

타이어 검사를 위한 Shearography의 응용

김경석[†] · 강기수^{*} · 윤철성^{*} · 양승필^{**}

Shearography in Tire Industry

Koungsuk Kim, Kisoo Kang, Chulsung Yoon and Seungphil Yang

Key Words: Quantitative Analysis of an inside defect(내부결함정량분석), Shearography(전자처리 스페클전단간섭법), The amount of shearing(전단량)

Abstract

In recent years, shearography has significantly improved capabilities in the areas of unbond and separation detection in tires. Although shearography has many advantages for qualitative evaluation, the technique remains the problem of quantitative analysis of inside defects, because shearography needs several effective factors including the amount of shearing, shearing direction and induced load, which exist as barrier for the quantitative analysis of inside defects. Since the factors are highly dependent on inspectors skill and also affect the in-situ workability. The factors were optimized and the size of cracks inside of pipeline and tire has been quantitatively determined.

1. 서 론

기호설명

- u : x 축에서 변위
 v : y 축에서 변위
 w : z 축에서 변위
 ∂x : x 축에서 전단량
 δu : u 에 대한 전단변위
 δv : v 에 대한 전단변위
 δw : w 에 대한 전단변위
 θ : CCD 카메라와 레이저조사방향과 이루는 각
 $\Delta\phi$: 물체변위에 따른 레이저 위상변화
 λ : 레이저 파장

타이어 내부에 존재하는 결함에서 응력집중으로 결함이 진전하여 타이어가 수명이전에 파손사고가 발생하고 있다. 이 결함은 과적상태에서 과속, 또는 표면 손상부에 지속적인 물 또는 이물질 등이 침투하여 결함으로 진전하는 경우의 후천적인 요인과 극히 드문 사례이지만 제조공정상 미세결함이 과도한 사용환경에서 결함의 진전으로 이어지는 경우가 있다. 타이어의 비파괴 검사기법으로는 육안검사, X-ray 검사, 초음파검사, 위상분석검사(Phase analyzer), 홀로그래피등이 있다. 이러한 검사기법들은 실제 현장적용에서 Point by point의 스캐닝 방식, 접촉식, 외부진동에 민감한 문제점등을 안고 있다[1]. 1973년 Y.Y. Hung[2]은 레이저전단간섭법(Shearography)이라는 새로운 기술을 개발하였다. Shearography는 간섭계의 특성으로 인하여 외부진동 등에 의해 발생하는 물체의 병진운동에 둔감하다는 장점이 있다. 이 기술은 항공산업, 원자력산업등의 비파괴 검사 분야에서 많이 활용이 되어왔으며, 최근에

[†] 조선대학교 기계공학부

E-mail : gsckim@stmail.chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7004 FAX : (062)230-7838

^{*} 조선대학교 대학원

^{**} 동아인재대학 안경광학과

는 외국기업을 위주로 타이어 결함검사에 활용되고 있다. 국내에서도 (주)금호타이어에서 Shearography를 이용한 검사시스템을 이용하여 off-line에서 타이어 손상원인 분석에 활용하고 있다. 그러나, 이 기술은 아날로그 방식의 Shearography로 필름의 현상인화 과정에 시간이 많이 소요가 되며, 결함의 정성분석만을 할 수 있다[3]. 따라서, 본 연구에서는 CCD Camera와 화상처리장치를 이용한 Digital Shearography를 적용하여 결함의 정량분석과 결함의 진전과정을 모니터링 하고자한다.

2. Shearography versus ESPI

Shearography는 Speckle Pattern Interferometry의 한 분야로 널리 알려진 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)와는 간섭계의 구성에서 차이가 있다. ESPI는 물체의 표면 변위를 직접 측정하며, Shearography는 물체변위의 1차 미분값을 측정하게 된다. Fig. 1(a)는 물체의 표면 변위를 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 물체의 표면변위에 대한 각 기법의 해석결과이다.

