

음향광변조기를 이용한 고분해능의 헤테로다인 간섭식 열팽창 측정기술

최병일[†] · 이상현 · 김종철

한국표준과학연구원

Ⓣ 305-600 대전시 유성구 도룡동 1번지 유성우체국 사서함 102호

임동건

고려대학교 물리학과

Ⓣ 136-701 서울시 성북구 안암동 5가 1번지

(2002년 8월 16일 받음, 2002년 11월 15일 수정본 받음)

열팽창계수의 정확한 측정은 재료과학이나 공업기술 분야에서 가장 중요한 요구량 중의 하나이다. 음향광변조기(AOM)를 이용한 고분해능 간섭식 열팽창계를 제작하여 성능검사를 하였다. 이 계는 이중광로 헤테로다인 간섭계와 복사열 전기기로 구성되어, 정밀한 변위의 측정과 시료의 신속한 가열 및 냉각이 가능토록 하였다. 또한 레이저의 주파수 안정화를 위하여 2차 맥놀이 주파수를 이용한 3종모드 안정화 He-Ne 레이저를 제작하였으며, 이때의 주파수 안정도는 5×10^{-9} 이었다. 제작된 계의 길이 측정은 실온에서 1100 K 온도영역에서 나노미터 정도의 정밀도를 주었다.

주제어 : heterodyne interferometer, AOM, dilatometer, thermal expansion, stabilized laser.

I. 서 론

열팽창을 이용한 분야는 실로 광범위하며, 첨단산업의 발달로 세라믹, 신소재 등의 열팽창 측정수요는 날로 늘고 있다. 특히 최근의 과학기술의 발달에 따라 극저열팽창 물질에 대한 관심, 극저온에서의 열팽창계수 및 얇은 박막의 열팽창계수 측정요구, 초전도 물질의 천이온도에서의 상변화 연구 등의 물질의 미세 상변화 연구 등은 열팽창의 측정능력을 nanometer 정도의 측정정밀도를 요구하고 있다. 또한 길이 측정표준의 향상을 위한 gauge block 및 밀도표준을 위한 질량구의 정밀한 열팽창 측정 등은 국가측정표준의 향상을 위한 고분해능의 열팽창 측정기술의 필요성을 말해주고 있다.

물질의 열팽창계수는 일반적으로 물질의 종류 및 온도영역에 따라 상당히 광범위한 범위의 값($10^{-3} \sim 10^{-9}/K$)을 갖고 있으며, 따라서 열팽창 측정은 측정물질의 종류나 온도영역에 따라 여러 측정 방법 등이 개발되어 왔고 각각의 방법들은 나름대로의 장단점을 갖고 발달되어 왔다.^[1] 포괄적으로 열팽창계수를 측정하는 방법은 다른 물질에 대해 상대적으로 측정하는 상대적 방법과, 물질의 팽창량을 직접 측정하는 절대적 측정방법 있는데, 대부분의 역학적인 방법은 상대적인 방법으로 측정하기 편리한 점은 있으나 절대적 방법에 의해 교정을 받아야 하며, 충분한 분해능을 주지 못한다. 요즘 널리 사용되고 있는 압봉식 열팽창계(push-rod dilatometer)는 상대적 측정 방법으로서 신뢰성이 좋으며, 측정이 용이하고, 신속하고 자동화하기가 용이하여, 중온영역에서 범용적으로 사용할 수 있는 열팽창계이다.^[2-5] 하지만 이의 분해능은 0.2 μm 정도로서 열팽창이 작

은 물질이나, 열팽창계수가 작아지는 저온영역에서는 충분한 분해능을 주지 못한다. 그러므로 최근 들어 고분해능으로 열팽창을 측정할 수 있는 절대적 측정방식인 레이저 간섭식 열팽창계(laser interferometric dilatometer)의 연구가 활발히 진행되고 있다.^[6-11] 레이저는 단색성, 간섭성 혹은 높은 출력 강도 등 때문에 길이 측정에 많이 사용되어 왔는데, 레이저 간섭식 열팽창계는 homodyne 방법^[6]과 heterodyne 방법^[7-11]이 있다. Homodyne 레이저 간섭을 이용한 열팽창계는 시료면과 기준면의 두 표면으로부터 반사된 광의 간섭에 기초를 둔 것으로, 이의 측정 정밀도는 압봉식 및 다른 역학적 열팽창계에 비해 높은 편이나 30 nm 정도의 정밀도의 한계를 갖는다. 이러한 한계는 간섭무늬의 DC level 측정시 시료의 열복사에 의한 영향, 혹은 측정시 광세기의 감소 등에 기인되는데, 광세기 감소의 주요 요인은 반사 광선, 진공 chamber 안에서의 수분 혹은 oli에 의한 흡수, 그리고 시스템의 열적변형에 의한 광학적 비정렬 등이다, 결론적으로 DC level의 변화는 간섭 무늬 fringe의 결정에 불확도를 주며 이는 길이측정의 정확도를 줄여준다.

반면에 heterodyne 간섭계는 동일한 주파수간의 간섭무늬의 이동대신에 주파수가 다른 광원간의 맥놀이 주파수를 이용하여 이들간의 위상변화를 측정함으로써 길이의 변화를 측정하는 것으로, AC term을 측정함으로써 잡음을 줄이고 분해능을 높인 간섭계이다. 본 연구에서는 음향광변조기(Acoustic Optical Modulator: AOM)을 이용한 heterodyne 간섭식 열팽창계를 제작하여 고분해능의 열팽창 측정기술을 확립하였다.

