

ESPI를 이용한 자동차 TPS 면외변형 측정

Out-of-Plane Deformation Measurement of TPS in Vehicle Using ESPI

한상길*, 함효식*, 함삼현*, 이종황**, 정원욱**, 이창희***, 이상봉*, 최성을*†

Sang-Kil Han*, Hyo-Shick Ham*, Sang-Hyun Ham*, Jong-Hwang Lee**,

Won-Wook Jung**, Chang-Hee Lee***, Sang-Bong Lee* and Sung-Eul Choi*†

초 록 본 논문에서는 ESPI 방법을 이용하여 자동차 엔진의 핵심 부품인 TPS의 열변형력에 따른 면외변형을 측정하여 열변형 특성을 분석하였다. 높은 해상도의 CCD와 줌렌즈를 사용하여 부품의 검사영역을 가로세로 각각 5 cm로 최소화하였다. 주행거리가 다른 TPS 부품들을 4-step 위상이동법과 위상 연속화를 통해 변형량이 연속적으로 변하는 위상도를 얻었고, 3차원으로 변형의 모양과 크기를 나타내었다. 약 70°C의 온도를 유지하면서 TPS 부품에 열을 가한 경우 주행거리가 길어질수록 TPS 변형은 크게 측정되었고, 위로 볼록한 형태로 변형되었다. 그리고 내부결함이 있는 부품에서는 위상도에 불연속적인 무늬가 나타났고, 아래로 오목한 모양을 갖는 변형으로 나타났다.

주요용어: ESPI, 위상이동법, 면외변형, TPS, 내부결함

Abstract In this paper, we analyzed the characteristics of thermal deformation of the TPS which is a core part of engine in vehicle by measuring out-of-plane deformation using ESPI. Inspection area of a test piece was minimized to 5 cm by 5 cm by using a high resolution CCD and a zoom lens. 4-step phase shifting method was used along with phase unwrapping algorithm to get a continuous phase map, configurations and deformations were displayed as 3D images. When heating the test pieces while maintaining the temperature at about 70°C, the out-of-plane deformations were measured. The results showed that a test piece with longer distance traveled tends to show larger thermal deformation, we could observe a convex shaped deformation on the surface. The inner defect sample, we could monitor discontinuous pattern phase map, and a concave shaped deformation on the surface.

Keywords: ESPI, Phase Shifting Method, Out-of-Plane Deformation, TPS, Inner Defect

1. 서 론

양자광학의 발전으로 레이저가 개발되고 그 우수한 성질을 이용한 연구가 여러 응용분야에 다양하게 적용되고 있다. 레이저는 뛰어난 단색성, 시공간인 가간섭성, 그리고 짧은 펄스(pulse) 광의 발생 등의 여러 특성이 있다. 이러한 레이저광을 이용한

응용계측 방법으로 홀로그래피(holography) 간섭법과 스페클 무늬(speckle pattern) 간섭법이 있다[1].

스페클 무늬 간섭법 중 하나인 ESPI(electronic speckle pattern interferometry) 방법은 신속한 기록 및 처리 과정으로 다른 비파괴 검사법에 비해 부품의 변형에 대한 해석이 간단하여 정량적인 실시간 계측이 가능하다는 커다란 장점을 가지고 있

다. 생산된 부품의 신뢰성을 구축하기 위하여 부품의 신뢰성 평가는 매우 중요하다. 특히, 부품의 결함을 진단하는 광학적 방법 중의 하나인 ESPI는 실시간으로 비파괴검사를 할 수 있다는 장점이 있어 최근에 많은 각광을 받고 있다. S. Sumi는 피로에 따른 표면구조의 변화를 스펙클 무늬 방법으로 다루었으며, N. J. Butters는 ESPI와 이와 유사한 방법들을 소개하였다[2,3]. 최근에는 이러한 기술이 점점 발전하여 펄스 레이저를 이용한 짧은 순간에서의 변형 측정[4-6]뿐만 아니라 비교적 큰 전자부품으로부터 마이크로 스케일의 MEMS (micro-electric mechanical system)에 이르기까지 다양한 크기의 부품의 미세한 역학적 거동 측정에 적용되고 있다[7,9]. 자동차 엔진의 핵심부품 중의 하나인 TPS(throttle position sensor)는 주행거리가 증가함에 따라 열 및 진동과 같은 지속적인 변형력(stress)으로 인하여 취약부분에 결함이 생겨나 궁극적으로 자동차 엔진에 커다란 문제를 일으키게 된다.

