

ESPI를 이용한 정사각튜브의 변형계측

박찬주*(조선대 원), 김경석(조선대 기계공학부), 정현철(조선대 원), 장호섭(조선대 원)

A Study on Measurement of Displacement Using ESPI Method in Square Tubes

C. J. Park(Chosun UNIV.), K. S. Kim(Mech. Eng. Dept., Chosun UNIV.),
H. C. Jung(Chosun UNIV.), H. S. Chang(Chosun UNIV.)

ABSTRACT

This paper proposes Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) for the quantitative buckling analysis of square tube, which is unable to be measured with previous methods. The quantitative buckling analysis in elasticity is important part to study strain-stress analysis of thick-plated tube and fatigue analysis. However, it is unsolved problem with theory and previous experimental method. The merits of ESPI, Whole-field measurement and high accurate 3D-displacement measurement make it possible to determinate the buckling analysis in elasticity quantitatively.

Key Words : ESPI(전자처리스펙클 패턴 간섭계), In plane, out of plane displacement (면내, 면외변위), Square tubes(사각튜브), Buckling(좌굴), Whole-Field Measurement(전면적계측)

1. 서론

고정밀과 첨단화를 추구하는 최근의 기술동향으로 정밀가공 기술과 이에 따르는 고정밀의 계측기술을 요구함에 따라 계측기술들은 급속한 발전을 거듭하고 있으며 홀로그래피 간섭계 (Holographic Interferometry), 전자스펙클 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI), 모아레 간섭계 (Moire Interferometry), 스펙클 사진법(Speckle Photography)등으로 잘 알려진 광계측 방법이 다양하게 활용되고 있다. 특히 국내에서는 홀로그래피 간섭계에서 발전한 ESPI를 이용한 기계구조물의 변형에 대한 계측이 연구되어지고 있으며, 산업체에 대한 적용방법과 인식의 확산 등으로 그 활용도가 높아지고 있다. 또한 그간 발표되어온 활용보고서 등에서 그 성능을 인정받고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

현대의 구조물들은 높은 강도를 가지는 얇은 박판의 사용으로 구성되어진다. 압축과 굽힘, 전단력등 다양한 외력에 대하여 적절치 못한 선택은 구조물의 붕괴등과 같은 치명적인 피해를 불러올 수 있다. 일반적으로 판의 국부적인 좌굴을 고려하는 것은 박판을 사용한 구조물에서 매우 중요한 인자로 작용한

다. 좌굴에 관한 연구는 Euler의 연구이후 많은 연구가 이루어 지고 있으며, 사각튜브에 관한 연구는 Usami 등에 의해 연구가 진행되어 왔다. 사각튜브에 관한 연구는 기둥의 좌굴에 대한 기존의 이론식을 그대로 적용 하는 데는 문제점이 있으며, 이는 사각튜브에 압축하중을 가할때는 실제로 각 판넬에 하중이 가해지므로 기둥의 좌굴 조건과는 경계조건 등의 차이가나는 특성을 고려하지 않는데 이유가 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

축방향 압력을 받고 있는 사각튜브의 거동은 부재의 세장비(slenderness ratio)에 따라 그 거동이 구분되어 지는데 세장비가 클때에는 전체좌굴(overall buckling)에 의해 붕괴되고, 세장비가 작을때는 각 면이 연속적으로 주름이 형성되어 접히는 국부좌굴(local buckling)이 발생한다. 에너지 흡수를 위해 주로 국부좌굴이 유도되도록 사용되어지지만, 피로등과 같은 하중이 가해졌을 때 탄성 내에서 전체좌굴의 형상이 반복되기도 한다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

이에 본 논문에서는 기존기법으로 측정이 불가능한 탄성영역내에서 z 축의 변위를측정, 좌굴량을 해석함으로써 이론해석 및 실험해석의 완전성을 기하고자 한다.

