

레이저 스페클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구 (Ⅱ)

강 영 준*, 노 경 원**, 나 의 균***

A Study on Measurement and Analysis of In-Plane Deformations by Using Laser Speckle Interferometry (Ⅱ)

Young-June Kang*, Kyung-Wan Rho** and Eui-Gyun Na***

ABSTRACT

Recently Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) has been studied because it has the advantages to be able to measure the whole-field surface deformations of engineering components and materials in industrial areas with noncontact. The speckle patterns to be formed with interference phenomena of scattering light from rough surfaces illuminated by laser light have phase informations of surface deformations. In this study we used this interference phenomena and the phase shifting method to measure the in-plane deformations, together with the use of digital image equipment to process the informations contained in the speckle pattern and to display consequent interferograms on TV monitor. FEA was performed before experiments and we obtained good agreement between the experimental results and FEA.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자 스페클 패턴 간섭법), In-plane Displacement(면내 변위), Interferogram(간섭무늬), Image Processing(화상처리), Phase Shifting Method(위상이동법), FEA(유한요소해석)

1. 서 론

홀로그래피 간섭법(holographic interferometry)^{(1),(2)}을 이용한 측정 방법은 광학적으로 거친 측정 대상 표면 때문에 측정 민감도가 대단히 우수하고, 비접촉식으로 검사 대상에 영향을 주지 않으며 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분의 전 영역이 측정 가능하다는 장점을 갖게 되었다. 그러나 홀로그래피 간섭법의 느리고 복잡한

기록 및 재생 과정은 현재 홀로그래피 간섭법을 이용함에 있어 하나의 난점으로 작용하고 있으며, 특히 실시간 측정이 요구되는 산업 현장은 이러한 단점 때문에 홀로그래피 간섭법의 이용이 매우 힘든 실정이다.

그러므로 홀로그래피 간섭법의 장점들을 수용하며, 동시에 그의 단점을 보완하는 신속한 비디오 시스템의 사용이 제안되었는데 이러한 간섭 시스템을 전자 스페클 패턴 간섭법(electronic speckle pattern interferometry,

* 전북대학교 기계공학부

** 전북대학교 대학원

*** 군산대학교 기계공학부

ESPI)^{(3),(4),(5)}이라 한다. ESPI는 측정 물체의 변형 정보를 갖고 있는 간섭무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 사용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 대단히 용이하며, 현장 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 ESPI가 현장에 보다 적합하게 적용되기 위해서는 외란에 덜 민감한 면내 변형 측정 ESPI가 적합하다.

이에 본 연구는 위 실험 기법들의 단점을 보완함과 동시에 관측 범위가 좀더 넓고 원거리 검사가 가능한 레이저 계측법의 일종인 ESPI를 이용하여 측방향으로 하중이 가해진 원형 구멍과 홈이 있는 시편의 면내 변형을 실시간으로 측정하였으며 본 실험을 수행하기 전 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS⁽⁶⁾를 이용하여 실험 결과를 미리 예측해 보았다. 실제 실험에서는 변형의 요철 정보를 알기 위해서 위상이동법(phase shifting method)^{(7),(8)}을 수행할 수 있도록 레이저빔의 위상을 이동시킬 수 있는 압전형 변환기(piezo-electric transducer, PZT)를 간섭계 내에 구성하여 물체의 변형 정보를 나타내는 위상도(phasemap)를 얻고 화상처리법(image processing method)을 이용하여 전체 변위의 정량적인 해석을 수행하였다.

2. 위상이동법

단지 간섭무늬만으로는 변형의 요철 정보를 확인할 수 없으며, 복잡한 간섭무늬인 경우 정확한 변위량을 알기가 쉽지 않으므로 변형의 요철 확인 및 화상처리 시스템을 이용한 변형의 정량화를 자동적으로 수행하기 위해서 위상이동법을 사용한다.

