연 구 논 문

레이저 섬광법을 이용한 열확산계수 측정시 오차요인별 분석연구

이 원 식* · 박 상 흡**

*기술표준원 자동화부품과
**천안공업대학 디지털용접과

A Study on the Error Sources for Thermal Diffusivity Measurement by the Laser Flash Method

Won-Sik Lee* and Sang-Heup Park**

*Agency for Technology and Standards, Kwachon-city 427-716, Korea
**Cheonan National Technical College, Cheonan-city 330-717, Korea

Abstract

Laser flash method have been widely used for practical measuring method of thermal diffusivity. And it can be used for measurement of non-conductive materials as well as conductive materials and also for measuring thermal multi-properties. We have analyzed effects of error occurring during measurement of thermal properties in order to enhance measuring accuracy.

Also we have studied delay time between measurement starting time with synchronizing signal and laser oscillating time, because it is important that measuring a time to rise temperature of specimen from room temperature to a half of measuring temperature at measuring a thermal diffusivity by laser flash method.

We could reduce non-uniform heating error from non-uniform energy distribution by developing 3D uniformizer to eliminate non-uniform heating error.

We have measured thermal diffusivities of POCO AXM-5Q1 and Glassy-Carbon which are standard specimen of NIST(USA) and candidate standard specimen of NRLM(japan) respectively for laser flash method. Maximum error fell within 2% for POCO AXM-5Q1 graphite and 2% for Glassy-Carbon. Those results showed error decreasing methods were effective.

(Received June 25, 2002)

Key Words : Thermal diffusivity, Laser flash method, Thermal property, Thermal multi-properties

1. 서 론

산업사회의 발달과 함께 열적 특성이 우수한 기능성 신소재들이 개발되고 있으며 이들 신소재들에 대한 정확한 물성측정의 필요성이 증대되고 있다. 재료의 열적 특성을 나타내는 중요한 열물성으로는 열확산계수, 열전도계수, 비열, 방사율 등이 있으며 이러한 열물성의 값은 철강산업, 열처리산업, 에너지산업, 전자산업, 원자력산업, 항공우주산업, 신소재산업, 건축산업 및 지구과학분야 등 기초산업에서 첨단산업에 이르기까지 광범위하게 필요로 하는 중요한 기본 물성들이다.

특히, 최근에는 첨단산업의 발달과 함께 파인세라믹, 탄소복합재료, 금속복합재료 등 열적 특성이 우수한 신소재 개발과 질화알루미늄, 다이아몬드 박막 등 특수 기능성 재료의 개발이 활발하게 진행됨에 따라 신소재의 평가기술에 대한 요구가 날로 증가되고 있다.

레이저 섬광법은 1961년 Parker[1]가 반시간법을 제시한 이래 레이저 기술의 발달과 더불어 급속히 보급되어 왔다. 이 방법은 1차원 비정상 상태의 열전도 방정식을 이용하여 신속하고 간단하게 측정값을 얻을 수 있는 열확산계수와 열전도계수 및 열용량을 측정하는 방

법으로서 장점으로는 단시간에 측정이 가능하고 데이터 취득이 용이하며 시편의 크기를 작게할 수 있으며 고온 및 저온에서도 측정이 가능할 뿐 아니라 전도성과 비전도성의 측정이 가능하다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 순간 열원으로 사용되는 고에너지 펄스레이저의 단면 에너지 분포 불균일 오차, 레이저 조사시간 지연에 따른 지연오차를 확인, 개선함으로서 측정 정밀도 향상을 기하고자 한다.

2. 오차요인별 분석

2.1 레이저 조사시간 지연 오차

레이저 섬광법에 사용되는 Nd:YAG laser 등 펄스레이저는 레이저발진 제어장치에서 사용하고자 하는 펄스폭 및 조사에너지 조건을 설정, 이에 적합한 조사에너지가 충전되고 신호발생기에서 레이저조사를 위한 동기신호를 발생시켜 레이저발진 제어장치에 송신함으로서 동기신호의 입력과 동시에 레이저가 조사되게 된다.

이와같이 동기신호의 발진으로부터 레이저 빔이 조사되어 시료 표면에 흡수되기 시작하기까지 전기적 신호 전달의 지연시간을 고려하지 않고 동기신호 발진 시간을 시료이면의 에너지 흡수 시점으로 하여 열확산계수를 산출할 경우 열확산 계수가 큰 재료나 시료의 두께가 충분히 두껍지 못한 경우에는 시간지연에 따른 측정 오차가 커지기 때문에 열확산계수의 정밀 측정을 위하여 이의 고려가 필요함이 제기된바 있다[2].

