

ESPI를 이용한 세탁기 적용 기계 구조물의 면내변위 측정에 관한 연구

이학주* · 김상태* · 최은오* · 장석원*

The Study on Measurement of In-Plane Displacement in Mechanical Structure applied to Washing Machine using ESPI

Hac-Ju Lee, Sang-Tea Kim, Eun-Oh Choi, Seog-weon Chang

Key Words: ESPI(electronic speckle pattern interferometry), In-plane displacement (면내변위), Washing- Machine (세탁기), Casedrum, FEA(유한요소해석)

Abstract

Recently, the mechanical structures applied to many industrial products, especially in electronic products, appear to be miniaturized and complicated. This trend makes it difficult to analyze the stress distribution of those mechanical structures and generates new challenges for *precise measurement of strain*. Therefore, generally most of those cases largely depend on the finite element analysis. But the development of optical metrology which has the capability of non-contact, full-field and precise measurement makes it possible to solve these measuring problems. Among the optical measurement techniques, the electronic speckle pattern interferometry (ESPI) has been developed and considered as one of the most useful tools for measuring displacement and deformation. But the shortage of recognition and difficulties of measurement have limited its industrial applications in spite of its excellent capabilities. Therefore in this study, in order to enhance the industrial application of ESPI, the measurement of in-plane displacement of mechanical structure with ESPI, which is applied to washing machine and cannot be measured by strain gauges, was performed. And the verification of validity of FEA results was also done.

1. 서론

최근 산업계 기술동향이 첨단화, 고정도화 그리고 초소형화함에 따라 고정밀의 계측기술이 요구되고 있는 실정이며 기술발전의 중요한 분야로 대두되고 있다. 특히 비접촉 계측방법으로 선호되고 있는 광계측 분야에서는 단색성, 가간섭성,

지향성, 집속성 등의 장점이 있는 레이저(laser)를 이용한 새로운 계측기술이 급속히 발전하고 있다. 이는 비접촉으로 전영역(full-field)의 변형계측이 가능하므로 스트레인게이지(strain gauge)계측방법이 갖고 있는 점(point)계측, 온도보정의 난해함, 부착장소의 조건성 그리고 계측자의 숙련도에 따른 편차 등의 단점을 극복할 수 있기 때문이다. 따라서 레이저를 이용한 비접촉 계측 방법은 기계구조물의 미소하중, 미소균열검출, 미

* 대우전자 품질경영연구소

소변형계측, 정밀계측분야에 관심이 집중되고 있다.

레이저를 이용한 물체의 변형계측은 주로 광간섭계를 응용한 방법들로서 홀로그래피 간섭계(holographic interferometry), 모아레 간섭계(moire interferometry), 스펙클사진법(speckle photography), 전자스펙클패턴 간섭계(electronic speckle pattern interferometry : ESPI) 등이 있다. 이러한 간섭계 중 ESPI는 분해능이 좋으며 실시간 검사가 가능하고, 넓은 검사 영역을 한번에 계측할 수 있는 등의 장점으로 인하여 정밀계측분야에서 빠르게 발전하고 있다.

이 방법은 레이저와 같이 가간섭성이 좋은 빛이 금속의 조면과 같은 물체의 표면에서 반사될 때 발생하는 스펙클 효과를 이용, 참조광(reference beam)을 물체광에 간섭시켜 스펙클의 휘도차에 의해 물체 표면에 발생하는 변위를 측정하는 것으로써 Vest¹⁾, Ennos²⁾, Jones와 Wykes³⁾에 의해 도입되면서 발전하였다. 현재 국내에서도 학계를 중심으로 ESPI를 이용한 기계구조물의 변형계측이 활발히 연구되고 있으나 산업계에서는 인식 부족과 측정의 난해함 등의 이유로 그 활용도가 높지 않다.

본 연구에서는 ESPI를 이용하여 하중을 받고 있는 복잡한 형상을 가진 기계구조물 전면적에 대한 정적변형량을 동시에 계측하였다.

하중을 받는 구조물 설계에서 응력의 분포는 중요한 설계인자이지만, 형상이 복잡하거나 미소면적일 경우 스트레인 게이지를 이용한 계측방법으로는 한계가 있으며 전면적을 동시에 계측하는 것은 매우 어렵다. 이러한 경우 응력분포의 검도는 유한요소해석으로 대신하고 있으나 해석결과의 검증이 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 계측방법의 한계를 극복할 수 있는 ESPI 계측방법을 이용하여 정밀한 변형량계측으로 해석결과의 타당성을 검증하고, 응력해석의 신빙성을 높여 산업적 활용도를 높이고자 한다.

