

본 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음.

고온하의 CW 레이저 스페클 사진법과 화상처리에 의한 열팽창계수 측정에 관한 연구

김 경 석*, 최 정 석**

Measurement of Thermal Coefficient at High Temperature by CW-Laser Speckle Photography and Image Processing

K. S. Kim*, J. S. Choi**

ABSTRACT

In recent year Laser Speckle and its development have enabled surface deformation of engineering components and materials to be interferometrically examined. Laser Speckle-Pattern Interferometry Method is a very useful method for measuring In-plane components of displacement. In measuring thermal expansion coefficient, the various problems generated were established, and the measuring limitation examined. Material INCONEL 601 was used in experiments. Specimen was heated to the high temperature(1000°C) by doing current to the direct two specimen.

Then, those problems appear to the influence of back-ground radiation by the heated specimen, the influence by air turbulence, the oxidation of specimen. The color monitor and interference filter prevented the back-ground radiation by rad heat. The oxidation occurring in specimen itself was not generated by the being acid-proof excellence of material INCONEL 601.

Yet, in this experiments, the serious problems are the oxidation of specimen and influence by air turbulence. By more reserching these problems forward, it is helpful that the thermal expansion coefficient of many materials is directly measured under high temperature.

1. 서 론

최근 공업기술이 급격하게 발달함에 따라서 기계 구조재료의 사용 조건이 대단히 다양해졌고 이러한 다양한 조건에서 사용하는 기회가 많아졌다. 특히 최첨단 산업이나 우주항공산업에 있어서는 우주왕복기나 초고속 항공기의 개발에 동반하여 구조재료의 표면이 수천도의

고온에서 견뎌야하는 상황에 이르게 된다. 이에 따라서 초고온의 온도하에서 구조재료를 사용할 때는 그 변형을이나 응력상태를 아는 것이 대단히 중요한 일이다.

그럼에도 불구하고 이러한 초고온하에서의 결정적인 변위측정법은 아직 확립되지 못하고 있는 형편이다. 고온하에서의 변위측정법으로는 일반적으로 알고 있는 방법으로 고온 스트레인 게이지를 사용하는 스트레인 게이

* 조선대학교 기계설계공학(정회원)

** 조선대학교 대학원

지 방법이나 내열격자를 사용하는 모아레법⁽¹⁾ 등이 있다.

이러한 것들로 측정할 때는 피 측정물의 표면에 직접 접촉하여 측정하지 않으면 안된다는 결점이 있기 때문에 초고온하에서는 사용이 곤란하게 된다. 이러한 점에 대하여 레이저 스펙클을 이용하는 변위측정법은 상기의 방법에서처럼 직접 피 측정물에 접촉하지 않고 비접촉으로 측정하여 측정표면의 경향을 정보로 나타내어 측정할 수 있다는 잇점을 가지고 있다. 그래서 고온하의 측정법에 있어서는 레이저 스펙클을 이용하는 것이 대단히 유용성이 있으며 쓸만한 방법이라고 생각한다.

지금까지의 연구로는 스펙클 상관 간섭법^(2,3)을 이용하여 Chiang⁽⁴⁾ 등이 468°C까지의 면내 변위측정 하였고 그 이후 Goodman⁽⁵⁾은 스펙클 상관법을 이용하여 등변위 줄무늬를 해석하였다.

또한 최근에는 스펙클 포토그래피법을 이용해서 角⁽⁶⁾, Groh⁽⁷⁾ 등이 레이저를 이용한 응용계측을 해 왔고 특히 金⁽⁸⁾ 등은 1000°C 이상의 고온에서의 계측이 가능함을 확인한 바가 있다.

본 연구실에서도 레이저 스펙클을 이용한 스펙클 사진법으로 1000°C 이상의 고온하에서 면내 변위의 측정이 가능함을 보였다.⁽⁸⁾ 그러나 이 방법은 면외에도 동시에 변형을 일으키는 경우에는 측정이 곤란하며 또한 전체적인 변위성분을 알기 위해서는 많은 점들을 해석하지 않으면 안된다는 결점이 있었다.

그래서 본 연구에서는 면의 변형에 강하고 직접변위 분포를 알 수 있는 ESPI(Electronic Speckle-Pattern Interferometry : 스펙클 패턴 간섭법) 법⁽⁹⁾을 이용하여 고온하에서 면내 변위, 열변형을 및 열응력등을 연구하기 위해 특수강인 INCONEL601을 시험편으로 사용하여 지금까지 측정이 불가능한 1200°C까지의 열팽창계수를 측정하고 이미 발표된 데이터(Data)와 비교하며 그때 생기는 여러가지 문제점을 규명하고 그 측정한계를 조사하는데 이 연구의 목적을 두었다.

2. 레이저 스펙클 상관 간섭법

금속의 조면, 불투명유리 또는 종이 등의 확산 반사면에 레이저(Laser)광을 조사하면 확산광 가운데 또는 그 상 가운데 보통의 광에서는 볼 수 없는 반점 모양의 형태가 나타나게 되며 이것을 관찰한다.

이 모양은 랜덤(Random)한 간섭에 의해서 생성된

다. 이렇게 생성된 스펙클 상관 간섭에 반사면의 정보가 포함되어 있고 반사면의 변형 전후의 상관을 서로 간섭시킴으로써 면내 변위를 알 수 있다.

2.1 기본 광학계

Fig. 1은 스펙클 상관 간섭법의 광학계를 나타낸다. 두개의 레이저광 1, 2를 같은 각도 θ 로 측정면에 조사한다.