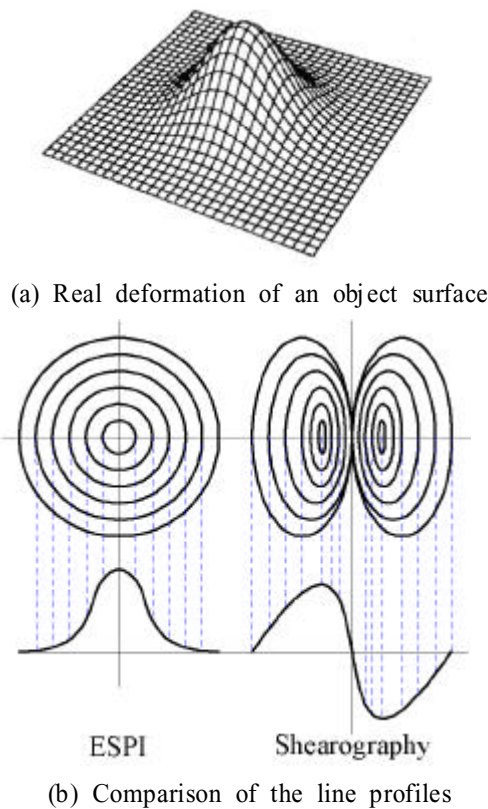


Fig. 1 Relationship between ESPI and shearography

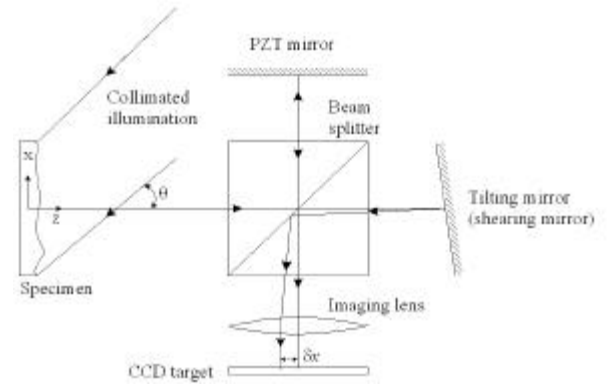


Fig. 2 A basic arrangement of the speckle pattern shearing interferometer

즉, Shearography는 물체변위의 1차 미분값을 직접 측정함으로써 외부 환경외란에 의해 발생하는 진동등에 둔감하여 현장적용이 용이하다[4,5]. Shearography에서 결함의 크기는 Line profile의 최대점의 사이를 측정함으로써 정량화가 가능하다. Fig. 2는 Shearography 간섭계를 나타내고 있다. 물체로 조사된 레이저가 반사되어 Twyman-Green 간섭계 내부로 조사가 되며, 광분할기(Beam Splitter)에 의해 물체광과 참조광으로 분리가 되고, 물체광 쪽의 거울은 적절히 조절된 량으로 기울어져 있다. 이 전단광과 방향은 조절이 가능하며, 간섭계의 민감도에 영향을 주게된다. 물체 표면의 임의의 점 (x, y) 이 물체의 변형에 대해 참조광의 변위는 $(x + u, y + v, w)$ 의 변위를 갖고, 전단량 δx 을 갖는 CCD 상면의 임의의 점 $(x + \delta x, y)$ 은 물체의 변형에 대해 $(x + \delta x + u + \delta u, y + v + \delta v, w + \delta w)$ 의 변위 분포를 가지게 된다. 물체의 변형은 물체의 변형 전후의 위상차를 측정함으로써 정량화가 가능하다. 변형전후의 위상차는 식(1)과 같이 쓸 수 있다[6,7].

$$\Delta\phi(x, y) = 2 \frac{\pi}{\lambda} \left[(1 + \cos \theta) \frac{\partial w}{\partial x}(x, y) + \sin \theta \frac{\partial u}{\partial x}(x, y) \right] \delta x \tag{1}$$

또한, 변형의 정량화를 위해 4단계 위상이동기법과 Unwrapping기법을 적용하여 변형을 정량화할 수 있다.[8,9].

3. 실험

3.1 압력파이프 내부 결함 정량화

내부 결함 정량화를 위하여 측정결과에 영향을 주는 인자를 분류하고 그 인자의 특성을 분석하여 최적조건을 결정하였다. 이를 위하여 Fig. 3과 같은 인공결함을 가공한 압력파이프를 제작하고 Shearography를 이용하여 영향인자 변화에 따라 결함의 크기를 결정하였다. 결함은 압력용기의 내부로부터 깊이 1, 2, 3 mm, 길이 12 mm로 가공하였으며, 질소가스를 주입하여 변형을 주었다. 영향인자 최적화 실험에서는 전단량, 압력, 전단 방향을 변화하면서 결함을 정확히 검출하는 최적값을 찾고 각 변화에 따른 검출된 결함의 크기를 비교하였다.