2. ESPI 계측의 이론적 배경

2.1 전자스펙클패턴 간섭계

가간섭성이 뛰어난 레이저를 물체의 표면에 조

사하면 스펙클이라 일컬어지는 반짝이는 작은점들이 물체면 위에 뿌려진 것처럼 보이게 된다. 이때 우리 눈이 렌즈와 같은 역할을 하여 물체 표면에서 반사된 스펙클이 우리의 눈에 결상하는 것인데 이와 같이 렌즈를 이용한 스펙클의 결상을 주관적인 스펙클이라 하며 실제 스펙클을 이용한 계측방법에는 이러한 주관적 스펙클이 사용된다. 주관적 스펙클의 크기는 렌즈와 사용한 레이저의 파장과 관계 있으며 실제로 그 크기는 Ennos²⁾에 의하여 아래와 같이 주어졌다.

$$S_s \approx 1.2 \cdot \lambda \cdot F \cdot (1 + M) \div M \quad (1)$$

여기에서 S_s 는 주관적 스펙클의 크기이며, λ 는 사용된 레이저 파장(nm), F 는 렌즈의 f /number, M 은 배율이다. 만약 이렇게 형성된 스펙클에 같은 파장의 레이저 빛을 하나 더(참조광) 조사하면 두 빛의 간섭이 일어나 스펙클 패턴이 형성된다. 이 스펙클 패턴을 이용하여 물체 표면의 변위 발생 시 발생하는 변형 전·후의 스펙클패턴을 빼서 줄무늬(fringe)를 만들고 이를 분석하여 위상차 및 변위량을 구하는 것이 스펙클 패턴 간섭계이다. 여기서 기록매체를 CCD 카메라를 사용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 전자적으로 화상처리 및 변형 정보를 얻는 방법을 전자스펙클패턴 간섭계(ESPI)라 한다.

2.2 면내(in-plane) 변위측정 이론

면내변위 측정법은 레이저 빛의 조사 방향을 면내 변위에 민감하게 조정하여 측정하는 방법으로서 Fig. 1에 측정법을 개략적으로 나타내었다.

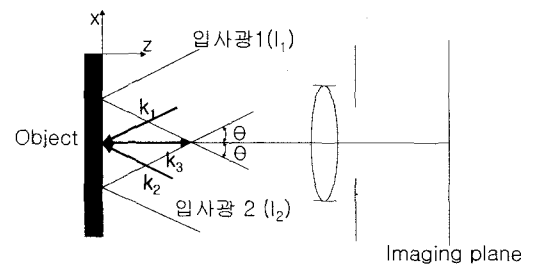


Fig. 1 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement

이 측정법은 Leendertz¹¹⁾에 의해 제안된 방법으로 참조광을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광을 Fig. 1과 같이 같은 각도로 조사하여 측정하는 것이다. 여기서 y방향이 지면에 수직방향일 때 물체는 xy 평면상에 있고 두 개의 빛이 동일한 각도(θ)로 조사되고 있다. 이미지면상에 임의의 점 P에서의 복사조도는 아래와 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \gamma \quad (2)$$

여기서 I는 복사조도이며, γ 는 P점에 조사되는 두 빛의 위상차이고, I_1, I_2 는 두 입사광의 복사조도이다. 만약 P점이 \vec{d} 만큼 움직였을 때, 복사조도는 아래와 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\gamma + \Delta\varphi) \quad (3)$$

여기서 $\Delta\varphi$ 는 물체의 움직임에 의하여 생긴 위상차이다. 위상차와 물체의 변위 \vec{d} (d_x, d_y, d_z)와의 관계는 민감도벡터(sensitivity vector)를 이용하여 얻을 수 있다.

입사광 1에서의 총 위상차 (δ_1)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin\theta i - \cos\theta k)] \\ &\quad \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin\theta + d_z(1 + \cos\theta)] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \vec{k}_1 는 입사광 1의 진행벡터 이고 \vec{k}_2 는 입사광 2, \vec{k}_3 는 관찰광의 진행벡터 이다.

입사광 2에서의 총 위상차(δ_2)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_2) \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin\theta i - \cos\theta k)] \\ &\quad \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin\theta + d_z(1 + \cos\theta)] \end{aligned} \quad (5)$$

식(3)에서 $\Delta\varphi$ 는 식(4), (5)의 차이이므로

$$\Delta\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) d_x \sin\theta \quad (6)$$

가 된다.

따라서 만약 어두운 줄무늬(dark fringe)가 나타나게 되면 위상차가 $2n\pi$ 만큼 나고, 우리가 얻고자 하는 면내 변위 d_x 는 아래와 같다.