II. Heterodyne 간섭계

Heterodyne 간섭계는 두 파장들간의 맥놀이 주파수(beat

[†]E-mail: cbi@kriss.re.kr

frequency)의 위상변화(phase shift)를 측정함으로써 분해능을 높은 간섭계로서, 두파장의 전기장세기를 각각 $A_1\sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)$ 과 $A_2\sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$ 라 할때 간섭무늬의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$I = \frac{(A_1^2 + A_2^2)}{2} + 2A_1 \cdot A_2 \cos(2\pi \Delta f \cdot t + \Delta\varphi) \quad (1)$$

여기서 $\Delta f = f_1 - f_2$, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 을 나타낸다. 간섭계의 위상변화는 lock-in amp를 통해 높은 정밀도로 얻을 수 있다. 간섭계의 간섭 맥놀이 신호는 기준 신호와 lock-in amp로 입력되어 비교되고, 두 신호간의 위상변화를 측정하여 시료의 길이 변화에 대한 정보를 얻게 된다.

음향광변조기(AOM)는 음향광학 상호작용을 이용한 것으로, 이는 음향파와 레이저 광선속이 존재하는 모든 광학매질 내에서 일어난다. 광학매질 내에 음향파가 실리면 굴절을 파를 생성하게 되며, 이는 회절격자 같이 행동하게 된다. 입사된 레이저 선속은 이 회절격자에 의해 Bragg 회절을 하게 되는데, AOM은 첫 차수의 선속을 극대의 효율을 갖도록 설계된 것이다. 이때 회절되는 각도는 식 (2)처럼 음향파의 주파수에 비례하게 된다.

$$\theta = \frac{\lambda f_a}{V_a} \quad (2)$$

여기서 λ 는 공기에서의 레이저 파장, f_a 는 음향파의 주파수, V_a 는 음향파의 속도, θ 는 음향파의 전파방향에 대한 회절된 레이저 광선의 각도를 나타낸다. 음향광 상호작용에서 레이저의 주파수는 음향파의 주파수만큼 천이하게 되는데, heterodyne 간섭계에서는 이 주파수천이를 이용하여 위상에 대한 정밀한 정보를 얻게 된다.

본 연구에서 구성한 간섭계의 개략도는 그림 1과 같다. 두 파장의 광선속(beam)은 주파수가 각각 80 MHz와 79.9 MHz 인 두 개의 AOM를 통해 얻었으며, 이 간섭계의 구조는 2중 광로(two-fold path) 간섭계로서 광선속이 시료와 기준 반사거울을 두번씩 통과하므로 분해능을 높였으며, 또한 코너 큐브 프리즘의 사용으로 광학적 비정렬 및 기준면과 시료면의 비평

행성을 보상해줄 수 있게 해준다. 주파수 안정화 레이저의 선속은 $\lambda/2$ plate를 통과하고 나서 광분할기(beam splitter)와 반사거울(reflector)를 통해 두 평행한 선속으로 바뀌고, AOM에 의해 80 MHz와 79.9 MHz로 변조되어 편광광분할기(PBS, polarized beam splitter)에 입사된다. 입사된 선속중 수평 편광된 두 선속은 PBS를 통과하여 광조합기(beam coupler)에 의해 합쳐져서 광검출기(1)에 검출되어 기준신호로 사용된다. 반면에 수직 선편광된 두 광선속은 PBS에 의해 반사되고 $\lambda/4$ plate를 통과하여 원편광으로 바뀌게 되고, 각각 측정시편의 아래와 윗면에 있는 반사경에 반사하게 된다. 반사될 때 두 선속의 원편광은 방향이 바뀌게 되고 $\lambda/4$ plate를 다시 통과 하므로서 수평 선편광으로 바뀌게 되어 PBS를 통과하게 된다. 통과된 두 광선속은 코너 큐브 프리즘에 의해 입사된 선속과 평행한 선속으로 반사되어 PBS를 다시 통과하게 되고, 앞에서와 같은 경로로 각각 측정시편의 아래와 윗면에 있는 반사경에 다시 반사하게 되고, $\lambda/4$ plate를 다시 통과함으로써 이번에는 수직 선편광된 두 광선속은 PBS에 의해 반사되어 광조합기(2)에 의해 합쳐지고 광검출기(2)에 의해 측정신호로 검출되게 되는데, 이 신호는 기준신호와 비교되어 위상변화를 측정함으로써 길이변화의 정보를 주게된다. 레이저 앞에 사용된 $\lambda/2$ plate는 기준신호와 측정신호의 크기의 비율을 조절할 수 있게끔 하여 적당한 신호의 세기를 유지할 수 있게 해준다.

광분할기는 rotate stage에 부착되었고, 반사거울(1)은 translater 위에 놓인 mirror mount에 부착되어, 두 평행 선속의 광정렬 및 선속 간격을 조절하게 된다. 두 AOM은 XZ translater 위에 놓인 XY mount에 부착되어, AOM의 위치 및 광정렬을 용이하게 하였다. PBS와 두개의 광조합기는 XY mount 위에 하나의 몸체로 되어있고, 이 몸체는 X translater 위에 부착되어 위치 이동이 가능하다. 코너 큐브 프리즘은 XZ translater에 부착되어 광선속의 위치조정을 하게된다. $\lambda/2$ plate와 $\lambda/4$ plate는 rotator에 부착되어 있다.