따라서 본 연구에서는 높은 해상도의 CCD (charge coupled device)와 줌(zoom)렌즈를 사용한 ESPI 방법을 통하여 다양한 주행거리의 TPS를 부품으로 하여 외부 열변형력에 의한 면외(out-of-plane)방향의 변형을 실시간으로 측정하여 TPS의 성능평가 및 내부결함을 측정하고자 하였다.

2. 이론

2.1. 면외 변위 측정

간섭성(coherence)이 높은 레이저가 물체에 조사되어 굴절률이 일정하지 않은 매질을 통과하거나 광학적으로 거친 표면에서 반사될 때, 고운 입자 형태의 밝고 어두운 무늬가 Fig. 1과 같이 무질서하게 나타나는데 이것을 스펙클 무늬라고 한다[10]. 이 스펙클 무늬는 오랫동안 노이즈(noise)로 취급되었으나 현재는 부품표면의 위상정보를 갖고 있어 ESPI에서는 매우 유용하게 활용되고 있다.

Fig. 2는 면외 변위 측정용 ESPI 시스템의 개략도이다. 물체에서 반사된 물체파(objective wave)와 직접 들어온 기준파(reference wave)가 서로 간섭을 일으켜 CCD에 입사된다. 물체에 변형을 가하기 전, CCD에 입사한 물체파와 기준파의 간섭무늬를 컴퓨터에 1차로 기록하고 외력에 의해 변형된 간섭무늬를 2차로 기록하여, 1차 간섭무늬와 2차 간섭무

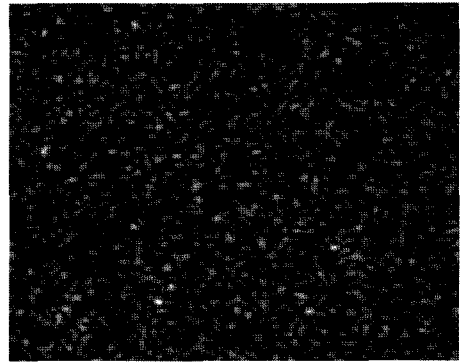


Fig. 1 Speckle pattern

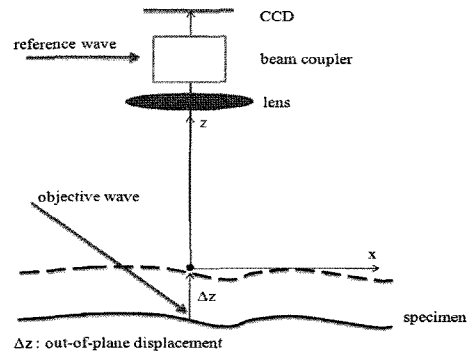


Fig. 2 Schematic diagram for measuring out-of-plane ESPI

늬의 위상 변화를 이용해 물체의 변형을 측정한다.

이때, 물체에 변형을 가하기 전에 기록한 1차 간섭무늬의 밝기(intensity), I_i 는

$$I_i = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi_O - \phi_R) \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서 I_O , I_R 은 물체파, 기준파의 밝기이고, ϕ_O , ϕ_R 은 각각의 위상이다. 물체 변형 후 기록한 2차 간섭무늬의 밝기, I_f 는

$$I_f = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi_O - \phi_R + \Delta\phi) \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 여기서 $\Delta\phi$ 는 물체 변형에 의한 물체파의 위상변화이다[11,12]. 위상변화 $\Delta\phi$ 는 면외 방향의 변위인 z 축 성분의 변형 정보를 담고 있고, 다음과 같은 관계식을 이용해서 변형량 Δz 와의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z \quad (3)$$

2.2. 4-Step 위상이동법

앞에서 1차, 2차로 기록한 무늬는 물체파와 기준파가 서로 간섭하여 만들어내는 간섭무늬의 밝기 분포이다. 밝기 분포만을 가진 영상 하나만으로는 위상정보를 얻어 낼 수 없기 때문에 일정한 간격으로 위상 이동을 시킨 최소 4장의 영상이 필요하다. 본 연구에서는 4-step 위상이동법(phase shifting method)을 위해 물체의 변형 전(1차)에 4장, 변형 후(2차)에 4장의 영상을 기록하였다. 일정한 위상 변화를 갖는 4장의 영상을 얻기 위해서 PZT(piezoelectric transducer)가 부착된 거울이 사용되며, 변형 전후 각각의 경우 PZT 거울을 미세 이동시키면서 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 의 위상차를 갖는 간섭무늬영상 4장을 얻을 수 있는데 이들 각각 영상의 밝기 분포는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \\
 I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\
 I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi) \\
 I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그 다음 식 (5)을 이용하면 위 4장의 영상에서 물체의 변형 전 위상, ϕ 를 얻을 수 있다[13].

