

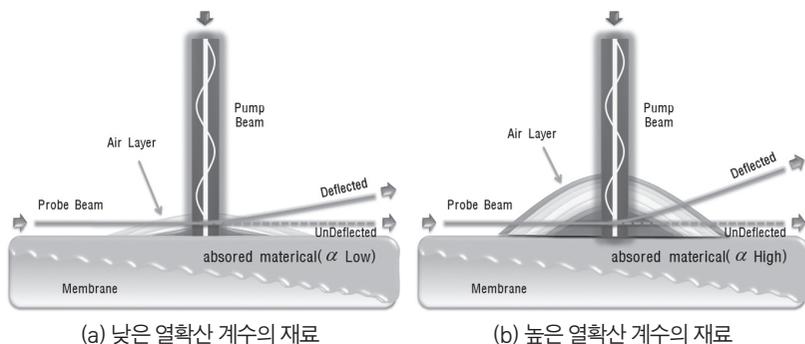
# 광열효과 응용기술에 대한 연구

광열효과를 이용하여 물질의 열물성을 측정하는 기술과 물질 내부의 3차원 이미징을 구축하는 방법에 대해 소개하고자 한다.

## 광열효과와 측정 원리

광열효과(photothermal effect)란 물질에 빛에너지를 조사하면 물질의 특성에 따라 그 에너지를 흡수하여 그 주변에 일어나는 여러 가지 물리적 현상을 말한다. 응용기술로는 측정하고자 하는 물질에 빛에너지를 조사하여 물질 및 주변 공기에 온도 상승이 일어나는 것을 이용하여 열물성 측정 및 3차원 내부 이미징 측정을 한다.

그림 1은 광열 편향법의 원리를 설명하는 그림으로 측정 재료에 대해 광열 효과와 광열편향이 어떻게 나타나는지 보여주고 있다. 그림 1에서 보듯이 특정 물질을 흡수한 재료에 변조된 가열빔(Modulated Pump Beam)을 조사하면 광열효과에 의해 재료에 에너지가 흡수되고 이는 온도상승을 야기한다. 공기층의 흡수계수는 매우 작으므로 공기에 흡수되는 가열빔의 에너지량은 무시할 수 있다. 흡수된 에너지는 재료의 열확산계수에 의해 사방으로 열확산(diffusion)이 되고 시편에 인접한 공기의



[그림 1] 광열효과에 의한 온도장 분포 및 조사빔의 편향(높은 열확산과 낮은 것 비교)

김현정

아주대학교 기계공학부

부교수

hyunkim@ajou.ac.kr

온도변화를 가져온다. 시편 내부에 가열빔의 강도, 시편의 크기, 시편의 열확산계수의 값에 해당하는 고유의 온도 분포장이 형성될 것이다. 결국 시편의 표면에 인접한 공기의 온도분포는 시편 표면의 온도분포에 따라 발생될 것이므로, 실험 조건에서 시편의 크기와 가열빔의 강도를 고정한다면 공기의 온도분포는 시편내부의 열확산계수에 의해 결정될 것이다.

따라서 그림 1에서 보듯이 열확산 계수의 크기에 따라 공기층 온도장의 구배가 결정되고, 이는 공기층의 굴절률 분포를 야기시킨다. 열확산계수가 큰 물질이 침투한 b)의 경우 공기층 굴절률의 구배가 크게 되어 검사빔의 굴절정도도 a)보다 더 크게 될 것이다. 측정원리에 대해서는 뒤에 더 상세히 기술될 것이다.

### 측정을 위한 이론 모델 및 해석

실험 측정에서 얻는 것은 검사빔과 가열빔의 위상차이므로, 측정된 위상차로부터 물질의 분포를 재구축하기 위해서는 측정시편 내의 열물성(열확산계수)이 반영된 이론식을 위상차에 대해 알고 있어야 한다. 이를 위해 각각의 영역에 대해서 주기적인 열원을 가지는 3차원 비정상열전도 방정식 해석을 다음과 같이 수행한다.[1, 2] 그림 2에서 볼 수 있듯이 측정하고자 하는 대상은 시편과 시편 앞

뒤의 공기층, 이렇게 세 영역을 포함하고 있다.

식 (1)은 세 영역에 대한 지배방정식을 나타낸 것으로 그림 2와 같이 유한한 두께를 가지고  $x$ 와  $y$  방향으로 무한한 길이를 가진다고 가정한다.