변형 정보를 알고자 하는 구조물의 변형 전과 변형 후에 물체에서 산란되어 나오는 파의 복소 진폭에 따른 빛의 세기인 간섭무늬 패턴 즉, 관측면 x, y좌표 하나의 화소 밝기는 다음 식과 같다.

$$I_i(x) = I_o(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \alpha_i]\}$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 우리가 알고자 하는 것은 두 파의 위상차 즉, 변형에 의한 간섭위상 $\Delta\phi(x)$ 이다. 변위의 간섭무늬 패턴 생성 시에는 변형 전후의 스펙클 상(image)이 2개만 필요하다. 그러므로 변형 전에 하나의 상을 메모리에 저장하고 변형 후에 들어오는 영상을 잡아서 메모리에 저장한 후 프레임 그래버(frame grabber)에서 두

상을 감산하여 처리해 주면 위상 정보가 들어있는 간섭무늬의 패턴을 획득할 수 있다. 그러나 계단형의 위상도를 획득하기 위해서는 8개의 영상(frame)이 필요하다. 이 8개 중 4개는 변형 전의 스펙클 패턴 상을 말하고, 나머지 4개는 변형 후의 스펙클 패턴을 말한다. 이렇게 8개의 변형 전후의 상을 구하기 위해서는 간섭계의 두 빔 중에서 하나의 빔을 위상 이동시켜야 한다 그러기 위해서 압전형 변환기를 사용하여 식(1)의 α_i 를 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상 이동시켜 준다. 이렇게 위상 이동이 되어 식(2)에서 식(5)에 따른 상대적인 위상차를 지니는 4개의 간섭무늬 상을 획득하게 된다. 이 식들처럼 위상 이동에 의하여 간섭무늬가 변한 결과가 그림 1의 (a), (b), (c)와 (d)에 각각 보여진다.

그리고 식(2)에서 식(5)의 연립방정식에 의해 구해진 식이 식(6)이며, 이 식에 의해 그림 2와 같은 하나의 위상도(phasemap)를 형성하게 된다.

$$I_1(x) = I_o(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x)]\} \quad (2)$$

$$I_2(x) = I_o(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \pi/2]\} \quad (3)$$

$$I_3(x) = I_o(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \pi]\} \quad (4)$$

$$I_4(x) = I_o(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + 3\pi/2]\} \quad (5)$$

$$\Delta\phi(x) = \tan^{-1}\left[\frac{I_4(x) - I_2(x)}{I_1(x) - I_3(x)}\right] \quad (6)$$

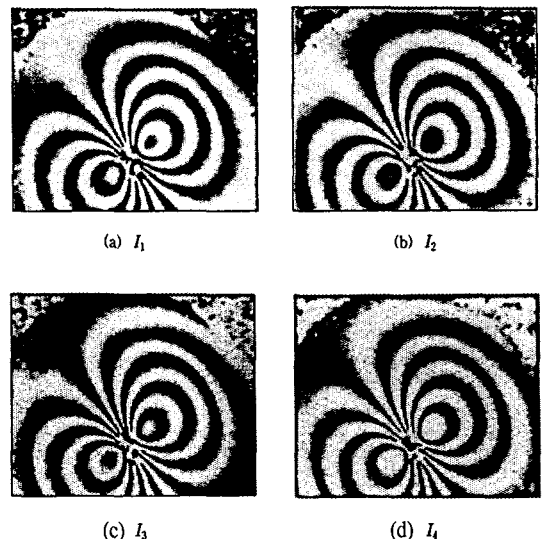


Fig. 1 Phase shifted images; (a)0, (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$