$$\therefore \phi = \arctan \left[\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1} \right]
 \tag{5}$$

그리고 연산처리가 된 변형 후 영상에서 같은 연산 처리가 된 변형 전 영상을 빼면 식 (3)의 면외 방향 변형정보를 얻을 수 있는데 이것이 Fig. 5에서 보는 것과 같은 위상도(phase map)로 나타난다. 4-step 위상이동법에서 얻어진 위상도에서 무늬 하나의 간격은 PZT 거울을 이동시켜서 얻은 위상차로써 광원 파장의 $\lambda/8$ 가 된다[14].

3. 실험 방법

3.1. 실험장치

실험 장치구성은 Fig. 3과 같으며 물체의 면외 방향인 z축 변형을 측정하여 분석하였다. 파장 532 nm 인 CW Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하였다.

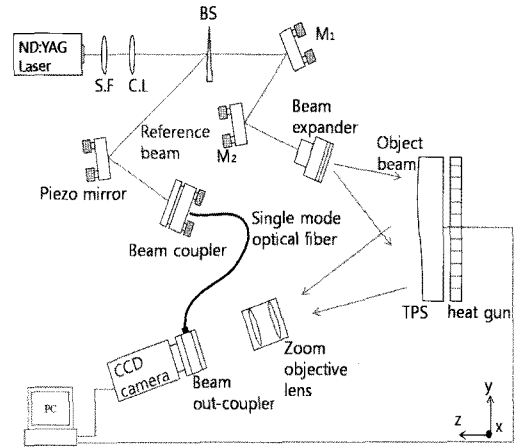


Fig. 3 Schematic diagram of ESPI measuring system



(a) Side view of TPS (b) Measuring part

Fig. 4 TPS

레이저에서 나온 광은 공간필터(spatial filter, S.F)를 통과하여 발산되고, 초점거리가 150 mm인 평행광 렌즈(collimating lens, C.L)를 지나 광 분할기(beam splitter, BS)에 의해 둘로 나뉜다. 이 중 한 광인 기준파는 PZT에 부착된 거울에서 반사되어 간섭무늬형성과 위상이동에 이용된다. 광 분할기에서 투과된 광은 M_1 , M_2 에서 다시 반사되어 광 결합기와 줌 대물렌즈를 차례로 지나서 물체에 조사된다. 물체에서 반사된 물체파와 기준파는 728(H)×568(V) 픽셀 해상도의 CCD로 들어간다. 그리고 두 광에 의해 생긴 스펙클 간섭무늬는 z축 방향의 변형에 대한 위상정보를 담고 있다. 기록된 영상을 위상이동 방법을 이용하여 위상도를 구했다. arctan의 특성 상 $-\pi/2$ 와 $\pi/2$ 에서 불연속성을 지니게 되는데, 이러한 불연속은 위상연속화(unwrapping) 알고리즘을 통해 물체 표면에서 발생하는 변형량을 연속적으로 나타내었다. 그리고 영상처리 프로그램을 이용해서 3차원 배열 영상(3D plotting image)로 변환하여 물체의 변형을 3차원으로 나타내어 한 눈에 쉽게 볼 수 있도록 하였다[15].

3.2. TPS 헤드 모듈(Head Module) 면외변형 측정

TPS는 알루미늄 몸체(body)와 헤드모듈로 이루어진 자동차 엔진부품으로 흡입공기 측정 및 연료 분사 시간을 제어하는 중요한 장치이다. Fig. 4(a)에서 흰색점선 부분이 헤드 모듈이고, Fig. 4(b)에서 흰색점선 부분은 부품의 검사영역으로 5 cm × 5 cm 이다. 이곳은 오랜 주행 시간을 할 경우 엔진의 열과 진동 등의 변형력으로 인하여 내부균열이 생겨 불완전연소, 출력저하, 역화(back-fire) 등의 문제가 발생하는 부분이다.