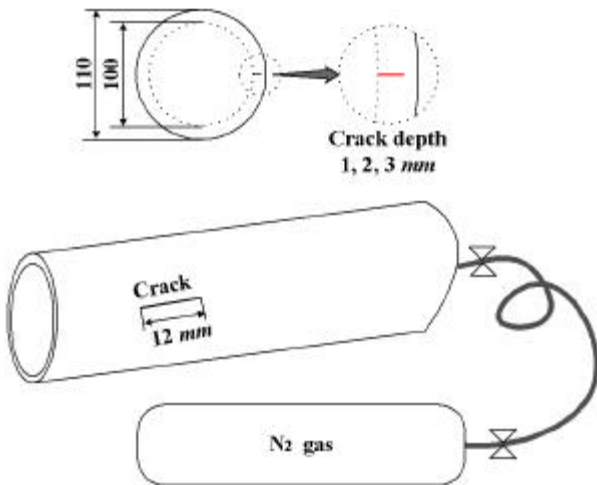


Fig. 3 Pipeline system with artificial defects



Fig. 4 Vacuum chamber

3.2 타이어 검사 시스템

타이어 검사시스템에서는 타이어에 변형을 주기 위한 진공 챔버에 타이어를 넣고 진동펌프에 의해 최대 공기압을 1 atm에서 0.75 atm까지 감압이 가능하다. 실제 결함검출에 사용한 범위는 1 atm에서 0.9 atm까지 감압해서 실험하였다. Fig. 4는 진공챔버의 전체사진을 보여주고 있다. Shearography 시스템은 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였다. 이 장비는 종전의 넓은 광학계에 펼쳐진 광학장비들을 축소하여 일정한 형태로 제작된 제품이며, 외국에서 산업현장에서 비파괴검사분야에서 많이 이용하고 있다. 실험 타이어로는 제조 공정상 결함이 발생한 타이어(규격 : 240/570R13)를 대상으로 결함이 위치한 부분을 x , y , $+45^\circ$ 와 -45° 의 방향으로 전단의 방향을 달리하여 결함의 모양을 검사하였고, 결함의 정량 평가를 위해서 각각의 전단 방향에 대한 전단량을 3 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm 등으로 달리하여 결함의 크기를 검사하였다. 또한 주행중 결함이 발생한 타이어(규격 : 195/65R15, 225/60R16, 235/45ZR17)를 검사하여 결함의 위치와 그 진행 정도를 검사하였다.

4. 결 과

4.1 내부결함의 정량화

실험을 통하여 Shearography를 이용한 결함정량화는 전단량, 전단방향 및 가해지는 압력에 따라 영향이 많아지는 것으로 밝혀졌으며, 정량평가를 위해서는 이 조건들에 대해 최적 조건을 결정하여야 한다. 따라서 이미 알고 있는 결함에 대해 전단량, 전단방향, 압력에 따른 상관관계를 규명하여 이들 인자들을 최적화하였다. Fig. 5는 각 전단량에 대한 Shearography 프린지 패턴을 가지적으로 나타내었으며, 이미지 선명도는 결함의 크기인 12 mm 주변에서 가장 구별이 쉽다. Fig. 6은 전단량의 변화에 따른 검출된 결함의 크기를 비교하였다. 결과에서 전단량이 결함의 길이인 12 mm 내에 있을 경우에는 비교적 정확한 결과를 주고 있으나, 전단량이 12 mm을 넘어서는 상당히 크게 평가하고 있다. 따라서 최적의 전단량은 결함의 크기와 전단량이 일치할 경우이다. 본 실험에서 결함의 정량화에 영향을 주는 인자로 변형을 위해 주어지는 하중에 의해서도 결함의 크기가 다소 변화하는 것을 발견하였다. Fig. 7은

압력의 변화에 따른 검출결함의 크기를 비교하였다. 압력이 증가함에 따라 결함이 크게 검출되었으나, 그 영향을 작은 것으로 나타났다. 또한, 최적의 하중은 압력용기의 허용응력(STS304 : $\sigma_A = 206$ GPa)의 10%에서 최적의 하중조건으로 나타났다. 또한, 전단방향은 측정하고자하는 결함길이 방향과 일치할 경우 최적으로 되었다.