간섭계의 안정도는 외부온도에 의해 영향을 받는데, 이는 주로 광학부품 및 공기의 굴절을 변화에 따른 광학적 길이의 변화에 기인된다. 안정도를 높이기 위하여 간섭계를 단열재로 외부와 분리시켰으며, 간섭계 밑면에 열선을 설치하여 온도를 실

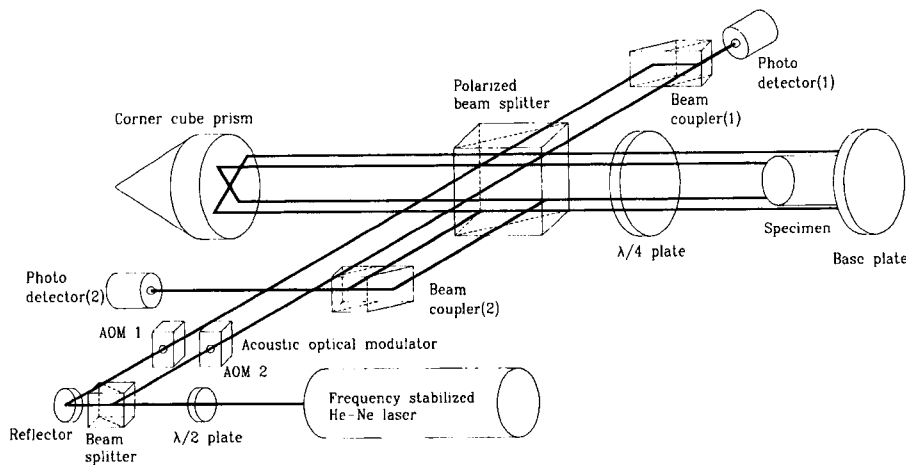


그림 1. Heterodyne 간섭계 구성도.

온도보다 2~3°C 높은 일정한 온도를 유지 시켰는데 이때의 온도 안정도는 ±0.2°C 이내 이었다. 또한 두 광선속을 합쳐주는 반사거울과 광분할기로 구성된 광조합기(beam coupler)는 하나의 몸체로 제작하여 외부 온도변화에 따른 광학적 길이의 안정도를 높여 주었다.

레이저의 간섭을 이용한 길이변화의 측정은 레이저 파장을 기준으로 하여 측정하고자 하는 길이의 변동을 파장의 배수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$L = \frac{\lambda_v}{2} \cdot \frac{m}{n} \tag{3}$$

여기서 λ_v 은 간섭계에 사용된 레이저 진공파장이고 m 은 실수이며 n 은 측정 광로상의 공기 굴절률이 된다. 식 (3)의 변화분 δL 을 계산해 보면

$$\delta L = \frac{\partial L}{\partial \lambda_v} \cdot \delta \lambda_v + \frac{\partial L}{\partial m} \cdot \delta m + \frac{\partial L}{\partial n} \cdot \delta n \tag{4}$$

이 된다. 위 식에서 오른쪽 2항, 3항은 측정상의 오차에 의한 값이므로, 레이저 주파수 변동에 의한 길이 오차항만 고려하면

$$\delta L = \frac{\partial L}{\partial \lambda_v} \cdot \delta \lambda_v \tag{5}$$

또, 빛속도 c 와 레이저 주파수 ν 및 파장 λ_v 사이의 관계식 $\lambda_v = c/\nu$ 를 고려하면 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\delta L}{L} = -\frac{\delta \nu}{\nu} \tag{6}$$

즉, 주파수의 불안정으로 인한 주파수의 변동은 직접 길이측정의 오차를 유발하게 된다. 일반적으로 상용의 He-Ne 레이저의 경우 그 중심주파수 ν (또는 진공파장)가 온도에 따라 $\Delta \nu_D = 1.5 \text{ GHz}$ 정도로 이득쪽 안에서 흔들리며, 이는 레이저 광주파수 $\nu \approx 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 에 대해 $|\delta \nu/\nu| = 3 \times 10^{-6}$ 가 되어, 측정시편의 길이가 10 mm인 경우 30 nm 정도의 오차를 주게 된다.

본 연구에서는 주파수의 안정화를 위하여 무변조 안정화 레이저를 제작하였다. 이는 열적변화에 의한 공진기 길이의 변화에 따라서 변화하는 세 종모드 사이의 2차 맥놀이 주파수를 이용하여 주파수 안정화 및 출력 안정화를 실현한 것이다.^[12,13] 보통의 He-Ne 레이저는 3~4개의 종모드 발진을 하게 되는데, 인접한 종모드 들은 서로 수직되는 편광방향을 가지고 있고 공진기의 길이가 변화더라도 이 편광방향은 변하지 않는다. 만일 반사경이 비등방 편광성을 갖는다면 레이저 발진모드에 따라 반사 위상지연이 다르기 때문에 레이저 발진모드의 편광방향에 따라 발진주파수의 편이가 생긴다. 또 발진모드가 이득 곡선의 중심에서 발진하지 않을 경우 매질의 분산특성 때문에 주파수 당김 효과가 나타나게 되고 이 주파수 당김 효과는 매질의 복수 감수율(χ)의 실수부 $\chi'(v)$ 에 비례하게 된다. 레이저 공진기에서 3개의 종모드 발진주파수를 $\nu_{q-1}, \nu_q, \nu_{q+1}$ 라 하면, 2차 맥놀이 주파수 Δ 는 다음 식으로 표현된다.^[13]

$$\Delta = 4\Delta\nu - \nu_q [\chi'(v_{q+1}) - \chi'(v_{q-1})] / 2n^2 \tag{7}$$

위 식에서 DC-term $4\Delta\nu$ 은 반사경의 비등방 편광성 때문에

생긴 위상지연의 차에 기인된 것이고, AC-term $\nu_q [\chi'(v_{q+1}) - \chi'(v_{q-1})] / 2n^2$ 는 공진기의 길이변화에 따라 변화는 복수 감수율의 실수부 χ' 에 기인된 것이다.