2.2 레이저 빔의 불균일 분포에 의한 오차

레이저 섬광법에서는 시료의 전면에 조사되는 빔의 단면 에너지 분포가 균일하여 시료표면에 균일하게 가열된다는 가정하에서 열확산계수를 산출하고 있으나 통상 펄스 레이저는 다중모드에서 발진되기 때문에 단면 에너지분포가 불균일하게 되며, 이러한 상태에 따라 측정점의 온도 및 주변 온도가 불균일하게 측정되고, 시료이면의 온도 이력곡선은 이론곡선과 편차를 갖게되어 열확산계수 측정값에 오차를 발생하게 한다.

이와같이 불균일한 레이저 빔의 에너지 분포상태에 따른 오차에 대하여 일본 계량연구소 (NRLM)의 Baba 등[3]은 Nd:Glass 레이저의 레이저 빔 분포특성을 광학적으로 측정하고 불균일한 레이저 빔을 조사시킬 경우 적외선 방사계의 온도측정점의 위치에 따라 발생하는 열확산계수의 상대편차를 발표한 바 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 레이저 조사시간 지연 측정

레이저 발진시간의 지연 특성을 측정하기 위하여 실험장치는 Fig. 1과 같이 구축하였으며 실험장치에 사용된 Nd:YAG 레이저 및 광센서의 사양은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

Fig. 1에서 동기신호가 Nd:YAG 레이저에 가해지면 약간의 지연시간 후 레이저는 발진되고 레이저 헤드부 앞에 놓인 반투과 반사경 및 광섬유를 통과하여 시료에 조사되게 된다. 이때 반투과 반사경에서 반사된 빔은 고속 Si 광센서에서 감지되어 오실로스코프에 출력신호를 보내게 된다.

이러한 일련의 작동시 동기신호, 적외선 방사계 및 고속 Si 센서의 출력을 고속 디지털 오실로 스코프에서 취합하면 동기신호로부터 레이저 조사까지의 지연시간을 구할 수 있게 된다.

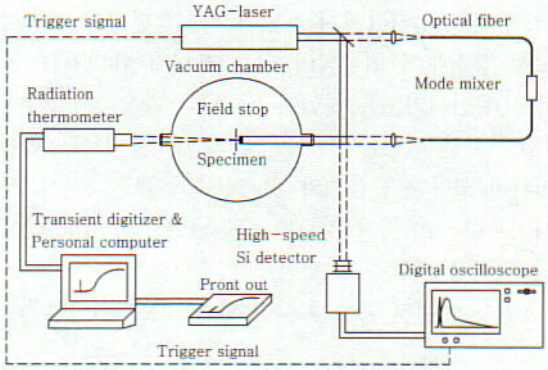

Fig. 1 Measuring sys. of laser pulse delay time

Table 1 Spec. of Nd:YAG laser

Manufacture	Physics instrumentation center
Wavelength	1,064nm
Max. energy	0.1 ms, 9 J ~ 0.6 ms, 19 J
Beam diameter	〈10 mm
Pulse width	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ms

Table 2 Spec. of high-speed Si photodiode

Manufacture	Melles griot
Spectral range	350~1,100 nm
Detector diameter	0.23 mm
Rise time(ns)	Max. 1.0 ns

3.2 레이저 빔의 에너지 분포 균일화

일반적으로 상용화하여 판매되고 있는 레이저는 다중모드로 발진되기 때문에 레이저 빔의 분포가 불균일하며 이러한 에너지분포를 갖는 레이저 빔을 열확산계수 측정용으로 사용할 경우 시료의 불균일 가열에 의해 오차가 발생하게 된다[4].

본 연구에서는 불균일 가열에 의한 측정오차를 줄이기 위해 레이저 빔을 무수차 집광렌즈로 집광시킨 후 3차원 이중굽힘을 갖는 스텝인덱스 광섬유에 투과하여 균일한 레이저 빔을 얻고자 다음을 검토, 적용하였다.

(1) 레이저빔이 광섬유에 입사될 때의 입사손실을 최소화하기 위하여 집광된 레이저빔을 광섬유의 입사면에 수직으로 입사시켰으며, 레이저빔을 무수차 렌즈에 통과시켜 초점의 크기를 최소화시킨후 초점의 직후단에 광섬유의 단면을 설치하여 레이저 빔의 입사시 광섬유 단면의 소손을 방지하였다.