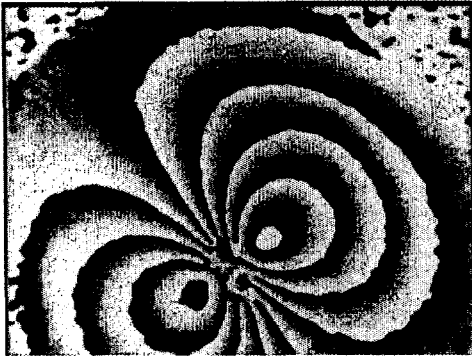


Fig. 2 Phasemap calculated from Fig. 1

이러한 기법을 4-프레임 위상 이동법(4-frame phase shifting method)이라 하며 변위를 나타내는 간섭무늬는 이러한 위상정보를 포함하고 있다. 이렇게 4개의 간섭무늬 상을 받아 만든 상은 2π 씩 나누어진 계단 형 위상 지도인 불연속 위상도를 나타내게 된다. 그러나 위상도 만으로는 정량적인 값을 알 수 없기 때문에 위상펼침(unwrapping) 알고리즘을 통하여 위상도의 2π 씩 나누어진 부분을 서로 이어주어야 한다.⁽⁹⁾ 그러면 변위 정보를 담고 있는 위상펼침도(unwrapping image)를 구할 수 있게 된다.

3. 유한요소해석 및 결과

ESPI를 이용한 실험에 앞서 실험에서 나온 측정 결과

를 어느 정도 유추하고 비교하기 위 하여 상용 유한요소 해석 코드인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석 시뮬레이션을 해 보았다.

이러한 해석을 수행하기 위해 실제 실험에서의 환경과 동일한 조건을 주었으며, 그림 3의 기하학적인 구조와 같이 원형 구멍이 있는 시편과 홈이 있는 시편을 축 방향으로 인장하였다. 시편의 재질은 알루미늄합금 2014-T6이다.

원형 구멍이 있는 시편의 면내 변형 결과, 즉 하중이 가해진 영역 주변에서 시편 표면 위에 위치의 함수인 축 방향 변위와 그에 따른 응력 분포가 그림 4의 (a)와 (b)에 있다. 여기에서 그림 4의 (b)는 시편의 응력 분포를 나타내는데, 어떤 부재에 구멍이 있는 경우 인장 응력이 가해질 때 급격한 변화인 불연속을 가지므로 그 부분에 높은

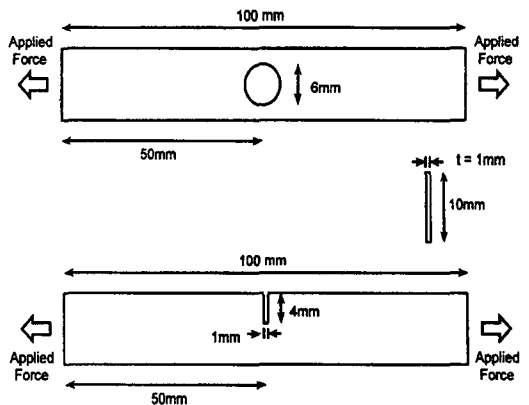
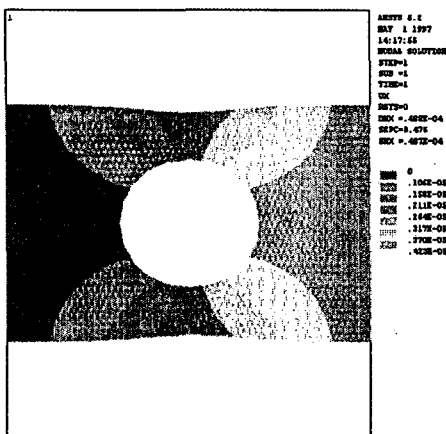
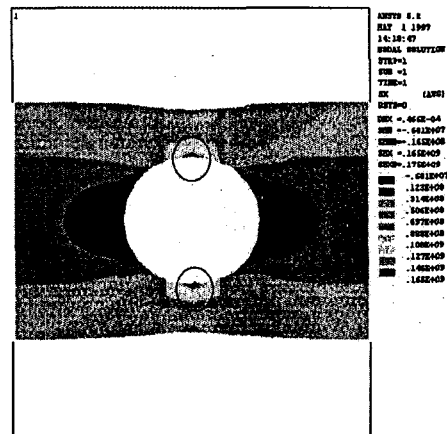


