

광섬유를 이용한 레이저섬광의 균일분포 증진효과에 따른 열확산계수 측정에 관한 고찰

이원식* · 배신철**

(1997년 10월 28일 접수)

A Study on Thermal Diffusivity Measurement by Improvement of Laser Flash Uniformity Using an Optical Fiber

Won-Sik Lee and Shin-Chul Bae

Key Words: Thermal Diffusivity(열확산계수), Laser Flash Method(레이저섬광법), Optical Fiber(광섬유), Non-Uniform Heating Error(불균일 가열오차)

Abstract

When thermal diffusivity is measured by laser flash method, the thermal diffusivity can be calculated from the assumption of the uniformly heated whole surface of the specimen. It has been known that the approximate 5% error is made by the non-uniform energy distribution on the specimen surface of laser pulse heat source. In this study, to obtain the highly-uniformed laser beam, which has both the low non-uniform heating error from non-uniform laser beam and the energy loss, research was carried out on no transmitting loss by optical fiber and high repetitions. In addition, heating error and thermal diffusivity were measured as the measuring positions were varied and compared with the results using the uniform and the non-uniform laser beams.

In addition, due to using the uniformized laser beam, the whole surface of the specimen was heated uniformly and as a result, it was thought that this was very effective to reduce the variations of the errors of the thermal diffusivity as the measuring positions were varied. It can be obtained that when the thermal diffusivity of POCO-AXM-5Q1 of SRM in NBS was measured with both the uniform and the non-uniform laser beams, the dispersion error of the former was from 2 to 2.5%, which was more improved than that of the latter.

1. 서 론

재료의 열물성이란 열적특성을 뜻하는 것으로 열확산계수, 열전도계수, 비열 그리고 방사율 등을 말한다. 이러한 열적특성의 계측은 고도의 정확도를 요구하는 계측기술로서 철강산업, 열처리산업,

에너지산업, 전자산업, 원자력산업, 항공우주산업 등 여러 기초산업 및 첨단산업에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있는 중요분야이다. 그러므로 재료산업의 고부가 가치에 따른 신소재의 지속적인 개발과 소재의 평가기술에 대한 요구가 날로 증가하고 있다.

이러한 열적 특성계측기술 중 열확산계수의 측정에는 오래전부터 많이 응용되고 있는 레이저에 의한 섬광법은 1961년 Parker⁽¹⁾가 제시한 이래 레이

* 회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 단국대학교 공과대학 기계공학과

저 기술의 발달과 더불어 급속히 보급되어 왔으며 현재는 열확산계수의 측정법으로 광범위하게 이용되고 있다. 레이저섬광법은 시편전면에 순간적 섬광으로 열을 투사시킨 후, 시료 후면의 온도이력을 측정할 온도와 시간에 대한 곡선으로부터 섬광이 가해진 시간을 0라 할때 시편 후면에서 최대온도에 이르기까지 걸리는 시간 t_{max} 와 이 온도의 1/2까지 걸리는 시간 $t_{1/2}$ 을 산출하여 이 두값을 열확산 방정식에 대입하여 열확산계수를 구하는 방법이다. 또한 레이저 섬광법에서 시료의 분광흡수율과 레이저의 입사에너지를 정확하게 알 수 있다면 열확산계수를 이용하여 비열 및 열전도계수를 얻을 수 있게 된다.

레이저 섬광법은 고출력 펄스레이저의 개발에 따른 Nd:YAG, Nd:glass 및 루비레이저 등을 열원으로 이용한다면 1,500K 이상의 고온영역에서도 열물성측정이 가능하다. 이 방법의 특징은 단시간에 측정이 가능하고, 데이터 취득이 용이하며, 시편의 크기를 작게할 수 있고, 고온 및 저온에서도 측정이 가능할뿐만 아니라 전도성 재료와 비전도성 재료 모두 측정이 가능하다.

이와같이 레이저섬광법은 시료의 전면이 균일하게 가열된다는 가정 으로부터 열확산계수를 산출할 수 있지만, 반면 시료의 가열원으로 사용되는 레이저빔의 불균일한 에너지분포로 인하여 약 5% 정도의 오차가 유발될 수가 있다.⁽²⁾

이러한 문제점을 보완하기 위하여는 광섬유에 레이저 빔을 통과시켜 에너지분포를 균일화 하는 방법이 제시되고 있지만 광섬유의 입사단면과 출사단면의 레이저에 의한 소손발생 없이 재현성의 균일화정도를 높일 수 있는 방법이 절실히 요청고 있다.

더욱이 레이저 빔의 공간분포를 균일화하기 위하여 먼저 레이저빔의 공간분포를 측정하려는 시도가 있어야 한다. Baba T. 등⁽³⁾은 먼저 Dry Graphite 로 코팅된 스테인레스 Foil필름에 펄스레이저를 투사시켰을 때 필름전면에 흡수된 레이저가 열로 전환되며 이 필름후면에 대한 온도이력을 열방사적으로 탐지하여 펄스레이저 빔의 공간분포 측정가능성을 연구하였다. Sakate H. 등⁽⁴⁾은 위와 같은 방법으로 레이저용 광섬유와 Graded index optical fiber를 이용해서 할로겐 램프의 광을 광섬유에 통과시킬 때 입사각의 변화에 따라 분포가 크게 변화됨을 연구하였다. 이에 Hong J. H. 등⁽⁵⁾은 CCD 카

메라에 입사된 빔의 강도에 따라 나타나는 상(Image)을 이용하여 공간분포를 측정하였다. 이때 균일화정도를 높이고자 레이저용 광섬유에 레이저빔을 통과시켜 줄 때 광섬유에 입사되는 빔의 입사각이 커짐에 따라 입사면에서의 에너지 손실이 크고 균일화의 효과가 작아 실용화가 될 수 없을뿐만 아니라 Graded index optical fiber에 레이저 빔을 입사시켰을 때는 상당량 균일화가 이루어졌으나 광섬유의 경계면사이로 레이저빔이 통과되어 광섬유가 소손되기 때문에 역시 실용화 되지 못하였다. 또한 Baba T. 등⁽³⁾에 의해서도 광섬유에 1차원 국부굽힘을 주는 방법을 제시하여 레이저빔이 상당한 수준으로 균일화 될 수 있음을 확인하였으나 대칭형굽힘에 따른 굽힘효과가 상쇄되기 때문에 실용화 되지 못하여 고도의 균일화가 불가능 하였다.

