

In-plane ESPI를 이용한 고온에서 STS430의 열팽창계수 측정

김경석*, 강기수#, 장호섭**

Thermal Expansion Coefficient Measurement of STS430 at High Temperature by In-plane ESPI

Koung Suk Kim*, Ki Soo Kang# and Ho Seob Jang**

ABSTRACT

This paper presents ESPI system for the measurement of thermal expansion coefficient of STS430 up to 1,000 °C. Existing methods, strain gauge and moiré have the limitation of contact to object and do not supply the coefficient up to 800 °C. There needs to measure the data up to 800 °C, because heat resistant materials have high melting temperature up to 1,000 °C. In previous studies related to thermal strain analysis, the quantitative results have not reported by ESPI at high temperature, yet. In-plane ESPI and vacuum chamber for the reduction of air turbulence and oxidation are designed for the measurement of the coefficient up to 1,000 °C and speckle correlation fringe pattern images are processed by commercial image filtering tool-smoothing, thinning and enhancement- to obtain quantitative results, which is compared with references data. The comparison shows two data are agreed within 4.1 % blow 600 °C however, there is some difference up to 600 °C. Also, the incremental ratio of the coefficient is changed up to 800 °C. The reason is the phase transformation of STS430 probably begins at 800 °C

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI (전자처리스펙클간섭법), Thermal expansion coefficient(열팽창계수), STS430(스테인레스강 430), Non-contact measurement(비접촉 측정)

1. 서론

최근 측정기술은 접촉식 측정기술의 한계를 극복하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 대체방안으로 레이저를 이용한 측정 및 계측기술이 많은 발전을 해오고 있다. 특히, 스펙클간섭법

(Speckle Interferometry)은 컴퓨터 화상처리기술에 힘입어 기존의 복잡한 계측과정을 용이하게 하면서 비접촉, 실시간 측정기술인 전자처리스펙클간섭법 (Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI)으로 발전하게 되었다.¹ ESPI는 진동모드 가시화 및 구조물의 응력/변형해석 등의 분야로 많은 활용이 되

접수일: 2004년 4월 22일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

* 조선대학교 기계정보공학과

교신저자: 조선대학교 대학원

E-mail kskang@stmail.chosun.ac.kr Tel. (062) 230-7004

** 조선대학교 대학원

고 있다.² 비접촉 측정의 장점은 초고온 등의 문제로 접촉이 어려운 대상물의 변형해석에 많은 응용이 되어왔다. Malmö³ 는 ESPI를 이용하여 3,000 °C 이상에서 간섭줄무늬를 확인하여 적용가능성을 확인하였으나, 표면산화와 대류의 문제로 인하여 변형에 대한 정량적인 결과를 확보하지는 못하였다. Ratnam⁴은 ESPI를 이용하여 100 °C이하의 온도에서 피스톤(Piston)의 열변형을 정량분석하였으며, 최근에는 복합재료와 같은 이방성재료의 열변형해석에 많은 활용을 하고 있다.⁵ 그러나, 금속재료에 대해 고온에서 열변형해석은 시험편주위의 공기대류 및 산화 등의 문제로 직접적인 적용사례가 매우 드물다. 본 연구에서는 1,000 °C 이상의 초고온에서 금속재료의 열변형해석을 위하여 진공챔버를 제작하여 진공상태에서 ESPI를 이용하여 열팽창계수를 측정하였다. 본 연구결과를 통하여 ESPI 기술을 내열재료의 물성평가와 초고온 상태에 있는 구조물의 열변형해석 기술로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. IN-PLANE ESPI

2.1 스펙클 상관간섭줄무늬의 형성

ESPI의 원리는 홀로그래피(Holography)기법과 같은 맥락에서 이해가 가능하다. 즉, 간섭에 의해 물체의 정보를 기록하고, 이 기록된 정보를 재생(형상측정) 하거나 변형 전후의 정보를 비교함으로써 변형의 측정 등으로 활용하고 있다. ESPI에서는 기존의 물체의 정보를 저장하기 위한 홀로그램을 CCD 카메라로 대체하고, 복잡한 재생의 과정을 화상처리기술을 적용하여 물체의 변형정보를 실시간으로 상관 간섭줄무늬로 나타나게 한다.⁶ Fig. 1에서와 같이 간섭성이 우수한 레이저를 이용하여 물체로부터 반사하여 입사하는 물체광(Object beam) $I_O(x, y)$ 과 레이저에서 CCD 카메라로 직접 입사되는 참조광(Reference beam) $I_R(x, y)$ 의 간섭은 스펙클의 강도분포 $I(x, y)$ 로 CCD 카메라와 화상처리장치에 의해 식 (1)과 같이 초기위상차 $\phi(x, y)$ 를 가지고 컴퓨터에 이미지로 기록된다.^{7,8}

$$I(x, y) = I_O(x, y) + I_R(x, y) + 2\sqrt{I_O(x, y)I_R(x, y)} \cos \phi(x, y) \quad (1)$$

