

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(1), 30-35(2017)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.1.30

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 고속 디지털 카메라를 이용한 알루미늄 하니콤 샌드위치 보의 고유 진동수 계측

구남서\*, 방호양미\*\*, 레빈통\*\*, 김태렬\*\*\*

### Measurement of natural frequency of aluminum honeycomb sandwich beams using high speed digital cameras

Nam Seo Goo\*, Hoang My Vang\*\*, Vinh Tung Le\*\* and Tailie Jin\*\*\*

Konkuk University\* , \*\* , OMA\*\*\*

#### ABSTRACT

In this study, we measured the natural frequencies of aluminum honeycomb sandwich beams using digital image correlation technique. The vibration images were captured using two high speed digital cameras and the images were converted to displacements by the digital image correlation technique. Displacement data in time domain were transformed to frequency domain data by fast Fourier transform software. To reduce noise invoked by random excitation, a spectrum averaging technique and Savitsky-Golay digital filter were adopted. A conventional vibration measurement using an accelerometer and a finite element analysis were performed to compare the results by high speed digital camera measurement method. In conclusion, new method using high speed digital cameras and digital image correlation technique can measure the vibration of beam structures and can be applied to bio-structures where sensors cannot be attached.

#### 초 록

본 연구에서는 디지털 영상 상관 기법을 이용하여 알루미늄 하니콤 샌드위치 보의 고유 진동수를 계측하였다. 고속 디지털 카메라를 이용하여 보의 진동 영상을 획득하고 디지털 영상 상관 기법을 이용하여 변위를 계산하였다. 시간 영역에서의 변위 데이터를 고속 푸리에 변환하여 주파수 영역의 응답으로 변환하였다. 랜덤 가진에 따른 주파수 영역에서의 잡음을 줄이기 위하여 스펙트럼 평균화 기법과 Savitsky-Golay 디지털 필터를 사용하였다. 가속도계를 이용한 기존의 방법 및 유한요소 해석 결과와의 비교를 통하여 방법의 정확성을 확인하였다. 결론적으로 고속 디지털 카메라와 디지털 영상 상관 기법을 이용하는 새로운 방법은 구조물의 진동을 잘 측정할 수 있음을 보였고, 센서를 부착하기 어려운 바이오 구조 등의 진동 계측에 적용할 수 있을 것이다.

**Key Words** : Digital image correlation technique(디지털 영상 상관 기법), Natural frequency(고유 진동수), Random excitation(랜덤 가진), Finite element analysis(유한요소해석)

† Received : November 2, 2016      Revised : December 23, 2016      Accepted : December 23, 2016

\* Corresponding author, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr

## I. 서 론

기계 및 항공우주 구조물의 변형 및 진동을 계측하는 주된 방법으로 구조물에 센서를 부착하여 변형/진동 신호를 계측하는 접촉식 계측법을 사용하여 왔다. 접촉식 방법은 신뢰도가 높은 계측 방법으로 많은 각광을 받고 있으며 정적 거동에서는 변형을 게이지, 동적 응답에서는 가속도계를 주로 사용하고 있다[1].

최근 전자, 로봇, 의료 산업의 비약적인 발전, 생체모사 연구의 대중화 등으로 말미암아 연구 대상 구조물의 범위가 전통적인 금속 또는 복합재료 구조물의 영역을 벗어나고 있다. 예를 들어 소형 무인 비행체 연구에 필요한 곤충 또는 새, 의학 분야의 간, 갑상선 등의 인체 장기, 스마트폰과 같은 소형 휴대형 전자기기 등이 있다. 이러한 구조물의 경우 센서를 부착하기 어려워 변형 및 진동을 측정하는 새로운 방법이 필요하다.

디지털 영상 상관 기법(digital image correlation technique, DIC 기법)은 구조물의 변형 전의 영상과 변형 후의 영상을 비교하여 구조물의 변형을 계측하는 방법이다[2-5]. 이 방법을 사용하면 구조물에 변형을 게이지나 가속도계와 같은 센서를 부착할 필요가 없으므로 센서 부착이 어려운 얇거나 복잡한 구조물의 변형/진동도 쉽게 계측이 가능하다.

