

◆특집◆ 레이저응용 변형 및 진동해석 기술

레이저스펙클 간섭법에 의한 진동해석

김경석\*, 강기수\*\*, 정현철\*\*\*

Vibration Analysis by Laser Speckle Interferometry

Koungsuk Kim\*, Kisoo Kang\*\* and Hyunchul Jung\*\*\*

**Key Words** : Laser speckle interferometry (레이저스펙클간섭법), Vibration analysis (진동해석), Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자처리스펙클 간섭법), ESPI, Time average ESPI(시간평균 ESPI), Stroboscope ESPI (스트로보스코프 ESPI), Pulse ESPI (펄스 ESPI)

1. 서론

간섭성이 우수한 레이저를 물체에 조사하면 표면 거칠기로 인하여 물체표면에서 스펙클(Speckle)이 형성된다. 이 스펙클은 물체의 표면정보를 함축하고 있으며, 물체의 변위 또는 변형에 따라 스펙클이 반응하게 된다<sup>1</sup>. 스펙클 간섭법에서는 간섭계를 이용하여 물체 표면에 형성되는 스펙클의 위상을 추출하여 형상을 측정하거나(Digital Holography), 변형전·후에서 위상을 추출하여 비교함으로써 물체의 변형 측정 또는 비파괴 검사를 할 수 있으며(ESPI or Shearography), 물체의 순간변형을 기록함으로써 동적해석(Stroboscope-ESPI or Pulse-ESPI)도 가능하다. 레이저스펙클 간섭법은 화상처리 시스템을 이용하여 물체의 변형정보를 고분해능, 비접촉(Non-contact), 전면(Full-field)에서 얻을 수 있으며, 특히 진동해석 분야에서 물체의 진동모드를 실시간으로 관찰할 수 있어 자동차산업에서 많은 활용을 하고 있다<sup>2-4</sup>.

본 논문에서는 레이저스펙클 간섭법을 이용하여 구조물의 진동거동해석 분야에 대해 중점적으로 소개하고자 한다. 구조물에서 진동은 소음의 원인으로서는 또는 피로파괴의 원인으로서는 중요한 설계 변수이며, 실험적, 수치해석적 연구를 통한 공진주파수와 진동모드 형상을 예측함으로써 품질 향상과 신뢰성 향상에 기여할 수 있다<sup>5</sup>. 진동해석에 있어서 대표적인 실험적 방법은 일정 간격으로 부착된 가속도계를 이용하여 주파수를 측정하고, 각 가속도계의 정보로부터 보간을 통하여 진동모드를 예측하게 된다. 따라서 가속도계의 부착위치와 수량에 따라 결과해석에 차이가 있으며, 구조물의 특성으로 가속도계 부착이 어려운 경우가 있다. 비접촉 진동해석 기법으로 레이저 도플러 가속도계(Laser Doppler vibrometer)<sup>6</sup>를 많이 사용하고 있다. 이 방법은 Point source 레이저를 물체에 조사하고 물체의 진동에 의해 레이저 주파수 변화를 측정하여 이로부터 물체의 공진 주파수를 측정한다. 또한, 공진모드는 일정간격으로 스캐닝(Scanning)하여 얻은 각 점의 정보를 보간하여 물체의 진동모드를 측정하게 된다. 비접촉 측정기법으로 가장 많이 활용하고 있으나, 진동모드의 측정에서 공간분해능의 한계와 속도 성분을 변위 성분으로 변환하여 진동량을 측정함으로써 수치해석적 오차를 수반하게 된다. 레이저스펙클 간섭계 기반의 진동해석 기술은 간섭계를 기반으로 고

\* 조선대학교 기계설계공학과  
Tel. 062-230-7004, Fax. 062-230-7839  
Email gsckim@chosun.ac.kr

레이저 스펙클간섭법 기반의 변형 및 진동해석, 비파괴 검사 분야의 연구활동을 하고 있음.

\*\* 한국표준과학연구원 안전그룹

\*\*\* 조선대학교 기계설계공학과

분해능으로 표면 변위를 직접 측정이 가능하며, CCD 카메라에 의해 높은 공간분해능으로 진동모드를 측정할 수 있다. 레이저스펙클 간섭계 기반의 진동해석 기술은 크게 시간평균 ESPI(Time average ESPI: TA-ESPI), Stroboscope ESPI, Pulse ESPI으로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 각 기법의 원리와 산업적 활용 사례를 소개하였다.