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (7)$$

3. 실험방법 및 결과

3.1 측정시스템

본 실험에서는 계측을 위하여 사용된 레이저를 비롯한 광학, 화상처리 및 데이터 분석 시스템을 독일 Ettemeyer社에서 특수 제작된 3D-ESPI 시스템을 사용하였으며, 이 시스템은 물체의 x, y, z의 3차원적인 변위를 연차적으로 한번에 측정할 수 있다. Fig. 2는 측정에 사용한 광학계의 구성도이며, Table 1은 측정시스템의 사양이다.

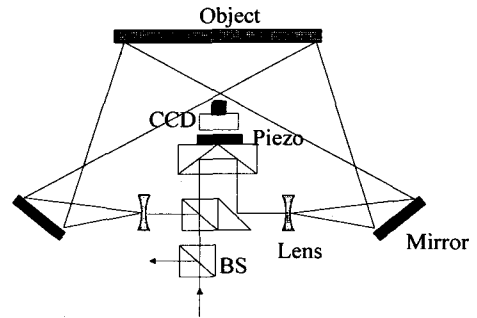


Fig. 2 Schematic diagram of the optical system used in measurement

Table 1 Specifications of measuring System

Measuring system	Specifications
Laser	DPSS CW Nd-YAG Max. Power : 500mW
CCD	752(H)×582(V) pixel
Graphic board	ATI 4MB
D/A-board	CIA DDA 06
Frame grabber	PCI image SG

3.2 실험방법

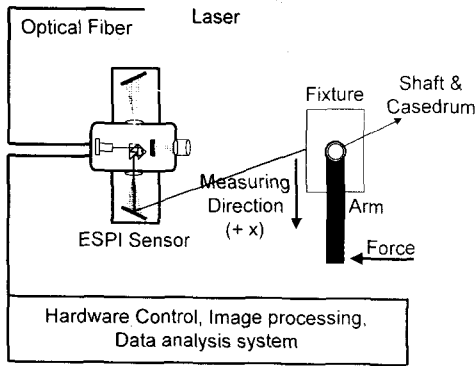


Fig. 3 Top view of Measuring system

Fig. 3은 본 실험을 위한 장치구성도이다. 측정 시료는 가정용 세탁기에 적용되는 기계구조물로서 축이 케이스드럼(casedrum)에 압입된 형태의 구조물이다. 비틀림 하중은 그림과 같이 축의 중심에서 길이가 25cm되는 강봉(steel bar)을 제작 연결한 상태에서 인장·압축 게이지(Push-Pull gauge)를 이용하여 인가하였으며, 케이스드럼의 바닥면은 광학정반에 완전히 고정하였다. 이때 축에 인가될 수 있는 굽힘(bending) 하중 요소를 제거하기 위하여 시료를 고정할 수 있는 특수 치구(jig)를 제작하여 측정시료를 고정하였다. 이 치구를 다시 광학정반의 바닥면에 완전히 고정하였다. 실제 이러한 설치 조건은 유한 요소해석에 사용한 경계조건에 최대한 근접하게 하기 위한 조건들이다. 이렇게 설치되어 있는 상태에서 비틀림 하중을 100kgf·cm부터 최대 500 kgf·cm까지 100kgf·cm씩 증가시키면서 케이스드럼에서 발생하는 면내 변위를 측정하였다.

3.3 실험결과

3.3.1. 시편고정용 치구의 타당성 검증 결과

본 실험에서는 순수 비틀림 하중에 의한 면내 변위를 측정하고자 하였다. 그러나 실제 실험에서 굽힘 하중의 부가없이 완전한 축대칭으로 순수비틀림 하중을 부가하기는 곤란하였다. 따라서 본 시험에서는 순수 비틀림 하중을 부가하기 위해 특수한 치구를 제작하여 시편을 고정 하였으

며, 간단한 예비실험을 통해 순수 비틀림 하중의 부가 여부를 확인하였다.

반약 순수한 비틀림 하중에 의해서만 변형이 일어날 경우, 시계방향과 반시계방향의 비틀림 하중 부가 시 면내변위의 방향이 완전히 반대로 나타나야 한다. Fig. 4는 고정치구를 설치하지 않고 약 20kgf·cm하중을 시계와 반시계방향으로