검출된 2차 맥놀이 신호는 일정한 주파수를 유지하기 위해서 pre-amp와 F/V(frequency to voltage)변환기를 사용한 PI 제어회로에 입력되고, 이 제어기는 공진기에 부착된 열선의 온도를 일정하게 제어함으로써 레이저의 주파수를 안정화하게 된다.

본 연구에서 안정화에 사용된 레이저는 Melles Griot사 모델 05-LHR-151이였으며 공진기에 부착된 열선은 저항 11.2 Ω 의 thermo-foil heater(Minco사 HK5415)를 두 개 병렬로 접속하여 레이저 방전관 주위에 감고 열전도가 균등하게 되도록 그 위에 Al-tape를 한겹 방전관 주위에 감아 붙였다. 제어회로에서 F/V 변환기를 의해 전압으로 변환된 신호를 기준신호와 비교하여 차등증폭기를 거친 후, PI 제어를 위한 적분기, 비례 증폭기 및 가산증폭기 등을 사용하였다. 적분기의 시정수 및 비례증폭기의 이득은 적절한 값이 되도록 가변이 가능도록 하였으며, 제어전압으로 열선의 전류를 조절하기 위하여 NPN형 Tr. BDX53C를 사용하였다. 또한 방전관을 일반 방전 온도보다 좀더 높은 온도(80~90°C)를 유지할 수 있도록 push-on 스위치를 부착하였는데, 이는 방전관의 온도제어를 쉽게 하여 주파수 제어를 용이하게 해준다.

III. 열팽창 측정장치

고온용 열팽창 측정장치의 시스템 구성에서 제일 중요한 점은 전기로의 온도변화에 따른 계의 안정도 및 외부 진동에 의한 영향을 없애는 것이다. 일반적으로 계의 불안정은 chamber 내의 온도변화에 따른 시스템의 열적인 변형과, chamber와 간섭계 사이에 있는 window의 온도변화에 따른 굴절률의 변화에 기인된다.

사용된 전기로는 Infrared Gold Image Furnace로 이었는데, 이는 텅스텐 할로겐 램프의 광원을 반사경에 의해 집속시켜 가열을 하는 방식으로서, 이의 가열영역은 200 mm, uniform zone은 $\phi 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 이고, 전체 용량은 9.6 kW이며 온도를 1000°C까지 가능하다. 특히 이는 일반적인 전기로 경우의 내열재에서의 가스 발생이 없으며 우수한 가열속도(Max. 1000 °C/sec)와 냉각속도(Max. -70°C/sec)를 가져 시간과 에너지를 절약 할 수 있었고, 또한 전기로의 온도가 외부의 시스템에 영향을 줄여주어 계의 열적인 변형을 줄여 주었다. 온도의 조절은 TPC-1000의 사용으로 온도의 프로그램이 가능토록 하였으며, 온도는 측정영역이 0~1450°C인 R-type(Pt.13%Rh/Pt) 열전대를 온도 조절용과 온도 측정용으로 2개를 사용하였다. 온도의 측정은 HP사 multimeter 3457A에서 전압으로 측정되어 GPIB로 보내진다. 열전대는 시료 바로 근처에 설치되었으며 정밀한 온도 측정을 위하여 끝단은 ice-point에 담겨있다.

제작된 고온 열팽창 측정장치의 단면도는 그림 2와 같다. 시스템의 chamber는 석영관으로 진공을 유지할 수 있으며, 시료가 놓이는 기준면은 알루미늄관 위에 놓여있다. 시료는 시료 덮개에 의해 덮여있게 하여 시료가 균일한 온도 하에 있게 하

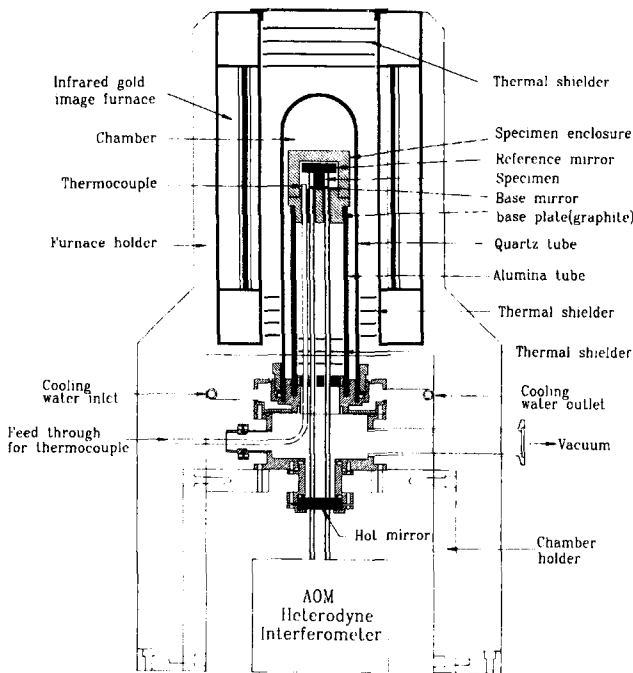


그림 2. Heterodyne 간섭식 열팽창 측정장치.

