

광음향학적 방법에 의한 얇은 금속판의 열물성 측정

김 석 원

한국표준과학연구원 온도연구실

(1991년 10월 24일 받음)

널리 쓰이는 금속들인 스테인레스강 304, 브라스, 알루미늄, 구리등의 얇은판을 기판에 붙여서, 광흡수를 무시할 수 있는 물질인 plexiglass로 만든 광음향셀에 장착한 후 시료에 입사되는 광의 chopping 주파수를 변화시키며 시료에서 발생되는 광음향신호의 크기와 위상을 측정하고 Rosencwaig-Gersho(R-G) 이론에서 발전된 2층(two-layer)모델을 바탕으로한 파라미터 추정(parameter estimation)법을 이용하여 구조적으로 분석하여 열확산도(thermal diffusivity)와 열발산도(thermal effusivity)를 구하였다.

I. 서 론

1880년 Bell에 의해서 발견되고^[1] 1881년 Tyndall^[2]과 Roentgen^[3]에 의해서 확인된 광음향효과(photoacoustic effect)는 레이저가 발명된 후 1970년대에 들어서 많은 분야에서 응용되기 시작하였으며 특히 1976년에 Rosencwaig와 Gersho^[4]에 의해 고체에서의 광음향효과에 대한 이론(R-G 이론)이 정립된 후 고체시료에 대한 광음향실험이 크게 활기를 띠게 되고^[5,6] 그 중에서도 특히 박막이나 박판의 열물성 측정분야에 많은 응용 및 노력이 이루어졌다.^[7,9] 기술적인 응용면에서 기판에 부착되어진 박막이나 박판을 통한 열의 전달에 대한 이해는 최근 다이아몬드 박막 등과 같은 특수한 박막의 열특성을 여러분야에서 이용함에 따라 그 중요성이 점점 커지고 있는 추세이다.^[10] 박막의 열물성측정에서 광음향을 응용한 것은 Adams와 Kirkbright가 시초이다.^[9] Mandelis등과^[11], Tominaga와 Ito^[12]는 R-G 이론을 2층 시편에 확장을 시도하였고 Lachaine과 Poulet^[13]는 고분자박막의 열적 성질을 측정하였다. 또한 Benedetto와 Spagnolo^[14]는 박판들의 열발산도(thermal effusivity)를 측정하였다.

광음향효과를 이용한 박막의 열물성측정에는 전면여기법(FSE: front surface excitation)과 후면여기법(RSE: rear surface excitation)등 2가지 방법이 있다. 전면여기법으로 Swimm은 chopping 주파수를 5 kHz까지 변화시키며 KCl에 증착된 두께 2 μ m인 As₂Se₃ 박막의 열확산도(thermal diffusivity)를 측정하였다.^[15] 후면여기법은 주파수를 200 Hz까지 변화시키며 구리 기판에 입혀진

고분자박막(두께 10 μ m)의 열확산도를 측정하는 등에 사용되었다. 후면여기법의 한가지 제약은 감지가능한 광음향신호를 얻기 위해서는 레이저빔과 같은 강한 열원이 필요하다는 것이다.^[16] 두가지 방법 공히 광음향신호의 크기(amplitude)와 위상(phase)에서 열물성에 관한 정보를 얻어낼 수가 있다.

본 연구에서는 전면여기법으로, 기판(backing)에 부착되어있는 얇은 금속판에서 발생하는 광음향신호의 크기와 위상을 동시에 측정하고 R-G 이론에 근거한 2층 모델을 바탕으로한 파라미터 추정법^[17]을 사용하여 구조적으로 해석하여 시편의 열확산도와 열발산도를 구하였다.

II. 광음향신호의 크기와 위상의 표현

불투명한 박막이 기판에 입혀져있을 때 기판을 backing 물질이라고 하면 전면여기법에서 광음향신호의 위상(Φ_s)과 크기(A_s)는 R-G 이론에서 각각 다음과 같이 유도 된다.^[15,16]

$$\Phi_s = \tan^{-1}(M \tan Y) - \tan^{-1}(M^{-1} \tan Y) \quad (1)$$

$$A_s = (A_0/2) Y^2$$

$$\times \left[\frac{\{(1+g)e^Y + (1-g)e^{-Y}\}^2 \cos^2 Y + \{(1+g)e^Y - (1-g)e^{-Y}\}^2 \sin^2 Y}{\{(1+g)e^Y - (1-g)e^{-Y}\}^2 \cos^2 Y + \{(1+g)e^Y + (1-g)e^{-Y}\}^2 \sin^2 Y} \right]^{1/2} \quad (2)$$