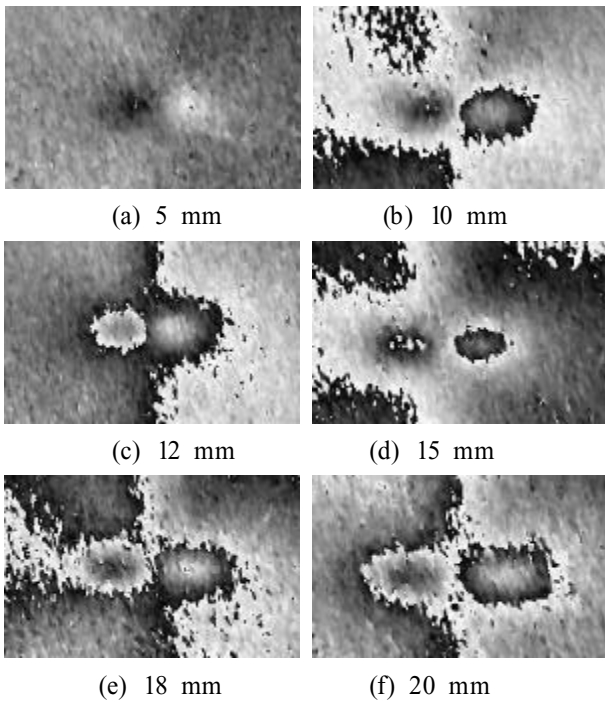
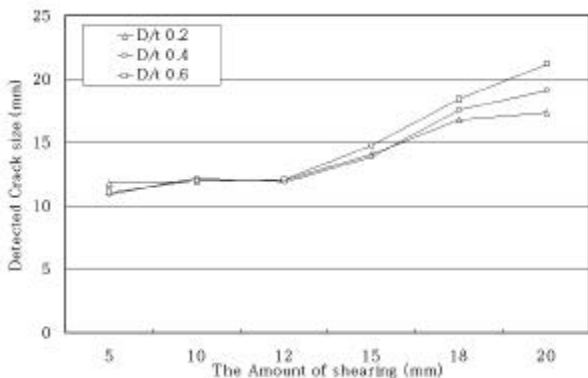
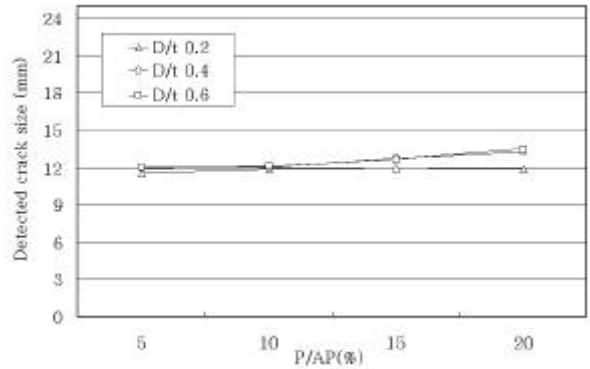


Fig. 5 Shearography Fringe Patterns with the amount of shearing



(a) The amount of shearing vs. Crack size

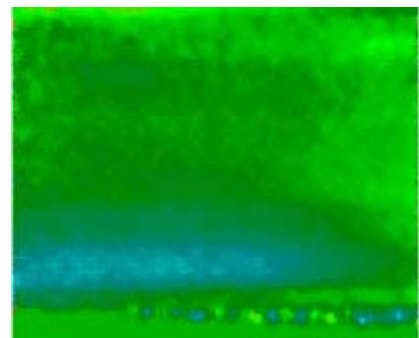


(b) Normalized pressure vs. Crack size

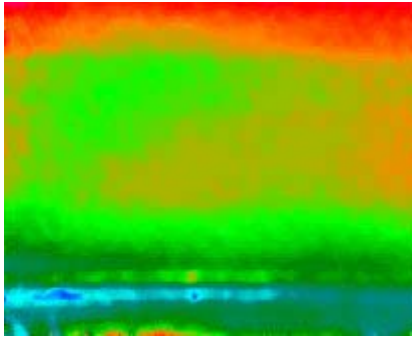
Fig. 6 Evaluation of the crack size due to the change of the effective factors (t: Wall thickness, D: Crack depth, P: Induced pressure, AP: Allowable pressure)