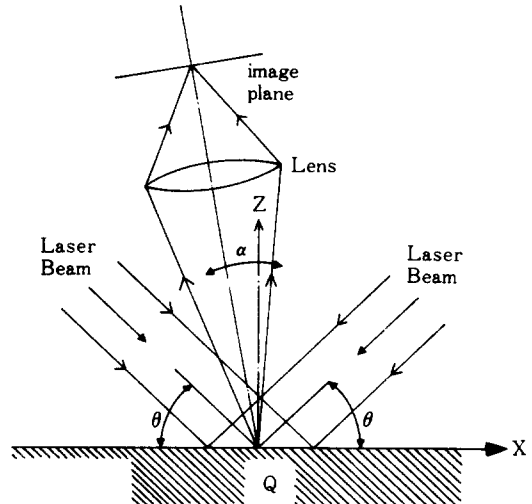


Fig. 1 The basic optical system of speckle-pattern interferometry system

레이저광을 조사한 면을 렌즈에 의해 像面上에 결상한다. 이 때 2개의 레이저광을 포함한 면과 측정면과의 교선방향 즉 그림에서 X축 방향이 변위를 측정하는 방향이 된다. α 는 관측 방향과 Z축과의 이루는 각이다.

한쪽 방향의 레이저광에 의해서도 상면에 스펙클 相關이 결상 되어지지만 2개의 광 각각의 스펙클 상관에 의해서 새로운 상관이 발생하게 된다. 이 스펙클 相關의 강도는 2개의 스펙클 相關의 간섭에 의해서 결정된다. 따라서 한쪽 방향의 光束을 物體光이라 생각하면 다른쪽 방향의 광속은 參照光과 같은 역할을 하게 된다.

다음의 Fig. 2에서와 같이 측정면상의 한 점Q가 일반적으로 변위 d 만큼 변화할 때의 변위를 생각해 보자.

u 는 변위 d 의 X방향성분 w 는 Z방향의 성분이다. 이때 광속 l 과 관측 방향으로부터 광로의 변화량 L_1 는

$$L_1 = u \cos\theta + u \sin\theta + w \sin\theta + w \cos\theta \dots\dots(2-1)$$

로 나타낼 수 있다.

같은 방식으로 광속2와 관측 방향으로부터 광로의 변화량 L_2 는

$$L_2 = -u \cos\theta + u \sin\alpha + w \sin\theta + w \cos\alpha \dots\dots(2-2)$$

로 나타낼 수 있다.

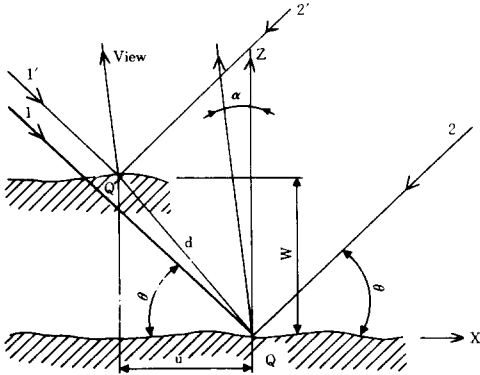


Fig.2 The relationships between displacement and optical path

한쪽 방향의 레이저 광속은 다른쪽 방향의 참조광과 작용하게 되고 줄무늬의 명암은 L_1 과 L_2 와 차이에 의해서 결정된다. 줄무늬의 차수를 n 이라하면

$$L_1 - L_2 = 2u \cos\theta = n\lambda \dots\dots\dots(2-3)$$

가 된다.

식2-3으로부터 줄무늬의 명암은 면의 변형 w 과 관측 방향 α 와는 무관하며 면내 변위 u 는 그 자체에 의존하여 나타나게 된다.

이때 면내 변위 u 는

$$u = n\lambda / (2 \cos\theta) \dots\dots\dots(2-4)$$

로 되어 줄무늬 밝기의 차수(n)에 비례한다. 이상에 의해서 X방향의 등변위 줄무늬를 얻을 수가 있다. 上記의 2광속을 포함한 면과 물체 표면과 이루는 교선 방향을 변화시킴에 의해서 임의 방향의 등변위 줄무늬를 얻을 수 있다.

3. 광학계 및 해석계

TV 카메라를 이용한 스페클 相關 간섭법을 고온하에

서 변위측정에 사용할 때의 문제점을 밝힌다. 광학계는 2장에서 설명한 바와 같은 것을 사용하였고 여기에서는 광학계의 배치와 해석계의 화상처리장치에 대해서 언급하며 본 실험에 사용된 레이저는 CW-Ar 레이저이고, 출력은 0.3W, 파장은 $5145\mu\text{m}$ 이며, 전류는 24A이다.

3.1 광학계의 배치

본 실험의 실험장치를 Photo.1에 나타내고 본 실험에서 사용된 광학계의 배치를 Fig.3에 나타내었다. 이것을 광학계를 바로 위에서 보는 평면도를 그린 것이다. 밀러 2와 밀러 4는 상하로 배치되어 있고 상하로부터 각각 같은 각도로 시험편에 照射된다. 광원으로부터 나온 레이저는 빔 스플리터를 통과하면서 두개의 광원으로 나뉜다. 이 두개의 광원은 각각 밀러와 렌즈를 통과하여 시험편까지 가게된다. 시험편에 도달한 두 광원은 상하로 배치되어 있어 이 두 광원의 간섭현상이 일어나게 된다. 빔 스플리터로부터 시험편까지 가는 2개의 광로는 거의 같도록 배치해야 한다. 또한 두 광속의 광량은 ND 필터(ND Filter)를 사용하여 두 광량이 같아질 수 있도록 조절하여야 하는데 두 광량의 조절은 시험편 앞에 흰 종이를 배치하여 시각으로 두개의 광원의 밝기가 같도록 ND 필터를 조절하게 된다.