본 연구에서는 국내 H자동차 회사에서 동일한 공정 과정으로 생산된 TPS를 주행거리 별로 제공받은 5가지 부품시료에 열을 가하여서 변형을 일으킨 후 열에 의한 면외변형을 측정하였다. 측정에 사용된 TPS 부품은 주행거리가 각각 0 km, 9,010 km, 24,010 km, 69,583 km, 그리고 122,446 km 이며, 이 중 주행거리가 가장 긴 122,446 km 부품은 실제로 엔진에서 출력저하와 역화의 문제가 발생했던 부품이다.

먼저 약 20℃의 상온에서 준비된 부품 시료에 변형을 가하기 전의 위상 ϕ_{before} 를 구하기 위해서는

네 개의 영상을 얻어야하는데, 이는 PZT를 구동시켜 위상을 $\pi/2$ 씩 증가시키면서 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 인 위상에서의 밝기분포를 갖는 영상을 획득하고, 식 (5)를 이용하여 위상정보를 구하였다.

그 다음에 구동 중인 자동차 엔진의 온도와 비슷한 약 70℃ 정도의 온도가 되도록 열풍기(heat gun)로 부품 시료에 열을 가해 충분한 열변형을 유도한 후, 상온에서 영상을 획득한 방법과 마찬가지로 네 개의 영상을 획득하고, 식 (5)를 이용해서 변형 후 위상 ϕ_{after} 을 구하였다. 그리고 변형 전의 위상 ϕ_{before} 와 변형 후의 위상 ϕ_{after} 로부터 변화된 위상차 $\Delta\phi$ 를 구할 수 있었으며, 식 (3)을 사용해서 면외변형량 Δz 와의 관계를 구할 수 있었다.

4. 실험 결과

Fig. 5의 상단 영상은 주행거리 증가에 따른 TPS 헤드모듈의 표면을 찍은 사진으로 육안으로 별다른 차이가 없었다. Fig. 5 중간 영상은 4-step 위상 이동법을 이용해서 CCD에 촬영된 무늬를 필터링(filtering)하여 나타낸 위상도이다. 그리고 Fig. 5의 하단 영상은 이 위상도를 3차원 배열 영상으로 정