반면 Hong J. 등⁽⁵⁾은 코어직경 1mm의 광섬유에 2중굽힘의 변형을 가함으로써 에너지손실이 적으면서 균일 분포상태를 얻을 수 있는 방법을 수행하였다.

본 연구에서는 위와같이 빔에 의한 불균일 가열오차를 줄이고 에너지손실이 적으면서 광섬유 소손 발생이 없고 재현성 및 균일화정도가 높은 균일빔을 얻는 연구결과로 균일빔과 불균일빔에 의한 측정위치별 가열오차 및 열확산계수를 측정하여 레이저섬광법의 균일화를 시도하는데 그 연구목적을 두었다.

2. 이론해석

2.1 열확산계수 계측이론

2.1.1 레이저 섬광법

레이저섬광법은 시편전면에 순간적 섬광을 투사시킨 후, 시료후면에 대한 온도이력을 측정할 온도-시간의 곡선으로부터 섬광이 가해진 시간을 0라 하고 시료후면에서 최대온도까지 걸리는 시간 t_{max} 와 최대온도의 1/2까지 걸리는 시간 $t_{1/2}$ 을 산출하여 이 값들을 열확산방정식에 대입하여 열확산계수를 구하는 방법이며, 기본적인 해석으로는 단열경계조건, 1차원 모델이다.

이때 다음과 같은 가정조건으로 단순화한 모델에 대하여 해석하였다.

① 레이저펄스의 시간폭은 무시할 수 있을 정도로 짧다.

② 레이저빔은 공간적으로 균일한 분포를 가지며 시료의 표면은 균일하게 가열된다.

③ 시료는 외계와 단열된 상태이다.

④ 시료는 균질하며 치밀하다.

⑤ 시료는 불투명성 재료이며 펄스레이저는 시료의 매우 얇은 표면층에서 에너지의 흡수가 이루어진다.

시료의 두께가 L 인 균질 무한슬랩이 시각 $t=0$ 에서 $T(x, 0)$ 의 온도분포를 하고, $t>0$ 에서 양면이 단열인 경우 시간 t 에 대한 온도분포 $T(x, t)$ 를 구하기 위한 열전도도배방정식과 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

지배방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 < x < L, \quad T > 0$$

초기조건

$$T = T(x, 0) \quad t = 0, \quad 0 < x < L$$

경계조건(단열조건)

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 & x=0, \quad t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 & x=L, \quad t > 0 \end{aligned}$$

위의 초기조건식을 고려할때 가열하기 이전의 시료의 전체온도가 T_0 로 균일하므로

$$\theta(x, t) = T(x, t) - T_0$$

라 하면, 지배방정식과 초기조건, 경계조건은 다음과 같다. 즉

$$T(x, t) = \theta(x, t) + T_0$$

이때, 열확산계수 α 는 다음식으로 얻어진다.

$$\alpha = \frac{1.37L^2}{\pi^2 t_{1/2}} = \frac{0.1388L^2}{t_{1/2}}$$

위로부터 열확산계수는 시편의 두께(L)를 알고 있을때 시료후면에 대한 최고상승온도의 1/2에 도달하는 시간 $t_{1/2}$ 을 측정하므로써 결정할 수 있다.

2.1.2 복사열손실 고려

위의 기본이론(반시간법)에서 이상적인 1차원모델에 대하여 열확산계수를 계산하였으나, 실제로는 1000 K 이상의 고온에서 복사열손실이 상당히 큰 오차를 유발하므로 이를 고려하여야 한다. 따라서

Cape와 Lehmann⁽⁶⁾은 복사열손실을 고려한 2차원 모델에 대한 열전도해석을 하였다.

온도를 T , 열생성율을 \dot{q} , 반경 a , 반경방향 좌표 r , 길이 l , 축방향좌표 x , 시간을 t 라 하면 비균질 경계조건을 가지는 시료전면에 순간적인 펄스 에너지로 가열되었을 때, 시료내부의 열류동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla^2 \delta(x, r, t) + \alpha^{-1} \delta(x, r, t) = k^{-1} q(x, r, t)$$

이때, 경계조건은 Stefan Boltzmann law를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta'_x(0, r, t) &= \nu_x \delta(0, r, t) \\ \delta'_x(l, r, t) &= \nu_x \delta(l, r, t) \\ \delta'_r(x, r_0, t) &= -\nu_r \delta(x, r_0, t) \\ \nu_{x,r} &= 4\sigma \epsilon_{x,r} T_0^3 k^{-1}, \quad \sigma = T - T_0 \end{aligned}$$

위 식들을 조합하면 $x=l$ 인 시료후면에서의 온도분포는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} (k/q_0) \delta(l, r, t) &= (2/r_0^2) \sum_{i=0}^{\infty} [z_i^2 / (Y_i^2 + z_i^2)] \\ &\quad \times [J_0(z_i r / r_0) / J_0^2(z_i)] \\ &\quad \cdot \bar{V}(z_i) \bar{F}(z_i, t) \end{aligned}$$