Fig. 3 Specimen geometry used for finite-element analysis



(a) Distribution of in-plane displacement



(b) Distribution of in-plane stress

Fig. 4 Finite element analysis of distribution of in-plane displacement and stress with stress concentration around a hole in a specimen

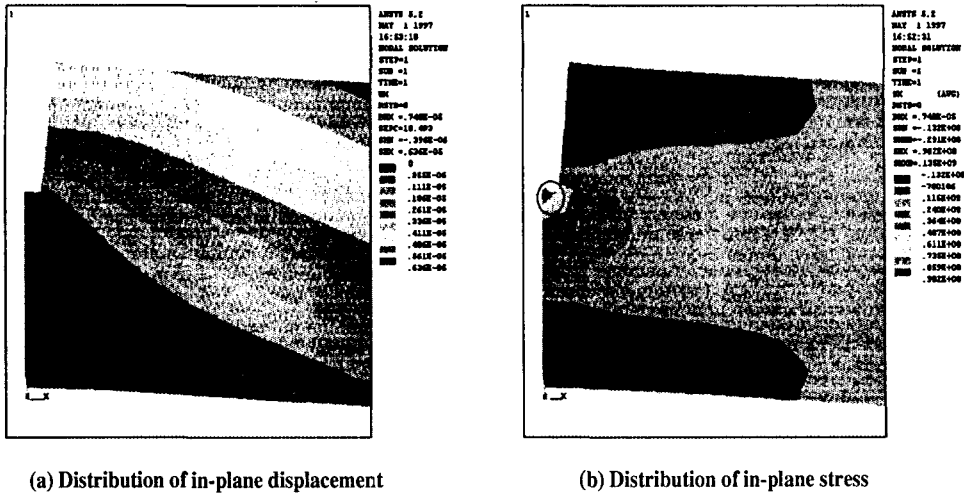


Fig. 5 Finite element analysis of distribution of in-plane displacement and stress with stress concentration around a crack in a specimen

국부적 응력이 존재한다. 이를 응력집중현상이라 하며, 그림 4의 (b)에서 보면 구멍의 상단과 하단에서 이러한 현상이 존재함을 알 수 있다. 시편에 가해진 하중은 3.5 kPa이며, 그에 따른 최대 변위는 4.23 μ m이다.

홈이 있는 시편의 면내 변형 결과는 그림 5의 (a)와 (b)에 나타나 있다. 이 시편의 변형 해석은 기하학적인 특성을 고려하여 좌우 대칭인 관계로 우측만을 고려하여 해석하였다. 하중을 3.5 kPa 가했을 경우 면내 변위의 분포가 그림 5의 (b)이며, 그에 따른 최대 변위는 6.4 μ m이다. 그림 5의 (b)는 응력 분포를 나타내고 있으며, 홈이 있는 영역에서 원이 표시되어 있는 부분이 변형에 급격한 변화를 갖는 응력집중부이다.

이상의 유한요소해석 결과는 면내 변형에 민감한 ESPI 시스템으로 측정된 실험 결과와 잘 일치함을 다음 장에서 알 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 시편에 인장을 가하기 위한 인장시험기의 구성도이다. 이 링(ring) 형태의 인장기는 그 특이성에 따라, 링의 윗 부분에 있는 조정 나사를 돌려서 측정 시편에 인장력을 가한다. 인장을 가하면, 시편은 길이 방향으로 늘어나지만 링은 넓이 방향으로 팽창하고 길이 방향으로 줄어들게 된다. 그림 7은 링 인장시험기의 링에 가해지는 정확한 인장력을 산출하기 위하여 로드셀(load cell)에 의해 획득된 힘-변위 선도이다. 이 실험은 그림 7에서 보는