였다. 기준면과 시료표개는 열팽창계수가 작고($46 \times 10^{-7}/K$), 열전도도가 좋은($120 W/mK$) graphite MGY-12로 제작하였다. 시료 밑면과 윗면에 있는 반사거울은 고온에서도 견디는 실리콘을 연마하여 사용하였다. 한편 window의 온도변화를 줄이기 위하여 물 냉각을 하였으며, 전기로 사이에 금속 차폐판을 4개 설치하였다. 또한 이 window는 hot mirror를 사용하였는데 이는 가시광선의 빛은 통과시키고 열선은 반사시키도록 코팅한 것으로 전기로의 열이 간섭계로 전달되는 것을 막아준다. 전체 신호처리 시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 시편의 길이변화의 정보를 가진 검출신호는 기준신호와 함께 광검출기에 의해 검출되고, lock-in amp에 의해 기준신호에 대한 위상

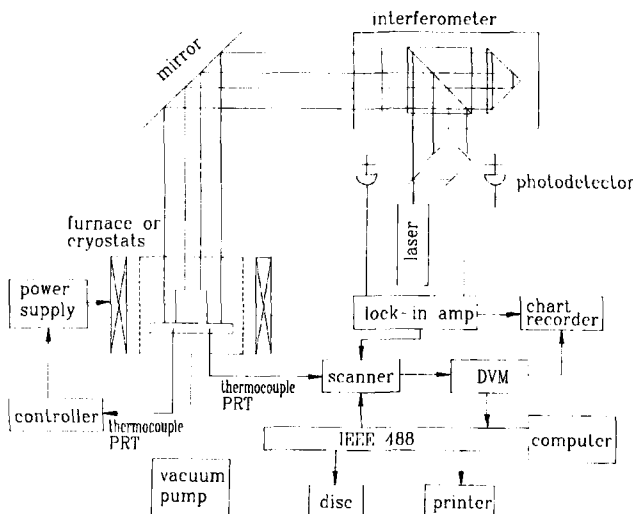


그림 3. 간섭식 열팽창계 전체 구성도.

변화가 측정된다. 측정된 위상변화는 scanner와 DVM(HP 3457A)을 거쳐 열전대의 온도와 함께 GPIB 로 보내져 프로그램에 입력되고, disc 혹은 기록계에 기록된다. 이때 하나의 fringe peak 이동은 $\lambda/4$ 의 길이변화를 의미한다.

IV. Heterodyne 간섭식 열팽창계 성능평가

일반적으로 열팽창계의 분해능에 영향을 줄 수 있는 원인을 살펴보면 다음과 같다.

- 간섭계 신호의 안정도 및 선형성
- 레이저의 주파수 안정도
- 열팽창계 시스템의 온도변화에 따른 안정도
- 온도측정의 정확도
- 초기길이 측정의 정확도

간섭계 신호의 불안정은 광검출기, AOM, Lock-in amp, DVM 등 신호처리 부분의 불안정에 기인되며, 간섭계 내의 온도변화에 따른 광학부품 및 공기의 굴절률 변화는 간섭계 신호의 long term stability에 영향을 미친다. 제작된 간섭계는 광조합기(beam coupler)의 한 몸체 제작, 간섭계 내의 일정한 온도 유지 및 전기로로부터의 열적 영향 차단 등으로 간섭계의 안정도 및 분해능을 향상 시켰다. 그림 4는 제작된 간섭계 신호의 안정도를 보여주고 있다. 외부의 온도변화($\sim 3^{\circ}C$)에 대해 간섭계 내의 온도는 $0.2^{\circ}C$ 이내의 일정함을 유지하였고, 그림에서 오른쪽 윗부분은 위상변화 신호를 50배 확대하여 nm로 표시한 것으로, 간섭계 신호의 long term stability가 12 시간동안 대략 $0.8 nm$ 이내에서 안정됨을 보이고 있다. 간섭계의 분해능 조사는 간섭계의 비선형성을 조사함으로써 알 수 있는데, 그림 5는 측정된 간섭계의 비선형성을 보여주고 있다. 비선형성 측정은 길이를 직접 변화시키지 않고 chamber 안의 굴절률을 변화시키면서 광학적 길이를 변화시켜서 조사하였다. 이는 chamber 안을 고진공으로 만든 다음 needle valve를 통해 공기를 일정한 유속으로 유입시킴으로써 이를 수 있다. 레이저의 파장은 edlin 공식에 의해 $\lambda = \lambda_0/n = \lambda_0 [1 + A \cdot B \cdot C]^{-1}$ 로 표시할 수 있는데, 여기서 변수 A, B, C는 온도, 압력, 수증기압, CO_2 등에 관계되는 양이다. 압력 이외의 변수의 변