(2) 광섬유를 3차원의 원형으로 굽히게하여 종래의 1차원 대칭굽힘에 의한 감쇄영향을 제거함과 동시에 레이저 광선의 입사각에 관계없이 나선형진행을 촉진시킴으로서 중심부에 집중되어 있는 레이저 에너지를 단면전체로 확산시키도록 하였다.

(3) 3차원 원형굽힘과 동시에 반대방향의 국부굽힘을 부가하여 코어와 클래드의 경계면에서의 입사각이 임계입사각보다 작아지지 않으면서도 난반사에 의한 레이저 빔의 확산을 촉진시켜 광섬유의 끝단에서 전단면에 걸쳐 균일한 에너지 분포를 갖는 빔을 얻도록 하였다.

3.2.1 레이저 빔의 균일화 장치

Fig. 2는 단면 에너지분포가 균일한 레이저 빔을 얻기 위한 3차원 2중 굽힘장치로서 스텝 인덱스 광섬유에 레이저광선의 나선형진행을 위한 3차원의 원형굽힘을 주기 위하여 굽힘가이드 1, 굽힘가이드 2 및 굽힘가이드 3을 3차원으로 설치하였으며, 레이저 광선의 나선형 진행 및 난반사의 촉진을 위하여 굽힘 가이드에는 원형굽힘과 반대방향의 국부굽힘을 부가 하기 위한 국부굽힘부를 설치하였다. 광섬유의 국부굽힘 곡률 반경은 굽힘가이드와 국부굽힘 조정자의 사이에 감겨있는 마이크로미터를 이용하여 국부굽힘 조정자를 이동시켜 조정하게 된다.

무수차 볼록렌즈에 의하여 집광된 레이저 빔은 광섬유에 입사되어 굽힘가이드 1의 주위를 통과하는 동안 원형굽힘과 국부굽힘에 의하여 나선형과 난반사가 진행되며, 굽힘가이드 1과 직각으로 설치된 굽힘가이드 2와 굽힘가이드 3의 주위를 통과하는 동안 모든 방향에서 입사된 레이저 빔에 나선형 진행과 난반사가 동시에 일어나게 되어 광섬유의 출사단면에서는 전체적으로 균일한 레이저 빔이 얻어지게 된다.

3.2.2 레이저 빔의 에너지 분포 측정장치

Fig. 3은 레이저 빔의 단면에너지 분포상태를 측정하기 위한 장치의 구성도로 동기 신호발생기에서 레이저 헤드와 CCD 카메라에 동기신호를 보내면 동시에 레이저 헤드로부터의 레이저 빔의 발사와 CCD 카메라의 순간촬영이 동시에 이루어지게 된다. 레이저 헤드에서 출사된 레이저 빔은 반투과 반사경에서 두개의 레이저 빔으로 분리되며 분리된 한개의 레이저 빔은 균일화되지 않은 상태로 무수차 볼록렌즈에 의하여 빔의 크기가 조정되고 필터에 의하여 투과휘도가 조정된 후 CCD 카메라에 조사된다. CCD 카메라에 의하여 촬영된 레이저빔의 분포상태는 퍼스널컴퓨터에 의하여 분포상태가 영상화되고 데이타가 분석된다.

이때 CCD 카메라에 의한 영상촬영은 불균일 레이저 빔과 균일화 레이저빔을 동시에 측정할 수 있도록 2대의 CCD 카메라를 사용하거나 1대의 CCD 카메라를 이용하여 교대로 촬영한다.