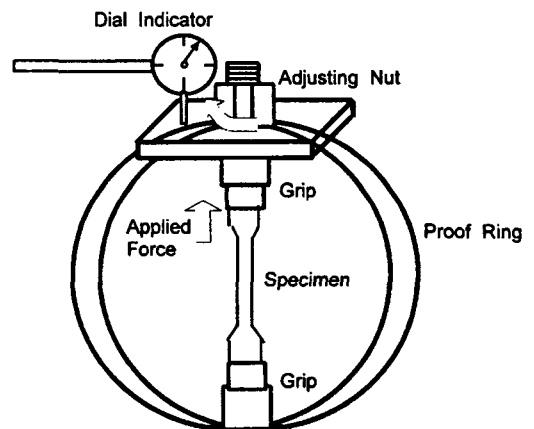


Fig. 6 Geometry of proof ring capable of measuring tension force used for the experiments

바와 같이 3차례에 걸쳐 반복 실험을 하였으며, 항상 일치하는 선도를 그리므로 재현성이 있다는 판단 하에 이 값들을 토대로 시편을 인장하였다.

그림 8은 실험에 사용되어진 in-plane ESPI와 화상 획득 및 처리 시스템의 구성도이다.⁽¹⁰⁾ 그림을 보면 위상 이동법을 수행하기 위하여 PZT에 일정 크기로 전압을 주어 각각의 화상이 일정한 위상차를 지닐 수 있도록 PZT 드라이버(driver)를 컴퓨터와 연결하여 자동으로 위상을 맞추어 줄 수 있도록 구성하였다.

이 시스템에 사용된 레이저는 파장이 532 μ m인 제 2조화파 연속레이저(2nd harmonic CW Nd:YAG Laser)

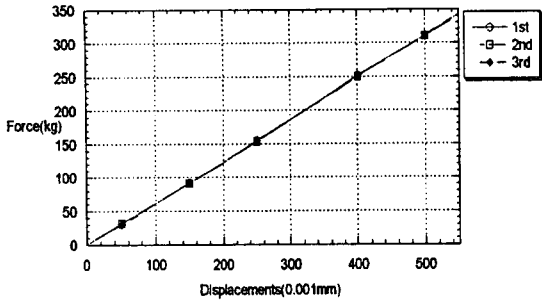


Fig. 7 Force and displacement diagram of proof ring generated in a load cell

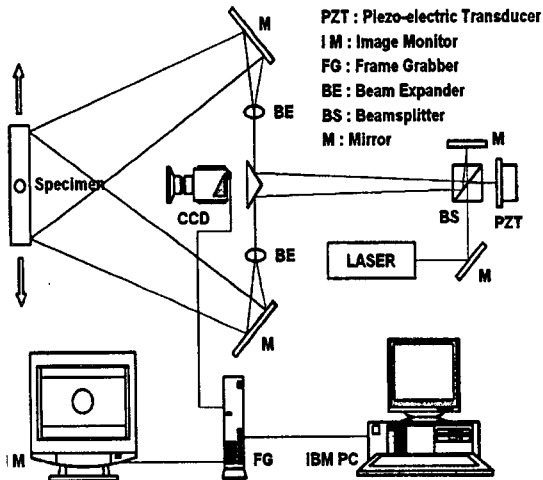
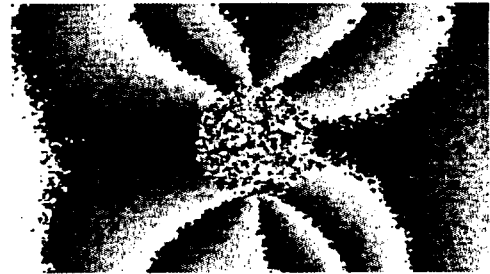