Baba⁽³⁾는 위식에서 축방향과 비교하여 반경방향의 복사열손실이 무시될 정도로 작다고 가정할 경우 다음과 같은 온도분포식을 제시하였다. 즉

$$T(t) = t_{\max} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp \left[- \left(\frac{X_n}{\pi} \right)^2 \left(\frac{t}{t_0} \right) \right]$$

위식에서 t 가 t_0 보다 대단히 클 때 합의 항에서 $m=0$ 인 첫항이 나머지 항들보다 훨씬 지배적 이므로 특성냉각시간 $\tau = t_0 / (X_0 / \pi)^2$ 에 따라 온도상승이 지수함수적으로 감소된다. 한편 τ 를 최소자승법(least-square method)으로 결정하면 t_0 는 Y 만의 함수가 된다. 온도상승부위의 곡선이 최적화된다면 t_0 가 결정되어지고 따라서 열확산계수를 구할 수 있다. 위식을 이용한 해석과정은 다음과 같다.

1단계 $t > 8t_0$ 의 냉각구간에서 $T(t) = T_M A_0 \exp(-t/\tau)$ 를 최적화 하여 τ 를 결정한다.

2단계 $t_0 = \tau^2 Y (1 - Y/12 + 7Y^2/288)^2 / \pi^2$ 가 되고,

3단계 실험데이터와 Cape & Lehmann에 의한 식과의 편차가 최소가 되도록 Y 를 결정한다.

4단계 $\alpha = l^2 / (\pi^2 t_0)$ 로부터 α 를 결정한다.

2.2 레이저빔 균일화이론

일반 레이저빔은 중심부에서 에너지밀도가 높고 불균일한 분포를 가지고 있으나 볼록렌즈로 집광시킨 후 광섬유 입구에 통과시키면 레이저빔이 굴절각도에 따라 다중모드로 반사되면서 광섬유가 약간의 구부러짐과 단면의 비대칭성 때문에 중심부를 지나서 나선형 빔으로 변형되어 광섬유의 출구단면에는 중심부의 에너지밀도가 높은 대칭분포를 갖게 된다. 따라서 이와같은 광섬유의 특성을 이용하여 레이저빔의 나선형 변화와 확산성을 높임으로서 레이저빔의 에너지분포를 균일화 하였다.

Fig. 1은 광섬유를 약간 굽혀주면은 레이저빔이 나선형으로 변화 하면서 중심부에 대한 에너지밀도를 변두리로 확산시키나가는 모양을 4개의 선이 진행되는 방향으로 간략화 한 것이다.

지금 광섬유의 입사측에 설치된 볼록렌즈를 통해서 집광되는 상하방향의 입사광선과 좌우방향의 입사광선의 진행과정을 광섬유 출구측의 단면에서 검토해 보면은 다음과 같다. 광섬유의 굽힘방향과 집광되는 상하방향의 입사광선은 굽힘에 따라서 진행방향만 바뀌었을 뿐이다. 광섬유의 굽힘방향과 90도의 각도를 가진 좌우방향의 입사광선은 최초에 광섬유의 중심을 통과한 후 굽힘 부분에서 반사방향이 바뀌어 나선형으로 변화하는 동시에 에너지밀도를 변두리로 확산시키게 된다. 이때 광섬유의 최초 굽힘방향과 다른 방향의 2차굽힘을 부가하면 상하방향의 입사광선도 2차굽힘에 의해서 나선형으로 변하게 된다.

원리는 커다란 직경을 가진 광섬유에 3차원굽힘을 부가할 경우 모든방향에서 입사되는 레이저빔은 나선형으로 변하게 되며, 광선다발로 이루어진 레이저빔은 중심부에서 높은 에너지밀도가 변두리로 확산되기때문에 대칭성 균일화가 촉진된다. 그러나 3차원 원형굽힘만에 의한 나선형 레이저빔은 완전한 파도형의 대칭분포를 갖게 되어 단면전체에 대

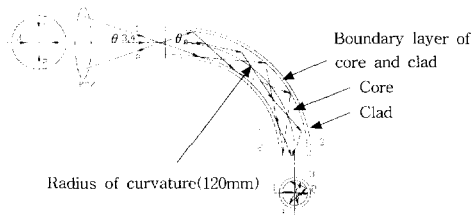


Fig. 1 Form of laser beam through beading step index optical fiber.

한 완전한 균일화는 얻어지지 않는다.

그러므로 본 연구에서는 광섬유에 3차원의 원형 굽힘을 정반대 방향으로 접선길이 2~5 cm, 곡률반경 6~7 cm의 역방향 국부굽힘이 중복적 부가되기에 더욱더 나선형의 진행을 촉진시키고 동시에 나선형 레이저빔이 국부굽힘의 위치로부터 난반사가 되도록 함으로서 파도형분포의 원인이 된 나선형광선의 원형집중을 제거하였다. 아울러 에너지분포가 불균일한 상태이기 때문에 일반 레이저빔을 효율적으로 균일화시키기 위하여 다음과 같은 광학적 설계를 하였다.

2.2.1 입사조건 및 렌즈의 설계

레이저빔의 입사손실을 최소화 하기 위하여 광섬유의 코어직경을 1 mm 보다 작은 0.6 mm으로 초점에서 집광할 수 있는 무수차 볼록렌즈를 사용하였다. 집광에 의한 초점부분에서 고에너지 밀도로 광섬유 단면이 손상되지 않도록 하기 위하여 레이저빔을 무수차볼록렌즈에 집광시킨 후 확산되기 시작하는 위치에 광섬유의 단면을 설치하였다.