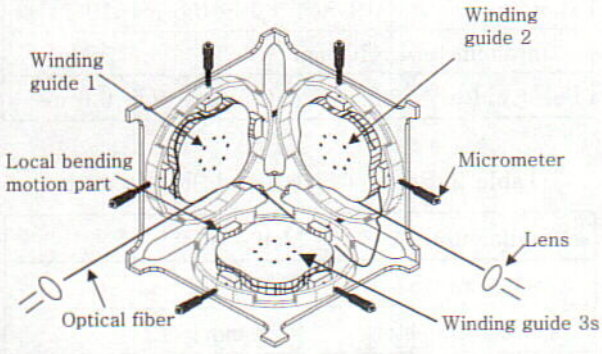

Fig. 2 Schematic diagram of 3D uniformizer

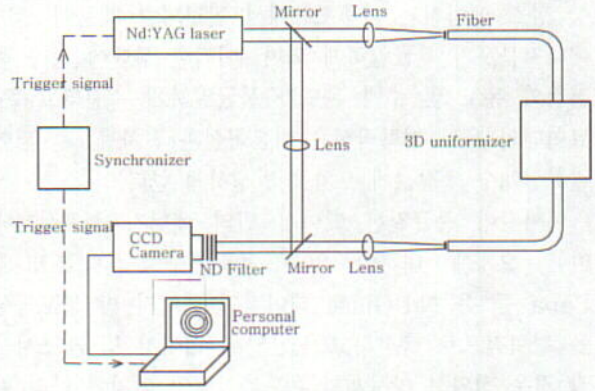

Fig. 3 Measuring sys. of laser beam uniformity

3.3 적외선 방사계

레이저 섬광법용 적외선 방사계의 필요조건으로는 측정속도가 빠르고 분해능이 좋아야하며, 출력이 안정되어야 한다. 범용 적외선 온도측정장치의 적용가능성을 확인하기 위하여 MCT(8~12㎛) 적외선 열화상 처리장치를 고려하였으나, 측정점을 쉽게 포착할 수 있고 사용이 간편한 반면, 분해능이 낮고, 측정속도가 30 frame · sec^{-1} 로 느리며, 데이터 분석방법을 측정목적에 따라 다양하게 구사할 수 없는 등의 문제점이 발견되었다.

또한 비접촉 온도계측기로 산업현장에 많이 보급되고 있는 적외선 온도계의 경우에는 측정 가능 범위가 구분되어 있으며, 대부분 주변방사의 영향을 고려하기 위하여 기기 내부에 초퍼(chopper)를 사용하고 있어 신호의 S/N비가 낮고 측정점이 큰 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 측정 온도범위가 실온부터 1,500K 정도이므로 사용이 비교적 간편한 InSb 센서를 선택하였다. InSb센서는 액체질소로 냉각 함으로써 2~5㎛ 범위에서 가장 높은 감도를 얻을 수 있는 양자형 단결정 적외센서로서 미국, 일본 등 선진국에서 이미 군용 및 특수목적용으로 개발되어 판매되고 있으며 본 연구에서는 일본 제품을 구입, 광학계를 구성하였다. 적외선 방사계의 개략적인 사양은 Table 3과 같다.

Table 3 Spec. of IR radiation thermometer

Wave length	2~5 ㎛
Photo detector	InSb(ϕ0.6 mm)
Lens	Ge f=15.2 mm, ϕ5.1 mm
Lens movement range	180~220 mm
Focusing range	471.43~900 mm
Target size	1.286~3 mm
IR filter	Sapphire
Cooling type	LN_2(77 K)

3.4 측정시스템

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 열확산계수 측정 시스템의 개략도이다. 신호에 의해 레이저가 발진하고 빔은 광섬유 및 3차원 균일화장치를 통과, 에너지 분포가 균일화되면서 시료에 순간 조사되고, InSb 적외선 방사계에서는 시료의 온도 변화를 검출, 적외선 센서의 비선형성을 보정한 온도로 환산된 상승온도 곡선으로부터 열확산계수를 구하게 된다.

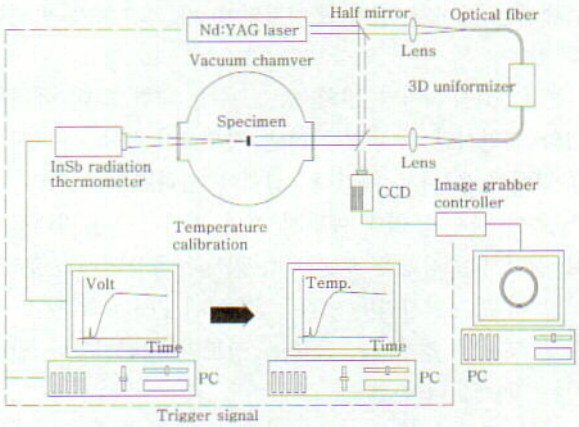

Fig. 4 Final experimental setup for IR calibration & laser-flash thermal diffusivity measurement

4. 실험결과 및 고찰

4.1 레이저 조사시간 지연오차 고려

레이저 섬광법에 의한 열확산계수 측정시 시료 표면에 대한 레이저 빔의 흡수시점을 선정하는 방법으로는 레이저 발진용 동기신호의 발신점을 선택하는 방법과 조사된 레이저 빔의 최대 에너지 밀도점을 선택하는 방법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 동기신호의 발신으로부터 레이저 빔의 최대 에너지 밀도점까지의 지연시간 특성을 고려한 평균 에너지 점과 최대 에너지점의 시간차 특성을 측정 · 분석하고 열확산계수 측정에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 5는 펄스 폭 400㎲로 조사한 레이저 빔의 에너지파형을 측정한 것으로 동기신호의 발신점 (A)로부터 196㎲ 지연된 위치 (B)에서 최고 에너지 밀도를 가지며, 총 조사 에너지의 중심점 (C)는 최고 에너지 밀도점으로부터 56㎲ 지연되었다. 이와 같이 동기신호의 발신점을 레이저 빔의 흡수 시점으로 하는 종래의 측정방

