한국정밀공학회지 제21권 제5호 (2004년 5월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 5, May 2004.

◆특집◆ 첨단 간섭계 계측기술

스페클 간섭계의 응용

백성훈*, 박승규**, 김철중**

Applications of Speckle Interferometer

Sung-Hoon Baik*, Seung-Kyu Park**, Cheol-Jung Kim**

Key Words : Speckle interferometer(스페클 간섭계), ESPI(전자 스페클 상관 간섭계), laser metrology(레이저 응용 계측), vibration mode(진동 모드), deformation(변형), flow visualization(유동 가시화)

1. 서론

스페클 간섭계는 빛을 이용하는 측정 방법이므로 비접촉/원격 측정 방법이며, 빛의 파장의 수십-수백 분의 1 정도의 정밀도로 측정이 가능하고, 레이저가 조사되는 영역 전체의 동시 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히 최근에는 전자, 영상, 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 ESPI(Electronic Speckle Pattern interferometer; 전자 스페클 상관 간섭계) 장치가 많은 발전을 이루었고, 이에 따라 산업 현장에서의 활용도 계속 늘고 있다[1].

ESPI의 응용 분야는 일반 물체의 변형이나, 진동, 그리고 유체의 가시화 및 굴절률 분포 측정 등이며, 힘을 가했을 때의 국부적인 미세 변형을 측정함으로써 내부의 결함을 측정하는 비파괴 검사에까지 활용이 가능한 기술 분야이다. ESPI의 최대 약점은 근본적으로 간섭계 방식이므로 주위 환경의 영향을 많이 받는 다는 것인데, 최근에는 외부 환경에 강인한 층밀리기 간섭계 방식 등이 도입됨으로써, 이러한 약점도 점차 극복되고 있다.

* 한국원자력연구소 양자광학기술개발부
Tel. 042-868-8993, Fax. 042-861-9602
Email: shbaik@kaeri.re.kr
레이저 광 계측, 3차원 측정, 원격 검사기술, 적응광학, 간섭계 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.
** 한국원자력연구소 양자광학기술개발부

ESPI의 응용 분야는 광범위해서 전부 나열하기는 어렵지만, 자동차 산업, 항공 산업 및 전자 산업 등에서 주로 활용되고 있으며, 고온 표면의 검사, 응력 분포 검사 등의 영역도 빼 놓을 수 없다. Tab. 1에 대략적인 응용 분야를 정리하였다.

Table 1 Applications of ESPI

자동차 산업	브레이크 등 자동차 부품 진동모드검사, 차체의 공명 및 진동 검사, 재질 검사 엔진 block 검사, 타이어 결함검사
항공기 산업	엔진 부품 검사, 터빈 날개 진동 검사, 타이어 결함검사, Housing/재질 검사
전자 산업	열 또는 응력에 의한 기판/소자 검사, 반도체 열변형 검사, 고체 device 연구
토목 공학	건물의 피로도, 결함 검사
음향 산업	진동 모드 패턴 검사
기타 산업	금속 재료의 피로 또는 응력 변형 검사, 냉장고 모터의 compressor 디자인, 고서/고화의 결함 검사 등

2. ESPI의 응용원리

2.1 진동 모드 측정 및 가시화

실험적으로 물체의 진동을 측정하는 방법은 측정물체의 표면에서 발생하는 진동을 전기적 신호로 변환시키는 가속도계(accelerometer)를 사용하는 방법이 가장 일반적으로 사용되고, 최근에는 원격 진동 측정이 가능한 레이저 도플러 진동 측정기(Laser Doppler Vibrometer, LDV)도 많이 사용되는 방법이다. 그러나 이 측정 방법들은 측정물의 몇 개의 점에서 얻은 정보를 바탕으로 진동을 해석함으로서 측정물 전체의 진동 모드를 분석하고자 할 때는 여러 개의 센서를 사용하든지, 레이저빔을 스캔하는 방법을 사용하게 된다. 이에 비해 ESPI를 이용한 진동 측정 방식은 레이저가 조사되는 측정 대상 면적 전체의 진동 모드를 가시화 시킬 수 있다는 장점이 있다.

