

본 연구는 1989년 문교부 학술연구 조성비의 지원을 받아
 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

연속파 레이저 스페클 寫眞法과 畫像處理에 의한 面內變位 測定에 관한 研究

김 경 석* · 나 기 대* · 김 택 현* · 정 낙 규* · 김 충 원**

A Study of Measurement of In-plane Displacement by CW Laser Speckle Photography and Image Processing

K. S. Kim, G. D. Na, T. H. Kim and N. K. Chung, C. W. Kim

Abstract This paper presents experimental results which explore the capability of a CW laser speckle photography for the measurement of in-plane displacement at high temperature. The serious restrictions on the application of the method seem to be the ambient air turbulence and the change of surface texture caused by the oxidation, as they tend to decorrelate the double exposed speckle patterns. In order to assess only the effect of air turbulence, a ceramics-coated stainless steel plate is heated in air and Ar-laser specklegrams are made with combination of temperature and lateral translation displacement. The slight reduction in visibility of Young's fringes is observed at 1000°C. The analyses of Young's fringes are carried out by a image processing system using a TV-camera and computers, and the result agrees well with the micrometer reading. Futhermore, uncoated stainless steel and Hastelloy X plates are tested and the effect of oxidation is also evaluated. The experimental results demonstrate that a CW laser speckle photography is applicable at temperatures up to 1000°C.

1. 서 론

最近 Laser Speckle에 의한 새로운 計測이 여러 분야에서 시행되고 있다. 그중에서 面內變位の 測定法으로서 대표적인 것에 Speckle 寫眞法이 있다. 非接觸測定の 이점을 살려 高溫下의 測定에 適用할 수 있다.^{2, 3)}

본 논문은 高溫下에서 또한 대기중에서 面內變位測定에 대한 Continuous Wave Laser Speckle 寫眞法의¹⁾ 가능성을 연구하기 위하여 高溫下에서의 문제점 및 適用限界溫度에 대하여 검토하였다. 表面酸化의 影響을 방지하기 위하여 세라믹 코우팅을 하였고 이 코우팅을 한 스텐레스강 平板을 판넬형의 히터로서 加熱하여 剛體移動變位를 주어 Young의 줄무늬로 解析하

* 朝鮮大學校 工科大學 機械設計工學科

** 朝鮮大學校 工科大學 컴퓨터工學科

접수 : 1990년 2월 21일

였다. 1000°C에서 그 可視度는 약간 저하했지만 TV 카메라와 계산기를 사용한 畫像解析시스템에 의하여 구한 變位는 마이크로미터로 준 變位와 잘 일치하였다. 따라서 空氣搖亂의 影響이 1000°C 程度의 溫度까지는 적다는 것이 밝혀졌다.

다음에 粗面 그대로인 스텐레스강판에 대하여 똑같은 實驗을 하였다. 그 結果 1000°C에서는 약간 Young의 줄무늬의 可視度는 저하하지만 測定한 變位의 精밀정확도는 양호하였다. 더우기 粗面の Hastelloy-x를 이용하여 實驗한 結果 酸化의 影響에 의하여 Young의 줄무늬 可視度가 저하하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 따라 表面酸化를 방지하든지 또는 酸化의 程度가 일정하다면 종래에 전혀 보고되지 않은 1000°C라 하는 高溫度까지 연속과 Laser Speckle 寫眞法을 適用하여 스트레인 測定을 할 수 있다는 것을 알았으므로 粗面 그대로의 스텐레스강 STS430을 熱膨脹시켜 실제로 그 熱스트레인을 測定하였다. 그 結果 公表된 데이터와 거의 일치하고 있음을 알았다. 따라서 종래의 方法에서는 전혀 測定할 수 없었던 1000°C 程度의 高溫度에 있어서도 CW레이저를 사용한 Speckle 寫眞法에 의한 스트레인 測定이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

2. 레이저 스페클 寫眞法의 原理

줄무늬 모양은 이동된 스페클이 二重슬릿으로 되기 때문에 발생하는 것으로 일종의 Young의 줄무늬라고 말할 수 있다.