또한 레이저빔이 광섬유에 입사될때 입사면으로부터 반사손실을 최소화하도록 하기 위하여 레이저빔을 수직으로 입사면에 입사시켰으며, 굽힘이 부가될 경우에도 코어와 클래드의 경계면에서 이상굴절에 따라 손실이 발생하지 않도록 입사광선의 최대 입사각을 허용입사각의 1/3 이하가 되도록 설계하였다. 이 허용입사각은 광섬유의 코어와 클래드의 굴절율을 고려한 것이다.

Fig. 2는 레이저빔이 광섬유에 입사되어 반사투과하는 과정을 나타내기 위한 것이다. 이때 레이저빔의 직경이 약 10 mm, 무수차볼록렌즈의 초점거리는 50 mm이다. 공기의 굴절율을 n_0 ($n_0 \approx 1$), 코어의 굴절율을 n_1 , 클래드의 굴절율을 n_2 라고 한다. 광섬유 단면에서의 허용입사각 θ_a , 광섬유 내의 임계굴절각 θ_c , 코어와 클래드의 경계면에서의 임계입사각 a_c 의 사이에는 다음의 관계가 성립한

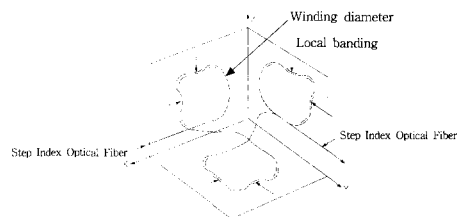


Fig. 2 Schematic diagram of 3D Uniformizer.

다.^(7,8)

$$\begin{aligned} \sin \theta_a / \sin \theta_c &= n_1 / n_0 = n_1 \\ \sin \theta_a &= n_1 \sin \theta_c \end{aligned} \quad (1)$$

또한,

$$\begin{aligned} \sin a_c &= \cos \theta_c = n_2 / n_1 \\ \cos^2 \theta_c &= 1 - \sin^2 \theta_c \end{aligned} \quad (2)$$

이므로

(1)식과 (2)식을 이용하여 허용입사각 (θ_a)은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \sin \theta_a &= n_1 (1 - \cos^2 \theta_c)^{1/2} \\ &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \end{aligned}$$

따라서

$$\theta_a = \sin^{-1} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

석영을 사용한 커다란 직경인 광섬유의 경우 일반적으로 코어 굴절율이 1.45, 클래드굴절율이 1.40인 점을 고려한다면, (3)식으로부터 허용입사각 θ_a 는 22°가 얻어진다. Fig. 3에 나타난 바와같이 레이저빔의 직경이 약 10 mm, 무수차볼록렌즈의 초점거리가 50 mm이므로 실제입사각은 $\theta_i = \tan^{-1} (5/50) = 5.7^\circ$ 가 되며, 허용입사각 (θ_a)의 26%로서 광섬유의 국부굴절에 의한 입사각의 변화를 충분히 고려하였다.

2.2.2 레이저빔 균일화를 위한 굽힘방법

광섬유로부터 단면전체에 걸쳐 균일한 레이저빔을 얻기 위해서는 레이저빔의 나선형 진행과 난반사의 축진이 필요하다. 나선형 진행은 단면중심부의 에너지를 번두리로 확산시키면서 원형의 점대칭분포를 만들게 되며, Fig. 3처럼 난반사의 축진은 레이저빔의 반사각을 확산시킴으로서 원형의 대칭분포를 평면 형태의 균일분포로 변화시켜 주고

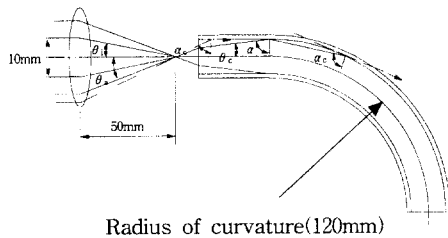


Fig. 3 Form of laser beam through step index optical fiber.

있다.

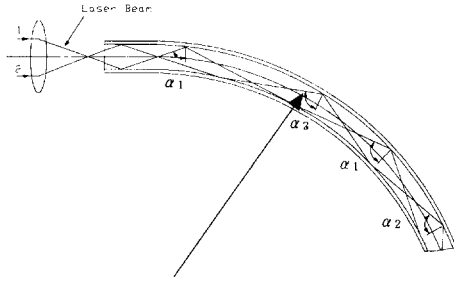
입사측 렌즈에 의해서 집광된 레이저빔은 광섬유에 입사된 후 Fig. 2에 나타난 것처럼 원형으로 굽혀진 X-Z면에 광섬유를 통과하면서 나선형 광선으로 변화된다. 이때 원형굽힘과 정반대 방향으로 굽어지는 곡률반경은 작은 국부굽힘을 부가하여 나선형 광선이 광섬유 단면의 중심부에서 가장자리로 확산되도록 한다. 동시에 곡률반경은 작은 국부굽힘면에서 난반사가 이루어져 광섬유를 통과하는 레이저빔의 광로를 다양화시키면서 광섬유의 전 단면에 걸쳐 무질서한 광로의 위치변경을 촉진시킴으로 레이저빔의 대칭화 및 균일화가 진행된다. 그러나 레이저빔의 광선중 광로가 광섬유의 굽힘방향과 일치하거나 비슷한 광선은 Fig. 3처럼 나선형의 변화는 별로 균일화가 진행되지 않는다. 따라서 Fig. 2의 X-Z면에 수직인 X-Y면에서 나선형 변화와 난반사에 의한 균일화를 촉진시킨 다음 Z-X면과 X-Y면 모두에 수직인 Y-Z면에서 최종적으로 나선형 변화와 균일화를 촉진시키면서 광섬유에 입사되는 모든 방향의 레이저광선이 나선형으로 변할 수 있도록 하였으며 3차원 국부굽힘을 각면에 2중으로 부가하여 광섬유의 전 단면에 걸쳐 균일한 에너지분포를 갖도록 하였다. 특히, 국부굽힘이 3차원 원형굽힘의 반대방향에 부가되므로서 원형굽힘과 국부굽힘에 의한 입사각의 변화가 서로 상쇄되어 코어와 클래드의 경계면에서 레이저광선의 입사각이 임계입사각 이하가 되는 것을 방지하였다.