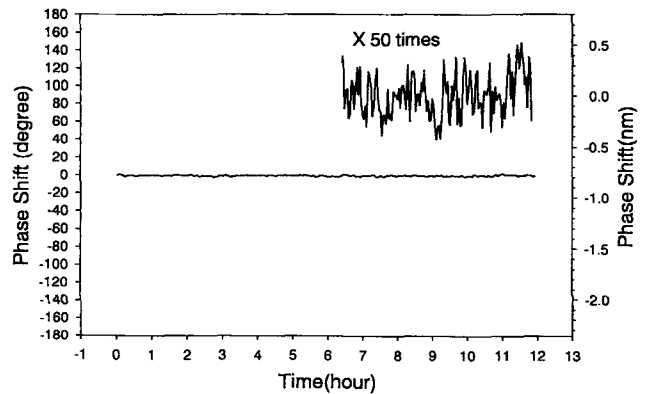


그림 4. 제작된 heterodyne 간섭계의 안정도(위쪽 그림은 50배 확대).

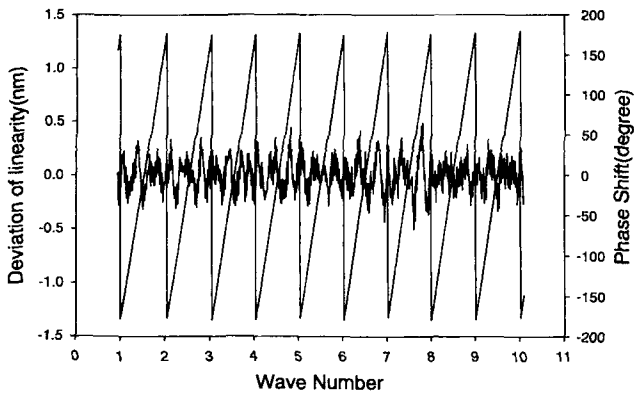


그림 5. 제작된 heterodyne 간섭계의 비선형성.

화를 무시하면 굴절률이 압력에 비례하게 되므로, 압력의 증가에 따른 광학적 길이의 변화를 측정하면 식 (4)에 의해 간섭계의 분해능을 조사할 수 있다. 그림 5에서 오른쪽 y 축은 압력의 증가에 따른 간섭계의 위상변화가 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 사이에서 변화함을 보이고 있고, 왼쪽은 이때 측정된 간섭계 신호의 선형성에서의 어긋남을 보여주고 있다. 이에서 보듯이 제작된 간섭계의 비선형성은 0.8 nm 이내 이었다.

레이저의 주파수의 불안정으로 인한 주파수의 변동은 직접 실험에 오차를 유발하게 된다. 그림 6은 안정화가 되기 전의 레이저의 2차 맥놀이 신호의 변화를 보여주고 있다. 이에서 보듯이 2개의 다른형의 곡선이(a, b영역과 c, d 영역) 연속적으로 반복되고 있는 것을 볼 수 있다. 이때 한 주기는 공진기의 길이변화 λ 에 해당된다. a 영역과 c 영역에서 레이저는 4개의 종모드로 발진하고 있으며 가운데 예리한 peak는 4개의 종모드 중 1개의 모드 소멸과 새로운 모드 생성을 나타낸다. b, d 영역에서는 레이저 발진모드가 3개이며, b 영역에서는 3개의 종모드 중 가운데 모드의 편광이 수직(\perp) 방향이고 d 영역에서는 수평(\parallel) 방향이다.^[12,13]

이러한 2개의 다른 형의 곡선의 반복은 각각 $\Delta(\perp) = \Delta_{q+1}(\parallel, \perp) - \Delta_{q-1}(\perp, \parallel)$ 와 $\Delta(\parallel) = \Delta_{q+1}(\parallel, \perp) - \Delta_{q-1}(\parallel, \perp)$ 에 해당된다. 즉 처음의 3개 종모드 편광은 $\parallel, \perp, \parallel$ 순으로 되어 있다

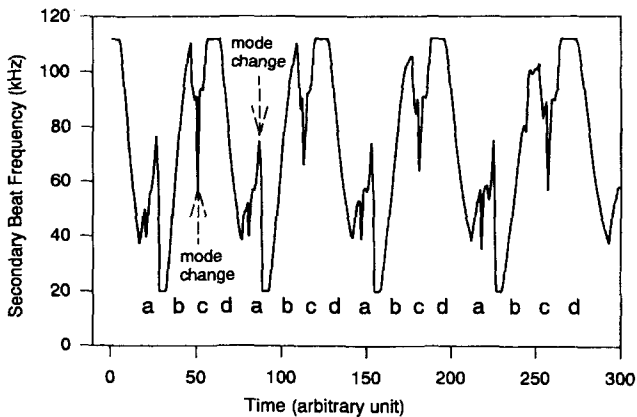


그림 6. 안정화 되지 않은 He-Ne 레이저의 2차 맥놀이 주파수의 변화.

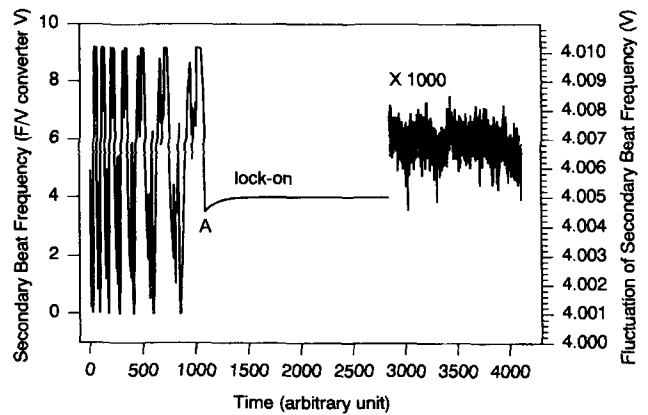


그림 7. 안정화 된 He-Ne 레이저의 잠긴 2차 맥놀이 주파수와 그의 안정도.