이 Young의 줄무늬의 발생원리는 Fig. 1과 같이 1개의 슬릿 S로 부터 나온 光이 二重슬릿 S₁, S₂로 갈라져 통과하면 뒷면의 스크린 위에 줄무늬가 형성된다. 이것을 Young의 줄무늬라 한다. 이것이 스페클을 이용한 面內變位측정의 原理가 된다. SS₁=SS₂이라면 S₁과 S₂를 동시에 통과한 2개의 光은 位相이 같다. 또 스크린이 二重슬릿에서 충분히 떨어져 있으면 S₁과 S₂로 부터 나온 光의 진폭은 스크린의 入口의 점에서 같다고 보면 된다.

이러한 光波를

$$\xi_1 = a \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}r_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$\xi_2 = a \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}r_2)$$

로 한다. 이러한 光을 합성하면

$$\xi = \xi_1 + \xi_2$$

$$2a \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} \sin \{ \omega t - \frac{\pi(r_1 + r_2)}{\lambda} \} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{합성진폭 } A_2 = | 2a \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} | \dots\dots\dots (3)$$

은 m=0, ±1, ±2, …… 로 할 때 π(r₁-r₂)/λ=mπ에서 진폭이 가장 크고, π(r₁-r₂)/λ = (2m+1)π/2에서는 0이다. 그러나 이러한 위치는 공간적으로 일정한 軌跡을 만든다.

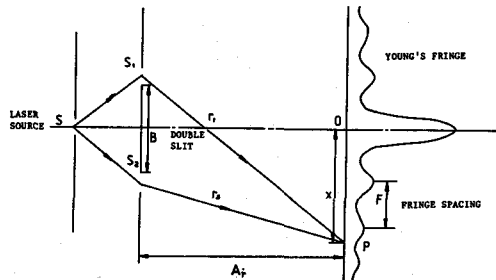


Fig. 1 Geometry of Young's fringes produced by double slit speckles.

Fig. 1에서 S₁S₂의 수직이등분선과 스크린과의 교점을 O, 그리고 S₁S₂면과 스크린과의 거리를 A_r, 또 S₁S₂=B, OP=x로 하면,

$$r_1^2 = A_r^2 + (x + \frac{B}{2})^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$r_2^2 = A_r^2 + (x - \frac{B}{2})^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\therefore r_1^2 - r_2^2 = (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = 2Bx \dots\dots\dots (6)$$

B < A_r, x < A_r 라고 하면, r₁ + r₂ ≃ 2A_r 따라서 r₁ - r₂ = Bx/A_r로 쓸 수 있다.

$$\text{따라서 } \frac{Bx}{A_r} = m\lambda, x = \frac{m\lambda A_r}{B} \dots\dots\dots (7) \text{ (밝은 선)}$$

$$\frac{Bx}{A_r} = (2m+1) \frac{\lambda}{2}, x = (2m+1) \frac{\lambda A_r}{2B} \dots\dots\dots (8) \text{ (어두운 선)}$$

$$(m=0, \pm 1, \pm 2 \dots)$$

그러므로 줄무늬 間隔 F는

$$F = \frac{\lambda A_r}{B} \dots \dots \dots (9)$$

으로 표시된다.

이와 같이 乾板에 레이저 빔을 照射하면 變形前과 變形後의 스펙클이 각각 슬릿 S₁S₂의 역할로 줄무늬가 발생된다. 攝影배율을 M,

試驗片 표현상의 變位量을 D라고 하면 스펙클의 이동량(슬릿 間隔) B는

$$B = MD \dots \dots \dots (10)$$

로 주어진다. 이것을 (9)식에 대입하면

$$F = \frac{\lambda A_r}{MD}$$

$$\therefore D = \frac{\lambda A_r}{MF} \dots \dots \dots (11)$$

로 되며 이 식에 의하여 줄무늬 間隔 F를 測定하면 빔 지름내의 試驗片의 變位量 D를 구할 수 있다.

또 줄무늬 스펙클의 이동방향, 즉 物體面上의 점의 變位方向에 대하여 직각인 方向으로 나타나기 때문에 줄무늬의 傾斜를 測定하므로써 變位方向도 구할 수 있다. 다만 變位量은 絶對量이기 때문에 變位백터를 구하는 것은 불가능하다.(11)식은 레이저 빔 照射領域 내의 각 점의 平均變位를 말하는 것이다.