진동 측정을 위한 ESPI 방법은 가장 기본적인 시간 평균법(time averaged ESPI)[2]이 있고, 진동의 위상도 측정 가능한 스트로보스코픽 방법(Stroboscopic ESPI)[3], 순간적인 진동을 측정할 수 있는 펄스 ESPI(pulsed laser ESPI)[4]등이 있다. 시간 평균법은 실험적으로 진동모드를 가시화하기가 용이하나 시스템의 특성상 진동 파형의 특정부분에서의 진동모드의 위상을 가시화 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한 펄스 ESPI는 레이저 파장의 극히 일부의 펄스를 사용하여 진동모드를 가시화하는 방법이다. 따라서 진동모드의 가시화된 이미지를 얻기 위해서는 매우 높은 출력의 레이저를 필요로 하게 되는데 고출력의 레이저 사용은 장비 가격의 고가로 인한 경제성의 문제 뿐 만 아니라 출력이 높은 장비인 만큼 장비의 구조 및 운용하는 방법이 까다롭고 복잡하다. 이에 비해 진동의 위상을 측정할 수 있으며, 기존의 진동측정 ESPI에 비해 크게 복잡하지 않은 스트로보스코픽 ESPI나 전자 광학 홀로그래피 (Electro-Optic Holography) 방법[5]이 산업적으로 많이 활용되고 있다.

Fig. 1은 진동 모드 분석을 위해 개발한 ESPI 장치 구성도로, 진동모드의 정량화를 위하여 위상이동 방법을 적용하였다. 레이저 앞에 장착된 전자광학변조기(E-O modulator)는 물체의 가진 신호와 동조되어 셔터 역할을 하며, 2 채널 신호 발생기에서는 가진 신호와 전자광학 변조기에 의한 레이저 셔터의 위상을 조절할 수 있도록 하였다. 진동 진폭의 정량적인 계산은 PZT를 사용하여 위상이동 방식으로 계산하였다. 본 실험은 팬의 공진 주파수와 진동모드분포를 측정하기 위해 수행된 것으로, Fig. 2와 Fig. 3 에 그 결과를 예시하였다.

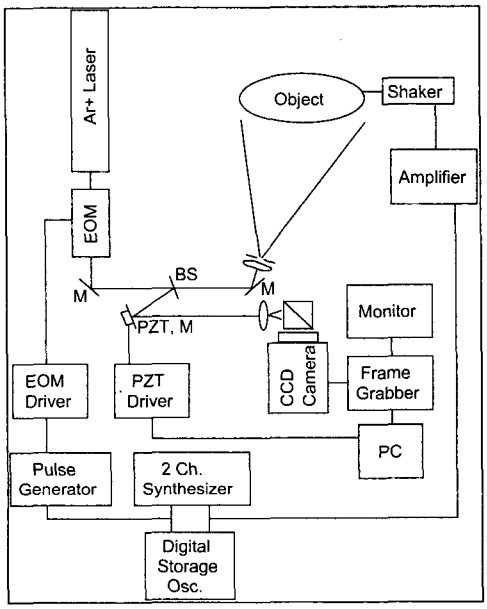
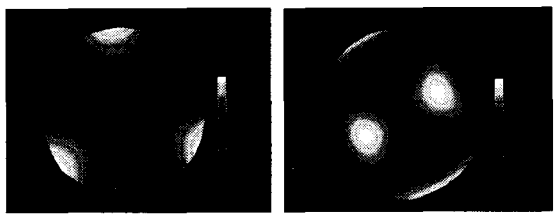


Fig. 1 Schematic of Stroboscopic ESPI for vibration measurement



(a) f = 1593 Hz (b) f = 4637 Hz

Fig. 2 Vibration modes of Circular plate

Fig. 3 Vibration mode of cooling fan(f = 1051 Hz)

Fig. 4는 모니터에 사용되는 shadow mask의 진동 모드를 ESPI 방법으로 측정한 결과이다. 이러한 구조물은 특정 주파수에서 진동이 심하게 되는 공진 모드를 갖는데, shadow mask와 같이 망 구조를 가지고 있어 가속도계를 붙이기 어려운 부품의 경우에는 광을 사용하는 ESPI가 장점을 가지며, 또한 공진 모드에서의 진동 패턴을 한 눈에 볼 수 있으므로 활용도가 높다.

(a) f = 533 Hz

(b) f = 1145 Hz

Fig. 4. Vibration modes of shadow mask

2.2. 유체 가시화 및 굴절률 측정

투명한 유동 물체에서의 온도나 압력의 변화는 일반적인 영상장치로는 보이지 않으며, 접촉식으로 측정이 어려워서 광학적인 방법이 많이 사용되고 있다. 이런 목적으로 사용되는 광학계측 기술로는 홀로그래피 간섭계, Mach-Zehnder 간섭계, Schlieren 및 Shadow-Graph 등이 있다. 홀로그래피 간섭계를 사용한 유동현상의 가시화(visualization)는 1960년대부터 시작되어[6], 전구, 불꽃의 온도 측정 등에 계속적으로 사용되어 왔다. 그러나 홀로그래피의 단점인 복잡한 광학계 구성과 화학 처리 때문에 사용이 제한되었으며, 최근에는 이러한 단점을 해소한 ESPI 방법[7]이 많이 사용되고 있다

Fig. 5는 온도장 분포 측정을 위해 구성한 ESPI 구성도이다. ESPI 장치는 전형적인 out-of-plane 측정 방식으로, 물체 빔을 유동 물체 뒤편의 diffuser로 보내 산란시켜 사용하였다.