이때, M , g , Y 및 이와 관련된 표현은 아래와 같다.

$$M = \{(1+g)e^Y + (1-g)e^{-Y}\} / \{(1+g)e^Y - (1-g)e^{-Y}\} \quad (3)$$

$$g = \epsilon_b / \epsilon_s \quad (b = \text{backing 물질, } s = \text{시편을 의미함}) \quad (4)$$

$$\epsilon_i = k_i / \sqrt{\alpha_i} \quad (k_i: \text{열전도도, } \alpha_i: \text{열확산도}) \quad (5)$$

$$f_i = \alpha_s / t_s^2 \quad (t_s: \text{시편두께}) \quad (6)$$

$$Y = \sqrt{\pi f / f_c} \quad (f: \text{chopping 주파수}) \quad (7)$$

여기서 A_0 는 chopping 주파수와 무관한 amplitude 상수, ϵ_s 는 열발산도, f_i 는 특성주파수(characteristic frequency), g 는 시편의 열발산도에 대한 backing 물질의 열발산도의 비율이다.

그림 1과 그림 2는 서로 다른 g 값에 대해서 각각 광음향신호의 위상과 크기의 변화를 $(f/f_c)^{1/2}$ 의 함수로 나타내고 있다. g 값의 변화에 대해서 위상의 변화가 크기의 변화보다 훨씬 큼을 알 수 있는데 이것은 g 의 변화에 대해서 위상이 신호의 크기보다 더 민감함을 의미하는 것이다.

III. 파라미터추정법(Parameter Estimation)

파라미터추정법은 가능한한 모든 data point들을 사용하여 실험결과를 분석하는 통계적 수단이며 실험결과로부터 거기에 관련된 각 파라미터들의 값을 역으로 추출해내는 과정이므로 inverse problem 이라고 부르기

도 한다.^[18] 파라미터추정은 식(1)로 표현되는 광음향신호의 위상에서 f_i 와 g 의 최적값(optimal value)을, 식(2)로 표현되는 광음향신호의 크기에서 f_i 와 g , 그리고 A_0 의 최적값을 구하는데 사용되며^[17] 여기서 추정되어진 최적 파라미터들은 식(4)와 식(6)에 의해서 열발산도와 열확산도로 환산되어진다. 본 연구에서는 Dennis 등에 의해서 개발되어진 비선형 파라미터 추정알고리즘인 NL2 SOL를 사용하였다.^[19,20] NL2SOL software 를 사용하여 얻어진 파라미터들의 신뢰성(reliability)은 각 파라미터들의 감도(sensitivity)에 의해서 결정되어진다. 광음향신호의 위상이나 크기를 어떤 파라미터에 대해서 1차미분한 것을 그 파라미터에 대한 위상이나 크기의 감도계수(sensitivity coefficient)로 정의하고 위상이나 크기의 단위로 식(8)에서 I_j 와 같이 정규화(normalization)된 것을 통상 감도계수라 부른다.

$$I_j = \beta_j \frac{\partial S}{\partial \beta_j} \quad (8)$$

여기서 j 는 각 파라미터들의 index 이며 S 는 광음향신호의 위상이나 크기를, β_j 는 각 파라미터들을 의미한다.^[18] 각 파라미터들에 대한 감도계수는 선정된 모델의 적합성을 검증하는 척도가 된다. 만약 한 파라미터값의 변화에 대한 S 값의 변화가 다른 파라미터값의 변화에 대한 S 값의 변화와 비슷한 양상을 보인다면 그 두 파

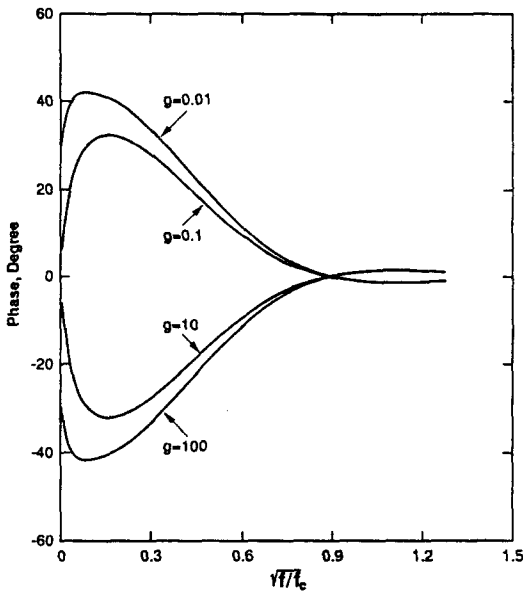


Fig. 1. Phase shifts of a photoacoustic signal as a function of $\sqrt{f/f_c}$ with different g values.