열원은 임의의 주파수로 사인과 형태로 변조되

$$\nabla^2 T_i + \frac{1}{k} Q_i = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (i=\text{front gas, sample, rear gas}) \quad (1)$$

고,  $x$ 와  $y$  방향으로 Gaussian 분포를 가지며,  $z$  방향으로 광흡수계수의 지수 법칙으로 정의하며 식(2)과 같이 정할 수 있다. [3, 4]

식(1)을 풀기 위해서는 4개의 경계조건이 필요

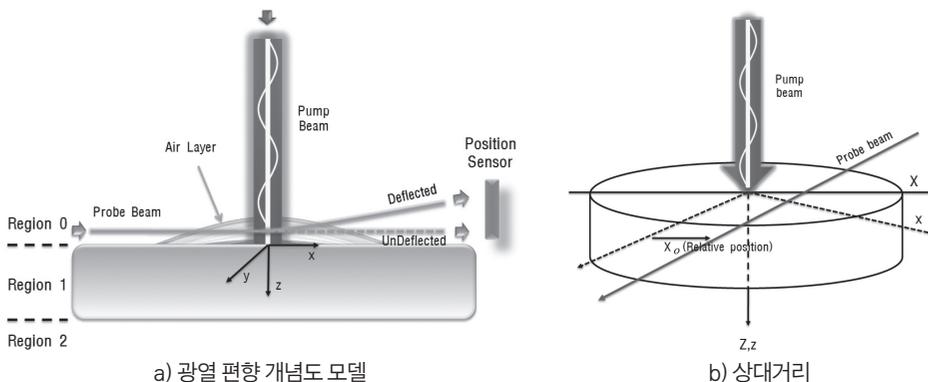
$$Q_i(x,y,z,t) = -\frac{P_0 (1-R_1)}{4\pi\alpha^2} e^{-\lambda z} e^{-(x^2+y^2)/a^2} e^{i\omega t} \quad (2)$$

하고, 이는 시편의 전/후 경계면에서 인접한 공기와 시편간의 열유속과 온도가 동일한 것을 경계조건으로 한다.

식(1)의 경우 비정상 3차원 방정식으로부터 비

$$T_0|_{z=0} = T_1|_{z=0} \quad k_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

$$T_1|_{z=L_1} = T_2|_{z=L_1} \quad k_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=L_1} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=L_1} \quad (4)$$



[그림 2] 측정을 위한 시편에 대한 이론 모델

정상 항을 다루기 위하여 복소변환법(Complex method)을 적용한다. 복소변환법을 적용 후 한켈 변환(Hankel Transform)을 적용하여 식을 변환시키면 다음 식(5)와 같이 식(1)이 변환될 것이고 식(6), (7)의 경계조건과 적분을 통해 각 영역에 대한 온도식을 유도해 낼 수 있다.

$$t_i(\beta, z) = \int_0^\infty \tilde{T}_i(r, z) r J_0(\beta r) dr \quad (5)$$

$$\triangleright \tilde{T}_i = \int_0^\infty t_i \beta J_0(\beta r) d\beta$$

$$t_0 = t_1 \quad (z=0) \quad k_0 \frac{\partial t_0}{\partial z} = k_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} \quad (z=0) \quad (6)$$

$$t_1 = t_2 \quad (z=L_1) \quad k_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} = k_2 \frac{\partial t_2}{\partial z} \quad (z=L_1) \quad (7)$$

일단 온도분포에 대한 식이 결정되면 이를 이용하여 식(8)을 이용하여 검사빔의 편향각을 구한다. 편향각의 경우 시편의 표면에 식(9)와 같이 수직(Normal)방향과 평행(Transverse)방향의 두 성분이 발생 할 수 있고 이는 각각의 방향에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\Phi = \int_{path} \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) \nabla_t T_0(r, z, t) ds \quad (8)$$

$$\Phi_n = \frac{1}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{air} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial T_0(r, z, t)}{\partial z} dx \quad (9)$$

$$\Phi_t = \frac{1}{n_0} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]_{air} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial T_0(r, z, t)}{\partial y} dx$$

검사빔과 편향각 사이의 위상차는 편향각의 실수부와 허수부의 관계로 식(10)을 이용하여 계산 될 수 있다.