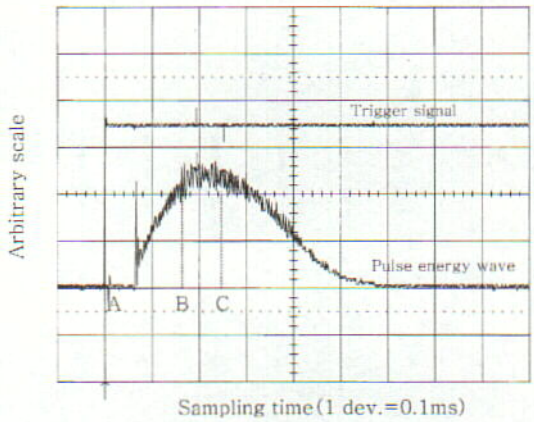

Fig. 5 Pulse energy wave of laser beam

법에서는 레이저 빔의 조사지연에 따른 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6는 레이저 빔의 펄스 폭에 대한 최대 에너지 점의 지연시간 특성을 나타낸 것으로서 펄스 에너지는 0.8J에서 3J까지 하였다. 실험에 의하면 레이저의 펄스 폭이 클수록 최대 에너지 점의 지연시간이 비례적으로 길어지는 경향을 보였으며 펄스의 폭을 100㎲로 조사할 경우 지연시간이 90㎲ 정도이며 600㎲의 펄스 폭으로 조사할 경우에는 350㎲ 정도의 시간지연이 발생되는 것으로 나타났다.

또한 레이저 빔의 흡수시점에 대하여 보다 합리적인 방법으로서 제안되고 있는 레이저의 총 에너지 중심점에 대하여 지연시간을 검토한 결과, Fig. 7과 같이 나타나고 있다.

Fig. 7에서 펄스 폭에 따른 평균 지연시간의 변화 특성을 보면 펄스의 폭이 짧을수록 지연시간이 크게 발생함으로 펄스 폭을 짧게 할 경우에는 총 에너지의 중심점을 측정하여 흡수점으로 하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

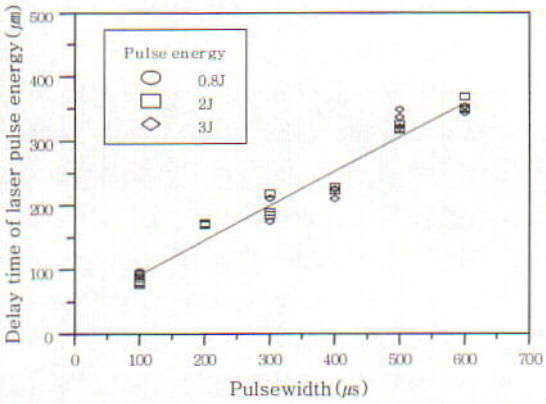

Fig. 6 Delay time of pulsewidth and energy

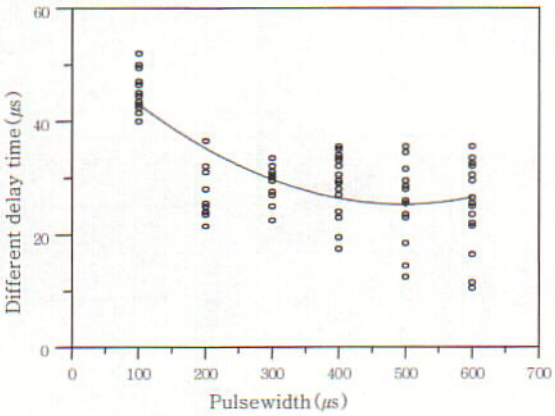

Fig. 7 Differential delay time of peak and integral energy

측정온도에 따른 레이저의 조사시간 지연효과를 검토하기 위하여 레이저의 펄스 폭을 500㎲로 하고 측정온도에 따른 레이저의 조사시간 지연효과를 검토하기 위하여 레이저의 펄스 폭을 500㎲로 하고 상온에서 1,300K까지의 온도범위에 대하여 두께 1.05mm 의 POCO AXM-5Q1 및 두께 1.13mm Glassy-carbon의 열확산계수를 측정하였을 때, 지연 시간 보정하기 전·후의 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 비교하였다. 레이저의 조사시간 지연에 의한 열확산 계수의 편차는 측정온도가 높을수록 감소하여, 상온 에서 편차가 크게 보임을 알 수 있다. 이것은 레이저의 조사시간의 지연이 일정한 반면, 측정재료의 열확산계수는 온도가 높을수록 작게되는 특성을 가지고 있기 때문에 고온일수록 영향이 작아지게 되기 때문으로 판단된다.