## 2. 측정원리

### 2.1 Time-average ESPI

TA-ESPI 는 조화운동을 하는 물체의 진동모드 가시화에 많이 활용되어 왔다. 일반적으로 변형해석을 위한 ESPI 는 변형전후의 이미지를 감산처리 하고 있으나, TA-ESPI 에서는 변형전 이미지에 연속하여 합산누적하는 기법을 사용하게 된다.<sup>1</sup> 면외변위 진동을 측정하기 위해 Fig. 1 과 같은 광학 간섭계가 사용되며, 간섭성이 우수한 레이저를 이용하여 물체로부터 반사하여 입사하는 물체광(Object beam)  $I_O(x, y)$  과 레이저에서 CCD 카메라로 직접 입사되는 참조광(Reference beam)  $I_R(x, y)$  의 간섭은 스펙클의 강도분포로 CCD 카메라와 화상처리장치에 의해 식 (1)과 같이 초기위상차  $\phi(x, y)$  를 가지고 컴퓨터에 변형전 이미지로 기록된다. 연속 조화 운동하는 물체의 순간위치를  $a(t) (= a_0 \sin \omega t)$  라고 할 때, 물체의 광간섭신호는 식(2)와 같이 쓸 수 있다.<sup>7</sup>

$$I = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \quad (1)$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \left[ \phi + \frac{4\pi}{\lambda} a(t) \right] \quad (2)$$

여기에서  $\lambda$  는 레이저 파장이다.

일정시간동안  $\tau$  ( $\gg 2\pi / \omega$ ) 조화운동하는 물체의 면외변위를 기록한 광소자에서의 광강도의 평균은 식(3)과 같이 쓸 수 있으며, 이 수식은 식(4)와 같이 간단히 0 차 Bessel 함수 ( $J_0$ ) 의 제곱 형태로 다시 쓸 수가 있다.

$$I_\tau = I_O + I_R + \frac{1}{\tau} 2\sqrt{I_O I_R} \int_0^\tau \cos \left[ \phi + \frac{4\pi}{\lambda} a(t) \right] dt \quad (3)$$

$$I_\tau = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} J_0^2 \left( \frac{4\pi}{\lambda} a_0 \right) \cos \phi \quad (4)$$

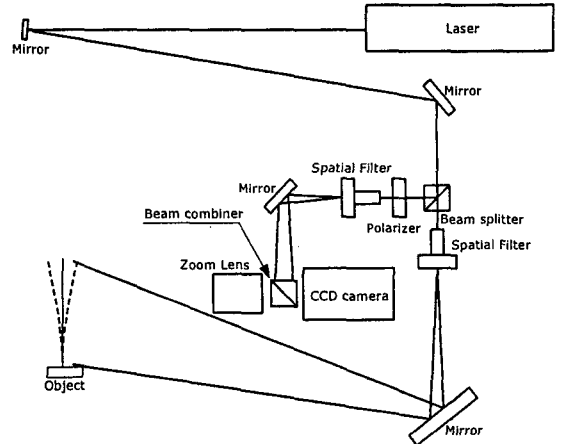


Fig. 1 Interferometer for time-average ESPI

이 수식에서  $J_0^2$  가 이미지의 명암대비를 결정하게 되며, 최대  $2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi$  를 가지게 된다. 또한, 이 기법에서는 한 주기 이상의 물체변위의 평균을 기록하고 있으므로 위상정보를 잃게 되며, 변위방향은 구별을 할 수 없다. 또한, 진동량은 Bessel function 의 특성 이용하여 보간하는 방식으로 측정하는 기법이 소개되고 있으나, 정확한 정량측정에 있어서는 제한요소가 많게 된다.