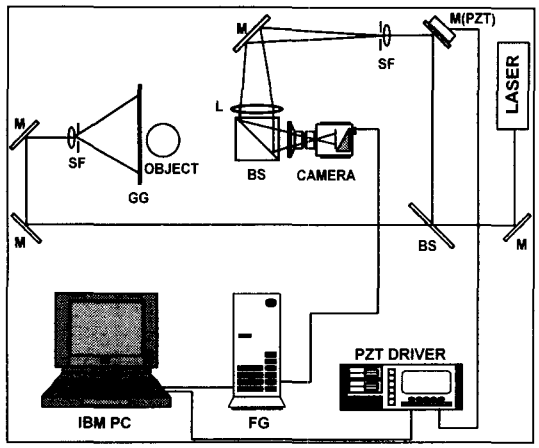
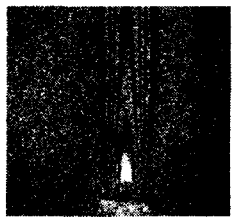
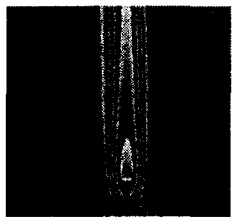


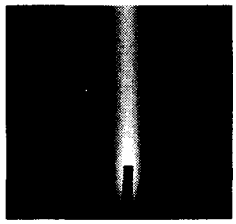
Fig. 5 Schematic of ESPI for measuring temperature field



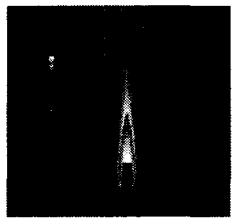
(a) speckle fringe pattern



(b) phase map



(c) After unwrapping



(d) After Pseudo coloring

Fig. 6. Temperature field of candle measured by ESPI

Fig. 6는 촛불의 온도에 의한 굴절률 분포를 ESPI로 측정한 결과이다. (a)는 초기의 전산처리를

거치지 않은 상태의 스페클 간섭무늬 패턴이고, (b)는 3 프레임의 간섭무늬를 계산하여 얻은 위상지도(phase map)이며, (c)는 (b)의 위상지도를 펼침(unwrapping)하여 얻은 굴절률 분포의 그레이 값, (d)는 그레이 값을 pseudo-coloring 한 결과이다. Fig. 6(a)의 초기 간섭무늬의 질은 많이 떨어지지만, 위상이동을 거치면서 필터링 효과가 있어 사용상의 문제점이 없어지게 된다. 정확한 온도 값을 얻기 위해서는 Abel 변환 등을 이용한 보다 정확한 정량화가 필요하다.

2.3. 미세변형 측정 및 비파괴 검사 방법

ESPI의 가장 기본적인 응용은 물체의 미세 변형 측정이다. 광학부품 검사용의 일반적인 간섭계가 기준 면과 검사 대상 면의 차이를 측정하는 것에 비해, ESPI에서는 변형이 없는 초기 상태와 변형 후 상태의 차이를 측정하게 된다. ESPI 측정 장치와 물체 면과의 각도가 수직이라고 할 때, 물체 면을 기준으로 out-of-plane 변위와 in-plane 변위를 측정할 수 있으며, 각각에 측정 물리량에 따라 ESPI의 장치 구성이 달라지게 된다.

Fig. 7은 홀이 있는 금속판에 장력을 가했을 경우, 홀 주위의 in-plane 변위를 측정한 결과이다. 이러한 in-plane 변위의 측정은 stress-strain 해석 실험에 많이 사용되는데, 특히 최근에는 접착식 strain gauge를 사용하기 어려운 MEMS 등의 특성 실험에 사용된다.

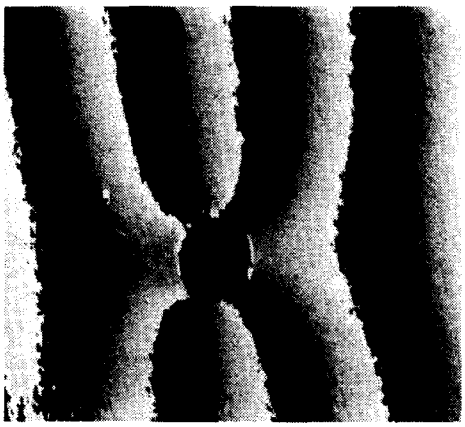


Fig. 7 In-plane deformation pattern around hole

Fig. 8은 ESPI 장치로 측정한 out-of-plane 변위의 예를 나타낸 것이다. 상단과 하단을 볼트로 조인 수조 구조물에 외부 힘을 가했을 때의 변형을 측정한 것으로 볼트 주위의 변형이 두드러짐을 알 수 있다.