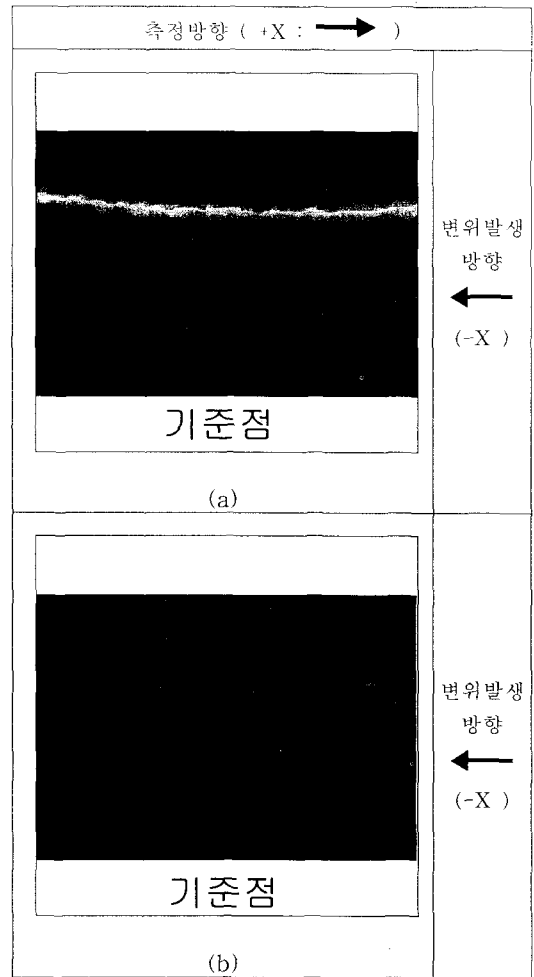


Fig. 4 Fringe patterns according to two opposite opposite loading directions ; (a) anti-clockwise loading, (b) clockwise loading

부가하였을 경우에 측정된 결과이다. 그림에서 정반대 방향의 비틀림 하중이 부가되었으나, 변

위는 -X로 방향이 같음을 알 수 있다. (단 기준 점을 측정영역의 하단부로 취했을 경우) 이는 결국 비틀림과 굽힘 하중이 동시에 추가되는 것을 알 수 있으며 실제 굽힘 하중에 의한 변위가 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 고정치구를 사용하여 동일한 실험을 수행한 결과 순수 비틀림 하중에 의한 변형의 결과로 나타남이 확인되었다.

3.3.2. 비틀림 하중에 의한 면내 변위 측정결과

Fig. 3과 같이 광학정반 위에 모든 측정 시스템을 설치한 후 실험을 실시하였다.

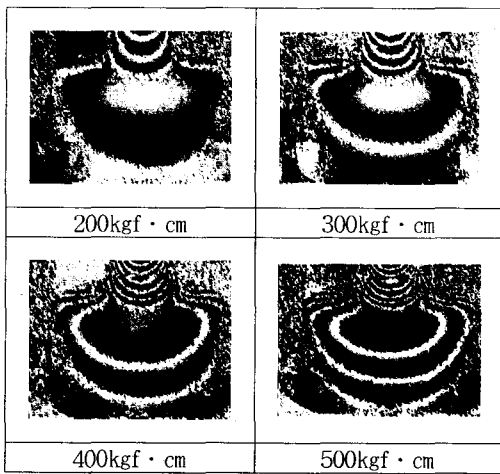


Fig. 5 Fringe patterns according to the increase of applied torsional loading

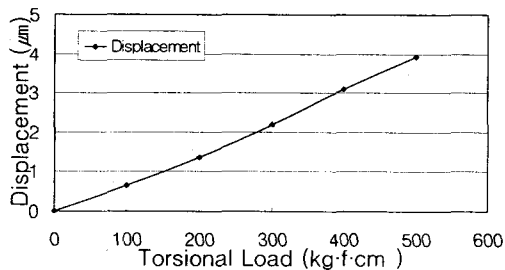


Fig. 6 Total in-plane displacement according to the increase of applied torsional loading

Fig. 5는 비틀림 하중 부가 시 하중별로 계측한 결과를 줄무늬 양상으로 나타낸 것이다. 측정결과 비틀림 하중에 의한 전형적인 줄무늬를 얻을 수 있었으며, 압입부에 가장 큰 하중이 추가되는 것을 알 수 있다. 케이스드림의 하단부에는 줄무늬가 넓게 나타나는 반면 상단부(압입부)에서는 줄무늬의 간격이 조밀하게 위치하고 있다. 따라서 이 부분에서 주로 면내변위가 발생하고 줄무늬의 간격이 급속하게 커지는 경계부분 즉 압입부가 끝나는 곡선 부분에서 가장 큰 하중을 받고 있음을 나타내고 있다. 케이스드림의 외양을 Fig. 7의 유한요소해석 모델로 나타냈다. 하단의 넓은 부분은 고정치구의 바닥면에 고정되고, 상단의 좁은 원통 부분에 축이 압입 된다. 하중이 가장 크게 추가되는 부분은 압입부의 끝에서 직각으로 굴곡되는 부분이다. 따라서 실제 이 부분에 스트레인 게이지를 이용하여 변형을 측정하는 것은 그 형상뿐만 아니라 미소한 면적 때문에 불가능하므로 유한요소해석 결과에 대한 검증 또한 곤란하다.