가 공진기의 길이 L이 변화하여 레이저 주파수 ν 가 변함에 따라 새로운 종모드가 생기게 되어 그 편광은 \perp, \parallel, \perp 순으로 배열되고 이것이 반복되게 된다. 이 곡선은 식 (7)에서 보듯이 레이저 매질의 분산곡선의 차함수로 나타나는 것을 알 수 있는데, 본 연구에서 제작된 안정화 레이저의 경우 그림 6에서 보듯이 $4\Delta\nu \approx 70$ kHz이므로 두 편광에 대한 반사경의 위상 지연에 의한 주파수 편차량 $2\Delta\nu$ 는 35 kHz 정도임을 알 수 있고, AC-term의 peak-peak 값으로 나타내지는 최대주파수 당감효과는 100 kHz 정도가 됨을 알 수 있다. 그림 7은 제어기에 의해 안정화된 2차 맥놀이 주파수를 F/V 변환기의 출력전압으로 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 A점에서 lock이 걸려가해준 bias 전압 4 V 부근(60 kHz)의 일정한 전압을 유지 하므로서 레이저 주파수가 안정화됨을 알 수 있다. 그림의 오른쪽 쪽은 주파수가 안정화된 상태에서의 제어 오차 신호를 확대(1000배)해 표시한 것으로, 이때의 오차신호의 요동 폭은 ± 2 mV로서 이는 레이저 주파수에 대략 ± 50 kHz의 요동을 주게 된다. 그러므로 제작된 안정화 레이저의 주파수 안정도는 5×10^{-9} 정도 이었으며, 출력도 3 mW 정도에서 $\pm 0.2\%$ 의 안정도를 보였다.

열팽창계 시스템의 안정도는 주로 전기로의 온도 변화에 따른 시스템의 열적인 변형과 광학부품의 굴절률 변화에 기인하

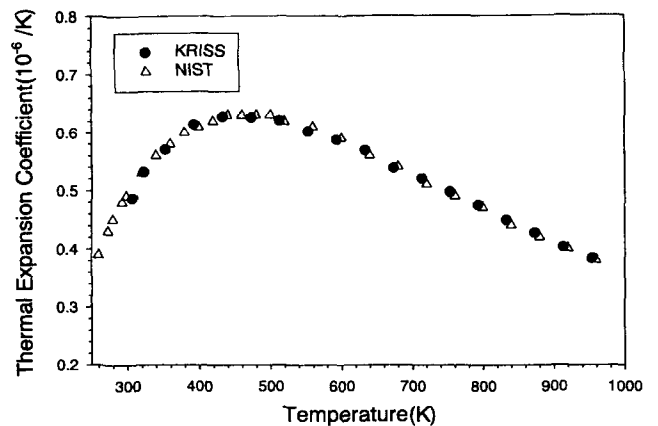


그림 8. SRM739 석영의 열팽창계수.

표 1. 불확도의 원인 및 열팽창계수에의 기여도(시료 20 mm, 온도간격 50 K)

Source	Type	Amount	Contribution to expansion coefficient (/K)
Laser frequency stability	Random	5×10^{-9}	5×10^{-10}
Fringe determination	Random	0.8 nm	0.8×10^{-8}
Repeatability of the zero drift of fring fraction with temperature change	Random	0.2 nm/K	2×10^{-8}
Temperature determination	Random	0.25 K	$5 \times 10^{-3} \times \alpha$ max. value* = 5×10^{-9}
Temperature calibration	Systematic	0.3 K	$6 \times 10^{-3} \times \alpha$ max. value* = 6×10^{-9}
Determination of specimen length	Systematic	5 μ m	$2 \times 10^{-4} \times \alpha$ max. value* = 2×10^{-10}

*The maximum value of uncertainty is calculated by using the maximum LTEC of fused silica $\alpha = 1 \text{ TIMES } 10^{-6}$

여, 간섭계의 baseline의 zero drift를 가져오게 된다. 본 연구에서 제작된 열팽창계의 zero drift는 0.2 nm/K이었으며, 열팽창 측정에서는 이 값을 보정을 해주어야 했다.

열팽창계의 성능평가를 위하여 미국 NIST(National Institute of Standards & Technology)의 표준시료 SRM739를 측정 비교 하였다. SRM739는 석영(fused silica) 으로서 99.8% 이상 순도를 가진 원통 모양이며, 시료의 온도를 1020 K 이상으로 올릴 경우 시료의 특성이 변할 가능성이 있다. 그림 8은 이의 측정결과를 보여주고 있는데 NIST의 결과와 오차범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있는데, 표 1은 초기 길이 20 mm 인 측정시료를 50 K 간격으로 측정했을 때 불확도를 주는 여러 원인들과, 이 원인들이 열팽창계수의 측정 불확도에 주는 기여도를 나타내고 있다. 여기서 max. value는 석영의 최대 선 팽창계수 값인 $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 를 기준으로 한 것이다. 온도측정의 불확도는 0.25 K, 온도교정의 불확도는 0.3 K이었고 초기길이 측정의 불확도는 0.5 μ m이었다. 전체적인 측정 불확도는 석영의 경우 대략 $2.3 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ 이었으며, 이에서 보듯이 온도변화에 따른 계의 불안정이 가장 큰 불확도 요인임을 알 수 있다.