광량과 광로의 길이는 비례하므로 빔 스플리터로부터 시험편까지의 각기구의 놓임위치는 줄을 띄워 빔 스플리터에 의하여 나누어진 광로의 길이가 같도록 조절한다. 그렇게 배치함으로써 명암이 선명한 줄무늬를 얻을 수 있다.

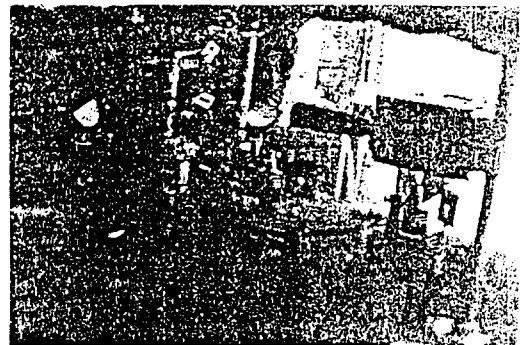


Photo.1 The experimental apparatus of laser speckle-pattern interferometry system

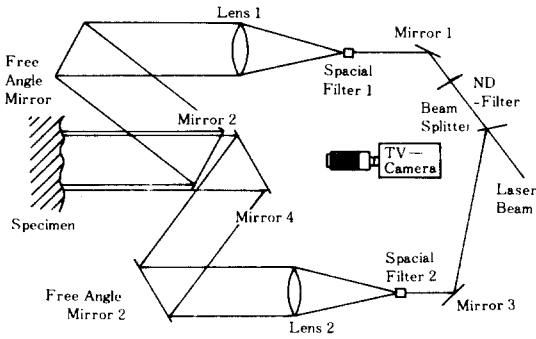


Fig. 3 The optical system

3.2 화상처리장치

본 실험에서는 변형 전후의 스펙클 相關을 간접시켜 해석하기 위하여 화상처리장치(NEXUS사 제품 QUBE)를 사용하였다. Fig. 4와 Photo. 2에 그 화상처리장치를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 측정면의 2방향에서 레이저광을 照射하고 그것에 의하여 생기는 스펙클 상관을 해상도가 640×560인 TV 카메라로 촬영하고 이것을 각 書素로부터 256階條의 2차원 디지털 화상데이터로 화상처리장치의 메모리에 수록한다.

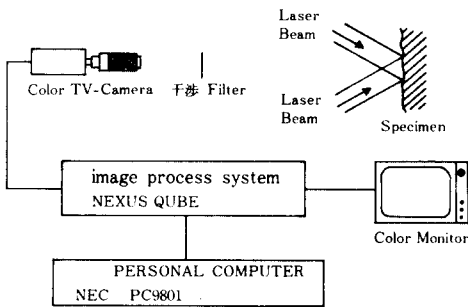


Fig. 4 The composition of image process apparatus

TV line number 단위로 메모리에 수록된 줄무늬를 미터계로 환산하기 위해 최초 시험편에 스케일을 부착하고 TV 카메라로 촬영하여 만들어진 기준화상과 연결된 TV 카메라로부터 차례로 보내오는 각 온도에서의 변환된 화상을 각각 감산하고 그 절대값을 표시한 것에 의하여 미세하게 변화된 줄무늬를 약 1/4초 찍는 것의 대부분을 리얼타임으로 보는 것이 좋다. 최초의 온도에서부터 온도를 올려가며 간섭줄무늬를 찍히게 되고 TV 카메

라에 나타난 간섭줄무늬를 실시간으로 보아서 이것으로부터 간섭줄무늬가 양호한 것을 Floppy-disk에 수록한다. 이 데이터 처리 장치는 NEXUS사에서 나온 QUBE를 사용하였다.

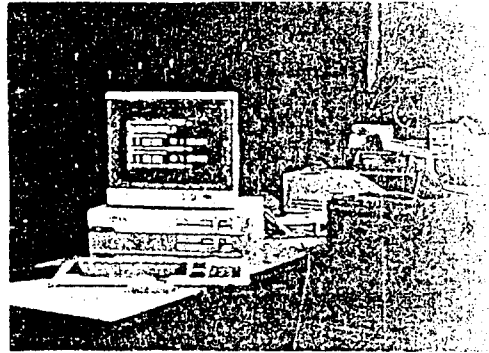


Photo. 2 The system of image process apparatus

4. 열팽창계수 측정실험의 문제점

대기중에서 열팽창계수를 측정하는 경우는 아래와 같다. 대부분 크게 4가지의 문제점이 있다는 것을 예상할 수 있다.

1. 空氣搖亂의 영향
2. 고온하에서 시험편의 적열에 의한 스펙클 可視度 저하
3. 시험편의 산화에 의한 스펙클의 相關저하
4. 온도의 변동

이런 문제점들이 예상되어서 이런 문제점들을 개선하여 실험하기 위해서 여러가지 면에서 검토했다. 스펙클 相關 간섭법의 큰 문제점 중의 하나는 空氣搖亂의 영향이다. 실재로 약 700℃를 지나면 과열되어서 Speckle의 흔들림이 관찰되고 그로 인해서 간섭 줄무늬가 흔들리게 된다.