3. 實驗方法

우선 高溫下에서의 測定上 문제라고 생각되는 여러 종류의 사항을 검토하기 위하여 소정의 面內剛體變位를 주어, 面內剛體變位와 스펙클 寫眞法에 의하여 얻어진 變位量을 비교하는 기초실험을 하였다.

3-1. 試驗片

試驗片으로는 耐熱溫度가 높고 또 高溫, 즉 800°C 程度 이하의 溫度에서 사용되는 페라이트계 스테인레스강 STS430과 더욱 高溫영역까지 사용되는 니켈계의 耐熱合金 Hastelloy-x를 사용하였다. 스테인레스강

STS430과 耐熱合金 Hastelloy-x의 재료성분은 Table 1과 Table 2에 표시하였다.

Table 1. Chemical composition(wt. %) for STS 430

STS 430 Chemical Composition(wt. %)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.12	0.75	1.00	0.040	0.030	0.60	18.00	79.46

Table 2. Chemical composition(wt. %) for Hastelloy-x

Hastelloy-x Chemical Composition(wt. %).												
C	Cr	W	Mo	Mn	Si	P	S	B	La	Fe	Ni	Co
0.06	21.29	0.53	8.81	0.36	0.17	0.006	0.005	0.001	-	18.12	49.528	1.12

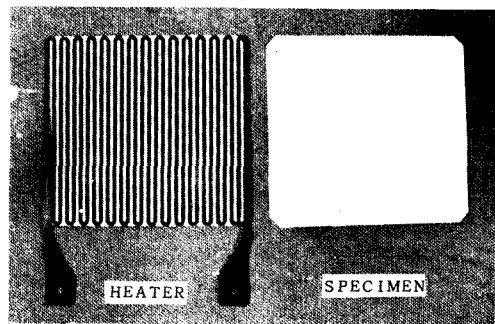
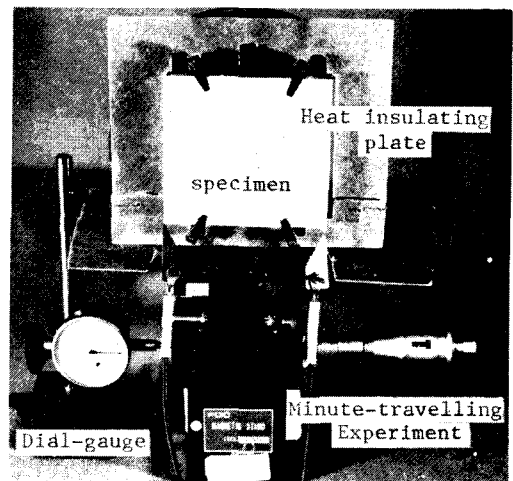


Fig. 2 A minute travelling experimental apparatus and specimen.

또한 Fig. 2에 표시한 것과 같은 형상으로 에칭(Etching) 가공에 의하여 제작된 두께 0.2mm의 니크롬제 판넬히터를 두장의 平板으로 겹쳐끼워서 試驗片으로 하였다. 平板의 치수는 가로 105mm, 세로 98mm로 두께는 STS430이 0.3mm, Hastelloy-x가 0.8mm이다. 또 니크롬 히터(Ni-Cr Heater)의 치수는 平板의 溫度分布가 가능한한 일정하도록 平板의 치수와 같도록 하였다.

히터와 접하는 平板의 內面은 어떠한 것도 전기적 絶緣을 위하여 Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 세라믹 코팅을 하였다. 또한 絶緣된 試驗片에 니크롬 히터를 끼워 슬라이더스로 부하電流를 변화시켜 試驗片을 각각의 높은 溫度까지 加熱하였다. 스테인레스 平板에서는 15A의 電流로써 1000°C 程度까지 加熱할 수 있었다. Fig. 3에 電流와 溫度와의 관계를 나타냈다.