### 2.2 Stroboscope ESPI<sup>8-12</sup>

스트로보스코프(Stroboscope)는 진동하는 물체의 위상과 같은 위상으로 조명을 단속적으로 조사할 때, 물체가 멈춘 것처럼 보이게 하는 현상이다. Stroboscope ESPI 에서는 물체의 진동량을 측정하기 위해 간섭성이 우수한 레이저와 위상추출을 위한 위상이동 기법(Phase shifting technique)을 적용하여 진동량을 측정할 수 있다. 시간평균법과 비교하여 보면, Fig. 2 와 같이 면외변위 측정 간섭계가 사용되며 Stroboscope 효과를 얻기 위한 음향광변조기(Acousto-optic modulator: AOM)와 위상이동기법을 적용하기 위한 위상이동장치가 간섭계에 포함된다. Fig. 3 은 Stroboscope ESPI 에서 신호흐름을 보여주고 있다. 물체는 함수발생기(Function generator)에 의해 조화함수로 가진되며 스트로보스코프 효과를 얻기 위해 AOM 에 가진주파수와 동기화된 신호가 입력된다. AOM 은 물체의 진동에 대응하여 제어장치로부터 트리거(Trigger)를 기준으로 같은 위상점에서 연속하여 짧은 펄스 폭을 가지고 레이저 펄스를 물체에 조사하게 된다.

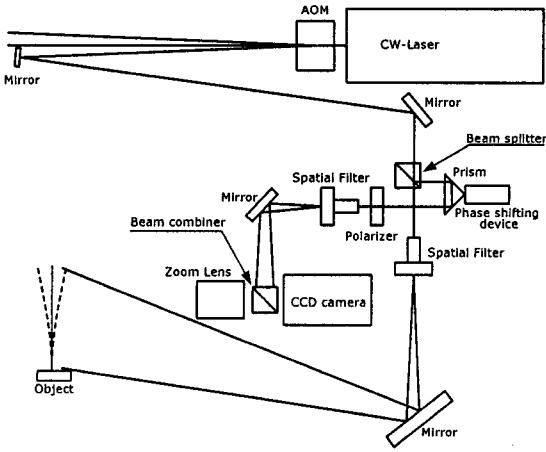


Fig. 2 Interferometer for Stroboscope ESPI

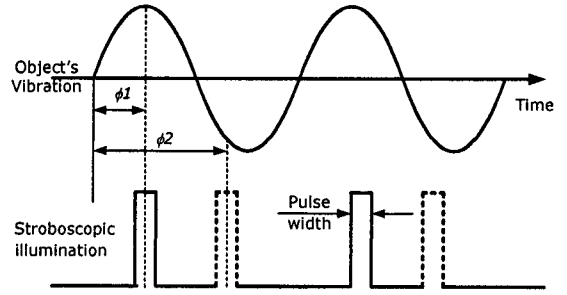


Fig. 4 Stroboscope illumination

출하고, 식(6)과 같이 두 위상점 사이의 변형위상 ( $\Delta\phi$ )을 구하여 결편침기법<sup>14</sup>을 적용함으로써 진동량을 정량화 할 수 있다. 정확한 결과를 얻기 위해서는 짧은 펄스 폭이 필요하며, 이는 고출력의 레이저를 요구하게 된다.

$$\Delta\phi(x, y) = \phi_2(x, y) - \phi_1(x, y) \quad (6)$$

### 2.3 Pulse ESPI<sup>15-17</sup>

펄스 ESPI 간섭계는 Fig. 5 와 같이 시간평균 ESPI 와 Stroboscope ESPI 의 간섭계와 같은 면외변위 간섭계가 일반적으로 구성이 되며, 고출력의 이중 펄스레이저(Double pulse laser)를 이용하여 두 펄스 사이의 면외 변형을 측정하게 된다. 시간평균 ESPI 와 Stroboscope ESPI 는 물체의 조화진동에만 적용이 가능하나, 펄스 ESPI 는 충격과 비주기진동에도 적용이 가능하다.

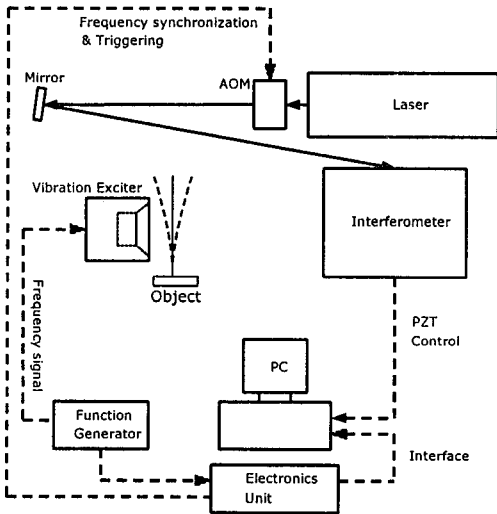


Fig. 3 Schematic of signal flow

이 때 물체는 Fig. 4 와 같이 정지하고 있는 물체라고 간주 할 수 있으며, 물체진동의 같은 위상점( $\phi_1$ )에 대해 4 단계 위상이동기법<sup>13</sup>을 적용하는 경우 식(5)와 같이 물체의 위상( $\phi_1$ )을 추출할 수 있다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (5)$$