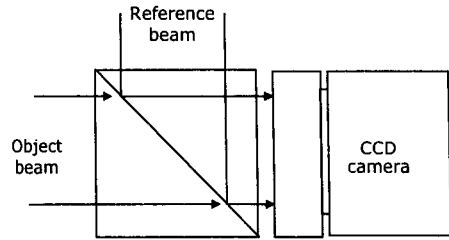


Fig. 1 Interference between object and reference beam

변형해석은 물체 변형전후의 정보를 기록하고 기록된 이미지들의 감산(Subtraction) 또는 덧셈(Addition) 처리를 함으로써 스펙클 상관간섭 줄무늬(Speckle correlation fringe pattern)를 얻게된다. 즉, 식(2)와 같이 표현되는 변형전후 스펙클패턴 I_{before} 와 I_{after} 는 CCD 카메라의 수광소자에 강도분포로 기록이 되고, 이들의 감산신호를 구함으로써 관찰 대상의 변형정도가 상관간섭무늬로 식 (3)과 같이 나타나게 된다. 이 값을 모니터 상에 출력하면 물체의 변형된 정도를 관측할 수 있는데 모니터 상에서 음의 출력신호는 검은색으로 출력되기 때문에 신호의 손실을 피하기 위하여 모니터로 출력하기 전에 절대값을 취해 감산신호를 정류시킨다. 따라서 모니터 한점에서의 밝기 분포 $B(x, y)$ 는 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서는 위상이동 기법의 적용이 어려운 상관간섭 줄무늬를 화상처리하여 줄무늬 사이를 보간하여 변형량을 구하였다.

$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

$$V_S = (I_{before} - I_{after})$$

$$= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \quad (3)$$

$$B(x, y) = K \left| 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right| \quad (4)$$

여기에서 $\Delta\phi$: 물체의 변형에 대한 위상변화
 V_S : 변형전후의 감산신호
 K : 모니터 상수

2.2 면내변위의 정량화

물체 위의 한점 Q 가 외력을 받아 Q' 으로 변위를 일으켰을 때, x 축 면내 변위성분 u 에만 민감한 면내변위 측정 광학간섭계를 Fig. 2와 같이 구성한다. 두 개의 광로로 분리되어 입사되는 레이저광 1과 2가 물체표면에 조사각 θ 로 물체에 조사되고, CCD 카메라가 물체표면의 법선축인 z 축과 Ψ 의 각도를 갖는 광학구성에서 광로차에 따른 물체의 표면면내변위를 정량화하였다. 물체변위에 대한 레이저광 1과 2의 광로변화를 각각 L_1 과 L_2 로 하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_1 = u \cos \theta + w \sin \theta + w \cos \Psi + u \sin \Psi$$

$$L_2 = w \cos \Psi + u \sin \Psi - u \cos \theta + w \sin \theta \quad (5)$$

여기에서 w : z 축방향의 변위성분

조사된 두 레이저광은 각각 참조광과 물체광의 역할을 하며, 변위 u 에 대해 두 광의 광로차 ΔL 은 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 2u \cos \theta \quad (6)$$

식(6)에서 물체표면의 면내변위 u 는 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$u = \frac{n \lambda}{2 \cos \theta} \quad (7)$$

여기에서 n : 줄무늬 차수, λ : 레이저파장

식(4)로 표현되는 상관간섭무늬는 평활화 및 이치화 확산축소, 세선화 등의 화상처리를 거쳐 Line 추출이 되고, 이 Line의 개수를 세어 식(7)의 줄무늬의 차수를 구한다. 변형율 값은 최소자승법으로 변환된 지수함수의 선형적인 값으로 보간 함으로서 잡음을 제거한 실질적인 측정값을 산출할 수 있도록 하였다. 열팽창계수 (α)는 ESPI 측정결과인 변형율 (ϵ)과 열전대를 이용하여 얻은 온도변화 (ΔT)로부터 식(8)을 이용하여 결정하게 된다.