4.2 실주행 타이어 내부의 Separation 결함진전 모니터링

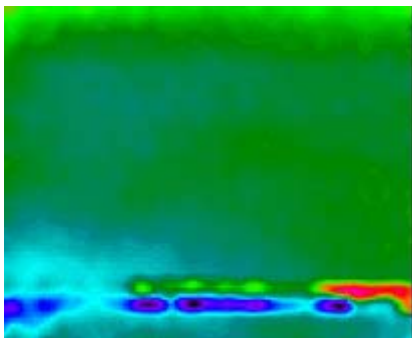
실주행 타이어에서 결함을 검출할 수 있는 경우는 매우 드문 일로서 여러 회에 걸쳐 타이어를 가속한 조건으로 실주행 실험하여 결함의 생성 및 진행과정을 모니터링하였다. Fig. 7은 결함의 초기 발생부터 결함이 진전하는 과정을 4단계로 나누어 보여 주고 있다. Fig. 7(a)은 제 1단계로서 결함이 벨트끝단(Belt edge)에서 타이어의 형상과 강도를 유지하기 위한 철제와이어의 발열에 의해 미세 점 형태의 결함이 발생하는 과정이다.(그림 하단) Fig. 7(b)는 2단계로서 많은 수의 점 결함들 중 하나의 결함이 급격히 진전하는 단계이다. Fig. 7(c)는 진전된 결함이 연결되는 과정으로 결함의 크기가 점점 커지고 있다. 이 단계를 Separation의 시작점으로 볼 수 있다.



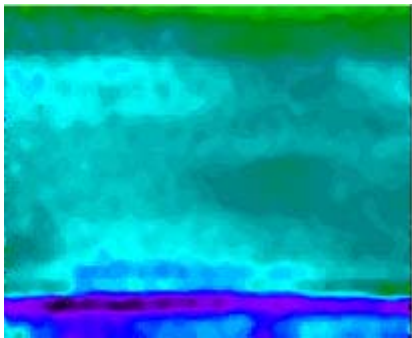
(a) 1st step: Starting of point defects from belt edge of the tire



(b) 2nd step: one of many points grows up rapidly



(c) 3th step: Connection of the small defects



(d) Fourth step: Progress to a tread.

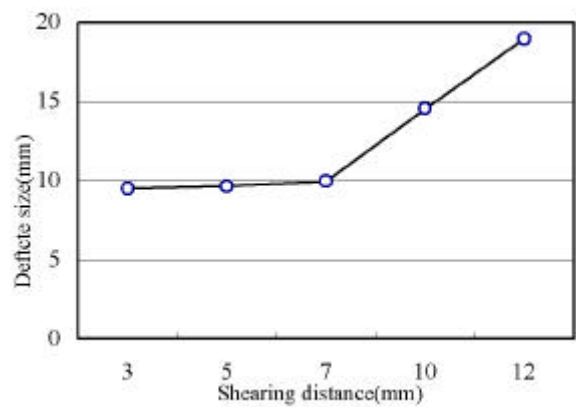
Fig. 7 The progress of separation in actual traveling tire (The bottom of image)

Fig. 7(d)는 여러 개의 결함이 완전히 연결되어 층간 분리(Separation)를 일으키고 있다. 이 결함은 타이어 Tread 층으로 진전하고 타이어로부터 Tread를 분리하여 대형의 사고를 일으키게 된다.

