

## Pulse ESPI System을 이용한 모형교량의 진동특성해석

최정구\*(조선대 대학원 기계설계공학과), 김경석(조선대),  
장호섭, 강명구(조선대 LARC), 김성식(목포 과학대)

### Vibration Characteristic Analysis of Bridge Simulator by Pulse ESPI System

J K Choi(Mech. Eng. Dept), K. S. Kim(Mech. Eng. Dept),  
H. S. Jang, M G Kang(LARC), S S Kim(Mokpo Science College)

#### ABSTRACT

Until now, strain gage technique and accelerometer for the diagnosis safety of constructions are used widely. However, the limits of these methods are revealed. But Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) that uses Pulse Laser is noncontact, whole-field, real-time measuring method also dull to disturbance and can achieve test result in a very short time. It has various strong point in spot application, swift establishment, and dynamic conduct analysis for the entire field of Laser illuminate. This author analyzed vibration characteristic of using the Pulse ESPI System, the diagnosis safety of bridges, to simplify the analysis of the dynamic conduct of a large construction.

**Key Words :** Pulse ESPI (펄스레이저를 이용한 전자처리 스펙클 간섭법 ), Simulator Bridge(모형교량), Vibration Characteristic Analysis(진동특성해석)

#### 1. 서론

눈부신 기술의 발달로 최첨단을 달리고 있는 요즘에도 예기치 못한 재해로 인해 인명피해가 많이 발생하고 있다. 그 중 대표적인 것이 교량붕괴이며, 교량은 특성상 여러 가지 이상 하중과 진동이 발생 할 수밖에 없기 때문에 다양한 외란을 고려한 설계가 무엇보다 중요하다. 안전한 설계를 하기 위해서는 무엇이 교량붕괴에 치명적인 영향을 미치는 가를 알아야 한다. 교량을 조사하는 방법에는 여러 가지가 있는데 대표적인 것으로 초음파탐상법, 음향방출법, 가속도계법 등이 있다<sup>[1]</sup>. 이들 기법은 point by point방식의 접촉식이며, 대형의 구조물에 적용에는 많은 경제적, 시간적 손실을 수반한다. 본 논문에서 제안하는 Pulse Laser를 이용한 Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)는 기존 Continuos laser 기반의 ESPI에서 문제인 환경진동 외란의 문제를 pulse laser를 이용하여 짧은 시간 ( $\mu s \sim ms$ )내의 물체의 거동을 측정할 수 있다<sup>[2]</sup>. 또한 이 pulse ESPI는 외란에 둔감하고, 설치가 빠르며 Laser가 조사되는 전면에 대한 동적거동해석이 용

이 하여 아주 짧은 시간에 검사를 마칠 수 있어서 현장적용에 있어 많은 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 Pulse ESPI를 사용하여 모형교량을 공진 주파수에서 진동거동을 가시화하고 기존 측정시스템에서 관찰되지 않았던 역학적 현상을 규명하고자 한다. 본연구를 통하여 교량의 안전진단 및 대형구조물의 동적거동을 보다 용이하고 간편하게 해석 할 수 있을 것으로 보이며, 기존 안전진단기술의 한계를 보완하여 새로운 방안을 제시할 수 있을 것이다.

#### 2. Pulse ESPI의 원리

Fig. 1은 면외변위 측정을 위한 Pulse ESPI 시스템의 개략도로서 물체로 조사되는 CCD 카메라에 집광되는 물체광과 CCD 카메라로 직접 입사되는 참조광의 간섭으로 물체의 변형을 측정하게 된다. 펄스레이저(Pulse laser)로부터 발진하여 확산된 레이저광은 대상 물체에 조사되며 이때 1차 스펙클 패턴이 형성이 된다. 물체에서 형성된 스펙클패턴은 Camera 렌즈에 의해 집광이 되며, 동시에 Beam