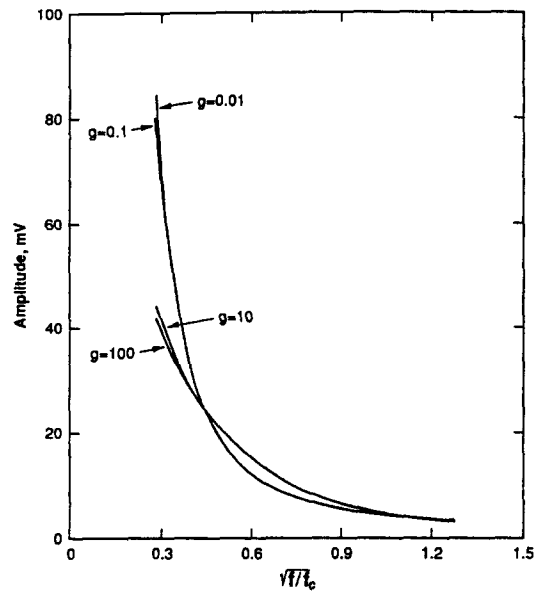


Fig. 2. Amplitude variations of a photoacoustic signal as a function of $\sqrt{f/f_c}$ with different g values.

라메터는 상관성이 있다(correlated)고 하거나 어느정도 종속적(dependent)이라고 말할 수 있다.

그림 3은 $f_c=177.75$ Hz, $g=0.014$ 일때 f_c 와 g 에 대한 광음향신호 위상의 감도계수의 변화를 chopping 주파수에 따라 나타내었다. f_c 에 대한 감도계수는 chopping 주파수가 저주파수로부터 약 f_c 의 절반이 되는 지점까지는 급격히 증가하다가 그 이후에는 서서히 감소함을 보인다. 그러나 g 에 대한 감도계수는 거의 항상 chopping 주파수와는 무관하게 0에 가까운 값을 나타내고 있다. 이와 같은 사실은 f_c 와 g 가 강한 상관관계를 가지고 있지 않아 신빙성있는 두 파라미터값을 추정해 낼 수 있음을 의미한다.

그림 4는 $f_c=177.75$ Hz, $A_0=30$ 그리고 $g=0.014$ 일때 각각 f_c , A_0 , g 에 대한 광음향신호 크기의 감도계수 변화를 chopping 주파수에 따라 나타내었다. g 에 대한 감도계수는 항상 0에 가까운 값을 보이나 f_c 와 A_0 에 대한 감도계수들은 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 이와 같은 사실로부터 f_c 와 A_0 는 강한 상관관계를 가지고 있으므로 동시에 타당한 파라미터 값을 추정해내기가 어렵다는 것을 짐작할 수 있다. 그러나 f_c 나 A_0 들중의 하나를 서로 독립적으로 구한다면 나머지 두 파라미터들은 강한 상관관계를 가지지 못하게 되므로 우리가 원하는 신뢰성 있는 파라미터 값을 추정해낼 수 있는 것이다.

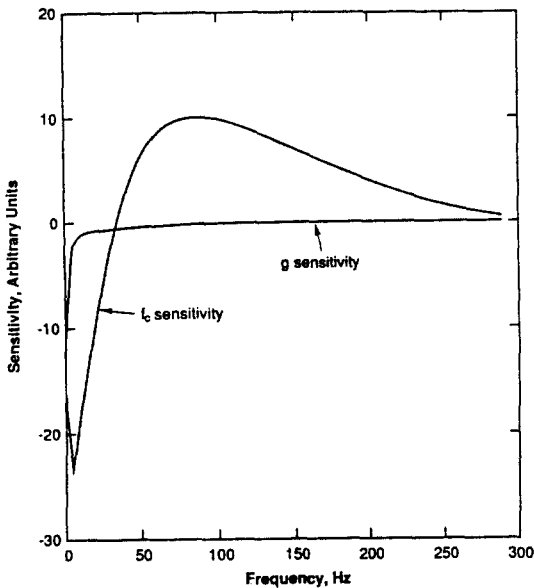


Fig. 3. Sensitivity coefficients for the phase measurement ($f_c=177.75$ Hz, $g=0.014$).

