 절대 위치를 측정하지 않고도 알 수 있을 뿐만 아니라 기존의 열과 결합법을 사용할 수 없는 영역에서도 적용할 수 있게 되었다.

z_0 는 펄스레이저에 의해 발생하는 광탄성파의 도달 속도를 측정하는 방식을 이용하면 정밀한 광학 이동 시스템의 구성 없이도 정확히 측정할 수 있다.

3. 실험

실험장치는 Fig. 4 나타나있다. 가열광으로는 Ar+ 레이저(Spectra-Physics stabilite2017, 1.2 W, $\lambda = 488$ nm)을 사용하였고, 탐사광으로는 HeNe 레이저(Uniphase Model 1122, 5 mW, $\lambda = 632.8$ nm)를 사용하였다. 가열광은 시편 표면에서 가열광의 크기를 줄이기 위해 광확대기 (beam expander 5X)로 확대 후 50 mm 렌즈로 집속하였고, 탐사광은 50 mm 렌즈로 집속시켰다. 주기적인 열유속을 발생시키기 위하여 광자르개 (Optical chopper, Stanford Research Model SR540)를 사용하였다. 신기루 신호는 칼날을 이용하여 탐사광의 강도를 반으로 가린 뒤 광검출기 (Photodetector, ThorLabs DET210)로 측정하였다. 락인앰프(Stanford Research Model SR810 DSP Lock-in Amplifier)을 이용하여 탐사광과 가열광 신호의 위상차를 측정하였다. 이 때 광자르개 신호를 기준신호로 하였으며, 광검출기의 신호는 프리앰프(Stanford Research Model SR552 Preamp)을 이용하여 100 배 증폭후 락인앰프에서 측정되었다. 시편은 3축 마이크로 이송대(분해

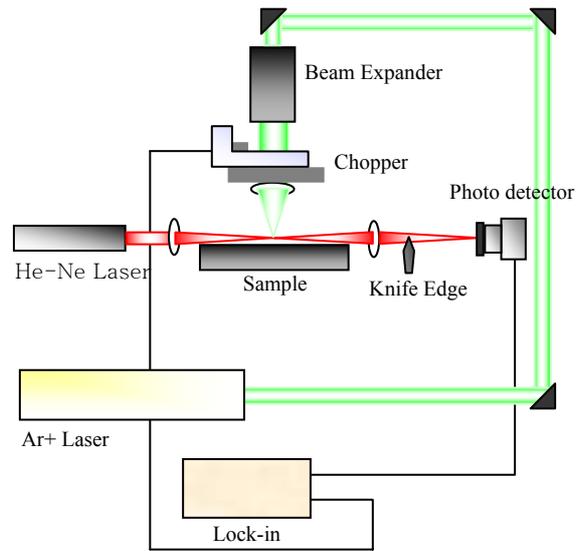


Fig.4 Alignment of the mirage experiment.

능 $5 \mu\text{m}$)위에 부착되었다.

광탄성파를 발생시키기 위하여 Nd:YAG 레이저 (Continuum II, FWHM=6 ns, $\lambda = 1064$ nm)를 사용하였다. 압력파에 의한 탐사광은 힘은 신기루 신호와 같이 칼날과 광검출기를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 토의

Ni의 열확산도를 측정하기 위하여 반복계산을 하기 이전에 광탄성파 실험을 통하여 측정된 탐사광의 높이는 $30 \mu\text{m}$ 이다.

실험으로 측정된 가열광과 신기루 신호의 위상차가 Fig. 5에 나타나있다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적인 Wong 등의 열과 결합법을 적용할 수 없는 y_0 근처에서도 $\arg(\Phi_{\text{air}}) - \sqrt{f}$ 관계가 선형적임을 확인할 수 있다. 만약 탐사광이 충분히 떨어진다면 $C=1$ 로 가정하고 일반적인 열과 결합법을 적용할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 가열광 근처에서 실험을 하였으므로 Wong 등의 열과 결합법 대신 수정계수 C 와 반복계산을 통하여 Ni의 열확산도를 구하였다. 위 계산을 통하여 나타난 Ni의 열확산도 값은 $2.30 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이며 이 값은 문헌값 $2.24 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 5% 이내의 오차로 일치한다.