$$\Psi = \tan^{-1} \left[ \frac{imag(\Phi)}{real(\Phi)} \right] \quad (10)$$

## 열물성 측정 원리

### 열확산 계수의 측정

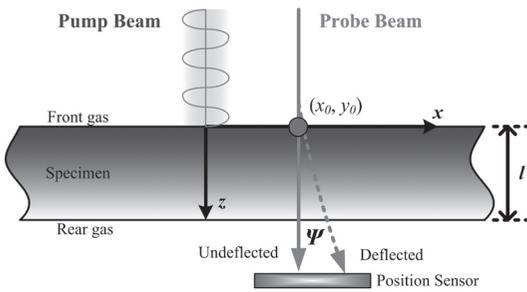
그림 2에서 보듯이 측정하고자 하는 재료에 평행하게 강도가 약한 검사빔(probe beam)을 공기 중에 조사시킨다. 조사된 검사빔은 재료와 평행하게 시편 전면의 공기층을 지나거나 시편과 평행하게 통과하게 되고 이 빔의 끝단에 위치센서(position sensor)가 놓인다[3, 5, 6, 7]. 이와 같이 검사빔과 위치센서를 설치한 후 재료의 표면에 수직으로 정현파(sine wave) 형태로 변조된 가열빔(modulated pumped beam)을 조사하면 광에너지의 흡수로 인하여 발생한 열확산은 시편과 시편에 인접한 공기의 온도변화를 야기한다. 이렇게 발생한 온도변화는 주변 공기층의 굴절률 변화를 유발하게 되고 이는 검사빔의 편향을 발생하게 한다. 가열빔을 변조시켰기 때문에 검사빔의 편향은 변조된 가열빔의 주기와 같은 주기를 가지고 반복한다. 하지만 가열빔에 의해 재료에 가해지는 열에너지가 재료 표면에 확산되는 시간이 있기 때문에 가열빔보다 약간의 시간차를 두고 발생한다. 위치센서는 Undeflected 검사빔(온도 변화가 회복되어 검사빔의 굴절이 없는 상태)과 온도 구배에 의해 굴절된(Deflected) 검사빔의 위치변화를 반복해서 측정한다. 이 굴절된 검사빔 신호의 위치 변화주기가 변조된 가열빔의 주기와 같을 것이고 열확산의 시간만큼 가열빔과 위상차가 발생할 것이다. 열확산계수는 재료의 고유 특성으로 각 재료마다 다르므로 각각 다른 열분포와 열확산시간을 야기시키고, 이를 통해 발생하는 위상차도 고유의 값을 가진다.

이렇게 측정된 데이터는 이론식과 비교를 하여 최종적인 열확산계수로 변환될 수 있다. 여기서, 열확산계수를 제외한 다른 값은 실험조건 및 실측에 의해 정해지는 값이고 열확산계수는 미지수로 남아있다. 앞 절의 이론식에서 유도된 위상차는 컴퓨터 계산을 통해 열확산계수의 값을 미지수로써 임

의 값으로부터 출발하여 Iteration을 통해 조금씩 변화시켜 계산을 하고 이론식에 의해 계산된 위상차 값과 실험에 의해 측정된 위상차 값이 일치하였을 때 사용된 값을 열확산계수로 결정한다.

### 투명 재료에 대한 열물성 측정

앞에서 설명한 광열 편향법은 재료의 투명도가 증가하면 할수록 측정이 어려워진다. 그 이유



[그림 3] 투과형 박막재료 측정 방법 (Collinear Deflection Method)

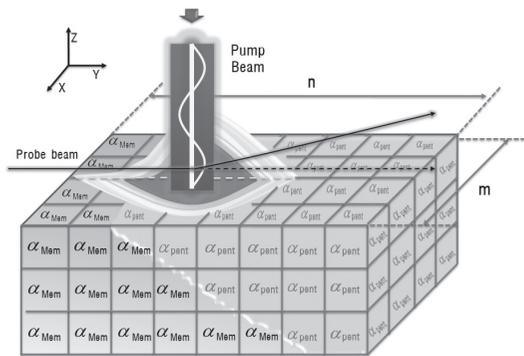
는 측정 재료 주변에 온도 상승을 유발시켜야 하나 투명재료의 경우 가열빔의 대부분을 투과시켜버려 에너지 흡수가 미미하기 때문에 온도상승이 매우 적기 때문이다. 이를 해결하기 위하여 Collinear Deflection Method라는 방법이 있다.