상관계수(correlation coefficient)는 두 파라미터 j 와 k 가 얼마나 상관관계를 가지고 있는지를 가늠하는 정량적인 척도이다. j 와 k 는 각각 j 번째와 k 번째 파라미터이다.^[17] 상관계수 ρ_{jk} 는 $-1 \leq \rho_{jk} \leq 1$ 를 만족하게 다음식과 같이 정의된다.

$$\rho_{jk} = \frac{\text{cov}(\hat{\beta}_j, \hat{\beta}_k)}{\sqrt{\text{var}(\hat{\beta}_j) \text{var}(\hat{\beta}_k)}} \quad (9)$$

여기서 $\hat{\beta}_j$ 와 $\hat{\beta}_k$ 는 각각 j 번째와 k 번째의 최적 파라미터 값이며, $\text{cov}(\hat{\beta}_j, \hat{\beta}_k)$ 는 두 최적 파라미터의 covariance, $\text{var}(\hat{\beta}_j)$ 는 j 번째의 최적 파라미터의 variance 이다. 만약 $\rho_{jk} = \pm 1$ 이라면 두 파라미터는 완전히 종속적(completely dependent)이다. 그림 3의 경우 계산되어진 f_c 와 g 의 상관계수는 -0.577 인데 이 수치는 두 파라미터가 강한 상관관계를 보이지는 않는다는 것을 의미한다. 그림 4의 경우 f_c 와 A_0 사이의 상관계수는 -0.992 , f_c 와 g 사이는 0.853 , A_0 와 g 사이는 -0.781 인데 이 결과로 A_0 와 g 는 어느정도의 상관을 가지고 있지만 나머지 두 관계는 상대적으로 강한 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

표 I은 광음향신호의 위상과 크기에서 f_c 와 g 가 각각 다른 값을 가질 때 계산되어진 상관계수값을 보여주고 있다. 위상의 경우, $f_c=500$ Hz일때의 상관계수의 절대값이 $f_c=50, 200$ Hz일 때보다 작다. 또한 같은 f_c 값을

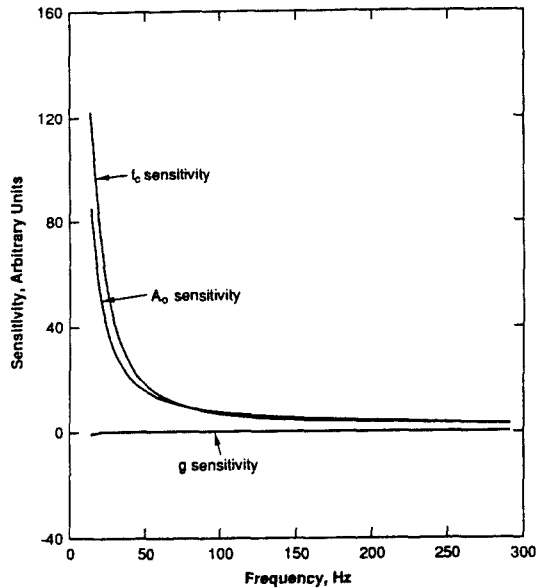


Fig. 4. Sensitivity coefficients for the amplitude measurement($f_c=177.75$ Hz, $A_0=30$, and $g=0.014$).

Table 1. Calculated values of correlation coefficient in the phase and amplitude measurement for different values of f_c and g .

f_c (Hz)	g	Phase measurement		Amplitude measurement		
		$f_c g$	$f_c A_0$	$f_c g$	$A_0 g$	
50	0.01	-0.582	-0.994	0.884	-0.829	
	0.10	-0.358	-0.995	0.882	-0.833	
	10.00	0.064	-0.982	-0.701	0.793	
	100.00	0.073	-0.977	-0.752	0.839	
200	0.01	-0.352	-0.995	0.855	-0.810	
	0.10	-0.348	-0.997	-0.639	0.693	
	10.00	0.064	-0.971	-0.302	0.501	
	100.00	0.111	-0.963	-0.631	0.786	
500	0.01	-0.289	-0.991	0.843	-0.763	
	0.10	-0.342	-0.993	0.827	-0.754	
	10.00	0.062	-0.986	-0.842	0.910	
	100.00	0.116	-0.980	-0.853	0.925	