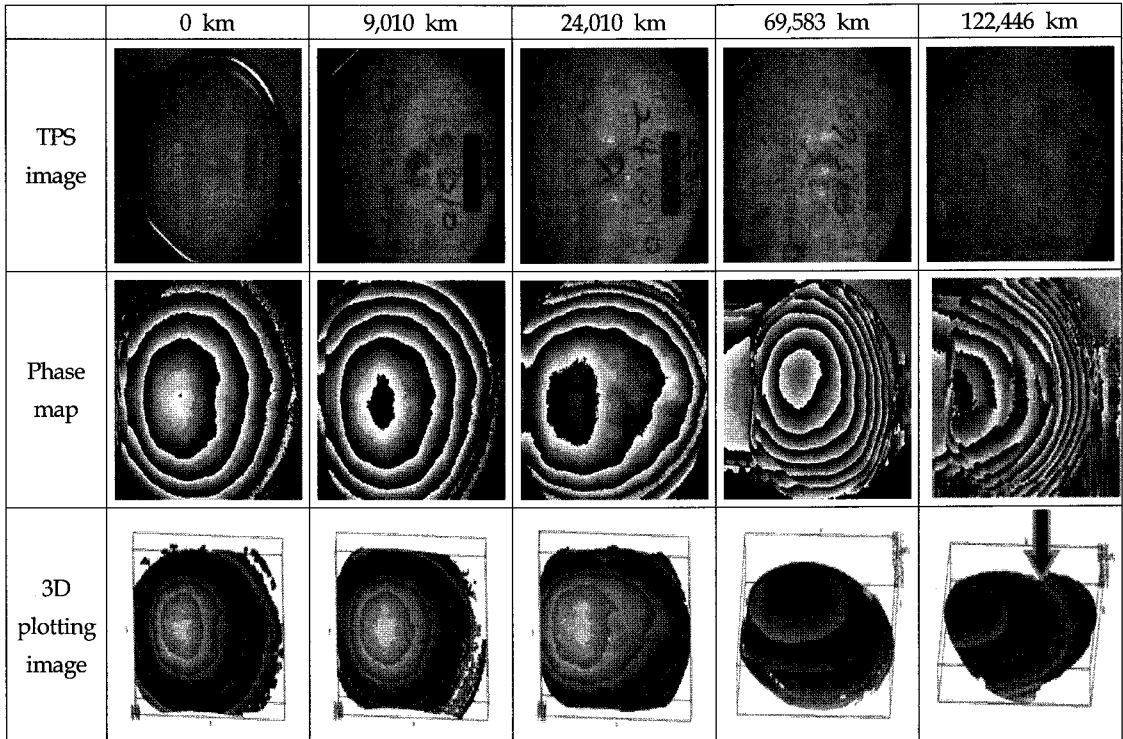


Fig. 5 TPS phase maps & 3D plotting images in different stages of mileage

량화시켜 나타낸 것이다. 우선 TPS 위상도를 살펴 보면, 사용 전 0 km 부품에서는 무늬가 비교적 등간격으로 무늬 간 간격이 넓으며, 무늬의 개수가 7개 정도로 관측되었다. 9,010 km 주행한 부품도 사용 전 부품과 마찬가지로 위상도에 나타난 무늬가 등간격으로 보이지만, 무늬 간 간격이 조밀해진 특징을 보이고, 무늬의 개수는 8개 정도 관측되었다. 24,010 km 주행한 부품에서의 위상도에 나타난 무늬는 가장자리로 갈수록 간격이 좁아지고, 무늬의 개수는 8개로 나타났으며, 0 km와 9,010 km 달리 무늬 간 등간격의 특성은 없어졌다.

69,583 km 주행한 부품은 24,010 km 주행한 부품에 비해 무늬의 간격이 더 조밀해졌고, 특히 부품의 오른쪽 부분에 무늬의 간격이 매우 좁게 측정되었다. 마지막으로 엔진에서 출력저하와 역화의 문제가 발생했던 122,446 km 주행 부품의 위상도에서는 무늬의 개수 파악이 힘들었고, 부품의 오른쪽에 나타난 무늬에서 불연속적인 형태를 보였다. 이를 통해서 상단영상에 배열한 사진은 육안으로 변형측정이 불가능했지만, 위상도를 이용해서 미세 변형량을 구할 수 있었다. 그리고 영상처리 프로그램을 이용해서 위상도를 3차원 배열영상으로 변환하여 물체의 변형을 3차원으로 보여주고 쉽게 분석할 수 있게 나타내었다.

오작동의 문제를 일으킨 122,446 km 부품은 위상도와 3차원 배열 영상에 나타난 것처럼, 간섭무늬 간격이 조밀하며, 특히 화살표로 표시한 시료의 중앙부분에서는 아래로 오목한 모양으로 변형이 일어남을 볼 수 있다. 이 부분에서 다른 부품과 판이하게 다른 변형을 일으키는 이유는 주행에 따른 변형력의 누적으로 생겨난 내부결함 때문인 것으로 판단할 수 있다. 사용 전의 부품은 열변형에 의해 0.84 μm 의 변형을 일으켰으며, 9,010 km 주행한 부품은 1.06 μm , 24,010 km 주행한 부품은 1.32 μm , 69,583 km 주행한 부품은 1.86 μm 정도의 변형을 보였다. 문제를 일으킨 122,446 km 주행 부품은 1.6 μm 의 변형을 보였다. Fig. 6은 3차원 배열 영상에서 나타난 주행거리 별 열변형력에 따른 면외 변형량을 그래프로 나타낸 것이다. 실험에서 측정된 면외 변형 측정의 위상도는 무늬 하나가 대략 0.06 μm 면외변형량에 해당되며, 전체적인 변형량은 이들의 개수를 곱하여 얻어진 값으로 변형의 크기를 나타내었으나, 정확한 값은 프로그램에서 얻어진 값으로 변형량을 구하였다.

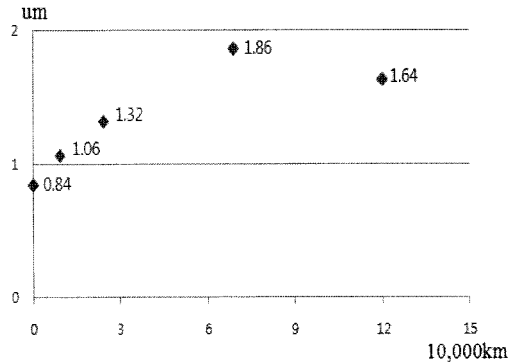


Fig. 6 Mileage vs TPS deformation

5. 결론

본 연구에서는 열과 진동에 취약한 자동차 엔진의 핵심부품인 TPS 헤드 모듈의 열변형력에 따른 면외변형을 주행거리 별로 분석하였다. 실험에 가장인 532 nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 4-step 위상이동법에 의해 만든 위상도에 표현된 무늬하나의 간격이 $\lambda/8$ 의 변형량에 해당하므로 이 실험의 최소 면외변위 측정한계는 대략 66 nm 임을 알 수 있다.