2. 이론

2.1 ESPI 기본이론

2.1.1 면내변위 계측이론

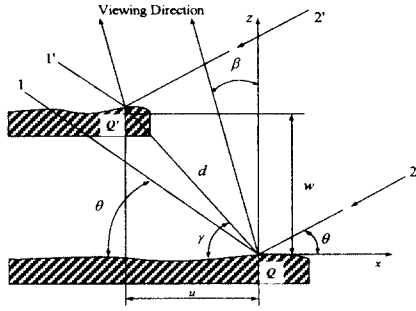


Fig 1. Geometric configuration for in-plane displacement measurement

두 개의 시준화(Collimation)된 레이저 광이 1과 2 방향에서 동일각 θ 로 측정면에 조사되면, 레이저광이 조사된 측정면은 렌즈를 통하여 CCD 카메라의 수광면에 결상된다. 이때 1, 2방향에서 조사된 두 광에 의하여 측정면은 x 또는 y 방향으로만 측정감도를 갖게 된다. Fig 1에서 1과 2의 광 경로로 진행한 두 광원이 물체에 변위가 발생했을 때 광로길이의 변화량 L_1 과 L_2 를 식(1-1)에 나타냈다.

$$L_1 = d \cos(\gamma - \theta) + d \cos(\pi/2 - \gamma - \beta) \quad (1-1)$$

$$L_2 = d \cos(\pi - \gamma - \theta) + d \cos(\pi/2 - \gamma - \beta) \\ = -u \cos \theta + u \sin \beta + \omega \sin \theta + \omega \cos \beta$$

두 개의 조사된 레이저광에서 한쪽은 다른 한쪽의 참조광이라고 할 수 있기 때문에 변형 전후의 광로길이의 변화 Δ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2u \cos \theta \quad (1-2)$$

식 (1-2)에서 Δ 는 면외변형성분 ω 와 관측방향 β 와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 여기서 광로길이 변화 $\Delta = n\lambda$ ($n=1, 2, 3, \dots$)가 될 때 간섭 줄무늬를 형성하므로 줄무늬 차수를 n , 레이저 파장을 λ 라 할 때, 변위 u 는 식 (1-3)과같이 표현할 수 있다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (1-3)$$

여기에서 변위 u 는 레이저의 파장과 레이저 광의 조사각만으로 결정됨을 알 수 있다. 변형율 ϵ 은

변위 u 를 시험편의 전체 길이로 나누어 측정할 수 있다.

2.1.2 면외변위계측 이론

측정원리는 레이저에서 발생된 빔이 광 분할기(Beam splitter)를 통해 두빔으로 나누어져, 하나는 CCD카메라에 연속적으로 입사되는 기준빔(Reference Beam)이 되고, 다른 하나는 대상체에 조사되어 반사된 빔이 CCD카메라에 입사되는 물체빔(Object Beam)이 된다. 이 두 빔이 광 합성기(Beam combiner)에서 간섭을 일으키게 되고 이때의 이미지가 CCD카메라의 수광소자에 입사된다. 측정체의 변형(진동)전후의 변위값은 변형 전 상태와 후 상태 각각의 이미지를 저장시켜 화상처리장치에서 그 차이를 계산함으로써 얻을 수 있다.

시험편이 무부하 상태일때 CCD카메라가 감지하는 빛의 세기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

물체빔(Object beam) $F_{o(before)} = A_o e^{i(\omega t + \phi_o)}$ 과 기준빔(Reference beam) $F_{r(before)} = A_r e^{i(\omega t + \phi_r)}$ 이 합쳐져서 식 (1-4)와 같은 강도 I_1 으로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos(\phi_r - \phi_o) \quad (1-4)$$

진동 혹은 외력에 의해 면외 변형이 발생하였을 때 CCD 카메라에 의해 나타내지는 빛의 세기는 물체빔

(Object beam) $F_{o(after)} = A_o e^{i(\omega t + \phi_o + \Delta\phi)}$ 과 기준빔(Reference beam) $F_{r(after)} = A_r e^{i(\omega t + \phi_r)}$ 을 합하여 식 (1-5)와 같은 강도 I_2 로 나타낼 수 있다.

$$I_2 = A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos(\phi_r - \phi_o) \quad (1-5)$$