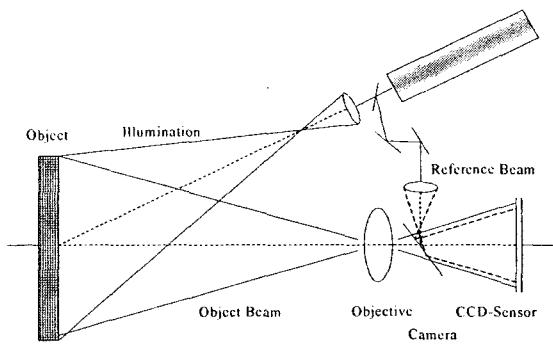


Fig. 1 Optical interferometer for pulse ESPI

Splitter나 광파이버(Optic Fiber)등을 이용하여 참조광을 물체광과 간섭을 할 수 있도록 유도하면, 물체광에 의해 형성되는 스페클패턴(Speckle pattern)과 참조광의 간섭에 의해 식(1)과 같은 강도분포를 갖는 제 3의 스페클패턴을 형성하게 된다.

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

여기에서  $I$ : 간섭에 의한 광강도분포,  $I_O$ : 물체광의 광강도 분포,  $I_R$ : 참조광의 광강도분포,  $\phi$ : 물체광과 참조광의 초기위상차이다. 식(1)에서 초기위상을 추출하기 위해서는 미지수가 3개( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $\phi$ )이므로 식(1)으로부터 직접 위상차를 구할 수 없게 된다. 즉, 위상을 추출하기 위해 최소한 3개의 방정식이 필요하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 기존 ESPI에서는 Piezo-electro transducer(PZT)를 이용한 위상변조 기법을 사용하고 있다<sup>[3]</sup>, 이 기법에서는 참조광을 PZT등으로 인위적인 변위를 발생시켜야 함으로 본 논문에서 적용한 pulse ESPI에서는 레이저의 pulse가 매우 짧아 기존 시간의존 위상이동기법을 적용할 수 없다. Pulse ESPI에서 위상추출은 공간의 춘성 위상이동기법(Spatial phase shifting method)을 사용하는데 CCD 결상면에서 서로 다른 위상을 갖는 3개의 방정식을 만들어 이들의 관계로부터 기존 위상이동기법에서 위상을 알고리즘을 사용한다. Fig. 2에서와 같이 참조광의 Source Point를 광축의 중심점에서 벗어난 곳에 약간의 기울기를 갖게 배치시키면, 간섭에 의해 각 CCD camera의 각 화소(pixel)에서는 Fig. 2와 같이 일정한 위상차( $2\pi/3$ )을 유지할 수 있게 된다<sup>[4][5]</sup>. 이와 같은 방법에 의해 Fig. 2와 같이 각각의 위상차를 갖는 각 화소에서

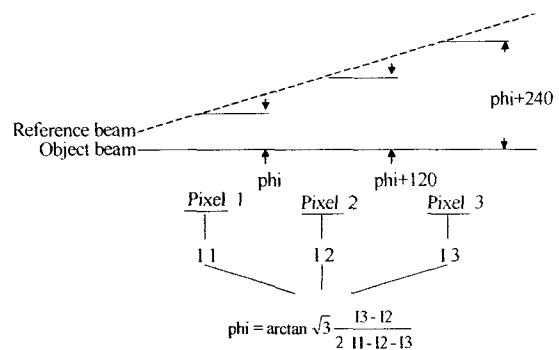


Fig. 2 Spatial Phase Shift Technique

"Pixel 1 =  $\phi$ ", "Pixel 2 =  $\phi + 120^\circ$ ", "Pixel 3 =  $\phi + 240^\circ$ "의 위상차를 갖게되며, 이를 이용하여 식(2)와 같이 시간위상이동기법의 해석에 사용된 알고리즘을 이용하여 위상을 추출할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (2)$$

공간위상이동기법의 가정은 3 pixel상에 조사된 광파면이 일정한 위상량을 유지할 수 있도록 평행광이여야 한다는 것이며, 한 개의 스페클이 3개의 pixel상에 존재하기 때문에 그만큼 상대적으로 낮은 공간분해능을 가지게 되며, 고분해능의 CCD 카메라를 요구하게 된다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 한 개의 스페클패턴으로부터 위상을 추출할 있다는 장점은 많은 분야에서 활용도가 높은 기술이라 할 수 있다.