$$\alpha = \frac{\epsilon}{\Delta T} \quad (8)$$

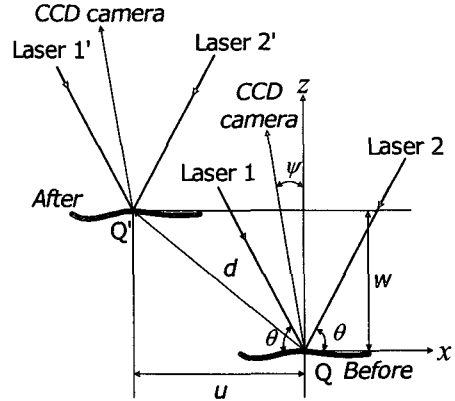


Fig. 2 Change of optical path

3. 실험장치구성

3.1 광학간섭계 구성

ESPI에서는 측정변위성분에 따라 광학간섭계의 구성이 달라진다. 본 연구에 사용된 광학계 구성은 면내변위 측정을 위한 것으로 평면배치도를 Fig. 3에 나타내었다.

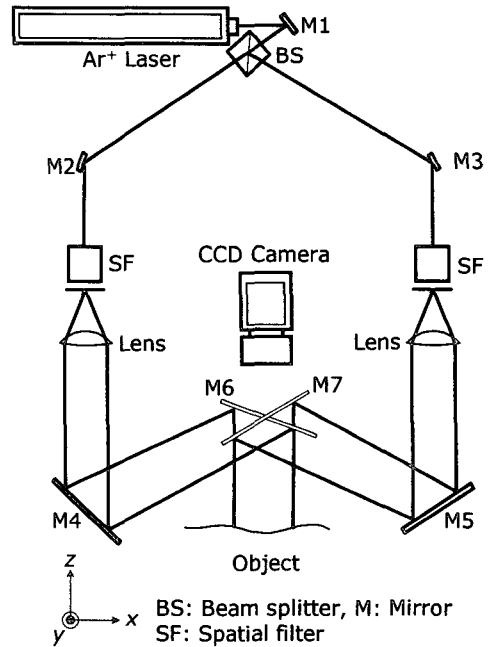


Fig. 3 Optical interferometer for in-plane displacement measurement

레이저로부터 나온 레이저광은 광분할기(Beam splitter)에 의해 두 개로 분할되고 거울2와 3에 의해 공간필터기(Spatial filter)로 입사가 되며, 필터에 장착된 핀홀(Pin hole)에 의해 노이즈가 제거된 상태로 확산된다. 그러나, 파장을 갖는 매체의 특성으로 핀홀을 통과하면서 곡면파면(Spherical wavefront)을 갖게되므로 렌즈시스템을 이용하여 평면파면으로 바꾸어 준다. 본 연구에서는 물체의 변형을 중력방향 즉, y축으로 유도하였다. 따라서 거울 6과 7를 이용하여 두 개의 광이 55도를 이루도록 하여 물체에 조사를 하였다. 실험에 사용된 광원은 파장이 514.5 nm, 출력이 2 Watt인 Ar+레이저를 사용하였다.

3.2 진공챔버 및 시험편 가이드 구성

시험편은 일반 기계구조용 강인 STS430를 사용하였다. 가열방식은 전류를 통과하여 전기저항성질을 이용하여 가열을 하게된다. 미세한 온도조절을 위해서 1차 2차 전압장치에 의해 시험편에 전류를 공급하게 되며, 온도는 K-type 열전대(Thermocouple)에 의해 측정된다. 열전대의 접촉에 의한 오차를 줄이기 위하여 열변형 측정을 위한 시험편과 온도 측정을 위한 시험편 즉, 두 개의 시험편이 동시에 가이드에 장착이 된다. 시험편의 가이드 구성은 상단은 고정을 하게 되고, 열팽창에 의한 시험편의 굽힘현상을 막고 자유열팽창을 할 수 있도록 하단부에 고정밀 Linear guide를 장착하여 구속하였다. Fig. 4는 시험편의 형상이며 Fig. 5는 열팽창계수 측정을 위해 제작된 시험편 가이드장치이다. 진공챔버는 제작된 가이드를 넣을 수 있도록 아크릴재질로 제작하였다(650x600x760 mm³). 진공 펌프를 이용하여 1 기압까지 진공이 가능하며, 중앙에 제작된 광학창을 통하여 측정한다. Fig. 5는 전체시스템 구성도를 나타내었다.