그림 3의 Collinear Deflection Method도 광열 편향법과 같이 검사빔을 시편에 직접 조사한다. 하지만 검사빔의 굴절정보를 취득하기 위해 위치센서를 시편의 뒤에 위치시킨다. Collinear Deflection Method의 경우도 검사빔의 광열에너지가 재료에 많이 흡수되지 못하고 상당부분이 투과해버리는 것은 마찬가지이나 고체 재료의 온도 변화에 따른 굴절률 변화는, 비슷한 온도 변화에 따른 공기의 굴절률이나 재료의 열탄성 변형에 비해 거의 100배에 이르기 때문에 검사빔의 변화량을 실험적으로 측정하는 것이 가능하게 된다.

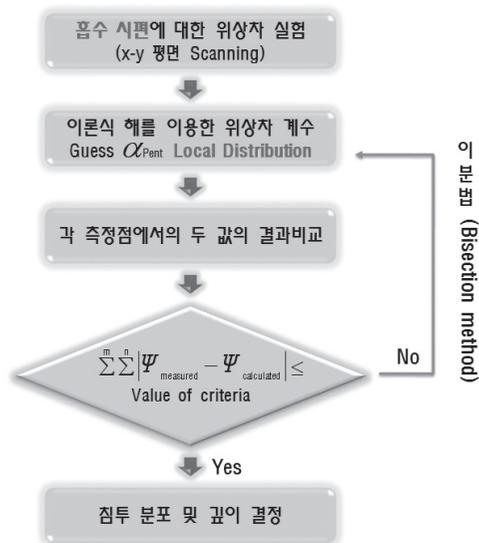
### 3차원 내부 이미징 방법

광열효과를 이용하면 재료내부에 따라 그 효과가 각각 다르게 나타날 것이므로 이를 이용하여 재료 내부의 물질 분포를 알아낼 수 있다. 그림 4에서 보듯이 측정 시편에 인접한 공기층의 온도분포는 가열빔의 세기를 고정한다면 시편 내부 재료의 열확산 계수 분포에 따라 결정될 것이다.

만약 모재(membrane)에 모재와 다른 열확산 계수를 가지는 물질이 전혀 침투하지 않았다면 대부분의 가열빔은 투과하여 공기층에 온도 변화를



[그림 4] 시편내의 열확산계수 분포에 따른 온도장 형성

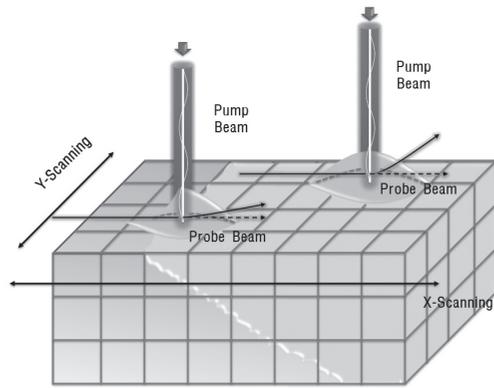


[그림 5] 침투물질의 위치 결정 흐름도

주지 못할 것이다. 하지만 모재와 다른(열확산계수가 더 높은) 물질이 침투한다면 침투한 위치의 범위에 따라 시편에 인접한 공기층에 온도변화를 야기할 것이다. 시편과 침투할 물질의 열확산 계수를 안다면 **그림 4**과 같은 상황에서 측정된 검사빔의 편향각과, 검사빔과 가열빔의 위상차는 침투 위치의 범위에 따라 고유한 값을 가질 것이다. 이론식에서는 초기값으로 시편의 모든 위치에 모재의 열확산계수 값을 넣고 계산을 수행하고, **그림 4**에서와 같이 시편의 3차원 내부에 형성한 격자(Grid) 중심의 위치에 순차적으로 침투 물질의 열확산계수 값을 넣어 온도장을 계산한다. 온도장이 계산된 후에는 이를 이용하여 앞에서 설명한 방법으로 편향각 및 위상차를 계산할 수 있다. 이때 계산된 위상차와 측정된 위상차를 비교하여 그 값이 일치하지 않으면 다른 격자점에 침투 물질의 열확산계수를 대입하여 측정 위상차 값과 계산된 위상차 값이 일치할 때까지 계산을 반복한다. 두 위상차의 값이 일치할 때 격자점에 대입한 열확산계수의 위치 값이 침투 물질의 침투 분포형상을 나타낼 것으로 예상된다. 측정 해상도의 한계는 격자점을 얼마나 작게 분할하느냐 달려 있다. **그림 5**는 침투 물질의 위치를 결정하는 과정을 나타내는 흐름도이다. 측정 위상차와 계산 위상차의 관계는 한 개의 고정된 측정점에서 다음과 같을 것이다.