Fig. 6은 순수 비틀림 하중에 따른 총 변위량을 나타낸 것으로, 하중의 증가에 따라 총변위량이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 본 실험과 같은 조건에서는 하중에 따른 변형이 선형적으로 비례해야 하므로 실험 결과에 대한 타당성을 입증해 주고 있는 것이다.

3.3.3. 측정결과와 유한요소해석 결과와의 비교

Fig. 7에 300kgf·cm의 비틀림 하중 인가 시 유한요소해석결과를 나타내었다. 여기서 하나의 색깔 무늬가 같은 등변위량을 나타내는 것이며, ESPI를 이용한 측정 시 나타나는 하나의 줄무늬와 같은 개념이다. Fig. 5와 Fig. 7을 비교해 보면 측정결과와 해석결과가 같은 양상의 무늬를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 즉 면내변위가 주로 압입부에서 발생하였으며 하단부로 갈수록 변위의 분포가 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 ESPI 측정결과와 정성적으로 잘 일치함을 의미하는 것으로, 응력해석결과 압입부가 끝나는 곡면부분에 가장 큰 응력이 걸림을 확인할 수 있었다. 그리고 해석과 측정의 변위량 값은 차이가 있으나 재료의 기계적 성질, 압입조건 등의 유한

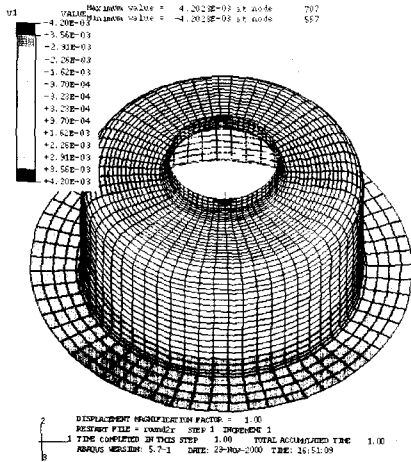


Fig. 7 In-plane displacement obtained by FEM when torsional load of 300kgf·cm is applied.

요소해석의 입력값의 오차가 존재하였기 때문이다. 따라서 유한요소해석의 입력조건의 조정(modification)을 통하여 해석의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 ESPI를 이용하여 측정하고자 하는 영역의 복잡한 형상 및 미소면적으로 인하여 기존의 스트레인게이지로는 측정이 불가능한 기계 구조물에 대한 면내(in-plane) 변위를 측정하여 유한요소해석결과의 타당성을 검증하고 해석의 정확도를 높여 ESPI의 산업적 활용도를 높이고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스트레인 게이지로는 측정이 불가능한 복잡한 형상을 갖는 기계구조물의 미소 변위를 ESPI를 이용하여 정밀하게 계측할 수 있었고, 이를 통해 유한요소해석의 정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

(2) 본 연구를 통해 실제 산업현장에서 ESPI를 이용한 측정이 재료의 변형 거동 측정에 우수하게 활용될 수 있음을 입증할 수 있었고, 그 산업

적 활용을 위해 본 측정법에 대한 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 2000년도 과학기술부 국가지정연구실 사업 (과제번호 : 2000-N-NL-01-C-267) 의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) C.M. Vest, 1979, "Holographic Interferometry", New York ; John Willey and sons.
- (2) A.E. Ennos, 1975, "Speckle Interferometry", in J.C.Dainty(ed.), "Laser Speckle and related Phenomena", Springer Verlag, Berlin, pp. 203~253.
- (3) R. Johns and C. Wykes, 1983, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press.
- (4) J.A. Leendertz, 1970, "Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect", Journal of Physics E : Scientific Instrument, 3: 214.
- (5) A. Ettemeyer, 1996, "Non-contact and whole field strain analysis with a laseroptical strain sensor", VIII International Congress on Experimental Mechanics, Nashville, Tennessee, pp. 10~13.
- (6) L.Binda, M. Fachini, 1998, "Electronic Speckle interferometry for the deformation measurement in masonry testing", Construction and Building Materials 12, pp. 269~281.
- (7) 김경석, 김형수, 1994, "ESPI법과 화상처리에 의한 2차원의 스트레인 측정에 관한 연구", 韓國情密工學會誌, 제11권, 제1호.