이럴 때의 대책으로서는 진공조를 이용하여 진공상태에서 측정을 하게 되는데 본 실험에서는 특히 리얼타임에 의해 간섭 줄무늬를 보는 것이므로 줄무늬의 상태가 좋은 때에 측정하는 것이 좋다. 또한 스펙클 상관을 이용한 변위측정법은 변형 전후 스펙클의 相關을 보호하는 것이 측정의 절대적인 조건이다. 특히 스펙클 相關 간섭법은 스펙클 크기 이하의 대단히 작은 변위량을 측정하기 때문에 세심한 주의를 요한다. 시험편의

표면 性状, 다시 말해서 표면 산화정도에 따라 스펙클의 가시도가 크게 차이가 나는 것은 말할 것도 없고 그것보다도 변형 전후 상태간에 산화가 진행된 것에 의해서 변형 전후의 스펙클 相關이 좋지 않게 되고 줄무늬의 방향이 큰 문제가 된다. 그래서 위와같은 영향을 최소화 시킬 수 있는 내산화성 재료인 INCONEL 601을 시험편으로 사용하면 좋다. 시험편의 온도가 630°C를 넘어서면서 부터 시험편의 적열이 시작되고 그 때문에 스펙클의 可視度가 상대적으로 떨어지므로 모노크롬 카메라를 사용하는 경우는 약 900°C 이상의 초고온의 스펙클에서도 背景放射가 강하게 나타난다. 그래서 간섭 줄무늬를 얻지 못하게 된다. 측정을 하고 있는 사이에도 온도는 끊임없이 변동한다. 같은 온도의 변동에는 주된 원인이 두 가지로 생각된다.

첫째는 시험편의 가열에 사용되는 전압변동 때문이다. 이에 대한 대책으로는 전압의 변동이 적고 안정된 전압을 내는 변압기를 사용하는 것이 좋으나 그러한 변압기는 일반적으로 고가이다.

둘째는 공기의 요란에 의해서이다. 시험편의 가열됨에 따라 주변에서 대류가 발생하고 온도가 낮은 공기가 시험편의 열을 빼앗게 된다. 이에 대한 대책으로는 시험편의 두께를 두껍게 하여 열용량을 크게 하는 것 등을 생각해 볼 수 있다. 그러나 가열시키는 通電系의 용량에도 한계가 있다. 그래서 시험편의 두께가 너무 두꺼운 것은 좋지 않다. 그렇기 때문에 될 수 있는 한 비저항이 큰 재료를 사용하고 가능한 한도 내에서 관두께의 두께를 최대한 두껍게 하는 것이 좋다.

5. 열팽창계수 측정실험의 방법과 장치

본 실험은 스펙클 相關 간섭법을 이용하여 고온하에서 열팽창계수 측정실험을 하고 그때 생기는 여러가지 문제점을 밝히고 그 문제점의 해결책을 검토하는 것을 목적으로 했다. 그래서 여기에서는 가장 단순하게 한 방향으로 같은 변위를 일으키는 경우를 측정하여 그때 얻은 등변위 줄무늬로부터 변위를 측정하고 열팽창계수를 측정, 검토하였다.

5.1 실험방법

본 실험에 사용된 시험편 고정장치를 Fig. 5와 Photo. 3에 나타내었다. 시험편은 2개를 대칭으로 놓고 그림과 같이 시험편 상부를 고정하고 수평면에 연직하방

으로는 자유롭게 늘어날 수 있도록 설치하였다. 시험편의 하부에는 자중에 의하여 저절로 늘어나는 것을 방지하기 위하여 선형 볼 베어링장치(Linear-Ball Bearing)을 장치하였다.

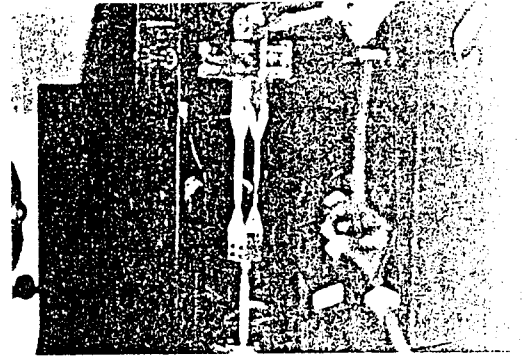


Photo. 3 The fixed specimen

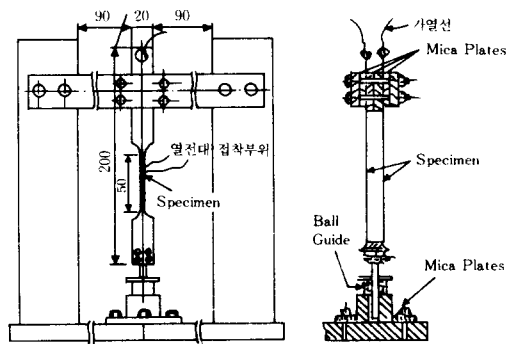


Fig. 5 The fixing and heating device of specimen

시험편의 가열은 직접 시험편에 通電함으로써 가열하고 이렇게 함으로써 시험편은 자유 열팽창하게 되고 연직하방으로 변위가 생기게 된다. 따라서 상하방향으로 같은 각도로 2개의 光束을 照射함으로써 시험편의 길이 방향 변위의 등변위 줄무늬를 얻을 수 있다. 측정부의 온도분포가 거의 같다고 한다면 이 등변위 줄무늬는 X축에 평행한 등 간격의 줄무늬가 되며 범용화상처리 프로그램에 의해 TV에서의 스케일의 길이 a 를 구한다.

(K : 스케일 길이, a : TV에서의 스케일 길이, TV : TV에서의 줄무늬간격, d : 줄무늬의 실제간격)

열을 가함에 따라 시험편은 팽창하게 되고 이 팽창의 정도와 줄무늬의 간격의 변화가 비례하므로 이 등변위 줄무늬의 간격으로부터 열팽창계수를 다음과 같이 계산해 낼 수 있다.