앞의 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론으로 내릴 수 있다. 첫 번째는 122,446 km의 시료를 제외한 모든 TPS 시료들은 주행거리가 큰 것일수록 열변형의 크기도 거의 선형적으로 비례하여 증가함을 보였으며, 두 번째는 122,446 km의 시료를 제외한 모든 시료는 위로 볼록한 모양으로 변형된 것을 보여주었다. 세 번째는 122,446 km인 시료의 경우 열변형에 의해 가장자리부분은 위로 볼록한 모양을 나타내지만 시료의 중심부위에서는 오히려 아래로 오목한 모양으로 변형이 일어남을 볼 수 있었다. 이것은 122,446 km인 시료의 경우는 내부가 정상적으로 열에 의해 고르게 팽창되지 못하고 내부균열에 의해 팽창이 부분적으로 덜 일어난 것으로 해석할 수 있다.

이 실험에서 사용한 ESPI 방법을 이용하면 부품의 물리적 변형 특성을 실시간, 비접촉식으로 측정할 수 있으며, 높은 해상도의 CCD와 줌렌즈를 사용하면 MEMS와 같은 작은 시료에도 적용할 수 있으므로, 앞으로 다양한 크기의 부품의 신뢰성 평가에 폭넓게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] D. Malacara, "Optical shop testing," 3rd Edition, Wiley Series in Pure and Applied Optics, pp. 409-437, John Wiley & Sons Incorporated, United States of America, (1992)
- [2] N. J. Butters and J. A. Leendertz, "Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology," Optics and Laser Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 26-30 (1972)
- [3] S. Sumi, "Speckle pattern correlation method for measurement of surface structural change caused by fatigue," The Society of Materials Japan, Vol. 56, No. 7, pp. 17-21 (1976)
- [4] G. H. Kaufmann, D. Kerr and N. A. Halliwell, "Contrast enhancement of pulsed ESPI addition fringes," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 25-34 (1994)
- [5] A. Davila, D. Kerr and G. H. Kaufmann, "Fast electro-optical system for pulsed ESPI carrier fringe generation," Optics Communications, Vol. 123, No. 4, pp. 457-464 (1996)
- [6] A. J. Moore and C. Pérez-López, "Fringe carrier methods in double-pulsed addition ESPI," Optics Communications, Vol. 141, No. 3, pp. 203-212 (1997)
- [7] P. Aswendt, C. Schmidt, D. Zielke, S. Schubert, "ESPI solution for non-contacting MEMS-on-wafer testing," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 40, No. 5, pp. 501-515 (2003)
- [8] K. S. Kim, K. S. Kang, Y. J. Kang and S. K. Cheong, "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography," Optics & Laser Technology, Vol. 35, No. 8, pp. 639-643 (2003)
- [9] L. Augulis, S. Tamulevicius, R. Augulis, J. Bonneville, P. Goudeau and C. Templier, "Electronic speckle pattern interferometry for mechanical testing of thin films," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 42, No. 1, pp. 1-8 (2004)
- [10] R. K. Mohanty, C. Joenathan and R. S. Sirohi, "Speckle interferometric methods of measuring small out-of-plane displacements," Optics Letter. Vol. 9, No. 2, pp. 475-477 (1984)
- [11] X. Hu and C. Hu, "Measuring in-plane and out-of-plane coupled motions of microstructures by stroboscopic microscopic interferometry," Optics and Laser Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 13-20 (2007)
- [12] D. W. Robinson and D. C. Williams, "Digital phase stepping speckle interferometry," Optics Letter, Vol. 57, No. 10, pp. 26-30 (1986)
- [13] S. Nakadate and H. Saito, "Fringe scanning speckle pattern interferometry," Optics Letter, Vol. 21, No. 6, pp. 72-80 (1985)
- [14] A. E. Dolinko and H. Kaufmann, "Measurement of the local displacement field generated by a microindentation using digital speckle pattern interferometry and its application to investigate coating adhesion," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47, No. 5, pp. 527-531 (2009)
- [15] U. P. Kumar, B. Bhaduri, N. Krishna Mohan, M. P. Kothiyal and A. K. Asundi, "Microscopic TV holography for MEMS deflection and 3-D surface profile characterization," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, No. 9, pp. 687-694 (2008)