2.2.3 임계입사각을 고려한 굽힘의 곡률반경

광섬유에 입사된 레이저광선은 원형굽힘과 국부굽힘에 의하여 코어와 클래드의 경계면에는 더욱 입사각이 작아지게 된다. 이러한 굽힘에 의해 코어와 클래드 경계면으로부터 레이저광선의 입사각이 임계입사각 이하가 되었을 경우 레이저광선은 클래드측으로 이상굴절을 일으키게 되어 에너지 손실은 물론 광섬유를 소손시키게 된다. 따라서 원형굽힘과 2중 국부굽힘의 곡률반경을 설계할 때는 임계입사각과 광섬유의 입사각, 원형굽힘에 의한 입사각의 변화, 국부굽힘에 의한 입사각의 변화를 고려해 주어야 한다.

한편 식 (2)식에 코어의 굴절계수 ($n_1=1.45$)와 클래드의 굴절계수 ($n_2=1.4$)를 대입하면 임계굴절각 θ_c 및 임계입사각 a_c 는 다음과 같이 구해진다.^(11,12)

$$\theta_c = \cos^{-1} (n_2/n_1) = 15.1^\circ$$



Radius of curvature(120mm)

Fig. 4 Form of laser beam through step index optical fiber.

$$a_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) = 74.9^\circ$$

즉, 광섬유내의 모든 위치에서 굴절각이 임계굴절각(15.1°)이하이면 코어와 클래드의 경계면에서의 입사각은 항상 임계입사각(74.9°) 이상이 되어 이상굴절이 나타나지 않게 된다.

Fig. 4와 같이 레이저광선을 원형 굽힘상태의 광섬유 내를 통과시킬 때 광섬유의 곡률반경은 같고 동일평면상에 있다고 가정한다면 광섬유의 길이방향 입사각은 변하지 않으므로 동일한 곡률반경을 가진 국부굽힘이 동일방향으로 반복될 경우에도 입사각은 감소하지 않지만($\alpha_1 \rightarrow \alpha_1, \alpha_2 \rightarrow \alpha_2$) 반면 굽힘방향이 다를 경우에는 나선형 진행이 촉진될 뿐이다. 따라서 3차원의 굽힘방향 변화를 주고 나선형변화를 촉진시켰으며 임계굴절각 및 임계입사각(a)에 대한 계산시 광섬유에 입사되는 입사각뿐만 아니라 최초의 원형굽힘에 의한 입사각의 감소, 최초의 국부굽힘에 의한 입사각의 감소, 역방향 2중 굽힘에 의한 입사각의 감소를 고려하였다.

광섬유에 입사되는 레이저광선의 가장 큰 입사각을 θ_i , 원형굽힘에 의한 입사각의 감소를 a_r , 원형 굽힘방향 국부굽힘에 의한 입사각의 감소를 a_b , 원형 굽힘의 반대방향의 2중 국부굽힘에 의한 입사각의 감소분을 a_d 라고 한다. 종합된 입사각 a_{t1} 를 다음의 조건내에 있도록 하였다.

$$a_{t1} = 90^\circ - (\theta_i/n_1 + a_r) > a_c \quad (4)$$

$$a_{t2} = 90^\circ - (\theta_i/n_1 + a_b) > a_c \quad (5)$$

$$a_{t3} = 90^\circ - (a_b + a_d) > a_c \quad (6)$$

(4)식은 입사각과 원형굽힘을, (5)식은 입사각과 국부굽힘을, (6)식은 원형굽힘방향 국부굽힘과 반대방향 이중 국부굽힘을 고려한 것이다. 이미 Fig.

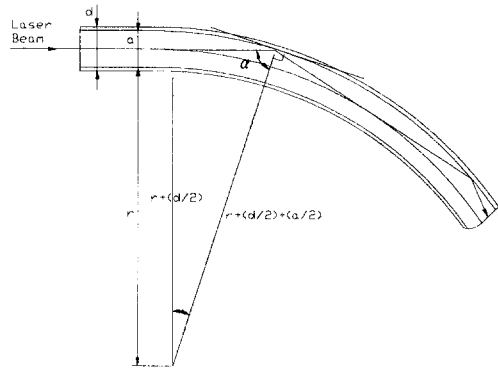


Fig. 5 Form of laser beam through step index optical fiber

3에 나타낸바와 같이 레이저빔의 직경이 약 10 mm, 무수차렌즈의 초점거리가 50 mm 이므로 실제의 입사각 θ_i 는 5.7°이다.