가질 때도 $g > 1.0$ 일 때의 상관계수의 절대값이 $g < 1.0$ 의 상관계수의 절대값보다 작다. 이것은 f_c 가 수백 Hz 이고 $\epsilon_0 < \epsilon_b$ 가 만족될 때 타당한 모델이라는 것을 의미한다. 광음향신호 크기의 경우, A_0 가 30 일 때 각 상관계수들을 계산하였다. 대부분의 경향들은 위상의 경우와 비슷하지만 f_c 가 500 Hz 일 경우 $g > 0.1$ 일 때 상관계수의 절대값이 상대적으로 큰 값이 된다. 또한 표 I 은 f_c 와 A_0 의 상관계수가 항상 거의 -1.0 에 가까운 값을 보여준다. 이것은 두 파라미터 사이의 상관관계가 매우 강함을 의미한다. 앞의 그림 4 에서 예상했듯이 두 파라미터 중에서 하나를 따로 구하면 나머지 파라미터들에 대해서는 신뢰성 있는 값을 구할 수 있다.

IV. 실험

실험장치도는 그림 5 에 나타내었다. 수은아크램프(200 W)로부터의 heating 빔은 광음향셀(photoacoustic cell)에 위치한 시편의 표면에 흡수된다. 이때 빔은 computer에 의해 제어되는 mechanical chopper에 의해서 주파수가 수 Hz 에서 수백 Hz 로 조정된다. 렌즈와 iris에 의해서 시편표면에서의 빔의 직경은 12.7 mm 로 고정된다. 광음향신호의 감지와 증폭을 위해서 감도가 40 mV/Pa 인 마이크로폰(ACO Pacific Inc.: ACO 7047)과 프리엠프를 각각 사용하였으며 dual phase lock-in amp(Stanford Research Systems : SR 530)를 신호분석용으로 사용하였다.

그림 5 에는 광음향셀의 세부구조도 나타내었다. 산란광과 background 잡음을 최소화 하기 위하여 흡수물

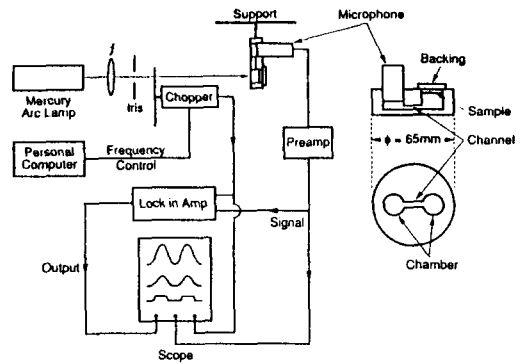


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup and the design of a photoacoustic cell.

무시할 수 있는 plexiglass로 셀을 만들었다.^[21] 셀에는 2개의 chamber가 있는데 하나는 시편 장착용이고 또 하나는 마이크로폰 설치용이다. 두 chamber는 가는 통로(channel)로 연결되어 있다. 본 실험에 사용된 셀에서 계산된 Helmholtz 공명주파수(resonance frequency)^[22]는 642 Hz였는데 본 측정에서 사용된 chopping 주파수 영역은 수 Hz에서 약 300 Hz이므로 그 효과는 무시할 수 있다.

측정에 사용된 시편들은 (1) 스테인레스강 304(두께: 0.386 mm), (2) 스테인레스강 304(두께: 0.274 mm), (3) 브라스(두께: 0.528 mm), (4) 알루미늄(두께: 1.580 mm), (5) 구리(두께: 0.795 mm) 이며 시편들의 직경은 공히 12.5 mm 이다. 신호대잡음비를 증가시키기 위하여 빛을

받는 시편의 앞면은 두께가 0.1 m 이하가 되게 graphite 도료를 입혔다. 또한 시편을 독자적으로 설치(free standing)했을 때 시편의 열팽창 등에 의한 드럼효과(drum effect)^[16]를 줄이기 위해서 시편들은 진공그리스(vacuum grease)를 사용하여 plexiglass로 된 backing에 부착하였다.

시편과 마이크로폰이 광음향셀에 장착되면 chopping 주파수를 수 Hz에서 약 f_c 의 1.3배가 될 때까지 변화시켜가며 광음향신호의 크기와 위상을 동시에 측정한다. (여기서는 시편의 두께와 문헌^[23,24]에 나와있는 시편의 열확산도를 식(6)에 대입하여 f_c 를 대략적으로 정한다.) 광음향신호의 위상변화를 측정할 때는 chopping 주파수 변화 이외의 다른효과가 위상에 미치는 영향을 제거하기 위하여 열적으로 두꺼운 보정시편(두께 5 mm)의 위상변화를 측정하여 이 값들을, 측정하고자 하는 시편에서 측정된 위상값에서 빼주는 방법을 사용하였다.