V. 결 론

음향광변조기(AOM)를 이용한 heterodyne 간섭식 열팽창계를 제작하여 고분해능의 열팽창 측정기술을 확립하였다. 제작된 간섭계는 2중광로로 분해능을 높였는데, 간섭계의 안정도 및 측정 분해능을 0.8 nm 이내 이었다. 또한 레이저 주파수 안정화를 위하여 안정화 레이저를 제작하였는데 이는 열적변화에 의한 공진기 길이의 변화에 따라서 변화하는 세 종모드 사이의 2차 맥놀이 주파수를 이용하여 주파수 안정화 및 출력 안정화를 실현한 것으로, 주파수 안정도는 5×10^{-9} 이었으며, 출력도 3 mW 정도에서 $\pm 0.2\%$ 의 안정도를 보였다. NIST의 석영 표준시료에 의한 열팽창계 성능평가 결과 열팽창계수 값이 $\pm 2.3 \times 10^{-8} / \text{K}$ 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있었는데, 온도변화에 따른 열팽창계의 열적 변형이 가장 큰 불확도 원인이었다. 고분해능의 열팽창 측정기술을 확립함으로써 고분해능의 열팽창 측정기술이 요구되는 저열팽창 물질 및 저온영

역에서의 열팽창 측정분해능을 확보하였고, 물질의 미세한 상 변화 측정연구가 가능토록 하였다. 이는 신뢰성 있는 열물성 데이터 및 표준물질의 업계보급, 재료연구에서의 물성의 기초 연구 지원 및 열확산도 등 다른 열물성 측정기술의 정밀도 향상에 기여하게 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Touloukian, Kirby, Taylor, and Desai, "Thermal expansion metallic elements and alloys," Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series Vol. 12, Plenum Press, 1977.
- [2] W. A. Plummer "Differential dilatometry a powerful tool," AIP Conference Proceedings No. 17, Thermal Expansion, pp. 147, 1973.
- [3] T. G. Kollie, D. L. McElroy, and J. T. Hutton, "A computer operated fused quartz differential dilatometer," AIP Conference Proceedings No. 17, Thermal Expansion, pp. 129, 1973.
- [4] G. R. Clusener, "Economy considerations for push-rod dilatometers" AIP Conference Proceedings No. 3, Thermal Expansion, pp. 51, 1971.
- [5] 최병일, 남현수, 김승태 "압축식 열팽창계 제작 및 성능검사" 응용물리, 11권, 1호, pp. 39-44, 1988.
- [6] T. S. Aurora, S. M. Day, V. King, and D. O. Pederson, "High-temperature laser interferometer for thermal expansion and optical-length measurements," Rev. Sci. Instrum., vol. 55, no. 2, pp. 149-152, 1984.
- [7] S. J. Bennett "An absolute interferometric dilatometer," J. Phys. E : Sci. Instrum. vol. 10, pp. 525-530, 1977.
- [8] G. Ruffino, "Recent Advances in Optical Methods for Thermal Expansion Measurements," International Journal of Thermophysics, vol. 1, 1989.
- [9] M. Okaji and H. Imai "A practical measurement system for the accurate determination of linear thermal expansion coefficients," J. Phys. E: Sci. Instrum. vol. 17, pp. 669-672, 1984.
- [10] M. Okaji and H. Imai "A high-temperature dilatometer using optical heterodyne interferometry," J. Phys. E : Sci. Instrum. vol. 1 20 pp. 887-891, 1987.
- [11] M. Okaji and N. Yamada, "Laser interferometric dilatometer

- at low temperature : application to fused silica SRM 739," *Cryogenics*, vol. 35, pp. 887-891, 1995.
- [12] 서호성, 정명세, "레이저 종모드간의 2차 Beat 신호에 의한 주파수 분별폭선 검출," *새물리*, 31권, 5호, pp. 546-549, 1991.
- [13] H. S. Seo and Y. T. Yoon, "Frequency and power stabilization of a three longitudinal mode He-Ne laser using secondary beat frequency," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 15, pp 2027, 1993.

High resolution heterodyne interferometric technique with AOM for measuring the thermal expansion

Byung Il Choi[†], Sang Hyun Lee, and Jong Chul Kim

Korea Research Institute of Standard and Science, Daejeon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: cbi@kriss.re.kr*

Tong Kun Lim

Dept. of Physics, Korea University, Seoul 136-701, KOREA

(Received August 16, 2002, Revised manuscript November 15, 2002)

The accurate measurements of thermal expansion coefficients is one of the most important techniques required not only in material science but also in industries. A high precision interferometric dilatometer, using acoustic optical modulator, has been constructed and its performance has been tested. The system consists of a double-path optical heterodyne interferometer and a radiant heating furnace. This provides highly accurate length measurement, and allows rapid heating and cooling method for the specimen. A three longitudinal mode frequency stabilized He-Ne laser, using the secondary beat frequency, is constructed. Its stability is found to be 5×10^{-9} . The uncertainty in the length measurement is estimated to be of nanometer order in the range between room temperature to 1100 K.

Classification code : SM.030.