Fig. 5는 굽힘에 의한 입사각의 감소를 나타낸 것으로서 굽힘가이드 및 굽힘조정자의 곡률반경을 r , 광섬유의 직경을 d , 코어의 직경을 a 라 한다면 굽힘에 의한 입사각의 감소는 다음과 같이 된다.

$$a_r = \cos^{-1}[(r + d/2)/(r + d/2 + a/2)] \quad (7)$$

본 연구에서는 원형굽힘 가이드의 곡률반경을 120 mm, 원형굽힘방향 국부굽힘 가이드의 최소 곡률반경을 60 mm, 반대방향 국부굽힘 조정자의 최소곡률반경을 55 mm로 하였고, 광섬유의 직경은 2mm, 코어의 직경은 1 mm이므로, 이 값을 (7)식에 대입하면 굽힘에 의한 입사각의 감소는 각각 $a_r = 5.2^\circ, a_b = 7.3^\circ, a_d = 7.6^\circ$ 로 구해지므로 이 값을 (4), (5) 및 (6)식에 대입하면,

$$\begin{aligned} a_{t1} &= 90^\circ - (5.7^\circ/1.45 + 5.2^\circ) = 80.9^\circ > a_c \\ a_{t2} &= 90^\circ - (5.7^\circ/1.45 + 7.3^\circ) = 78.8^\circ > a_c \\ a_{t3} &= 90^\circ - (7.3^\circ/7.6^\circ) = 75.1^\circ > a_c \end{aligned} \quad (8)$$

로서 모두 임계입사각 $a_r = 74.9^\circ$ 이상이다. 특히, a_{t3} 는 원형굽힘방향과 반대방향의 역방향 이중 국부굽힘이므로 서로 상쇄되어 대부분 최대입사각이 a_{t2} 이하이지만 안전성을 고려하여 a_{t3} 을 검토하였다. 따라서 광섬유 코어의 직경을 a , 레이저빔의 확산각도를 ϕ , 무수차렌즈의 유효직경을 h , 초점거리를 f , 광섬유의 출사단면에서 렌즈까지의 거리를 b , 렌즈로부터 필요로 하는 조사위치까지의 거리를 L , 필요로 하는 조사면의 크기를 D 라

한다면 다음의 관계가 성립한다.

$$1/L + 1/b = 1/f, \quad D/a = L/b$$

따라서

$$D = a \times L/b = (L/f - 1) a \quad (9)$$

한편 레이저빔은 무수차렌즈의 유효직경 이내를 통과하여야 하므로 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$a + b\psi \leq h \quad (10)$$

3. 균일화장치 구성 및 실험

본 실험에서의 3차원 균일화장치는 광섬유를 다차원 원형굽힘과 동시에 반대방향에 굴부굽힘을 부가시켜준다. 이때 코어와 클래드의 경계면에서 입사각을 임계입사각 이상이 되도록 함으로서 클래드를 통한 레이저에너지의 손실을 방지하며, 난반사에 의한 레이저 빔의 확산을 촉진시켜 광섬유의 끝단에서 전단면에 걸쳐 균일한 에너지 분포를 갖는 레이저 빔을 얻도록 하였다. 균일화 실험장치는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 펄스레이저(Nd:YAG Laser), CCD카메라, 화상처리 프로그램, 대구경 광섬유, 무수차집광렌즈 및 동기신호발생기 등으로 구성된다. 동기신호발생기의 신호가 레이저와 CCD카메라로 보내지면 레이저가 발사됨과 동시에 카메라가 레이저빔을 측정하게 되고 측정된 레이저빔은 화상처리 프로그램에 의해서 에너지 강도에 따라 가상의 색으로 변환된 후 PC의 모니터에 출력된다. Nd:YAG 레이저의 직사빔과 광섬유에 굽힘변형을 주며 균일화된 빔을 측정하여 두 빔의 에너지분포를 비교 검토하였다. 시험에 사용된 레이저의 에너지는 2J, 파장은 1.064 μ m이며 레이저빔의 조사시간은 0.1ms이었다.

4. 결과 및 검토

4.1 레이저 빔이 불균일 및 균일화일때의 빔 측정결과

본 연구에서 개발한 균일화장치에 레이저 빔을 투과 후 Fig. 6의 레이저 빔 측정장치를 통한 에너지분포를 측정한 결과를 2차원 및 3차원으로 가시화하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 (a)는 Nd:YAG 레이저의 직사빔으로서 위치에 따라 에너지강도의 차이가 많이 발생하는

불균일한 에너지분포를 보여주고 있는 반면 (b)는 균일빔으로서 에너지강도가 높은 영역이 동심원 중 95% 이상의 면적을 차지하고 있고, 동심원의 외곽 테두리가 선명하며 폭이 전체면적의 5% 정도에 지나지 않는 매우 균일한 에너지 분포를 나타내고 있다.

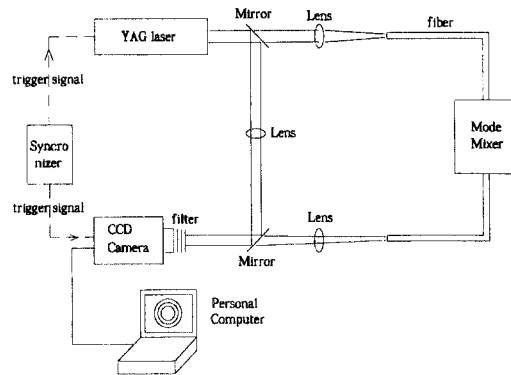


Fig. 6 Experimental setup for mode-mixing device (3D Uniformizer) of laser beam.

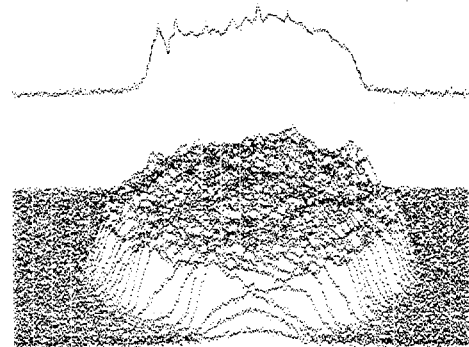


Fig. 7(a) Direct laser beam profile.