여기에서  $I_1, I_2, I_3, I_4$  는 연속적으로  $\pi/2$  만큼의 위상차를 갖는 복소진폭이다. 또한, 임의의 위상점( $\phi_2$ )에서 위상이동기법을 적용하여 위상( $\phi_2$ )를 추

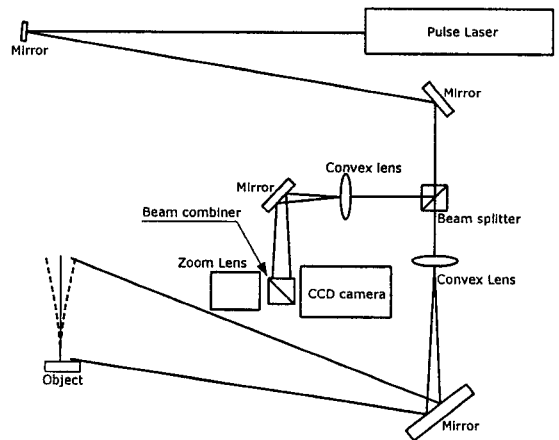


Fig. 5 Optical interferometer for pulse ESPI

특히, 짧은 펄스 사이에서 형성되는 물체의 변형을 외부 환경진동에 무관하게 측정할 수 있다. 펄스 ESPI 에서 변형측정은 Fig. 6 에서 펄스 레이저에서 발진하는 두 개의 각 펄스에서 위상 ( $\phi_1, \phi_2$ ) 을 공간위상이동기법을 적용하여 추출을 하고 식(6)과 같이 두 위상의 차이인 변형위상 ( $\Delta\phi$ ) 을 구함으로써 물체의 진동량을 측정할 수 있다. 측정하고자 하는 진동형태에 따라 펄스레이저의 Separation time 과 Duration time 의 조절이 가능하다. 펄스 ESPI 에서 위상 추출은 Stroboscope ESPI 에서 사용하는 시간의존 위상이동기법(Time-dependant phase shifting technique)을 사용할 수 없으며, 공간의존 위상이동기법(Spatial-dependant phase shifting technique)을 사용하게 된다<sup>18</sup>. 공간의존 위상이동기법은 Fig. 5 의 광학간섭계에서 참조광을 광축의 중심점에서 약간의 기울기를 갖도록 배치하여 입사되는 참조광과 물체광의 간섭에 의해 각

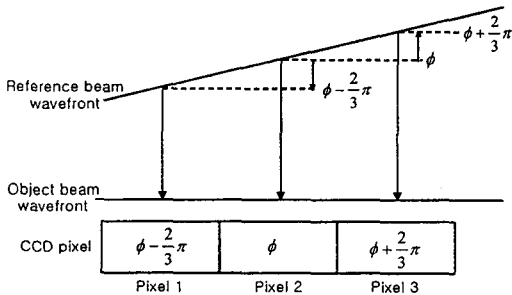


Fig. 6 Principle of spatial phase shifting technique

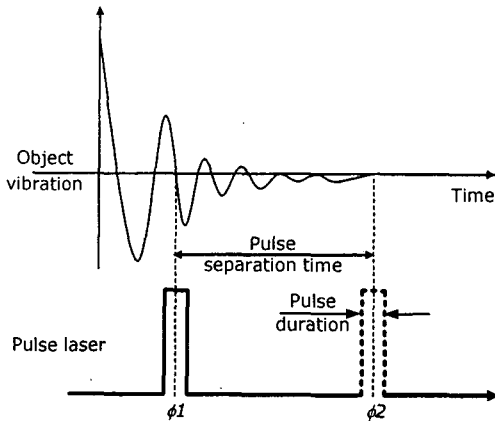


Fig. 7 Double Pulse illumination

CCD camera 의 각 화소(Pixel)에서 Fig. 7 과 같이 일정한 위상량( $3\pi/2$ )을 유지할 수 있게 한다. 이와 같은 방법에 의해 각 화소에서는  $r, r$ 의 위상차를 갖게 되며, 이를 이용하여 식(7)과 같이 3 단계 위상추출 알고리즘을 적용하여 위상  $\phi_1$  과  $\phi_2$  을 추출할 수 있다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \sqrt{3} \frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (7)$$

여기에서  $I_1, I_2, I_3$  는 Pixel 1, 2, 3 에서의 복소진폭이다.