(2-4) 식에서 줄무늬 한개의 변위 $u = \lambda / (2\cos\theta)$ 이고, 모니터 상의 시험편 전체길이를 L 이라 하고, TV에서의 스케일의 길이, 두 줄무늬 사이의 간격은 a 이므로 전체 변위량 $\Delta L = L \cdot u/a$ 이다.

$$\text{변형률 } \epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L \cdot u}{L} \cdot \frac{1}{d} = \frac{u}{d} = \alpha \cdot \Delta T \text{ 이므로}$$

구하는 열팽창계수 $\alpha = \frac{\epsilon}{\Delta T} = \frac{u}{d} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{\lambda}{\alpha \cdot \Delta T \cdot 2\cos\theta}$ 이다.

이렇게 측정된 열팽창계수와 이미 측정된 열팽창계수를 비교하므로써 이 실험의 정도를 평가하였다.

5.2 시험편

본 실험의 제1장에서도 기술한 바와 같이 특별히 800℃ 이상의 초고온에서의 열팽창계수를 측정을 하려고 한다. 이렇게 하기 위해서 시험편의 재질로는 높은 온도에서도 성질이 안정된 것을 사용하려 한다. 그래서 본 실험에서는 INCONEL 601을 시험편으로 사용하고 시험편에 직접 통전함으로써 시험편에 열을 가하였다. 그러므로 시험편의 저항치를 높이기 위해 시험편의 형상을 Fig. 6과 같이 하였다. 고온하의 측정에 있어서는

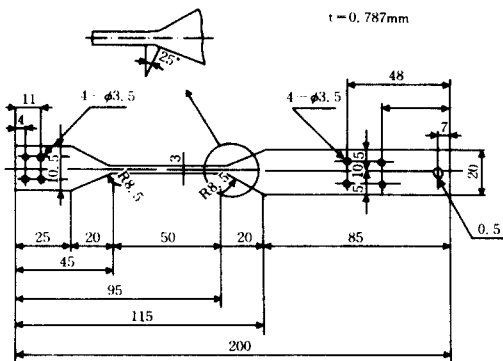


Fig. 6 The specimen configuration for measurement of thermal expansion coefficient

空氣搖亂과 함께 시험편이 산화되고 서로 轉移를 일으키는 것에 의한 영향이 예상된다. 그러므로 본 연구에서는 이 산화에 대한 영향을 줄이기 위해 Table 2, 3에서 보는 바와 같이 1200℃ 이상에서도 내산화성이 높은 재료인 INCONEL 601을 사용하여 실험했다. Table 1은 INCONEL 601은 물성치로서 우수한 고온 특성을 가지며 상온에서 약 1301℃~1368℃의 용점까지

내열성, 내산화성이 강하여 성질이 안정되고 상전이를 일으키지 않는다. Table 2는 실험에 사용한 시험편 INCONEL 601의 화학적 성분으로서 Cr~Ni 합금강이며, Table 3은 시험편 INCONEL 601의 상온에서 1033℃까지의 열팽창계수 DATA로써 일본의 INCONEL 합금 제작사인 NILACO 사의 DATA에서 발췌하였다.

Table 1. The characteristic chart of INCONEL 601

Specific Heat	0.106cal/℃
Density	8420kg/m ³
Melting Point Range	1301~1368℃
Electrical Resistivity	118.0μΩ-cm
Young's Modulus	21000Mpa

Table 2. The chemical composition of INCONEL 601

	Ni	Cr	Al	C	Mn	S	Si	Cu
%	58.0	21.0	1.0	0.10	1.0	0.015	0.50	1.0
	~63.0	~25.0	~1.7	~max	~max	~max	~max	~max

Table 3. The coefficient of thermal expansion of the INCONEL 601

℃	21	93	260	538	816	1033
× 10 ⁻⁶	-	13.7	14.6	15.3	16.7	18.4

5.3 온도의 측정

변압기의 허용 전류는 모두 100A이며 여기에 사용되는 전기케이블(120V 정격 Cable)도 허용 전류의 크기에 맞는 正格을 사용한다. 이렇게 함으로써 비저항이 적은 재료나 판두께가 두꺼운 시험편도 1000℃ 이상의 초고온으로 가열하는 것이 가능하다.

본 실험에서 온도의 측정은 모두 열전대를 사용했다. 시험편 측정부 중앙의 안쪽에 열전대를 용접하고 그것을 디지털 온도계에 연결하여 온도를 측정한다. 이 실험에 사용된 열전대는 직경 0.1mm의 C-A 열전대이다.

5.4 통전계

스펙클 相關 간섭법에서는 측정 변위량이 대단히 미소하므로 시험편의 열팽창으로 일어나는 변위량도 크게 되면 않된다. 그렇기 때문에 시험편에 나타난 변형 전후의 온도차도 크면 않된다. 본 실험에서는 직접 통전함

으로서 시험편을 가열시키기 때문에 시험편의 전기저항치를 알맞게 조절하기 위해서는 매우 미세하게 변압기를 조절해야 한다. 본 실험에 있어서는 Fig. 7에 보는 바와 같이 변압기 2개를 직렬로 연결해 사용한다. 변압기 1에서는 전압을 10A로 고정하고 변압기 2를 미세하게 올림으로써 변압기를 1개 사용할 보다 더욱 세밀하게 전압을 조절하는 것이 가능해졌다. 변압기의 허용 전류는 모두 100A이며 여기에 사용되는 전기케이블도 허용 전류의 크기에 맞는 정격(120V 정격 Cable)을 사용한다.