$$\psi_{measured} = \psi_{calculated}(\alpha(x,y,z), L, \alpha, r, f) \quad (11)$$

앞에서도 설명하였지만 열확산계수를 제외한 변수들의 값은 측정 실험으로부터 정해질 수 있는 값이다. 여기에서 중요한 점은 측정 시편의 표면에서 어떠한 측정점을 선택하여도 측정과 계산 위상차의 값이 다르게 될 뿐이지 시편 내부의 열확산계수 분포는 일치해야 한다는 사실이다(열확산 길이보다 측정 범위가 작다는 전제 조건하에서) (**그림 4** 참조). 이와 같은 물리적 상황은 개발하고자 하



[그림 6] 측정점의 변화에 따른 편향각의 변화와 열확산 계수 분포의 동일성

는 방법이 다른 방법과 다르게 방대한 측정점을 대상으로 Scanning 할 필요가 없다는 것을 말한다.

앞에서 설명한 방법만으로도 개발하고자 하는 측정 방법은 기존의 측정 방법보다 많은 장점과 높은 정확도를 달성할 것으로 사료된다. 하지만 모든 측정방법은 측정 오차가 있기 마련이다. 여기서 더욱 정밀한 측정을 위하여 격자점의 위치에 따라 시편의 표면에서 X-Y 방향으로 Scanning을 한다(**그림 6** 참조). 따라서 모든 측정점에서 획득된 물질의 침투 위치가 모두 일치할 때까지 반복계산을 수행한다. 현실적으로 식(12)와 같이 측정된 위상차의 합과 계산된 위상차의 합의 차이가 어느 일정 범위(Criteria)안에 들어올 때 계산을 중지할 것이다.

$$\sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n | \psi_{calculated}(x,y) - \psi_{calculated}(x,y, \alpha(x,y,z), L, \alpha, r, f) | \leq \text{value of criteria} \quad (12)$$

여기서  $m, n$ 은 각각  $x, y$  방향으로의 격자점 개수이다.

## 참고 문헌

1. A. Salazar, A. Sanchez-Lavega, and J. Fernandez,

- "Thermal diffusivity measurements on solids using collinear mirage detection", *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, No. 3, pp.1539-1547 (1993)
2. M. Commandre and E. Pelletier, "Measurements of absorption losses in TiO<sub>2</sub> films by a collinear photothermal deflection technique", *Applied Optics*, Vol. 29, No. 28, pp.4276-4283 (1990)
3. B. C. Li, and R. Gupta, "Simultaneous measurement of absorption coefficient, thermal diffusivity, and flow velocity in a gas jet with pulsed photothermal deflection spectroscopy," *J. Appl. Phys.* Vol. 89, No. 2, pp.859-868 (2001).
4. M. Bertolotti, G. Liakhov, R. Li Voti, Ruo Peng Wang, C. Sibilis, and V. P. Yakovlev, "Mirror temperature of a semiconductor diode laser studied with a photothermal deflection method," *J. Appl. Phys.* Vol. 74, No. 12, pp.7054-7060 (1993).
5. G. L. Bennis, R. Vyas, R. Gupta, S. Ang, and W. D. Brown, "Thermal diffusivity measurement of solid materials by the pulsed photothermal displacement technique," *J. Appl. Phys.*, Vol. 84, No. 7, pp.3602-3610 (1998).
6. E. T. Ogawa, C. Hu, and P. S. Ho, "Thermal diffusivity measurement of polymeric thin films using the photothermal displacement technique: I. Free-standing film case," *J. Appl. Phys.* Vol. 86, No. 11, pp.6018- 6027 (1999).
7. D. L. Balageas, D. M. Boscher, A. A. Deon, and F. Enguehard, "Photo- acoustic microscopy by photodeformation applied to thermal diffusivity determination," *ETPC Proceedings*, Vol. 23, pp.517-528 (1991). 