V. 결과 및 논의

시편과 backing 사이의 진공그리스층의 두께가 매우 작기 때문에 진공그리스의 영향은 무시한다고 가정하고^{19, 25)} 2층(two-layer)모델을 적용하였다. Backing물질의 효과를 조사하기 위하여 시편 (2)가 각각 다른 backing에 (plexiglass와 알루미늄)에 부착되어 있을 때의 광음향신호의 위상변화를 조사하였다. 그 결과가 2층모델에서 계산되어진 결과와 같이 그림 6에 나와있는데 광음향신호가 backing 물질에 강하게 영향을 받고 있다는 것을 보여주고 있다. 여기서 추정되어진 시편 (2)의 열확산도

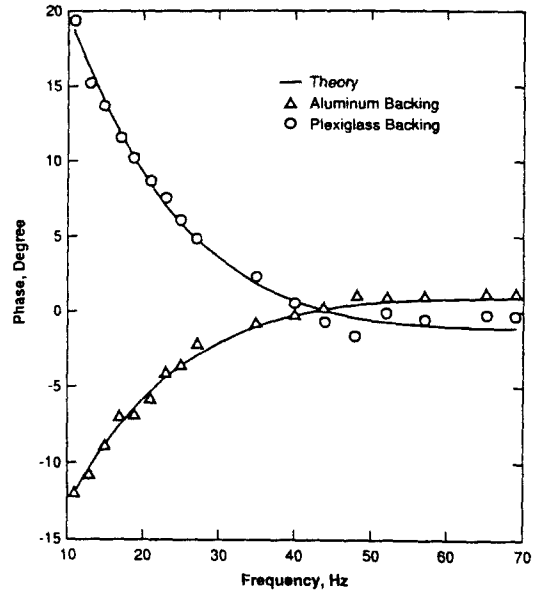


Fig. 6. Phase variations of a photoacoustic signal with different backing materials. Sample is stainless steel 304 ($t_s=0.274$ mm).

는, 식 (6)에 이미 알고 있는 시편의 두께와 파라메터 추정법에 의해서 얻어진 f_c 의 최적값을 대입해서 구할 수 있게 되는데 plexiglass 와 알루미늄을 backing 으로 사용했을 때 각각 0.041과 0.042 cm^2s^{-1} 로서 문헌값^[23,24]과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

각 시편에 대해서 5번씩 측정을 실시하여 평균과 표준편차를 구했다. 그림 7은 시편 (3)과 시편 (5)의 위상

Table 2. Thermal diffusivity and thermal effusivity values obtained from the phase measurement compared with the values quoted in literature.

Sample	α_s ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		ϵ_s ($\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	
	measured	literature ^a	measured	literature ^b
1	0.043±0.003	0.039	0.55±0.06	0.689
2	0.041±0.003	0.039	0.49±0.05	0.689
3	0.313±0.008	0.340	1.60±0.30	1.930
4	0.940±0.020	0.970	2.10±0.30	2.193
5	1.160±0.030	1.200	3.00±0.40	3.466

^aQuoted from references [23, 24]

^bComputed from values of thermal conductivity and thermal diffusivity [23, 24]

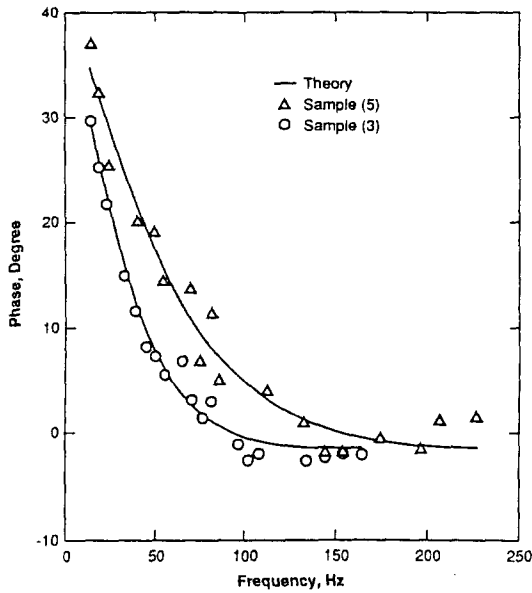


Fig. 7. Experimental data with the theoretical curve fit using the parameter estimation of f_c and g in phase measurement.
 sample (3): $f_c = 112.27$ Hz, $g = 0.030$
 sample (5): $f_c = 183.54$ Hz, $g = 0.016$