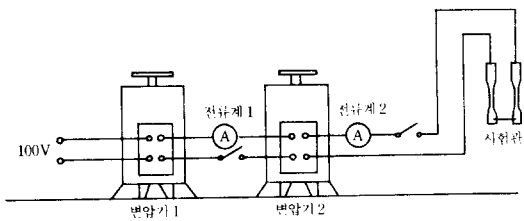


Fig. 7 A resistanced system

6. 열팽창계수 측정실험의 결과 및 고찰

스펙틀 相關 간섭법을 이용한 고온하에서 변위를 측정할 때는 크게 3가지의 문제점이 생긴다는 것을 예상할 수 있었다.

주위의 放射에 의한 영향에 대해서는 간섭 필터를 사용함으로써 상당한 영향을 줄일 수가 있었다. 실제 본 실험에서는 간섭 필터를 사용함으로써 1000°C 이상의 면내 변위를 측정을 하는 것이 용이했다. 背景放射에 대해서 확실하게 주장할 수 있는 것은 1000°C 이상의 고온에서도 비접촉으로 변위측정이 가능하므로 고온에서의 변위측정의 가능성을 높였다고 하는 것이다. 그러나 역시 고온에 올라가면 가장 크게 실험을 방해하는 것은 공기의 擾亂에 의한 것이었다.

온도가 높아질수록 공기의 擾亂에 의해 시험편의 온도가 절대적으로 변동하기 때문에 분명한 줄무늬를 얻기가 곤란하였다. 또한 시험편 표면의 산화에 대한 영향은 공기중에서 실험을 하는한 어쩔 수 없었다. 그리고 이것은 레이저 스펙틀을 이용한 변위측정에 있어서는 치명적인 문제이다. 이 산화를 어떤 방법으로든 없애지 않는 한 이 이상의 고온에서는 측정이 불가능하다고 사료된다. 초고온에서는 시험편의 적열에 의한 背景의 放

射가 커지고 스펙틀을 확실하게 볼 수 없게 된다. 그러므로 고온에서 측정하기 위해서는 다음과 같은 대책을 세워야 한다.

6. 1.1 TV 카메라에 의한 대책

본 실험에서는 새로운 칼라의 화상처리를 얻을 수 있는 화상처리장치를 사용하므로 레이저광의 과장을 可視 영역인 녹색으로 되게하여 背景放射의 영향을 줄였다. 다시 말해서 칼라 카메라를 사용하여 스펙틀을 받아서 보낼 때 그 화상에서 적색과 청색성분을 버리고 녹색성분만을 사용함으로써 레이저 과장 부근의 빛만을 얻을 수 있다. 본 실험에 사용한 칼라 카메라는 일본제 품인 FP-C1H(HITACH)이다. 이 카메라의 분광감도 특성을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 칼라 TV 카메라는 녹색(G), 적색(R), 청색(B)의 3원색의 조합으로 이루어지는데 3가지색이 분리되는 상한선을 Ar-레이저 과장부인 녹색의 분광감도 특성과 CCD (Charge Couple Device) 라인의 분광감도 특성이 거의 일치하므로 배경방사를 줄이기 위하여 녹색만을 취하였다.

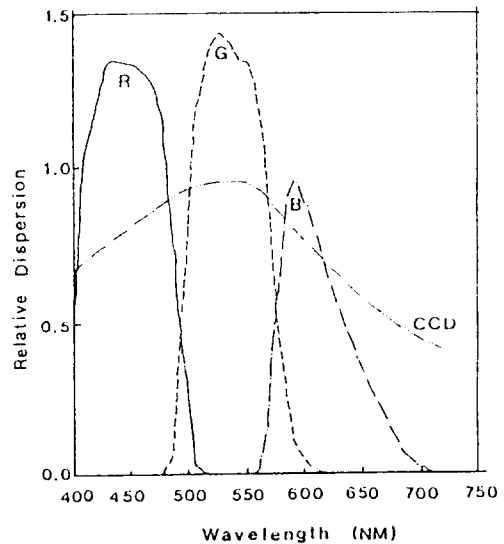


Fig. 8 The characteristics of spectrum sensitivity of color camera

6. 1.2 간섭 필터(Filter)에 의한 대책

앞에 기술한 칼라 카메라를 사용하는 방법에서는 레이저의 과장부분 이외 부분은 버리는데 줄무늬의 과장영

역이 넓기 때문에 적열이 계속되면 줄무늬마다 파장이 짧은 영역의 背景放射가 증가하게 되고 레이저 파장부근의 背景放射에 의해서 전파 같이 스펙클의 可視도가 떨어지게 된다. 그래서 이러한 높은 온도에서 측정을 하기 위해서는 간섭 필터(Filter)를 사용해야 한다.

간섭 필터는 굴절율이 틀린 물체를 여러개 겹쳐서 특정한 파장만을 투과시키는 것이다. 간섭 필터의 특성을 Fig.9에 나타내었다. 본 실험에서 사용한 간섭 필터는 Ar-레이저 파장영역인 녹색부의 파장영역과 일치하는 것을 사용하여 최대 투과율의 효과를 얻음으로써 본 실험의 간섭 필터의 효과는 앞서 설명한 칼라 카메라를 이용한 것과 비교하였을 때 10배 이상의 효과가 있다고 사료된다.