### 3. 측정 대상 및 측정시스템

#### 3.1 Pulse ESPI system

Pulse ESPI System은 독일 Steinbichler사의 제품으로, 구성은 Fig. 3과 같이 파장 694 nm, 최대출력 3J, pulse duration이 20 ns인 double pulse Ruby Laser와 간섭계가 내장된 고분해능 비디오 카메라에 참조광을 공급하기 위해 전용 광파이버를 이용해 연결하였고, Ruby Laser에 필요한 레이저의 출력 및 펄스간격(pulse separation)를 제어하는 전원공급조절장치(Power Supply Control Unit)와 이 모든 장비를 제어하고 화상처리장치(Image processor System)에 발사신호를 제공하는 Controller, 확산렌즈, 불록거울, 광분할기(Beam Splitter) 등의 광학부품으로 구성되었다. 최초 레이저 소스에서 광분할기에 의해 두개의 빔

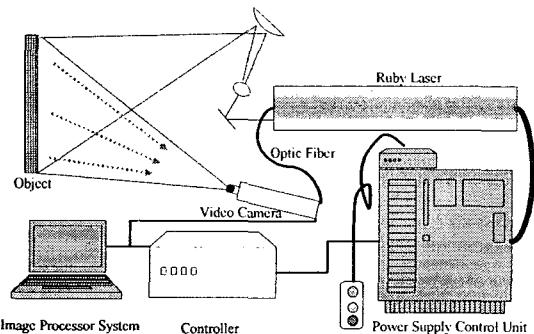
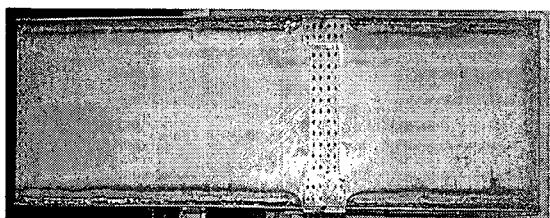


Fig. 3(a) Composition of Pulse ESPI System

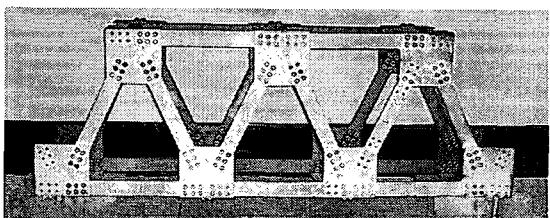
으로 분할되어 그중 하나는 광파이버를 통하여 비디오카메라로 입력되고, 다른 하나는 미러와 볼록렌즈를 지나 확산되어 물체에 조사되며 물체에서 난반사된 빛이 비디오카메라로 입사되어 이곳에서 물체광과 참조광이 만나 간섭을 일으켜 면외변위를 측정할 수 있게 된다.

### 3.2 교량 시험편

본 연구에서는 현재 국내 교량의 대부분을 차지하는 트러스 교량과 박스 거더교량을 모델로하여 교량 모형을 제작하였다. 모형은 실제교량의 10:1으로 상사법칙에 의해 제작하였으며, 거더교는 직선구간의 하부 박스형 부분을 기준으로 하여 시뮬레이터를 제작하였다.



(a) Simulator of Girder



(b) Simulator of Truss

Fig. 3 Bridge simulator

트러스 교량에 사용된 재료는 SS400으로 구조물 제작에 주로 사용되는 재료를 선택하였으며, 거더교에서는 여러 가지 설계조건을 고려하여 강재는 열연강판(SM400)을 사용하였다. 경계조건은 실제 교각과 유사한 조건인 단순지지로 구현하였으며, Fig. 3은 시뮬레이터의 사진이다.