또한, 변형 위상 ( $\Delta\phi$ ) 는 Fig. 7 에서 Pulse separation time 사이의 변형을 의미하며, 식(6)에 의해 구할 수 있다.

### 3. 적용사례

#### 3.1 Time-average ESPI and Stroboscope ESPI

시간평균 ESPI 와 Stroboscope ESPI 는 조화진동을 하고 있는 물체의 진동모드의 변화를 측정하며, Stroboscope ESPI 는 진동량의 정량화가 가능하다는 장점이 있다. 그러나, Stroboscope ESPI 는 위상이동기법을 적용하기 위한 데이터 처리속도가 필요하며 실시간 측정이 어렵다. Fig. 8 은 양단이 고정된 Stainless steel 평판의 공진주파수에서 진동모드를 시간평균 ESPI 를 이용하여 측정한 결과이다.

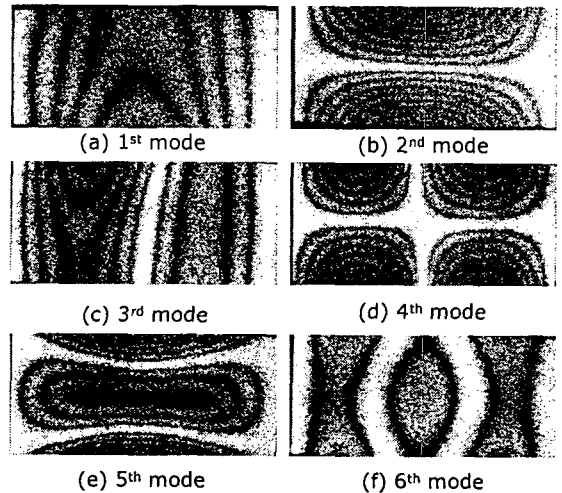


Fig. 8 Vibration mode shape of two ends clamped plate

일반적인 적용방법은 시간평균 ESPI 을 적용하여 가진주파수 변화에 따라 실시간으로 각 진동모드 변화를 관찰하여 공진모드와 공진주파수를 결정하고, 측정된 각 공진주파수에 Stroboscope ESPI 을 적용함으로써 진동량의 정량측정을 하게된다.

Fig. 9 는 4 면이 고정된 평판의 진동량을 측정하기 위해 Stroboscope ESPI 를 적용하여 측정된 위상지도 (phase map)이다. 위상지도에 결필침기법 (Unwrapping)을 적용하여 진동량을 정량평가할 수 있다. Fig. 10 은 4 면고정 평판의 해석결과로서 유한요소해석(FEM), 시간평균 ESPI(TA-ESPI), Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV), Stroboscope ESPI 를 이용하여 측정된 공진주파수를 비교하였다. 측정결과는 유한요소해석결과와 비교하여 시간평균 ESPI 와 Stroboscope ESPI 는 2% 이내의 오차를 보이고 있다.