4. 실험결과

실험은 시험편주위의 공기대류와 산화를 최소화하기 위해 챔버를 사용한 상태에서 실험하여 ASME에서 제공한 물성결과와 비교하였다. 참고로, 챔버를 사용하지 않은 상태인 공기 중 에서 실험은 시험편주위의 대류의 영향으로 125 °C까지 측정이 가능하였다. 챔버 내 실험에서는 시험편의 발광(發光)현상으로 512 °C 이상에서는 CCD 카메라에 514.5 nm line filter를 사용하여 측정하였다.

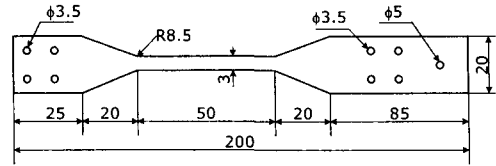


Fig. 4 Configuration of specimen

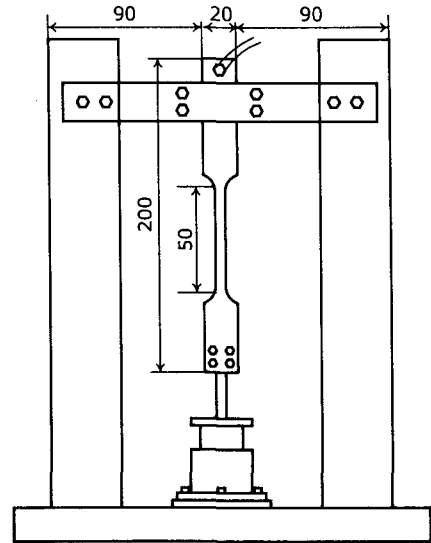


Fig. 5 Guide configuration

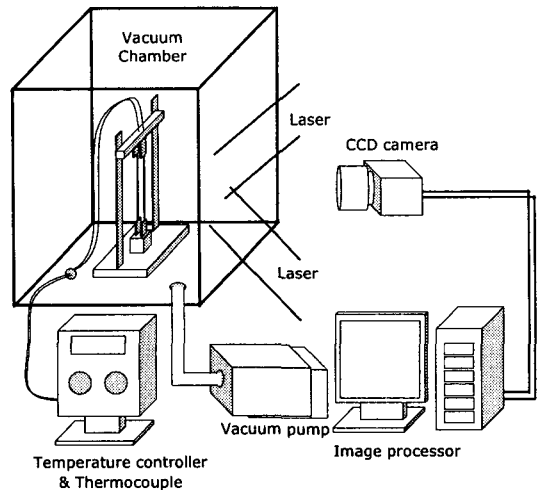


Fig. 6 Measurement system configuration

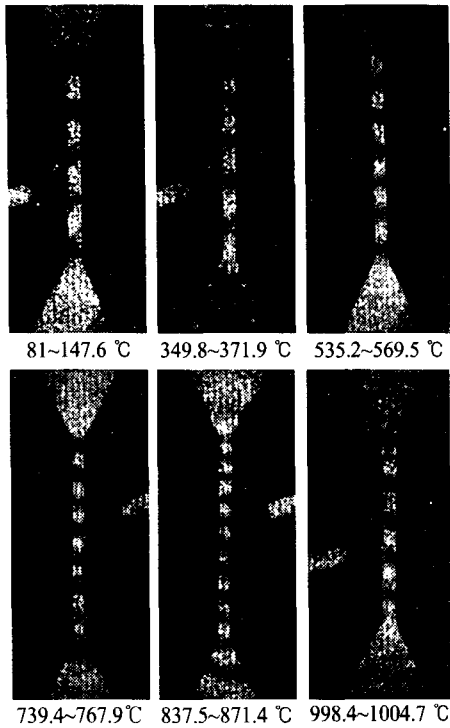


Fig. 7 Speckle correlation fringe patterns

Fig. 7은 챔버 내에서 온도변화에 따른 스페클 상관간섭무늬를 보여 주고 있다. Fig. 8은 ESPI 측정결과와 미국기계학회(ASME)에서 제공되는 열팽창계수와 비교를 하였다. 538 °C까지의 비교에서는 4.1 %의 오차로 매우 잘 일치하였으나, 그 이상에서 많은 오차가 발생하였다. 이 결과로부터 약 600 °C 이상이 기존 접촉식기법의 한계로 추정할 수 있다. 또한, ESPI의 결과에서 800 °C 이상의 온도에서는 열팽창계수가 급격히 증가하고 있는데, 이는 페라이트계의 상변화 온도인 820 °C에 가까워지면서 페라이트계인 STS430의 상변화가 일어나는 것으로 추정된다. 1,000 °C 이상의 온도에서는 STS430의 용융점(1,427~1,510 °C)에 가까워지면서 표면산화가 급격히 일어나 프린지 패턴의 가시도가 떨어져 측정이 불가능하였다.