출력 카메라의 신호 I_1 와 I_2 이 입력 화상의 강도에 비례하므로, 감산된 광의 강도는 식 (1-6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 - I_2 = -4A_o A_r \sin\left(\phi - \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin \frac{1}{2} \Delta\phi \quad (1-6)$$

3. 실험

3.1 실험장치구성 및 방법

3.1.1 UTM

본 연구에서는 UTM을 사용하여 인장실험 및 압괴실험을 실시하였고, 동시에 ESPI로 y 방향의 면내 측정과 z 방향의 면외변위 촬영을 실시하였다. Fig. 2에 실험장비인 Instron사의 UTM 장비에 인장 및 압괴실험을 위한 구성을 나타내었으며, 압괴의 속도는 0.5mm/min의 속도로 진행되었다.

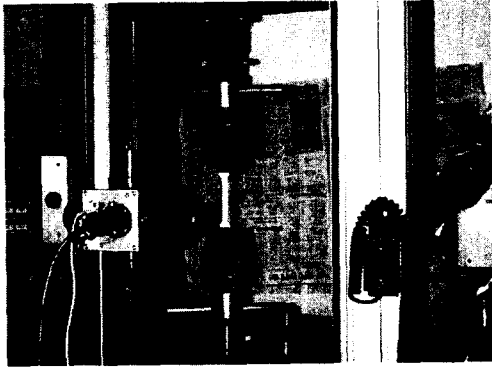


Fig. 2 Photography of experimental setup

3.1.2 ESPI

ESPI 실험장치는 독일 Ettemeyer 사의 상용장비인 3D-ESPI Sensor를 사용하였으며 압력실험시 y 축의 변위와 z 축의 변위를 동시에 연속적으로 촬영하는 방법을 사용하였다. 변위 측정에 사용된 광원은 532nm의 파장을 가지는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 레이저가 조사된 표면으로부터 스펙클의 간섭현상을 CCD 카메라를 통해 전기적인 신호로 바꾸고 Frame Grabber를 통해 저장되고 마지막으로 감산처리를 하여 간섭무늬를 얻는다. ESPI실험장치의 구성도는 Fig. 3에 나타냈다.

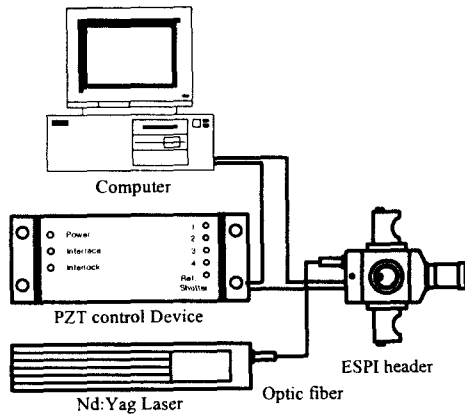


Fig. 3 Schematic of measuring System

3.2 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 정사각단면을 사용하였으며, 폭의 변화를 주었다. 시험편의 형태는 Fig. 4에 나타내었고 치수는 Table 1에 나타내었다.

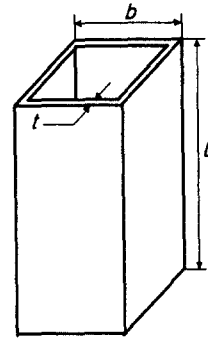


Fig. 4 Geometry of tested specimen

Table. 1 Dimension of specimen

	t (mm)	b (mm)	L (mm)
Type 1	1	25	180
Type 2	1	30	180
Type 3	1	35	180

4. 실험 결과

4.1.1 인장실험

실험의 신뢰성을 높이기 위해서 스트레인 게이지를 이용하여 탄성계수를 측정하였으며, 동시에 ESPI를 이용하여 y 변위를 측정하였다. y 변위의 Phase map 과 Unwrapping 이미지를 Fig. 5에 나타내었으며, 시험편의 인장실험 결과를 Table. 2에 나타내었다.