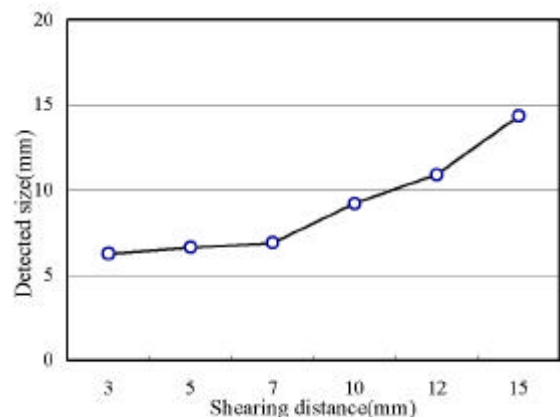
4.3 타이어 내부결함의 정량화

타이어의 선천적인 결함은 정상적인 제조공정

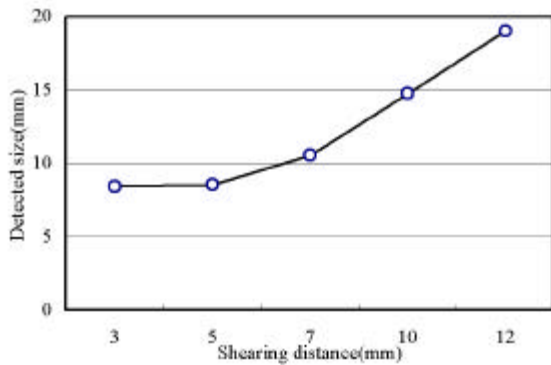
에서 발생이 극히 드문 경우이지만 물, 또는 이물질 등이 타이어 층사이에 삽입하는 경우로 생산라인의 초기시험, 시제품 등에서 많은 결함이 발생한다. 이 결함은 타이어 전체에 걸쳐 발생하고 있으며, 생산라인의 검사를 위해서는 결함의 위치 및 크기에 대해 정확히 검사할 필요가 있다. 결함의 정성분석을 위해 타이어를 45°의 각도로 각각 검사하고 결함의 정량화를 위해서 앞 절의 결함정량화기법을 적용하여 전단량의 변화에 따라 결함의 크기와 형상을 측정하였다. Fig. 8은 각 전단방향에서 전단량의 변화에 따른 결함의 크기 측정결과이다. 측정결과로부터 결함은 가로 7 mm, 세로 7 mm, +45에서 5 mm, -45에서 7 mm의 크기를 갖는 결함으로 검사되었다.



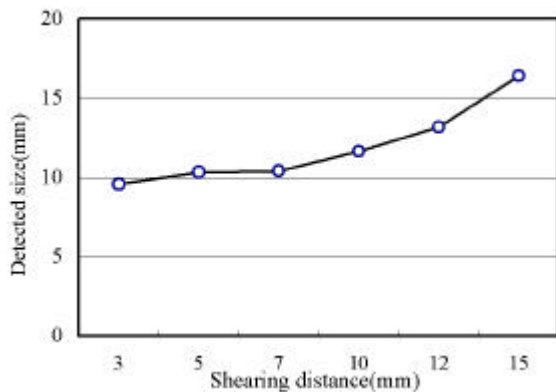
(a) The defect size with the amount of shearing in x-direction shearing



(b) The defect size with the amount of shearing in y-direction shearing



(c) The defect size with the amount of shearing in +45-direction shearing



(d) The defect size with the amount of shearing in 45-direction shearing

Fig. 9 The defect size with the amount of shearing and shearing direction

4. 결 론

본 논문에서는 타이어 내부결함의 정량화와 결함 진전과정의 모니터링을 위하여 Shearography를 이용한 정량화 기법을 개발하였다. 먼저 인공결함이 가공된 압력파이프를 이용하여 결함 정량화에 영향을 주는 인자를 결정하고 그 인자들을 최적화하였다. 진단량은 내부결함의 크기와 일치할 때 가장 정확히 결함의 길이를 검출하였으며, 진단방향은 측정하고자하는 길이방향과 일치할 때 최적으로 평가되었다. 하중 또한 결함정량화에 영향을 주었으나, 그 영향은 적었으며, 재료 허용응력의 10%에서 최적으로 결함을 측정하였다. 이 정량화기법을 이용하여 타이어의 내부결함을 정

량화하였으며, 또한 실제 주행에서 발생하는 결함의 초기발생과 진전과정을 모니터링하여 결함의 원인규명에 기여하였다.

후 기

이 논문은 과학기술부/한국과학재단지정 지역협력연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2003년도 연구비 지원에 의해 연구되었음

참고문헌

1. Y.Y. Hung and R.M. Grant, 1981, "Shearography: A New Optical Method for Nondestructive Evaluation of Tires", *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 54, No. 5, pp. 1042-1050.
2. Y.Y. Hung and C.E. Taylor, 1973, "Speckle-shearing interferometric camera- a tool for measurement of derivatives of surface displacement", *Proc. SPIE*, Vol. 41, pp. 169-175.
3. J.W. Newman, 1993, "Advanced Shearography Tire analysis", *Tire technology international*, pp. 15-18.
4. Y.Y. Hung, 1997, "Digital Shearography versus TV-holography for Non-destructive Evaluation", *Optics and Lasers Engineering*, Vol. 26, pp. 421-436.
5. A. Ettemeyer, 1996, "Technical Engineering Note Laser Shearography for inspection of pipelines", *Nuclear Engineering and design*, Vol. 160, pp. 237-240.
6. P.K. Rastogi, Eds., 2001, *Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 179-203.
7. S.L. Toh, F.S. Chau and C.W. Sim, 1997, "Theoretical basis for real-time shearography", *J. of Modern Optics*, Vol. 44, No. 2, pp. 279-286.
8. G.L. Cloud, 1990, *Optical methods of engineering analysis*, Cambridge University Press., pp. 477-491.
9. P. Andra, U. Mieth, and W. Osten, 1991, "Strategies for unwrapping noisy interferograms in phase-sampling interferometry", *Proc. of SPIE, USA*, Vol. 1508, pp. 50-60.