### 3.3 실험방법

공진주파수에서 교량의 진동 거동을 해석하기 위해서 공진주파수를 Laser Doppler Vibrometer(LDV, Poytek GmbH, Germany)를 이용하여 공진주파수를 측정하였으며, 각 공진주파수에서 진동거동을 pulse ESPI를 이용하여 진동모드를 측정하였다. 가진방법은 Shaker (2806 B&K)와 함수발생기(Function Generator, HP Co.)를 이용하여 각 공진 주파수에서 가진을 하였으며, pulse seperation을 400 ms로 하여 측정하였다.

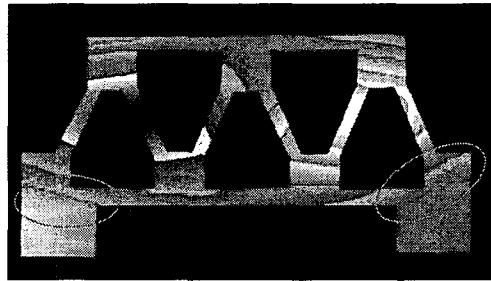
## 4. 실험결과

### 4.1 트러스 교량의 진동거동 해석

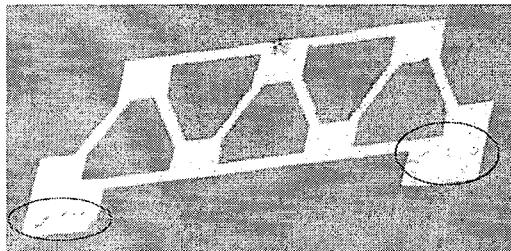
Table 1은 LDV로 측정한 트러스교량의 공진주파수를 나타내며 각 공진주파수에서 Pulse ESPI System을 이용하여 진동모드측정실험을 행한 결과를 주요한 거동을 일으키는 공진주파수(3 mode, 8 mode)를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 3모드인 81 Hz의 공진주파수에서 교량의 거동을 나타내는 것으로 오른편 교각에서 1모드 2모드에서보다 과다한 전단력이 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 교각 연결부에 과하중으로 작용하게 된다. 즉, 교량설계 시 이를 고려하여 최대전단지점에 전단하중을 줄일 수 있는 구조설계가 되어야 할 것이다. 또한, 7th 모드에서는 388 Hz와 395 Hz에서 공진주파수를 나타냈으며, LDV의 검출신호를 오실로스코프(Oscilloscope)에서 조사한 결과 388 Hz에서는 미약한 고주파성분이 388 Hz와 함께 검출이 되었으며, 395 Hz에서는 고주파 성분이 뚜렷하게 나타났다. 즉, Fig. 5에서 확인 할 수 있는 것과 같이 좌측 상단의 연결부에서의 고주파 진동을 하는 것으로 조사되었다. 이러한 문제는 저주파의 공진에서도 3rd 또는 4th 하모닉 진동이 동반하여 나타나, 각 연결부재의 진동으로 나타날 수 있는 의미이며, 이 진동은 연결부재 체결부에 파로하중을 가하여 볼트파손의 원인이 될 수 있다. 기타 공진모드에서 대칭 안정된 형태의 거동을 보였다.

Table 1 Resonance Frequencies Analysis by LDV

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
Hz	17	63	81	104	127	179	388/ 395	437

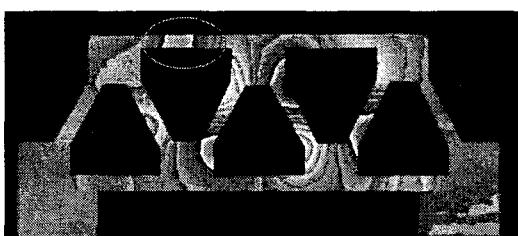


(a) Vibration mode shape

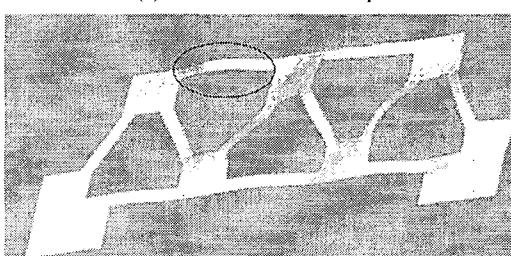


(b) 3D Displacement Distribution

Fig. 4. Vibration mode shape of truss bridge simulator  
(3rd mode, 81 Hz)