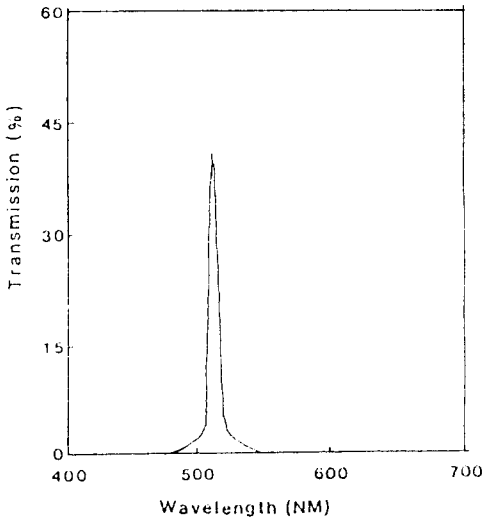


Fig.9 The characteristics of interference filter

6.1.3 효과의 비교

칼라 카메라를 사용하면 약 950°C 온도까지는 스펙클을 관찰하는 것이 가능했다. 그 이상의 온도에서는 背景放射가 크기 때문에 스펙클을 관찰하기가 대단히 어렵다. 그러나 간섭 필터를 사용하는 경우는 1000°C에서도 스펙클의 비교가 명확하여 그것을 관찰하기가 좋다. 그리고 輝度는 상당히 떨어지지만 간섭 줄무늬를 보는 것이나 콘트라스트는 그렇게 낮아지지는 않았다. 그렇기 때문에 공기揺亂의 영향을 상대적으로 크게 받게 된다. 그러나 어찌하든지 간섭 필터를 사용하는 것은 적어도 1200°C 정도의 온도에서도 스펙클의 관찰이 가능하다.

본 실험에서는 약 650°C 이상의 측정실험에서는 전체적으로 간섭 필터를 사용했다.

6.2 측정결과

간섭 줄무늬는 저온에서 보다는 고온으로 갈수록 줄무늬가 크게 비뚤어 지고 심하면 소멸하는 경우도 있다. 대기중에서 실험한 INCONEL 601의 비교적 안정된 줄무늬를 photo.4에 나타내었다.

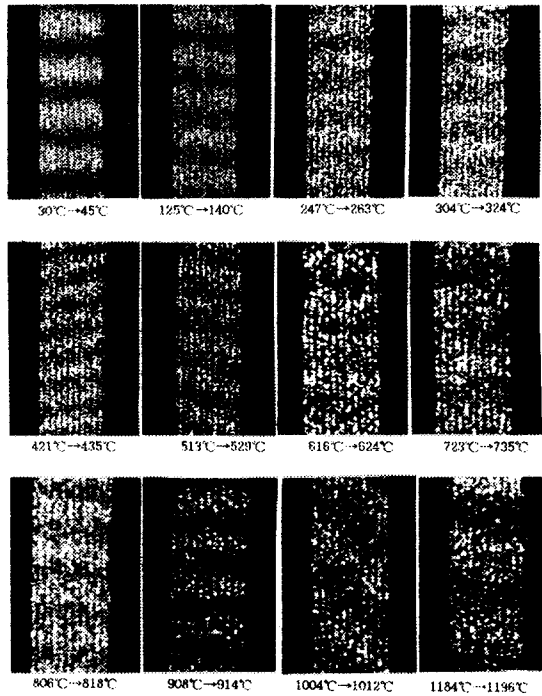


Photo.4 The image process fringe pattern obtained from speckle-pattern interferometry method

6.2.1 INCONEL 601의 실험결과

INCONEL은 1000°C 이상의 초고온에서도 대단히 내산화성이 높고 거의 산화되지 않았다. 그렇기 때문에 揺亂의 영향을 받지 않고 대단히 안정되게 측정할 수 있었다. 그 측정결과를 Table 4에 나타내었다. 디지털 온도계를 사용하여 나타낸 온도가 온도 1에서 온도 2까지 변화하게 되고 이때 변압기 1은 10A로 고정하고 변압기 2를 올려줌으로서 온도변화를 알 수가 있다. 이 데이터는 우리가 직접 관찰하여 기록하고 실제 스케

일 K와 $d=K \cdot TV/a$ 의 관계식에 의하여 줄무늬 간격이 구해진다. 그리고 그 결과의 그래프를 Fig.10에 나타내었고 Fig.10에서 나타낸 그래프는 Table 4를 앞에서 설명한 바 있는 줄무늬의 간격과 열팽창계수의 비례성을 수식화하여 데이터 처리할 수 있도록 되어있는 컴퓨터 프로그램에 입력하여 열팽창계수로서 얻어진 것이다.

이미 발표된 데이터는 일본 INCONEL 제작사인 NILACO사에서 모아레법에 얻은 데이터로서 700°C 정도까지는 거의 일치함을 알 수 있으나 그 이상의 온도에서는 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 니켈계 합금에 있어서 700°C 부근이 변태점으로서 700°C까지의 직선성이 갑자기 높이 올라가는 것을 알 수 있었다. INCONEL 합금의 재결정 온도 때문이라 사료되며 본 실험에서의 데이터는 온도보상이 필요없고 고온에서의 측정인 경우 비접촉으로 손쉽게 측정할 수 있는 유용한 방법이라 생각되며 정확한 데이터라 사료된다.

화상처리에 의한 줄무늬의 사진을 Photo.4에 나타내었다. 이 사진은 TV 화면상에 나타난 것을 카메라로 촬영하였고 사진상의 검게 표시된 부분이 줄무늬를 나타낸다. 30°C에서 45°C까지 온도변화를 주어 이때 두 레이저광의 간섭에 의하여 생기는 줄무늬 간격을 화상처리

프로그램에 의해 해석하고 5.1의 식에 의해 시험편에 생기는 열에 의한 변위를 알 수 있다.