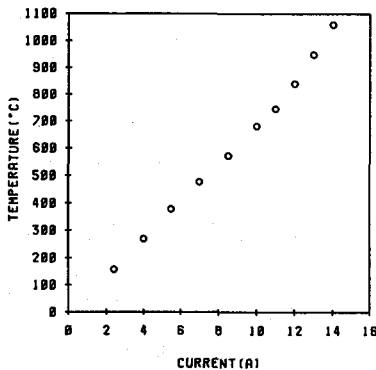


Fig. 3 Relationship between current and temperature in elevated temperature testing.

3-2. 實驗裝置

Fig. 4는 實驗裝置 전체의 概略圖이며 히터를 중간에 끼워 一體가 된 試驗片을 Fig. 2에 표시된 것 같이 마이크로메타(최소눈금 1/1000mm)가 붙은 微動裝置의 上部에 수직으로 달아서 面內剛體變位를 가한 前後의 二重露光 스페클그램(Specklegram)을 아르곤 레이저를 사용하여 Agfa-Gevaert 10E56의 乾板에 攝影기록하였다. 加熱된 시험체로부터 微動裝置로의 열전달은 이들 사이의 가늘고 긴 피스를 이용하여 연결하므로써, 또 熱輻射는 열차단판으로써 방지하였다. 시험체 平板의 溫度分布測定으로는 赤外線放射溫度計

를 이용하였다. 面內剛體變位는 平板 중앙부에서 測定하였지만, 中央부근에 용접하여 붙인 크로멜-알멜 熱傳帶(C-A thermocouple)로써 그 점의 溫度를 測定함과 동시에 그 溫度로 부터 적외선 방사온도계에 필요한 방사율을 설정하였다.

二重露光 스페클그램에 레이저 빔을 照射하였을 때에 발생하는 Young의 줄무늬의 줄무늬 間隔과 줄무늬 方向으로 부터 面內變位내의 크기와 方向을 얻을 수가 있지만 그러한 것들을 程度 좋게 구하기 위하여 TV 카메라와 컴퓨터에 의한 2차원 畫像解析 시스템을 이용하였다.⁴⁾ 이 시스템의 概略圖를 Fig. 5에 표시하였다. 스페클그램에 레이저빔을 비치면, 스크린에 발생하는 Young의 줄무늬는 TV카메라를 통하여 컴퓨터에 보내져, 다음과 같은 순서로써 畫像處理되어 解析된다. 우선 變位의 方向 즉 줄무늬의 方向을 구하기 위하여 Young의 줄무늬 輝度分布를 임의의 方向으로 반복 합하여 일차원 輝度分析를 만든다. 이 輝度分布에서 인접점의 휘도와의 차를 제공하여 합한 것을 콘트라스트 평가량으로 하여, 이것이 최대가 되는 반복 합한 方向을 구하면 그 方向에 직교하는 方向으로서 變位 方向을 구할 수 있다.

Fig. 6이 700°C의 경우 畫像解析 結果의 예로써 Fig. 6(a)는 줄무늬 方向에 겹쳐서 합한 Young의 줄무늬 輝度分布를 나타냈고, Fig. 6(b)는 그 輝度分布의 power-spectrum을 FFT로 나타낸 것이다.

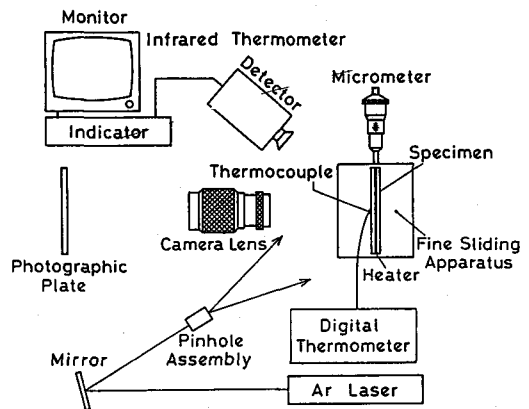


Fig. 4 Schematic diagram of rigid body translation test.