실제로 측정된 결과를 보면 POCO AXM-5Q1의 경우 상온에서 약 6% 정도의 편차를 발생시키고 있으며, Glassy-carbon의 경우에도 약 2.5% 내외의 편차를 나타내고 있어 열확산계수의 정밀측정을 위해서는 레이

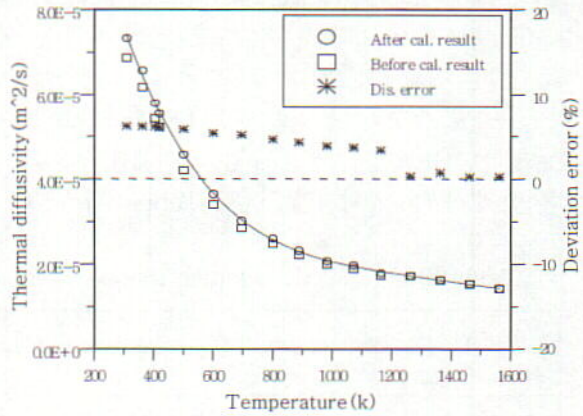

Fig. 8 Thermal diffusivity deviation caused by the delay time at 0.5ms pulsewidth (POCO AXM-5Q1, t=1.05mm)

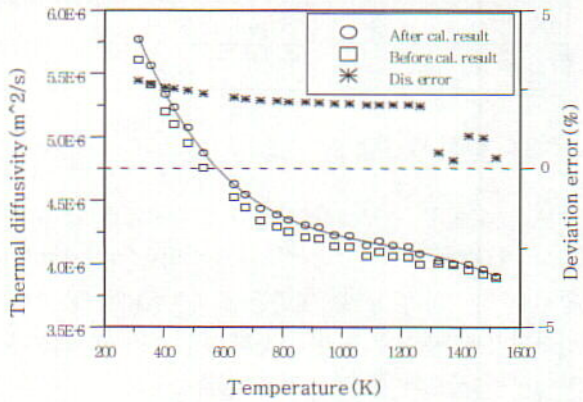

Fig. 9 Thermal diffusivity deviation caused by the delay time at 0.5ms pulsewidth (Glassy carbon, t=1.13mm)

저 빔의 조사시간 지연특성에 대한 보정이 필요함을 알 수 있었다.

실제로 측정된 결과를 보면 POCO AXM-5Q1의 경우 상온에서 약 6% 정도의 편차를 발생시키고 있으며, Glassy-carbon의 경우에도 약 2.5% 내외의 편차를 나타내고 있어 열확산계수의 정밀측정을 위해서는 레이저 빔의 조사시간 지연특성에 대한 보정이 필요함을 알 수 있었다.

4.2 레이저 에너지 분포 균일화 효과

본 연구에 사용한 Nd:YAG 레이저 빔을 균일화시키지 않고 직접 조사한 경우와 본 연구에서 개발한 3차원 빔 균일화 장치에 레이저 빔을 투과시켜 빔의 에너지분포를 측정한 것을 Photo. 1과 Photo. 2에 나타내었다.

Photo. 1은 Nd:YAG 레이저의 직사빔으로 위치에 따라 에너지밀도의 차이가 많이 발생하는 불균일한 에너지분포를 보여주고 있는 반면 Photo. 2는 레이저 빔 균일화장치를 통과한 균일 빔으로 에너지밀도가 매우 균일함을 알 수 있다.

균일화된 레이저빔과 불균일 레이저빔에 의한 열확산계수 재현정도의 비교를 위하여 POCO AXM-5Q1을 상온에서 1,300K까지 측정하였으며 측정횟수는 동일 온도에 대하여 3~4회씩 실시하였다.

측정결과를 보면 불균일한 레이저빔을 사용하였을 때에는 측정 분산도가 ±5% 이하를 보이고 있으나 균일화 빔을 사용하였을 때에는 측정분산도가 ±2.%이하를 보이고 있어 균일화 빔을 사용함으로서 열확산계수 측정값의 재현성이 향상되었음을 알 수 있었다. 그 결과는 Fig. 10와 같다.