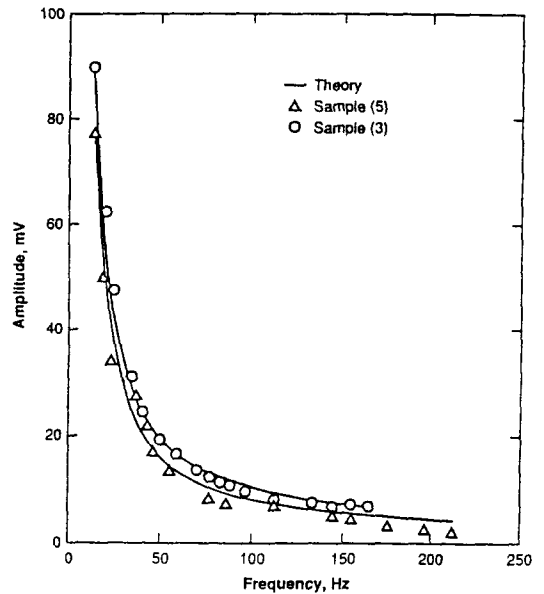


Fig. 8. Experimental data with the theoretical curve fit using the parameter estimation of A_0 and g in amplitude measurement.
 sample (3): $A_0 = 45.2$, $g = 0.022$,
 sample (5): $A_0 = 34.9$, $g = 0.017$

Table 3. Thermal diffusivity and thermal effusivity values obtained from the amplitude measurement by 3-parameter estimation.

Sample number	α_s ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ϵ_s ($\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
1	0.034 ± 0.002	0.19 ± 0.02
2	0.035 ± 0.001	0.18 ± 0.04
3	0.37 ± 0.02	not available
4	1.02 ± 0.02	not available
5	1.4 ± 0.7	0.80 ± 0.03

Table 4. Thermal effusivity values obtained from the amplitude measurement by 2-parameter estimation.

Sample number	ϵ_s ($\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ^a
1	0.67 ± 0.09
2	0.58 ± 0.04
3	2.2 ± 0.1
4	1.9 ± 0.2
5	2.8 ± 0.3

변화의 측정결과와 이론치를 동시에 나타낸 것이다. 이론곡선은 2-파라미터(f_c , g)추정에 의해서 얻어진 것이다. 표 II는 실험결과 추정되어진 파라미터들을 식 (6)과 식 (4)에 각각 대입하여 구해진 열확산도와 열발산도를 문헌값^[24,25]과 비교한 것이다. 식 (4)를 사용하여 열발산도를 구할 때 backing의 열확산도인 α_b 는 문헌^[26]에서 이미 알고 있는 값이라고 가정하였다. 실험에서 구해진 값들은 문헌값과 잘 일치하고 있음을 보여준다.

표 III은 광음향신호의 크기를 측정된 것과 3-파라미터 (f_c , A_0 , g) 추정에 의한 분석결과를 보여주고 있다. 여기서

^aThe f_c values, obtained from the phase measurement, is substituted into this estimation.

얻어진 열확산도는 신뢰성이 있지만 열발산도는 그렇지 못하다. "not available"이 의미하는 것은 추정되어진 g 값이 0으로 접근하여 타당한 값을 구하지 못했다는 것이다. 따라서 f_c 와 A_0 사이의 강한 상관관계 때문에 둘 중 하나는 제거되어야 한다. 본 연구에서는 위상측정에서 추정되어진 f_c 값을 여기에 대입하였다. 그림 8과 표 IV는 그 결과를 보여주고 있는데 여기서 구해진 열발산도는 비교적 신뢰성있는 값이라 할 수 있다.