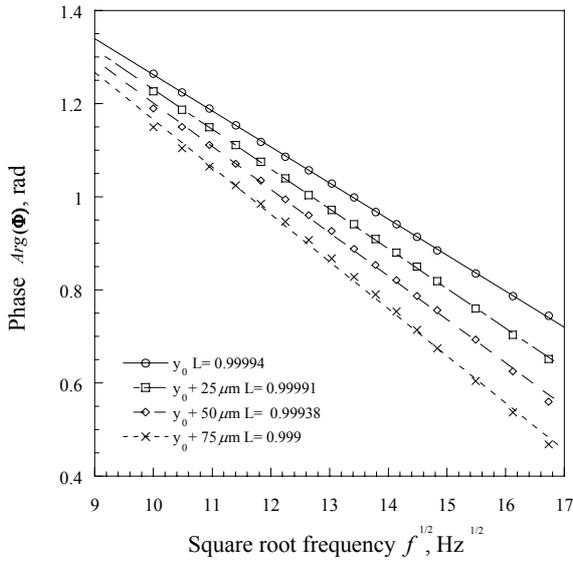


Fig.5 $\arg(\Phi_{\text{air}}) - \sqrt{f}$ curves for a polished Ni bulk sample of 1 mm thickness at y_0 , $y_0 + 25\mu\text{m}$, $y_0 + 50\mu\text{m}$, $y_0 + 75\mu\text{m}$ and z_0 .

5. 결론

1. 3 차원 열전도 이론으로부터 기존의 열과결합법 식을 확장한 형태로 광열 신기루법을 적용하였고, 이를 통해 탐사광의 높이를 아는 경우 탐사광의 절대위치를 측정하지 않고도 열적으로 두꺼운 시편의 열확산도를 측정할 수 있는 새로운 기법을 제안 하였다.
2. 열과결합법을 이용하여 안정적으로 열확산도를 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 그리고 기초 실험을 통해 벌크 시편의 열확산도를 측정하여 실험장치의 신뢰성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2002 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음. (KRF-2001-003-E004)

참고문헌

[1] K.E. Goodson, M.I. Flik, 1994, "Solid layer thermal conductivity measurement techniques", *Applied Mechanical Review*, vol.47, pp.101-112.
 [2] H.K. Park, C.P. Grigoropoulos, and A.C. Tam, 1995,

"Optical measurements of thermal diffusivity of a material", *International Journal of Thermophysics*, vol.16, pp.973-995.

[3] A. Salazar, A. Sanchez-Lavega, and J. Fernandez, 1989, "Theory of thermal diffusivity determination by the mirage technique in solids", *Journal of Applied Physics*, vol.65, pp.4150-4156.
 [4] A. Salazar, A. Sanchez-Lavega, and J. Fernandez, 1991, "Thermal diffusivity measurements in solids by the mirage technique: Experimental results", *Journal of Applied Physics*, vol.69, pp.1216-1223.
 [5] J. Rantala, L. Wei, P.K. Kuo, J. Jaarinen, M. Luukkala, and R.L. Thomas, 1993, "Determination of thermal diffusivity of low-diffusivity materials using the mirage method with multiparameter fitting", *Journal of Applied Physics*, vol.73, pp.2714-2733.
 [6] P.K. Wong, P.C.W. Fung, H.L. Tam, and J. Gao., 1995, "Thermal diffusivity measurements of an oriented superconducting-film-substrate composite using the mirage technique", *Physical Review B*, vol.51, pp.523-533.
 [7] P.K. Wong, P.C.W. Fung, and H.L. Tam, 1998, "Low thermal diffusivity measurements of thin films using mirage technique", *Journal of Applied Physics*, vol.84, pp.6623-6627.
 [8] G F.P. Incropera, and D.P. DeWitt., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Ed, John Wiley and Sons, Inc., Appendix A.