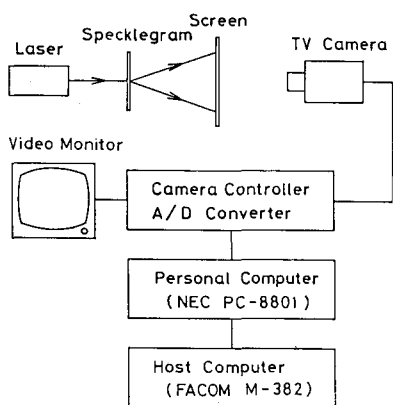


Fig. 5 Block diagram of image processing system.

이동으로서 乾板에 기록하기 때문에 스페클은 물체의 變形과 동시에 이동하는 것이다. 그러나 常溫에서 높은 溫度를 갖는 물체를 놓으면 물체와 주위공기와의 溫度差에 의하여 放熱되어 이 熱을 흡수한 공기는 上方向으로 흘러간다. 이 때문에 空氣搖亂이 발생하여 공기밀도가 변한다. 이것에 의하여 물체에 照射하고 反射하는 레이저光이 굴절을 일으켜 물체의 變形前後의 스페클 相關關係를 잃는다고 생각할 수 있다. 이것을 방지하는 方法으로써 眞空中에서 실험을 하는 方法이 있지만 일반적인방법은 아니다 따라서 眞空中에서 또는 高溫에서 스페클 寫眞法이 사용될 수 있는가 하는 것은 매우 흥미있는 것으로 사료된다.

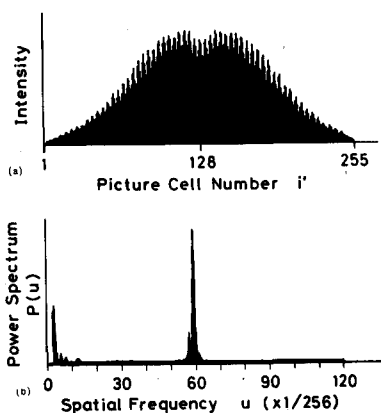


Fig. 6 Brightness distribution of Young's fringe and power spectrum in case that displacement is comparatively large.

3-3. 實驗結果와 考察

3-3-1. 高溫下에 있어서 스페클 寫眞法의 문제점
스페클 寫眞法을 高溫下에서 이용하는 데 문제로 되는 점은 크게 나누어 두가지이다. 한가지는 熱에 의한 空氣搖亂의 影響이며 또 하나는 試驗片의 표면상태의 변화의 影響이다.

3-3-1-1. 熱에 의한 空氣搖亂의 影響

스페클 寫眞法은 앞에서 설명한 바와 같이 물체의 變形을 變形前後의 스페클을 撮影하므로써 스페클의

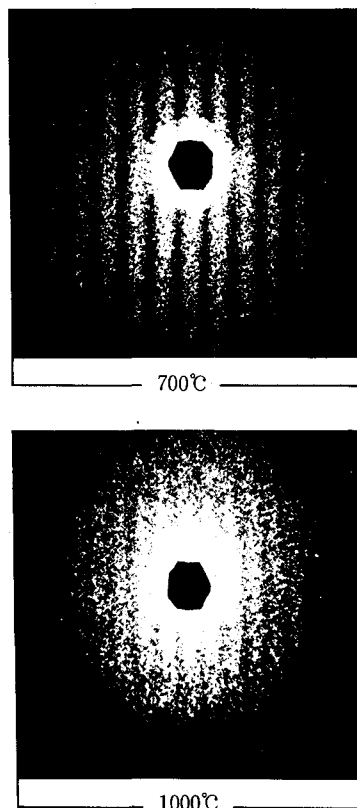


Fig. 7 Young's fringe obtained from Ar-Laser speckle photography on the surface of uncoated stainless steel(50µm).

3-3-1-2. 試驗片의 表面性狀變化의 影響

高溫이 되면 試驗片이 금속인 경우 酸化가 일어난다. 또 다른 물질에서도 용해 등의 화학변화를 일으키는 것을 생각할 수 있다. 이와 같이 試驗片의 表面이 二重露光사이에 변화를 일으키면 그것과 동시에 스펙클의 상태도 변하기 때문에 試驗片의 變形前後의 스펙클의 相關關係를 잃어 버린다. 이 影響을 없애기 위하여 表面을 무었인가로 코우팅을 하는 것이 바람직 하기 때문에 이것은 耐熱溫度가 높고 剝離하지 않는 測定 조건에 맞는 것을 신중히 선택할 필요가 있다.