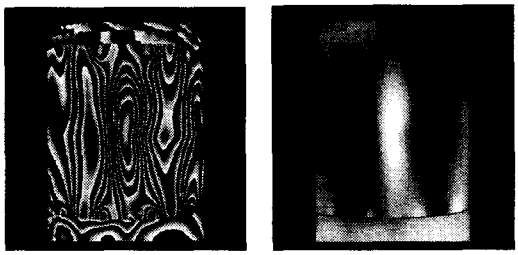
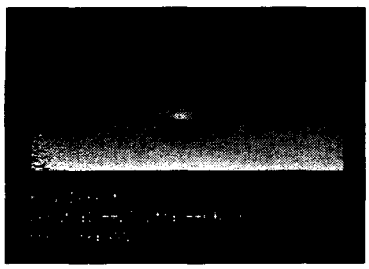


Fig. 8 Out-of-plane deformation of water tank

ESPI를 사용한 비파괴 검사 방법은 항공기나 자동차의 타이어 검사, 항공기 동체의 결함 검사 등에 사용되는 방법으로, 검사 대상에 진공이나 압력으로 균일한 힘을 가한 후 발생되는 미세 변형을 측정하여 결함을 찾는다. Fig. 9은 이러한 비파괴 검사 방법의 한 예를 나타낸 것으로, 내부 면에 결함이 작은 있는 압력 용기에 고압 가스를 주입하여 압력을 가한 후 미세변형을 측정하여 결함이 있는 부위와 결함의 크기를 측정하게 된다. Fig. 9(a)는 압력을 가했을 때 나타나는 간섭무늬 패턴이며, Fig. 9(b)는 간섭무늬를 정량적으로 해석한 후 전체 변형 량을 미분하여 급속한 변형이 나타나는 부위를 찾은 결과이다. 그림에서 내부 결함의 부위와 형태, 크기 등을 알 수 있다.

(a) Fringe pattern of deformation



(b) Inner defect of the pressure tube

Fig. 9 Non-destructive Testing of pressure tube

3. 결 론

ESPI 장치는 레이저를 사용하는 원격 비접촉 측정 방식이며 또한 기존의 간섭계에 비해 사용이 간단하고 사용 환경에 덜 민감하다는 장점으로, 물체의 미소 변위나 진동의 측정에도 많이 활용도를 가지고 있다. 또한 다양한 장치 구성의 변화로 다양한 방식의 변형/진동의 측정이 가능하고, 유체의 유동이나 온도의 측정이 가능하기 때문에 활용 잠재성이 높다고 할 수 있다. 지금까지 ESPI 장치는 자동차 산업 등에서의 진동 모드 검사 분야에서 가장 활발하게 활용이 되었다고 할 수 있으나, 최근에는 층밀리기 ESPI(Shearing ESPI, Shearography) 등의 새로운 장치가 계속 개발되면서 전자산업, 토목산업 등에도 활용이 늘어날 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Jones, R. , Wykes, C., Holographic and speckle Interferometry, Cambridge Studies in Modern Optics Vol. 6, 2nd Edition, Cambridge University press, 1989. Ch.4.
2. 강영준, 최장섭, "시간평균 ESPI를 이용한 진동 물체의 모우드 형태 계측법," 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 2, pp. 84~93, 1996.
3. Wang, Xizhou, Tan, Yushan, "Vibration Modal Analysis Using Stroboscopic Digital Speckle Pattern Interferometry(DSPI)," A Speckle Techniques, Birefringence Methods, and Applications to Solid Mechanics, SPIE Vol. 1554, pp. 907~914, 1991.
4. Pedini, G., Pfister, B. and Tiziani, H.,"Double pulse-electronic speckle interferometry," Journal of Modern Optics, Vol. 40, 89-96, 1993.
5. Ryszard, J. Pryputniewicz, "Static and dynamic measurements using electro-optic holography," Proceedings of SPIE, Vol.1554B, 790-8, 1991.
6. Heflinger, L.O., Wuerker, R.F., Brooks, R.E., " Holographic Interferometry," J. Appl. Phys., 37, 642, 1966.
7. Song, Y. , Kulenovic, R., Groll, M., Guo, Z., "Effects of speckle displacement on speckle interferometry for measurement of phase object," Optics communications, 139, 24, 1997.
8. Brug, H., "Real-time speckle shearography system for defect detection in aircraft materials," Proceedings of SPIE, Vol. 3586, 239-47, 1999.