5. 결론

본 연구에서는 비접촉 측정이 가능한 In-plane ESPI와 공기대류 및 산화를 최소화하기 위하여 진공챔버를 이용하여 STS430의 열팽창계수를 1,000 °C까지 측정하였다. 먼저, 챔버를 사용하지 않은 공

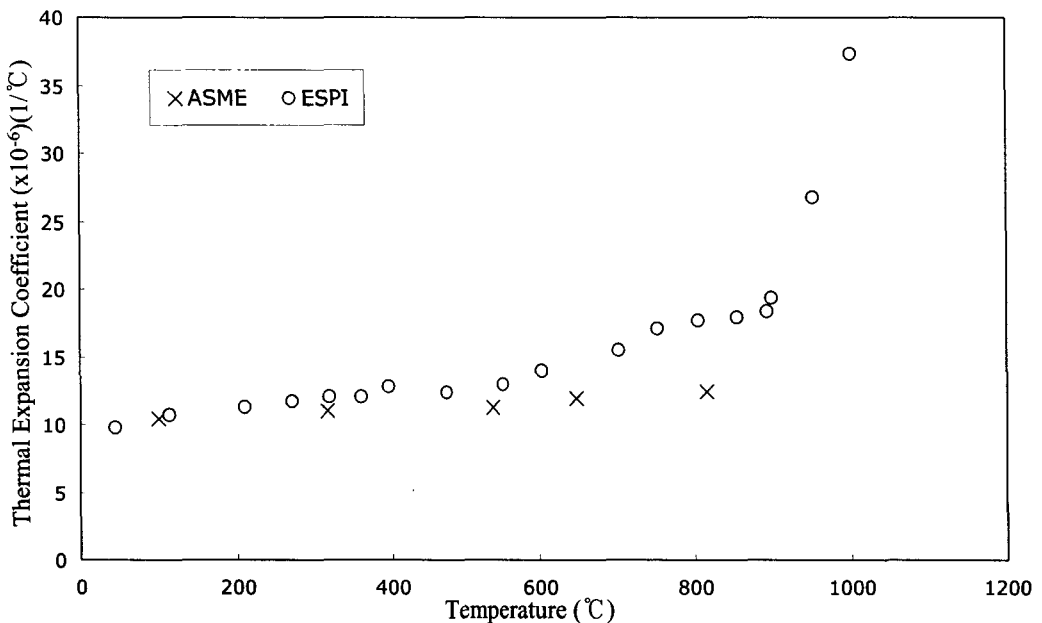


Fig. 8 Comparison of ESPI results and ASME data

기 중의 실험에서는 대류로 인하여 125 ℃까지만이 측정이 가능하였으나, 진공챔버를 사용함으로써 1000 ℃이상까지 측정이 가능하였다. 실험은 기존의 strain gage 또는 moiré와 같은 접촉식 측정기술에 비하여 간편하였으며, 기존 기술의 한계인 800 ℃이상의 온도에서도 열팽창계수를 제공함으로써 초고온에서 내열재료의 열팽창계수 측정 및 열변형 해석에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 34-41, 2001.

참고문헌

1. Løkberg, O.J., "ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY," Physics in technology, Vol. 11, pp. 16-22, 1980.
2. Cloud, G.L., Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge University Press, pp.453-476, 1990.
3. Malmo, J.T., Løkberg, O.J. and Slettemoen, G.A., "Interferometric Testing at Very High Temperatures by TV Holography(ESPI)," Experimental Mechanics, Sept., pp.315-321, 1987.
4. Ratnam, M.M., Evans, W.T. and Tyrer, J.R., "Measurement of thermal expansion of a piston using holographic and electronic speckle pattern interferometry," Optical Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 61-69, 1992.
5. Hack, Erwin and Brönnimann, Rolf, "Electronic speckle pattern interferometry deformation measurement on lightweight structures under thermal load," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, pp.213-222, 1999.
6. Kim, I.K., Kim, K.S., Yoon, S.W., Kang, K.S., "A Study on Vibration Characteristic of Thin Plate in Crack Propagation by Laser Holography Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 200-205, 2000.
7. Moore, A.J. and Tyrer, J.R., "An Electronic speckle pattern interferometry for complete in-plane displacement measurement," Measurement science and technology, Vol. 1, pp. 1024-1030, 1990.
8. kang, Y.J., Bea, J.K., You, W.J., Park, N.K., "A Study on Measurement of Crack Length by using Laser Speckle Interferometry," Journal of the