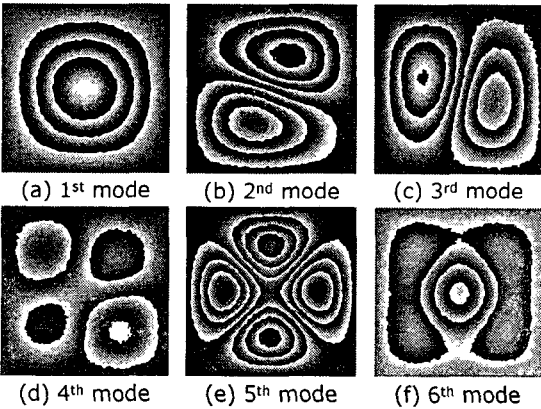


Fig. 9 Vibration mode shape of all clamped plate

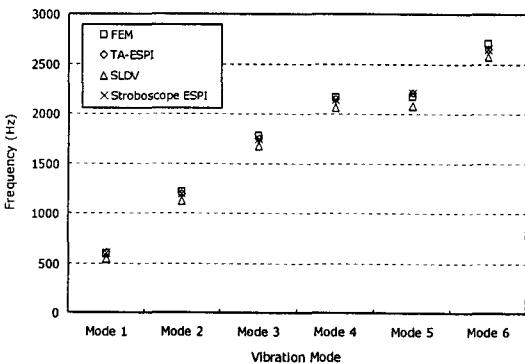


Fig. 10 Comparison of each technique

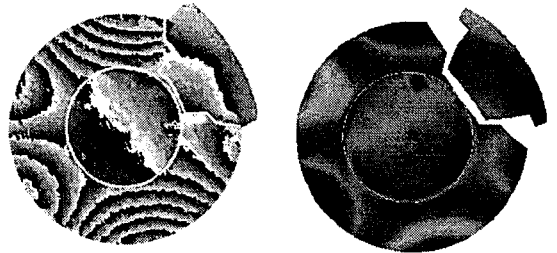
두 기법은 조화진동을 하는 대상체에만 적용해야 하는 제한점이 있으나, 가속도계, LDV 와 같은 공진주파수 분석기법과 융합하여 공진모드분석에 있어 높은 공간분해능을 제공할 수 있다. 특히, 고분해능 CCD 카메라의 발전은 대형 구조물에 높은 공간분해능을 제공하며, 최근에는 MEMS 분야의 발전과 함께 형상이 작고 복잡한 구조물의 공진주파수와 공진모드 측정에 활용이 되고 있다

### 3.2 Pulse ESPI

Pulse ESPI 는 이중 펄스레이저의 Separation time 사이의 변형을 측정하며, 환경외란에 영향을 받지않아 충격 및 비주기 진동 해석에 활용도가 높은 기술이다. 대상체가 가동 중에 측정을 할 수 있다. 또한, 측정을 위한 압막시설이 필요없으며, 고출력 펄스레이저를 사용하여 대형 면적을 동시에 고분해능으로 측정이 가능하다. Fig. 11 은 독일 Steinbichler사와 Ettermeyer사에서 자동차 소음분석과 대형 디스크브레이크의 진동해석에 Pulse ESPI 를 활용한 사례이다. 자동차 소음분석 실험에서 줄무늬 패턴이 조밀한 곳에서 진동량이 크며 이는 소음원으로 간주 될 수 있다.



(a) Noise analysis of automobile (Steinbichler GmbH)



(b) Vibration analysis of disk brake (Ettermeyer GmbH)

Fig. 11 Industrial application of pulse ESPI

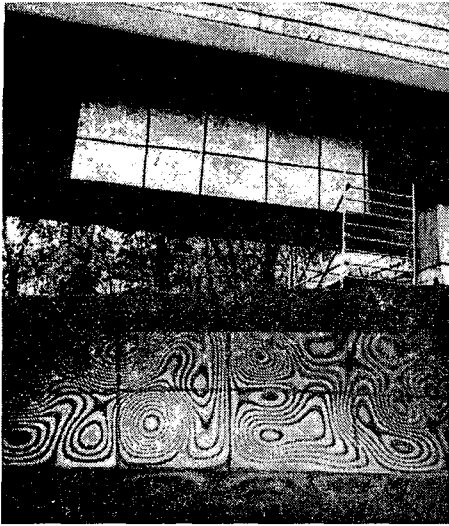


Fig. 12 Vibration analysis of railroad bridge

이외에도 국외에서 Fig. 12 와 같이 실제 운행 중인 철도교량의 진동해석을 통한 안전진단 분야에서 활용을 하고 있다. 국내에서는 삼성전자, 대우전자, 한국원자력연구소, 전북대학교, 조선대학교에서 Pulse ESPI 를 활용한 제품 신뢰성평가, 구조물 진단, 화염가시화 등의 연구를 수행하고 있으며, 펄스레이저의 가격하락과 함께 산업적 활용이 많아 질 것으로 예상된다.