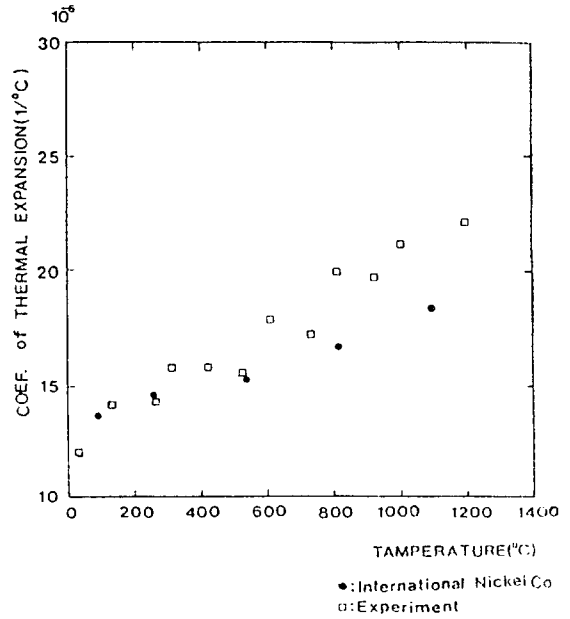


Fig.10 The thermal expansion coefficient of INCONEL 601 with temperature

Table 4. The measuring results of INCONEL 601

Temperature 1 (°C)	Current Transformer 1	Electric Current 1 (A)	Current Transformer 1	Electric Current 2 (A)	Temperature 2 (°C)	Current Transformer 1	Electric Current 1 (A)	Current Transformer 1	Electric Current 2 (A)	K=	Fringe Space
30	10	0	0	0	45	10	2	10	0	226	72.49557
125	10	0	18	0	140	10	2	20	2	262	62.53434
247	10	1	25	0	263	10	2	26	4	280	58.51428
304	10	2	28	5	324	10	2	28	5	390	42.01025
421	10	6	37	18	435	10	5	38	19	274	59.79560
513	10	10	39	20	529	10	10	39.5	20.5	309	53.02264
616	10	11	48	25	624	10	11	49	25	207	79.14975
723	10	20	57	30	735	10	20	58	31	294	55.72789
806	10	25	63	35	818	10	25	64	35	295	55.53897
908	10	32	71	41	914	10	32	71	42	205	79.92193
1004	10	40	79.5	49	1010	10	41	80	50	157	104.3566
1184	10	43	85	57	1196	10	43.5	86	58	296	55.32684

7. 결 론

CW 레이저에 의한 스페클 相關 간섭법으로 대기중 고온하에서 열팽창계수를 측정하는 경우 문제점 및 적용 한계 온도에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 사용된 CW 레이저 스페클 相關 간섭법인 비접촉 측정법으로 고온인 1100°C의 면내 변위 측정이 가능했다.
2. CW 레이저 스페클 相關 간섭법으로 측정된 INCONEL 시험편의 열팽창계수는 약 700°C까지는 이미 발표된 데이터와 잘 일치하므로 CW 레이저 스페클 相關 간섭법은 고온하의 비접촉 측정의 유용한 변위측정방법이라 사료된다.
3. 본 실험은 자동화 시스템에서 새로운 칼라 화상처리 장치를 사용함으로써 레이저광의 과장부근인 녹색성분의 빛을 사용함으로써 背景放射의 영향을 감소시킬 수 있으므로 정밀정확도 면에서 0.3%의 측정율로 측정이 우수함을 알 수 있었다.
4. 대기중 고온하에서 간섭 줄무늬의 측정은 공기요란과 시험편의 산화에 의한 문제점은 Ar-레이저 과장영역과 일치하는 간섭 필터를 사용하므로 약 1200°C까지는 간섭 줄무늬 측정이 가능함을 알 수 있었고 온도의 변동에 의한 문제점은 시험편을 최대한 사용 가능한 영역에서 두께 ($t=0.787mm$)를 두껍게 하고 내산화성 재료, 열용량이 큰 재료를 사용함으로써 어느정도 막을 수 있었다. 그러나 그 이상의 고온에서의 변위측정은 새로운 레이저 스페클 측정법의 개발이 필요하다.

後記 본 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성) 과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. O. J. Lokberg and J. T. Malmo, Deformation Measurements at Very High Temperatures by ESPI and Moire Methods Applied Optics, Vol. 1, No. 2, pp. 62~68, 1986.
2. 志自岐雄介, 스펙클패턴간섭法による高温下の變形測定 修士論文 九州大學, 1989.
3. 山口秀穂, 스펙클패턴간섭法を用いた高温下での面内變位測定に関する研究 修士論文 九州大學, 1990.
4. F. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty and J. Adachi, Thermal Strain Measurement by One-beam Laser Speckle Interferometry, Applied Optics 19(16), pp. 2701~2704, 1980.
5. Goodmann, J. W., Statistical Properties of Laser Speckle Pattern, Topics in Applied Physics, Vol. 9, pp. 876~879, 1975.
6. 角誠之助, 構造強度解析におけるレーザの應用, 日本抗空宇宙學會志, 第25卷, 第281號 pp. 259~268, 1977.
7. Groh, G., The Engineering Uses of Holography, edited by E. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge Univ. Press, pp. 483, 1970.
8. 金庚錫, CW-레이저 스페클 寫眞法에 의한 高温下에서의 面内 變位測定에 關한 研究, 博士論文 漢陽大學校, 1988.
9. O. J. Lokberg, J. T. Malmo and G. A. Slettemoen, Interferometric Measurements of High Temperature Objects by Electric Speckle Pattern Interferometry Applied Optics, Vol. 24, No. 19, pp. 3167~3172, 1985.