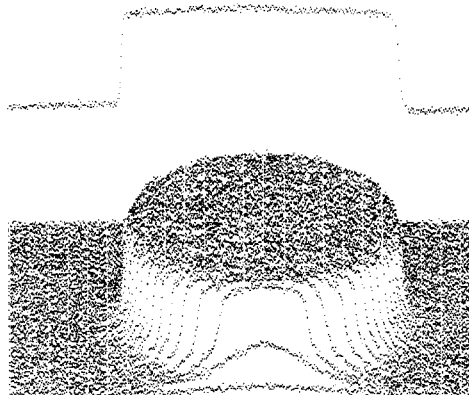


Fig. 7(b) Uniformized laser beam profile.

광섬유를 이용한 레이저 빔 균일화의 난제인 에너지손실을 검토한 결과 광섬유의 입구에 조사되는 에너지의 85% 이상이 투과되어 출구측에서 얻어지며 이는 기 연구결과인⁽⁵⁾ 79% 투과율보다 향상되어 레이저빔을 수직으로 광섬유 입사면에 조사시킨 것이 주효했음을 알 수 있다. 또한 투과된 에너지의 95% 이상이 높은 에너지영역에서 5%의 편차를 갖는 에너지장도 감소폭이 매우 적은 이상적인 균일빔을 얻을 수 있었다.

4.2 측정위치별 가열오차

불균일한 레이저빔 및 균일 레이저빔에 의한 열확산계수측정 실험장치는 Fig. 8과 같이 구성되며 Nd:YAG레이저, 시료지지부, 진공 및 온도조절부, 데이터해석부 등으로 구성된다.

레이저는 2.2절에서 기술한 것과 동일하고, 시료지지부는 시료와의 접촉열손실을 방지하고자 히터와 동일재질의 Graphite로 제작하여 원형 시료지지대 안쪽 및 바닥면이 시료와 점접촉이 되도록 하여 히터내에 장착하게 된다.

열확산계수를 측정할때 대류에 의한 열손실 및 대기중의 산소에 의한 산화를 방지할 수 있도록 진공으로 유지해야 하기때문에 실험에 사용된 진공부는 진공조, 로타리펌프 및 확산펌프로 구성하였으며 최대 10^{-6} torr까지 진공시킬수 있도록 설계되었다. 또한 고온에서 시료지지대에 따른 시료의 위치이동을 방지하기 위하여 진공조, 히터 및 시료지지대는 수직형으로 제작하였다. 진공조내에 설치되는 히터는 Graphite 히터로 DC 50V, 700A의 직류전원 공급장치로부터 전원을 공급 하면서 2,000K이상 측정이 가능한 W-Re 열전대를 통해서 온도를 측정토록 하였다. 이때 온도조절은 조절스위치를

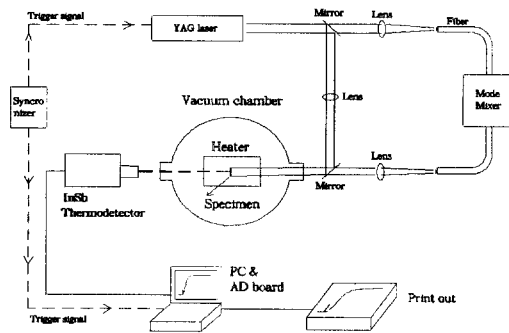


Fig. 8 Experimental setup for laser-flash thermal diffusivity measurement.

이용한 수동식과 PID제어에 의한 자동조절방식으로 구성하였으며 온도측정용 W-Re 열전대는 시료 온도를 정확하게 측정할 수 있도록 하기위하여 시료지지대를 통해 시료측면과 약 1 mm 떨어지도록 위치에 장착하였다.

한편 불균일 가열오차를 고찰하기 위하여 적외선 방사온도계의 측정위치를 시료후면의 중심부(0 mm)에서 1 mm씩 수평방향으로 이동시켰다. 이때 미국 NBS의 표준시료인 POCO-AXM-5Q1에 대한 온도상승 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림 (a)에서와 같이 직사빔을 사용했을 경우, 레이저빔의 에너지밀도가 중앙에서 가장 높기때문에 에너지 밀도가 낮은 주위로 열확산이 빨리 일어나며 약 100 ms이후에는 시료의 온도가 급격히 떨어지는 형태를 보이고 있다. 또한 그림 (b)에서는 균일화된 빔을 사용할 경우 에너지 밀도가 거의 같으므로 시료후면의 어느 위치에서 측정하더라도 열확산계수의 편차가 크지 않음을 알 수 있다.

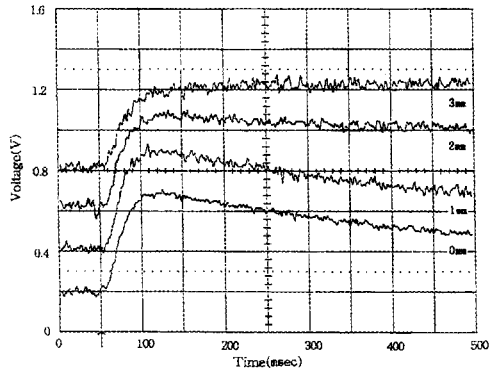


Fig. 9 (a) Raw data to be with measured position of direct beam.

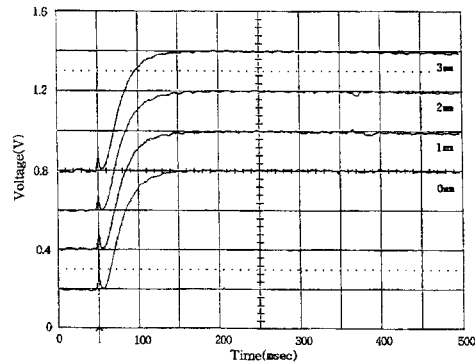


Fig. 9 (b) Raw data to be with measured position of uniformized beam.