3-3-1-3. 高溫下에서의 強體移動實驗의 結果

試驗片을 700°C 부터 1000°C 까지 각 溫度로 加熱한 후 所定의 양만큼 剛體移動變位를 가한 前後에서의 二重露光 스펙클그램을 撮影하였다. 이 경우 試驗溫度의 상승과 동시에 表面酸化의 程度가 심하게 變化된다고 생각되지만 試驗片은 상당히 빨강계 加熱되어 表面의 酸化程度를 정확히 觀察하는 것은 불가능하다. 실험종료후 常溫에서 觀察해 보면 表面은 黑炭色으로 變化되어 있다. Fig. 7은 實驗에서 얻은 Young의 줄무늬의 예를 나타낸 것으로서 1000°C에 가까우면 平板은 상당히 赤熱化되어 있지만, 녹색의 아르곤 레이저에 적합한 感色度의 乾板을 사용하기 때문에 赤色長領域을 제거하는 필터를 사용할 필요는 없었다.

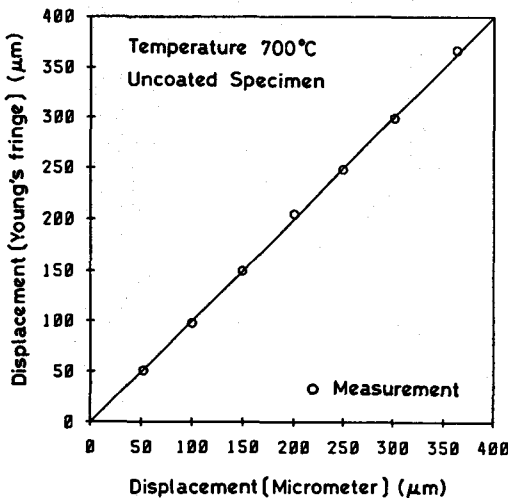


Fig. 8 Results of measurement on the surface of uncoated stainless steel plate at 700°C.

Fig. 8, 9는 Young의 줄무늬를 畫像解析시스템으로 解析하여 구한 變位量과 마이크로메타로서 가한 變位와를 비교한 것으로써 兩者는 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

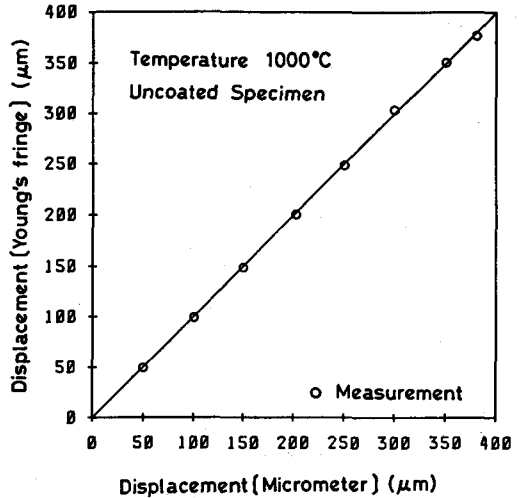


Fig. 9 Results of measurement on the surface of uncoated stainless steel plate at 1000°C.

4. 線膨脹係數의 測定

지금까지의 剛體移動變位 測定實驗에 의해 1000°C까지의 測定에, CW레이저 스펙클 寫眞法을 適用할 수 있는 가능성이 밝혀 졌기 때문에, 그 응용으로써 變位句配가 있는 경우, 즉 스트레인 이 발생하는 경우의 測定을 하였다. 그 測定은 스텐레스 강(STS430)을 재료로 하여 自由熱膨脹을 시켜 그 變位를 測定하여 熱스트레인을 구하여, 線膨脹係數의 溫度依存性을 조사하여 보았다.