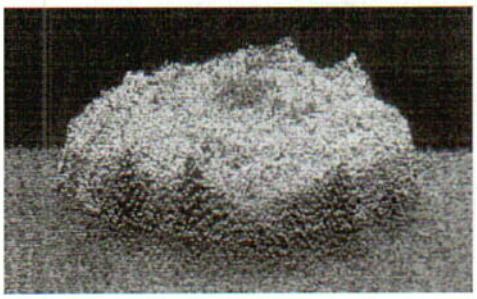

Photo 1 Direct laser beam profile

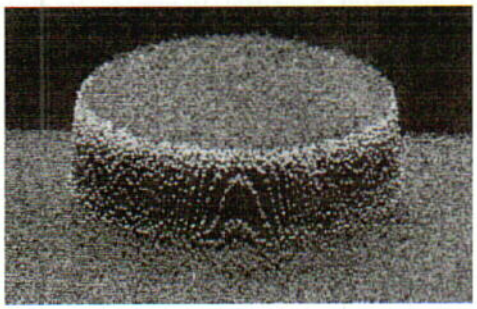

Photo 2 Uniformized laser beam profile

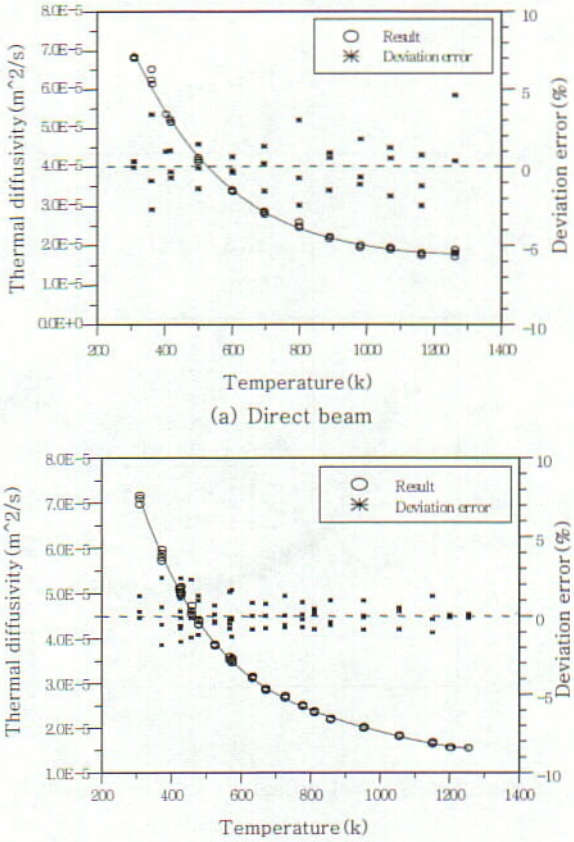

Fig. 10 Thermal diffusivities and their deviation error measured by the direct beam and uniformized beam

4.3 종합 오차요인 개선 효과

레이저 섬광법에 의한 열확산계수 측정시 중요 오차요인이 되는 레이저 조사 시간 지연, 레이저 빔의 에너지 분포 불균일 영향을 보정할 수 있는 정밀 측정방법을 개발·적용한 측정 오차의 개선 효과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 각각 두께 2.55mm의 POCO AXM-5Q1과 두께 2.31mm의 Glassy- carbon에 대하여 상온에서 1,500K의 온도범위에서 본 연구에 의하여 확인된 오차 개선 방법의 적용 이전과 적용 이후의 열확산계수 측정 결과를 미국 국립표준기술원(NIST)의 측정치[5] 및 일본 계량연구소(NRLM)의 측정치[6]와 비교·검토하였다.