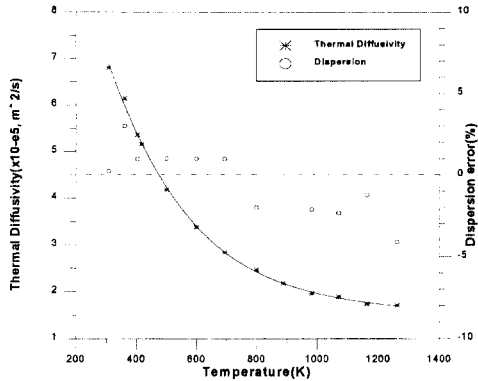


Fig. 10 (a) Thermal diffusivity and its dispersion error measured by direct beam.

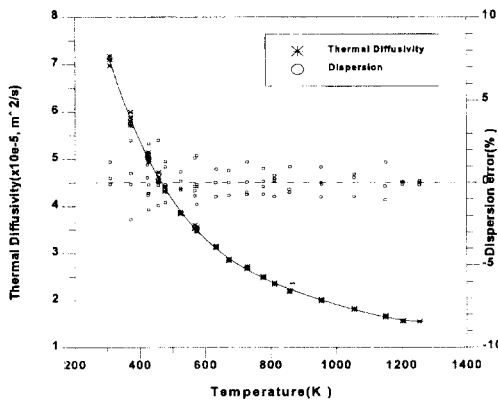


Fig. 10 (b) Thermal diffusivity and its dispersion error measured by unformalized beam.

4.3 열확산계수

균일화된 레이저빔과 불균일 레이저빔에 의한 열확산계수 측정효과를 고찰하고자 NBS의 표준시료인 POCO-AXM-5Q1에 대하여 복사열손실을 고려한 Cape와 Lehmann⁽⁶⁾의 식을 이용하여 측정된 온도별 열확산계수 및 측정결과 분산도를 Fig. 10 (a), (b)에 나타내었다. 이때 측정온도는 상온에서부터 1,300K까지이며, 측정결과를 보면 불균일 레이저 빔을 사용하여 측정시 측정분산도는 상온에서 약 3%, 고온에서는 5%의 분산도를 보이고 있으나 균일화 빔을 사용할 때 측정분산도는 상온에서는 약 2.5%, 고온에서는 2%를 보이고 있어 측정값의 재현성이 향상되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

레이저섬광법에 의한 열확산계수 측정시 불균일

빔에 의한 오차요인을 감소시키고자 3차원 균일화장치를 구성하여 레이저빔 균일화를 연구하고 검토하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다. 즉

(1) 초기 레이저빔의 공간분포를 확인한 결과, 매우 불균일한 에너지 분포를 보였으나, 본 연구에서 개발한 균일화장치를 이용하므로 불균일한 레이저빔을 광섬유에 통과시켰을 때 광섬유에는 만곡굽힘과 국부굽힘변형을 동시에 가해져서 광섬유의 입구에 조사된 투과된 에너지의 85% 이상이 출구쪽에서 얻어지며, 또한 투과된 에너지의 95% 이상은 높은 에너지영역에서 약 5%의 편차를 갖는 에너지강도 감소폭이 매우적은 이상적인 균일빔을 얻었다.

(2) 균일화된 레이저 빔을 이용한 결과, 시료전면에 가열이 균일하게되므로써 측정위치에 따른 열확산계수의 오차를 감소시키는데 효과적임을 알았다.

(3) 균일화된 레이저빔으로 미국 NBS 표준시료인 POCO-AXM-5Q1에 대한 온도별 열확산계수를 측정된 결과 불균일빔을 사용하였을때보다 향상된 2~2.5%의 분산도를 얻을 수 있다.

또한 시료에 입사되는 레이저 빔을 균일화하므로써 열확산계수의 측정정도가 향상될뿐만 아니라 입사에너지에 대한 정밀측정이 가능하므로 고난도의 평가기술개발에 필요한 레이저섬광법에 의한 비열 및 열전도계수 측정의 향상 가능성을 본 연구를 통하여 제시하고자 한다.

참고문헌

- (1) Parker, W. J., Jenkins, C. P., Butter, C. P. and Abbott, G. L., 1961, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity," *J. Appl. Phys.*, 32, pp. 1679~1684.
- (2) Arai, T., Baba, T. and Ono, A., 1987, "Thermographic Investigation of Laser Flash Diffusivity Measurement," *High-Temp. High-Press.*, 19, pp. 269~273.
- (3) Arai, T., Baba, T. and Ono, A., 1986, "Laser Beam Profile Measurement by a Thermographic Technique," *10th European Conf. on Thermophy. Properties*, pp. 386~389.
- (4) Sakate, H., Sakuma, F. and Ono, A., 1987, "Measurement of Output Angular Intensity Dis-

- tribution of Light Passing Through a Lightguide for Application to Radiation Thermometry," *13th Remote Sensing Sym.*, pp. 127~128.
- (5) Hong, J. H., Baba, T. and Ono, A., 1989, "Application of Optical Fibers to the Improvement of Laser Beam Profile for Laser Flash Thermal Diffusivity Measurements," *2nd Asian Thermophysical Properties Conf.*, pp. 127~132.
- (6) J. A. Cape and G. W. Lehman, 1963, "Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity," *J. of Appl. Phys.* 34.
- (7) Henry Z. and Cynthia Z., 1991, *Fiber Optics, Communication and Other Applications*, Maxwell Macmillan International Editions.
- (8) Pierre-A. B langer, 1993, *Optical Fiber Theory*, World Scientific