4-1. 線膨脹係數의 實驗裝置와 方法

線膨脹係數를 測定하기 위한 실험장치를 Fig. 10에 표시하였다. 試驗片은 두께 0.3mm, 그 시험부의 폭은 3mm, 길이는 50mm로 하였다. 試驗片의 下部에는 試驗片의 굽힘과 비틀림 變形을 방지하기 위하여 軸주위의 회전을 拘束하는 선형베어링이 부착되어 있다.

이 試驗片에 직접 電流를 흘려 加熱시켰고 그 溫度는 크로멜-알멜 熱傳帶로서 測定하였다. 溫度가 정상상

태가 뒤과 동시에 첫번째 露光하였고, 다시 溫度를 변화시키고 다시 두번째로 露光한 二重露光 스페클그램을 앞에서 既述한 畫像解析시스템으로 解析하여, 溫度가 거의 일정한 시험부 중앙점을 기준으로 6.25mm 間隔으로 5점의 變位를 구하였다. 그 結果 각 점의 變位로부터 평균 熱스트레인과 測定溫度로부터 線膨脹係數를 구하였다.

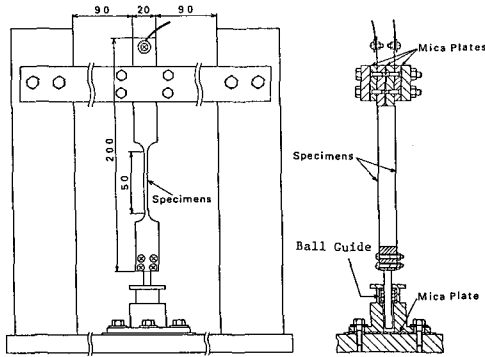


Fig. 10 Schematic diagram of thermal strain measurement testing.

4-2. 實驗結果와 考察

本 實驗에서는 試驗片에서 膨脹되어 늘어나는 方向을 一軸으로 하여 試驗片의 中央部の 가늘고 긴 部分을 測定面으로 하였다. Fig.11은 각 測定點에서의 Young의 줄무늬를 表示하고 있다. 膨脹 方向으로 갈 수록 줄 무늬 間隔은 점차 작아져서 실제 變位量은 커지고 變位 方向은 거의 일정 하다는 것을 알 수 있다. 각 점에서의 Young의 줄무늬 間隔을 解析하여 算出한 線膨脹係數 測定 結果인 Table 3과 이미 公표된 Table 4에 있는 ASME Handbook⁵⁾ Data와 Table 5에 있는 AISI의 Data와 비교 검토한 溫度에 대한 線膨脹係數의 測定結果를 Fig. 12에 표시하였다. 從軸은 線膨脹係數이며 橫軸은 溫度이다. 0의 표시가 본 實驗에서 구한 結果로써 常溫에서 400℃까지는 ASME Hand Book⁵⁾의 結果 및 AISI(일본스텐레스협회)의 데이터⁶⁾와 거의 일치하고 있으며, 400℃부터 700℃까지는 AISI의 데이터와 傾向이 거의 一致하고 있다. 또 700℃ 이상의 常溫에서는 아직 公表된 데이터가 없기 때문에 비교할 수 없어 본 연구의 結果만을 표시하였는데, Fig. 12에서 보

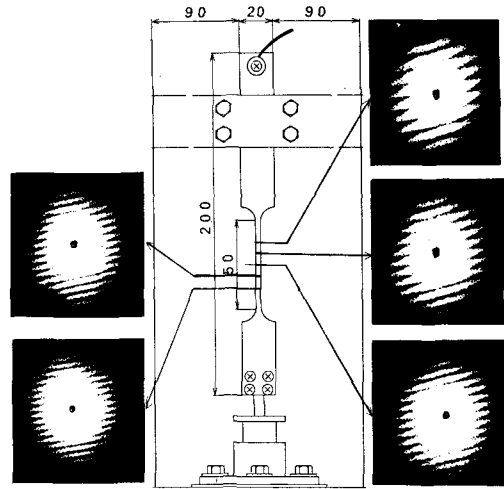


Fig. 11 Fringes when illuminating point by point on specklegram.