본 연구에서 적용한 여러 가지 오차 요인을 고려하지

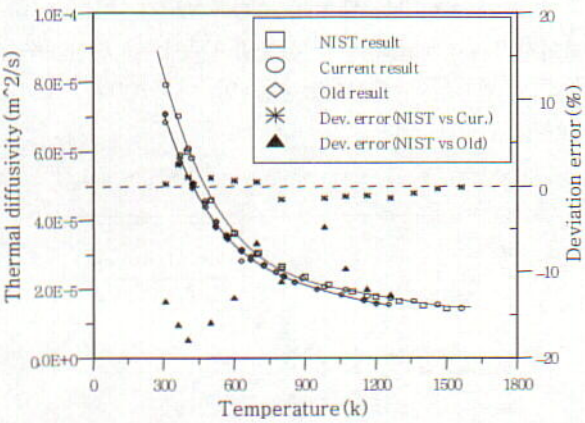

Fig. 11 Thermal diffusivity of POCO AXM-5Q1

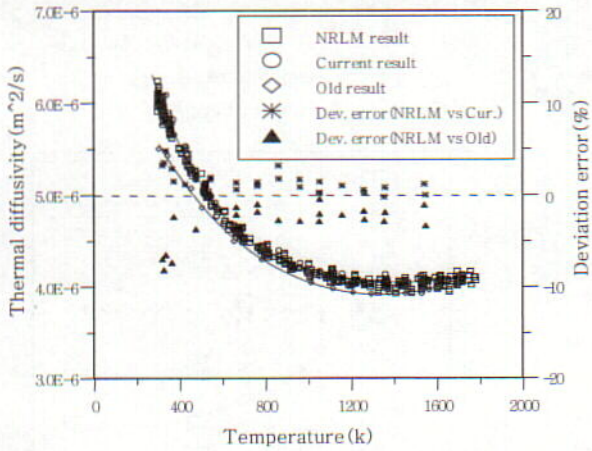

Fig. 12 Thermal diffusivity of Glassy-carbon

않은 경우(Fig. 11의 ◇)의 열확산계수 측정치는 미국 국립표준기술원이 제시한 POCO AXM-5Q1의 표준치에 비하여 상온에서 최대 18%까지, 1,200K 부근에서 최대 13%까지의 편차를 나타내고 있으나 본 연구의 주요 오차 요인의 개선 방법을 적용한 경우(Fig. 11의 ○)에는 ±2% 이내의 편차를 나타내고 있음이 확인되었다.

또한 Glassy-carbon의 경우에도 동일 lot의 시료에 대하여 측정한 일본 계량연구소의 측정 결과를 기준으로 할 경우 오차 요인을 고려하지 않은 방법(Fig. 12의 ◇)에서는 상온에서 약 8%, 1,200K 부근에서는 4%의 최대 편차를 나타내고 있으나 본 연구의 주요 오차 요인의 개선 방법을 적용한 경우(Fig. 12의 ○)에는 상온에서는 5%이내, 1,500K 부근에서는 2% 이내의 편차를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 레이저 섬광법에 의한 열확산계수 측정시 중요 오차 요인이 되는 레이저 조사 시간 지연, 레이저 빔의 에너지 분포 불균일 영향을 보정할 수 있는 정밀 측정방법을 제시하고자 하였으며 종합적인 측정 오차의 개선 효과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서 적용한 여러 가지 오차 요인을 고려하지 않은 경우, 열확산계수 측정치는 미국 국립표준기술원이 제시한 POCO AXM-5Q1의 표준치에 비하여 측정온도에 따라 13%~18%의 편차를 나타내고 있으나, 본 연구의 주요 오차 요인의 개선 방법을 적용한 경우에는 측정온도 전 구간에서 ±2% 이내의 편차를 나타내고 있어 오차 요인의 현저한 개선 효과를 확인할 수 있었다.

2) 또한 Glassy-carbon의 경우에도 동일 로트의 시료에 대하여 측정한 일본 계량연구소의 측정 결과를 기준으로 할 경우, 오차 요인을 고려하지 않은 방법에서는 측정온도에 따라 4%~8%의 편차를 나타내고 있으나, 본 연구의 주요 오차 요인의 개선 방법을 적용한 경우에는 2%~5%의 편차를 나타내고 있어 오차 요인 개선 방법이 주효하였음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Parker, W. J., Jenkins, C. P., Butter, C. P. and Abbott, G. L. : Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity, Journal of Applied Physics, **32** (1961), 1679~1684 (in English)
2. Hong J. H., Baba T. and Shinzoto K. : Thermal Diffusivity Measurement of Low Emissivity Solid Materials by a Hemispherical Mirror Type Laser Flash Method, 17th Japan Thermophysical Symposium, (1996), 355~358 (in English)
3. Arai T., Baba T. and Ono A. : Laser Beam Profile Measurement by a Thermographic Technique, 10th European Conf. on Thermophysical Properties, (1986), 386~389 (in English)
4. Hong J. H, Phark J. W., Lee W. S., Mok J. K. and Oh K. S. : Improvement of Laser Beam Profile by 3D-uniformizer Using an Optical Fiber, 4th Asian Thermophysical Properties Conference, (1995), **58** 9~592 (in English)
5. NBS Special Publication : SRM:A Fine-Grained, Isotropic Graphite for Use as NBS Thermophysical Property RM's from 5 to 2500K, **260-89** (1989), 59 (in English)
6. Suliyanti M. M., Baba T. and Ono A. : Thermal Diffusivity Measurement of Glassy Carbon by Laser Flash Method, 12th Symposium on Thermophysical Properties, (1991), 327~330 (in English)