(a) Vibration mode shape

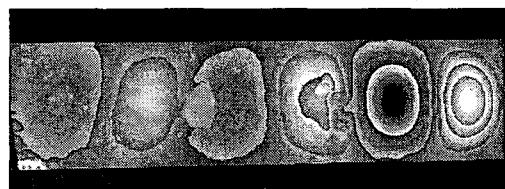


(d) 3D displacement distribution

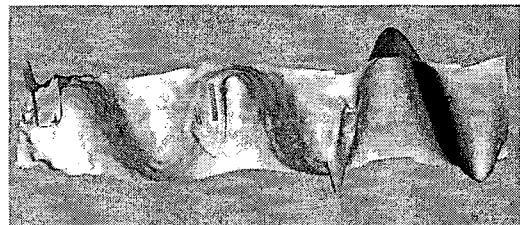
Fig. 5. Vibration mode shape of truss bridge simulator  
(7th mode, 395 Hz)

#### 4.2 강박스 거더교의 진동거동 해석

강박스 거더교의 실험에서는 각 공진주파수에서 대체적으로 대칭의 안정된 거동을 보였으며, 정상적으로 건설된 거더교에서는 진동거동에 의한 과도한 전단력 또는 비대칭 거동에 의한 응력집중에 의한 구조물의 피로파괴는 발생하지 않을 것으로 사료된다. 그러나, 특정한 문제(잔류응력, 부실시공 등)에 의한 강박스의 연결부에서 손상이 발생할 가능성이 있다. Fig. 5는 공진주파수 439 Hz에서 강박스거더교의 진동모드를 보여 주고 있다.



(a) Vibration mode shape



(b) 3D Displacement Distribution

Fig. 4. Vibration mode shape of truss bridge simulator  
(439 Hz)

#### 5. 결론

본 논문에서는 교량 시뮬레이터의 진동거동해석을 위해 Laser Doppler Vibrometer를 이용하여 교량모형의 공진주파수를 검출하고 각 공진주파수에서 교량의 진동모드를 Pulse ESPI를 이용하여 측정하였다. 기존의 접촉식 방법에 비하여 원거리에서 진동거동을 해석할 수 있다는 장점 이외에도 Pulse ESPI를 이용한 교량의 전체적인 거동을 검사한 결과에서는 특정 공진 주파수에서 과도한 전단력이 발생하는 지점을 용이하게 검출할 수 있으며, 저주파 진동과 연관된 3rd, 4th 하모닉 진동이 발생하여 교량의 각 부재에 영향을 줄 수 있다는 사실을 발견하였다. 또한 강박스 거더교의 실험에서는 대상체의 구조적 특성으로 대체로 안정된 대칭거동을 보이며 특이한 거동이 발견되지 않았으며, 이는 진동거동보다는 하중 또는 용접부의 잔류응력이 주요한 문제로 지적되어 연결부의 피로에 의한 파손이 더 심각한 문제일 것으로

예상된다. 본 연구에서 제안하는 교량안전진단 기술은 현장적용이 가능한 기술로 기존 검사기술의 접촉식, point by point 검사의 한계를 보완할 수 있으며, 더 나아가 기존 기법에서 검출이 어려웠던 문제들을 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] 한국콘크리트학회 편저, “콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단” 한국콘크리트학회, 제 1장, 1994.
- [2] Auweraer, Van der , Steinbichler, H., Vanlanduit H., Haberstok, 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.
- [3] Creath, K.. "Phase-shifting Speckle Interferometry.", Applied Optics Vol. 24, pp. 3053, 1985.
- [4] Leidenbach S.: "Direct Phase Measurement - A new Technique for Calculating Phase Portraits from One Intensity Portrait only", Laser 1991.
- [5] A. Davila, D. Kerr, G.H. Kaufmann: "Fast Electro-Optical System for Pulsed ESPI Carrier Fringe Generation", Optics Communications, pp. 457-464, 1996.