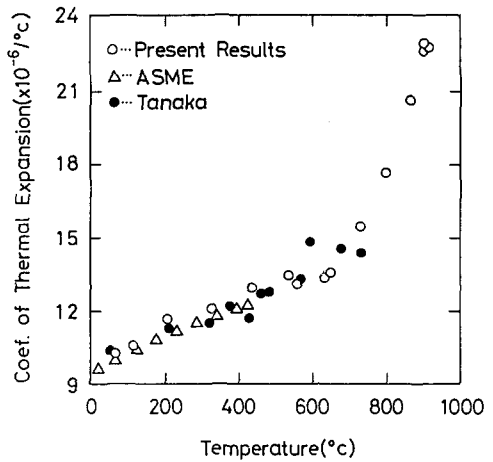


Fig. 12 Comparison of nominal coefficient of thermal expansion measured by speckle photography with announced data.

는 바와 같이 線膨脹係數가 高溫이 됨에 따라 增加하는 것은 當然한 結果라고 할 수 있지만 700℃ 이상이 되면 線膨脹係數가 急激히 上昇함을 볼 수가 있다. 이것은 스테인레스 STS430의 變態點이 약 700℃ 附近이기 때문에 材質의 變化에 의한 것으로서 金屬學적 問題라고 思料된다.

Table 3. Nominal coefficients of thermal expansion for 15Cr~17Cr alloy in ASME data

ASME Boiler and Pressure vessel code Sec 8-2 data																
Temperature (°C)	21.11	37.78	65.56	93.33	121.11	148.89	176.67	204.44	232.22	260	287.78	315.56	343.33	371.11	398.89	426.67
Coef of Thermal Expansion α_T	9.59	9.74	9.97	10.19	10.39	10.58	10.78	10.96	11.14	11.30	11.47	11.63	11.77	11.92	2.06	12.19

Table 4. Nominal coefficients of thermal expansion for STS430 in Japanese steel corporation data

Japanes Steel Corporation Data (Danaka's data)											
Temperature (°C)	50.0	208	427	593.5	732.5	677	482.5	374.5	458	566	319
Coef of Thermal Expansion α_T	10.4	11.28	12.186	13.89	14.34	14.16	12.75	12.173	12.68	13.28	11.73

Table 5. Nominal coefficients of thermal expansion for SUS430 in Laser speckle photography data

Present Results											
Temperature (°C)	110	205	325	433	533	555	632	728.5	796	861	902.5
Coef of Thermal Expansion α_T	10.55	11.68	12.08	12.94	13.43	13.07	13.32	15.46	17.62	20.59	21.56

5. 結 論

연속파 레이저에 의한 스펙클 寫眞法으로 대기중 고온하에서 면내변위 및 스트레인 측정을 하는 경우 문제점 및 적용한계온도에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 이종로광중 산화정도가 다르면 Young의 줄무늬 可視度가 저하되므로 시험편을 코우팅하여 산화를 방지하므로써 약 1000°C 정도까지 Young의 줄무늬 可視度를 향상시켜 측정이 가능하였다.

둘째, 剛體移動變位測定 實驗結果에 의하면 약 700°C 程度부터 1000°C의 溫度까지도 400µm는 剛體移動變位測定이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었고, 또한 이러한 測定이 가능함을 알고 線膨脹係數 測定實驗을

한 結果 종래의 方法으로는 測定하기가 아주 곤란한 1000°C 程度의 高溫에 있어서도, 畫像시스템을 병용한 CW레이저 스펙클 寫眞法에 의해 스트레인 測定이 가능하다는 것을 알 수가 있었다. 후기, 본 연구는 1989년 문교부 학술연구 조성비의 지원을 받아 수행된바 깊은 사의를 표합니다.

References

1. R. K. Erf : Laser Application, Vol. 4, Academic Press(1980).
2. D. J. V. Martine : Materials Evaluton, 36, 53(1978), pp. 53~56.

3. F. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty and J. Adachi : Applied Optics, 19, 16(1980), pp. 2701~2704.
4. 角, 山岐, 室園, 金, 今城 : 九大工學集報, 60, 2(1987), pp. 201~206.
5. ASME : Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 2, Part AM(1986).
6. AISI : Stainless and Heat Resisting Steels, Chapt. 13, (1974), p. 72.