Table. 2 Mechanical properties of specimen

Aluminum alloys (6060-T5)	
Yield strength (σ_y)	270 MPa
Young's Modulus (E)	72.1 GPa

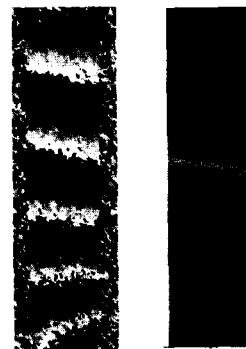


Fig. 5 Photography of Phasemap, Unwrapping image

4.1.2 사각튜브 압괴실험

실험 목적인 사각튜브의 압괴시 변형거동을 나타내는데 있어서 시험편의 재질이 알루미늄이므로 연강과는 달리 Fig. 6과 같은 형태로 나타나게 된다. 3D-ESPI 센서의 장점인 연속촬영 기법을 이용하여 y 방향을 측정하였으며, 실험 결과가 인장실험에서 나타나는 Phase map이나 Unwrapping 상태가 유사하였다. 이때 최초 하중이 가해지는 순간부터 사각튜브가 좌굴하중에 도달시까지의 변형을 UTM과 ESPI를 이용하여 각각 측정된 결과를 Table. 3에 나타내었으며, 최대 8% 이내의 정확한 결과를 보여주고 있다.

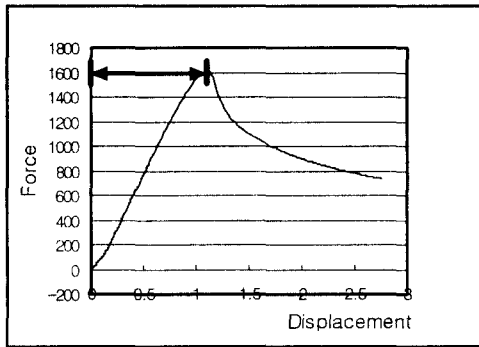


Fig. 6 Result of Compress testing

Table. 3 Comparison of displacement of y-axis
Unit (mm)

	1	2	3	4	5
UTM	1.2373	1.1250	1.2170	1.0498	1.1333
ESPI	1.1920	1.1000	1.2700	1.0540	1.2280
Error(%)	3.7	2.2	4.4	0.4	8.4

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 ESPI 장비를 이용하여 정사각튜브의 압괴시 변위를 측정하여 기존의 방법으로는 측정 불가능했던 z 방향의 변위를 계측하고자 시도하였다. 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 인장 실험시 ESPI 장비와 동시에 촬영을 하여 변위를 측정하였으며, 그 결과는 최대 8% 이내의 오차로 정확성을 가졌다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다. (1)ESPI를 이용하여 인장실험을 수행하였으며 스트레인 게이지를 이용한 실험과 비교하여 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다. (2)사각튜브의 압괴실험에 적용하여 y 방향 변형을 측정하였고, 최대 8%이내의 오차율을 보였다. (3)또한, 연속촬영기법을 이

용하여 프린지를 획득하면서 부재가 좌굴에 도달될 때를 알 수 있었다.

정밀측정이 가능한 ESPI를 이용하여 부재가 국부 좌굴이 될 때의 변형을 x방향 변형, y 방향변형, z 방향 변형을 동시에 측정이 가능함을 나타내는 것이며, 산업전반의 여러 분야의 정밀측정에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김경석 외 4명 "레이저 응용 기법에 의한 기계구조물의 비파괴 안전성 평가기술", 한국정밀공학회, 2000.10
2. Gudmun A. Slettemoen: General analysis on fringe contrast in electronic speckle pattern interferometry, 26(3), 313~327, 1979.
3. Timoshenko, P. and Gere, M. "Theory of Elastic Stability", McGRAW-HILL, 1988
4. Allen, H. G. and Bulson, P. S. "Background to Buckling", McGRAW-HILL, 1980
5. T. Usami and Y. Fukumoto, "Local and Overall buckling of Welded Box Columns." 1982
6. 한병기 외 3명 "사각 튜브의 국부좌굴과 전체좌굴", 대한기계학회, 1996
7. Markstrom, K. and Storakers, B., "Buckling of Cracked Members Under Tension," Int. J. Solids and structures, Vol. 16, No.4, pp. 217~229, 1980