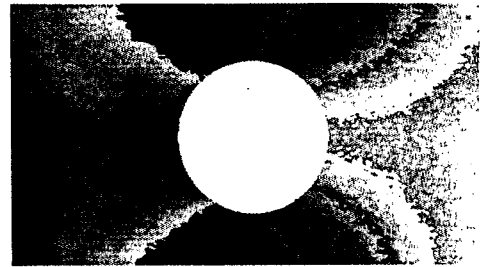
Fig. 8 Schematic of the laser interferometer used in the ESPI and image acquisition system

이며 시편의 변형으로 인하여 측정된 간섭무늬는 CCD 카메라를 통해 그 상을 획득할 수 있도록 구성되어 있다. CCD 카메라는 512×512 화소로 이루어진 단색 비디오 카메라를 사용하고 있으며, 최적의 간섭무늬 계측은 화소의 밝기값이 포화 상태에 가까울 때 이루어졌다.

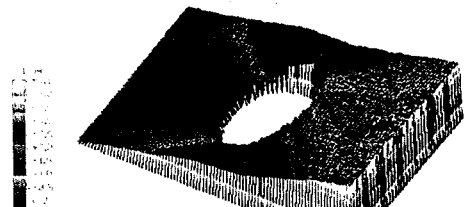
그림 9을 보면 원형 구멍을 가지고 있는 시편이 3.5 kPa의 인장응력을 받을 때, 그에 따른 위상도, 위상펼치기와 3차원으로 정량화된 값들을 보여준다. 그림 9의 (a)인 위상도는 위에서 언급하였듯이 변형 전 4개의 이미지와 변형 후 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 식 (6)과 같이 조합하여 구한 상을 말한다. 그러나 위상도 만으로는 완벽하게 정량화가 이루어지지 않은 상태이므로 이 위상도의 위상을 펼치는 이미지 처리 작업을 해 주



(a) Phasemap of fringe



(b) Unwrapping image for quantification

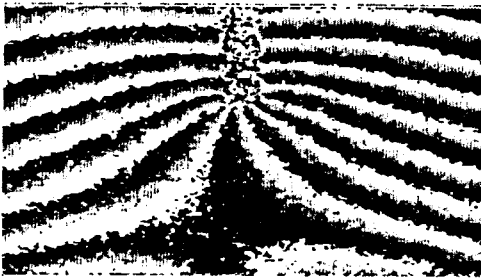


(c) 3-D plot of fringe

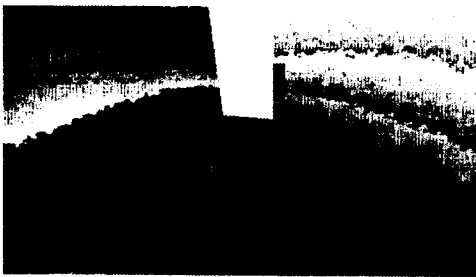
Fig. 9 Results of a deformed specimen with a central hole

는데 그 결과가 그림 9의 (b)인 위상펼치기(unwrapping)이며, 이를 3차원으로 나타낸 것이 그림 9의(C)이다. 그 결과 약 4.5 μ m의 변위가 생성됨을 알 수 있으며, 그림 4의 (a)인 유한요소해석 결과와 약 6%의 오차를 허용하고 있음을 알 수 있다.

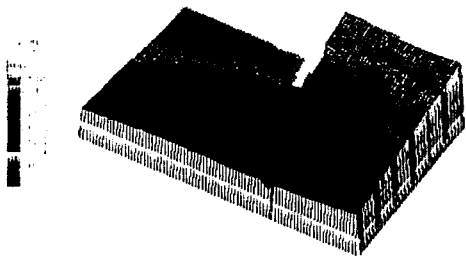
그림 10의 흠이 있는 시편도 원형 구멍이 있는 시편과 같은 방법으로 정량화를 했다. 그 결과 인장응력이 3.5 kPa일 경우 변위가 약 7 μ m임을 알 수 있으며, 유한요소 해석 결과인 그림 5의 (a)와 비교하여 약 8.6%의 오차를 갖고 있다.