VI. 결 론

R-G 이론에서 발전된 2층 모델이 plexiglass backing에 부착된 얇은 금속판 시편에 잘 적용됨을 확인하였으며 파라미터 추정법에 의하여 실험결과를 분석하여 신뢰성 있는 열확산도와 열발산도를 구할 수 있었다. 또한 감도해석에서의 상관계수값으로부터 광음향신호의 위상에 대한 모델이 신호크기에 대한 모델보다 더 신뢰성이 있다는 것을 확인하였다. 신호크기의 측정에서 f_c 와 A_0 사이 그리고 f_c 와 g 사이의 상관계수의 절대값이 f_c 와 g 사이의 값보다 크기 때문에 파라미터 f_c 가 제거되었을 때 신뢰성 있는 열발산도를 얻을 수 있었다. 만약 두 신호의 비율(하나는 측정하려는 시편에서의 신호, 다른 하나는 이미 열물성을 알고있는 기준시편에서의 신호)을 측정할 수 있다면 파라미터 A_0 는 제거될 수 있으며 이것에 대한 알고리즘은 연구중이다. 보다 얇은 시편의 측정을 위해서는 높은 chopping 주파수영역에서는 신호의 크기가 마이크로폰으로 감지될 수 있을 정도의 크기를 가져야하므로 레이저빔들을 열원으로 사용하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 1990년도 전반기의 Post-Doc 연수지원금에 의해 미국 Purdue 대학교 부설 열물성연구소(TPRL: Thermophysical Properties Research Laboratory)에서 수행된 것으로 한국과학재단 관계자 여러분들께 감사드린다. 또한 본 연구기간동안 도움을 아끼지 않으신 TPRL의 Dr. R. E. Taylor께 깊이 감사드리고 많은 조언을 해준 Dr. J. Lee에게도 감사드린다.

참 고 문 헌

[1] A. G. Bell, Am. J. Sci. **20**, 305 (1880).
 [2] J. Tyndall, Proc. Roy. Soc. **31**, 307 (1881).
 [3] W. C. Roentgen, Phil. Mag. **11**, 308 (1881).
 [4] A. Rosencwaig and A. Gersho, J. Appl. Phys. **47**, 64 (1976).

[5] 이호성, 송양섭, 이동두, PAS(광음향분광학)의 응용, 한국표준연구소 연구보고서 KSRI-88-4-IR, pp. 1-10 (1988).
 [6] 송양섭, 박사학위논문, KAIST (1990).
 [7] F. A. McDonald and G. C. Wetsel, Jr., J. Appl. Phys. **49**, 2313 (1978).
 [8] N. C. Fernelius, J. Appl. Phys. **51**, 650 (1980).
 [9] M. J. Adams and G. F. Kirkbright, Analyst **102**, 281 (1977).
 [10] A. Ono, T. Baba, H. Funamoto, and A. Nishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **25**, L808(1986).
 [11] A. Mandelis, Y. C. Teng, and B. S. H. Royce, J. Appl. Phys. **50**, 7138 (1979).
 [12] T. Tominaga and K. I. Ito, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 2392 (1988).
 [13] A. Lachaine and P. Poulet, Appl. Phys. Lett. **45**, 953 (1984).
 [14] G. Benedeto and R. Spagnolo, Appl. Phys. **A46**, 169 (1988).
 [15] R. T. Swimm, Appl. Phys. Lett. **42**, 955 (1983).
 [16] P. Charpentier, F. Lepoutre, and L. Bertrand, J. Appl. Phys. **53**, 608 (1982).
 [17] J. V. Beck and K. J. Arnold, *Parameter Estimation in Engineering and Science*(John Wiley & Sons, New York, 1977) Chapter 2 and 6.
 [18] J. J. Hoefler, M. S. M. E. Thesis (Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1989) Chapter 2 and Appendix C.
 [19] J. E. Dennis, Jr., M. D. Gay, and R. E. Welsch, Trans. on Math. Software **7**, 348 (1981).
 [20] J. E. Dennis, Jr., M. D. Gay, and R. E. Welsch, Trans. on Math. Software **7**, 369 (1981).
 [21] J. F. McClelland and R. N. Kniseley, Appl. Opt. **15**, 2967 (1976).
 [22] N. C. Fernelius, Appl. Opt. **18**, 1784 (1979).
 [23] Y. S. Touloukian, *Thermal Diffusivity*(IFI/Plenum, New York, 1973).
 [24] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 2nd Ed.*(John Wiley & Sons, New York, 1985) Appendix A.
 [25] N. F. Leite, N. Cella, H. Vergas, and L. C. M. Miranda, J. Appl. Phys. **61**, 3025 (1987).
 [26] R. S. Quimby, Ph. D. Phys. thesis (University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 1979) p. 127.

**Photoacoustic Determination of Thermophysical Properties
of Thin Metallic Plates by Using Parameter Estimation**

Sok Won Kim

Temperature Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science

(Received: October 24, 1991)

The phase and the amplitude of the photoacoustic signal were measured as a function of chopping frequency for several kinds of widely used thin metallic plates (stainless steel 304, brass, aluminum and copper) attached to plexiglass backing. The experimental data have been analyzed systematically by parameter estimation technique based on the two-layer model developed from Rosencwaig-Gersho (R-G) theory. Using this analysis, the values of thermal diffusivity and thermal effusivity of the materials have been determined.