#### 4. 요약

본 논문에서는 진동해석을 위한 전자처리 스페클간섭법 (Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI) 기반의 응용 기법들을 소개하였다. 변형전후의 상태를 연속적으로 시간평균하여 진동모드를 측정하는 Time average ESPI, 물체의 위상과 같은 위상으로 레이저를 조사하고 위상이동기법을 적용하여 조화진동을 하는 대상체의 진동량을 정량 측정할 수 있는 Stroboscope ESPI, 이중 펄스레이저를 사용하여 Pulse separation 간의 충격 또는 비주기 진동을 측정할 수 있는 Pulse ESPI 기술의 원리와 적용사례가 설명되었다. 현재 국내에서는 진동해석 분야에서 시간평균 ESPI 가 많이 활용되고 있으나, 점차 제품 신뢰성평가와 MEMS 구조물 진동해석 등 분야에 Stroboscope ESPI 와 Pulse ESPI 의 연구가 확대될 것으로 예측하고 있다.

#### 참고문헌

1. Cloud, G. L., "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, Chapter 21, 1990.
2. HØgmoen, K., LØkberg, O.J., "Detection and measurement of small vibration using electronic speckle pattern interferometry," Applied Optics, No. 16, pp. 1869-1875, 1977.
3. Valera, J. D. R., Jones, J. D. C. and Løkberg, O. J., "Exact vibration amplitude derivative measurement with TV shearography," Meas. Sci. Technol., Vol. 7, pp. 918 - 922, 1996.
4. Jung, H.C., Kim, K.S., Kang, K.S., Lee, Y.H., Ji, C.J. "Application of Stroboscopic ESPI method for measuring the vibration amplitude of the square shaped plates," Spring Proc. of KSPE, p.174 , 2004.
5. Inman, D.J., "Engineering Vibration," Prentice-Hall Inc., Chapter 1, 1994.
6. Castellini, P., Cupido, E., Baldoni, F. and Ingenito, G. "Vibration measurements on rolling tyres by tracking laser doppler vibrometer," Proc. SPIE, Vol. 4072, pp. 169~175, 2000.
7. Jones, R., Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, Chapter 4, 1983.
8. Doval, Á. F., Trillo, C., Cernadas, D., Dorrio, B.V., López, C., Fernández, J.L. and Pérez-Amor, M., "Measuring Amplitude and Phase of Vibration With Double-Exposure Stroboscopic TV Holography," Proceedings of the International Conference on Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications, pp. 281~288, 2000.
9. Graham, G., Petzing, J., Lucas, M., Tyrer, J., "Quantitative modal analysis using electronic speckle pattern intefereometry," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, pp. 147~161, 1999.
10. Vikhagen, E., "Vibration measurement using phase shifting TV-Holography and digital image processing," Optics Communications, Vol. 69, pp. 214~218, 1989.
11. Jung, H.C., Kim, K.S., Choi, J.S., Kim, S.S., Kang, K.S., Jung, S.T., Choi, T.H., "Development Non-contact Laser Measuring System for Vibration

- Analysis of Structures," Spring Proc. of KSPE, pp.443-446, 2003.
12. Park, N.K., You, W.J., Ahn, J.K., Kang, Y.J., "A study on the Quantification of vibration mode by ESPI using A·O Modulator," Spring Proc. of KSPE, pp.207-210, 2001.
  13. Creath, K.. "Phase-shifting Speckle Interferometry," Applied Optics, Vol. 24, pp. 3053, 1985.
  14. Rosinson, D.W., Reid, G.T. ed., "Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques," Institute of Physics Publishing, Chapter 6, 1993.
  15. Auweraer, Van der, Steinbichler, H., Vanlanduit, H., Haberstock, S.C., Freymann, R., Storer, D., Linet, V., "Application of stroboscopic and pulsed-laser electronic speckle pattern interferometry (ESPI) to modal analysis problems," Measurement Science and Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 451-463, 2002.
  16. Ruiz, P.D., Kaufmann, G.H., Möller, O., Galizzi, G.E., "Evaluation of impact-induced transient deformations using double-pulsed electronic speckle pattern interferometry and finite elements," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 32, pp. 473-484, 2000.
  17. Davila, A., Kerr, D., Kaufmann, G. H., "Fast Electro-Optical System for Pulsed ESPI Carrier Fringe Generation," Optics Communications, pp. 457-464, 1996.
  18. Rosinson, D.W., Reid, G.T. ed., "Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques," Institute of Physics Publishing, Chapter 5, 1993.