(a) Phasemap of fringe



(b) Unwrapping image for quantification



(c) 3-D plot of fringe

Fig. 10 Results of a deformed specimen with a central crack

실험 결과와 유한요소해석 결과 사이의 이러한 오차는 실험시 만능 인장 시험기가 아닌 프루프링 (proof ring)을 사용하여 인장을 가했기 때문에 발생하는 전단력에 의한 결과로 생각된다.

5. 결론

축 방향으로 인장력이 가해진 중앙에 구멍이 있는 시편과 홈이 있는 시편의 면내 변형량을 알아보기 위하여 실험에 앞서 유한요소법을 통해 그 결과를 어느 정도 유추하였으며, 실제 ESPI시스템을 구성하여 각 시편들의 변

형 간섭무늬를 획득해본 결과 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 보였다.

본 실험은 정량화 수행을 위해서 반드시 필요한 위상 이동법에 대해서 이론적으로 고찰하고 간접적인 실험을 통해서 위상도를 획득하였으며, 본 실험을 수행하기 전에 간단한 유한요소해석을 통해서 실험 결과를 유추해 볼 수 있었다.

실제 실험에 있어서는 비교적 구성이 간단하고 가격 대 성능비가 좋은 링 인장시험기를 이용하였으며, 본 인장시험기의 안정성을 그림 7의 결과로 보여지는 로드셀 실험에 의해서 획득하였다. 그림 8의 간섭계에서 보여주는 것처럼 ESPI의 특성상 위상 이동법과 화상처리법을 이용하여 정량화를 수행하였으며, 그 결과가 각각 그림 9와 그림 10에 나타나 있다. 실험 결과는 유한요소해석과 비교하여 각각 약 6%와 8.6%의 오차를 갖고 있으며, 이 오차는 링 인장시험기의 구조적인 문제에 의한 것이라 생각된다.

본 연구는 현재 잔류응력 검출을 위하여 보다 더 확장되고 있으며, 본 in-plane ESPI 시스템을 이용하여 현장에 존재하는 많은 공학 부품의 면내 변형량을 실시간으로 측정할 수 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호 981-1001-008-2)에 의해서 수행된 연구결과의 일부로서 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. D. Gabor, "A new microscopic principle, Nature(London), Vol. 161, 777, 1948.
2. Chartes M. Vest, "Holographic Interferometry," John Wiley & Sons. Press, pp. 36-66, 1979.
3. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed.," Cambridge Univ. Preas, pp. 165-196, 1989.
4. A. E. Ennos, "Speckle interferometry," in Laser speckle and related phenomena, J. C. Dainty ed., chapter 6, Springer-Verlag, New York, 1975.

5. R. Ritter and K. Galanulis, "Notes on the Application of Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 26, pp. 283-299, 1997.
6. ANSYS Procedures Volume I User's Manual, Reversion 5.2, Swanson Analysis System. Inc, 1994.
7. K. Creath, "Phase-measurement interferometry: Beware these errors," *SPIE*, Vol. 1553, pp. 213-220, 1991.
8. A. A. M. Maas and H. A. Vrooman, "In-plane strain measurement by digital phase shifting speckle interferometry," *SPIE*, Vol. 1162, pp. 248-256, 1989.
9. 강영준, 문상준 "위상이동 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 파이프의 내부결함 측정법," *한국정밀공학회*, Vol. 13, No. 2, pp. 68-75, 1996.
10. G. Gulker, K. Hinsch, C. Holscher, A. Kramer and H. Neunaber, "Electronic speckle pattern interferometry system for in situ deformation monitoring on buildings," *Optical Engineering*, Vol. 29, No. 7, pp. 816-820, 1990.