본 연구에서는 두 대의 고속 디지털 카메라를 사용한 DIC 기법으로 알루미늄 하니콧 샌드위치 보의 고유진동수를 계측하였다. 고속 디지털 카메라를 이용하여 보의 진동 영상을 획득하고 DIC 기법을 이용하여 변위를 계산하였다. 시간 영역에서의 변위 데이터를 고속 푸리에 변환하여 주파수 영역의 응답으로 변환하였다. 랜덤 가진에 따른 주파수 영역에서의 잡음(noise)을 줄이기 위하여 스펙트럼 평균화 기법(spectrum averaging technique)과 Savitsky-Golay 디지털 필터를 사용하였다. 가속도계를 이용한 기존의 방법 및 유한요소 해석 결과와의 비교를 통하여 방법의 정확성을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2.1 디지털 영상 상관 기법

디지털 영상 상관 기법은 카메라로 촬영된 구조물의 변형 전의 영상과 변형 후의 영상을 매칭되는 미소면(facet)에서 비교하여 구조물 전체 영역의 변위를 계산하는 방법이다[2-5]. 여기에서

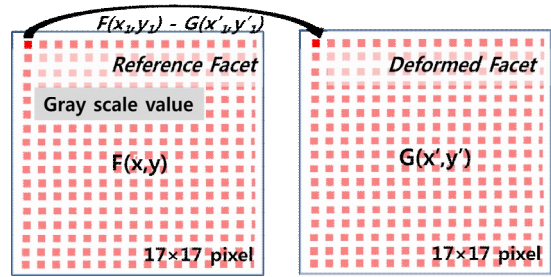


Fig. 1. Basic principle of digital image correlation technique

미소면은 구조물의 영상에 있는 일정한 크기의 픽셀의 집합이며 Fig. 1에 변형 전의 미소면과 변형 후의 미소면을 표기하였다.

변형 전과 변형 후의 미소면의 상관관계를 편차제곱합(sum of square deviation, SSD)  $r$  로 표기하면 다음과 같다.

$$r = \sum (G_i - F_i)^2 \quad (1)$$

여기에서  $G_i$ 는 변형 후의 미소면의 그레이 스케일 값이며  $F_i$ 는 변형 전의 미소면의 그레이 스케일 값이며  $r$ 의 값이 0이면 두 미소면이 일치함을 의미한다. 즉 변형 전의 미소면과 제일 일치하는 변형 후의 미소면을 찾고 그 이동한 거리를 계산하면 구조물의 변위가 계산되는 것이다.

이렇게 계산된 변위는 픽셀 단위의 변위이기 때문에 정확도가 높지 않다. 정확도를 높이려면 서브픽셀(sub pixel) 단위의 변위를 계산하는 알고리즘을 사용해야 한다. 일반적으로 사용하는 방법에는 Coarse-fine search 알고리즘, Peak-finding 알고리즘, Iterative spatial domain 알고리즘과 Spatial-gradient-based 알고리즘 등이 있다[4]. 각각의 방법의 장단점은 참고문헌 [4]에 기술되어 있으며, 여기에서는 가장 우수한 Iterative spatial domain 알고리즘과 Spatial-gradient-based 알고리즘만을 소개한다. 두 방법은 모두 변위매핑 함수(displacement mapping function)를 이용하는 알고리즘이며 계산이 빠르고 정확도가 높아서 제일 많이 사용되는 방법이다.

Figure 2에서 표시한 것처럼 변형이 아주 작은 고체에서 변형 전 점  $P(x_0, y_0)$  주위의 임의의 점  $Q(x_i, y_j)$ 는 고체가 변형을 하여도  $Q'(x'_i, y'_j)$ 는  $P$  점의 주위에 있다고 가정하면 변위매핑 함수,  $\xi, \eta$ 를 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \quad (2)$$

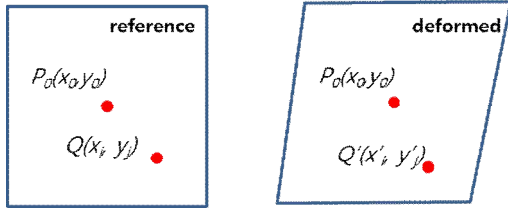


Fig. 2. Positions of points P and Q on a facet before and after deformation

$$y'_j = y_j + \eta(x_i, y_j) \quad (3)$$

이때 구조물이 강체 병진 운동만 발생하였다면 0차 변위매핑 함수는 아래와 같이 된다.

$$\xi_0(x_i, y_j) = u, \quad \eta_0(x_i, y_j) = v \quad (4)$$

여기에서  $u$ 와  $v$ 는 X축과 Y축 방향의 변위이다. DIC 기법의 정확도를 높이기 위하여 1차 변위매핑 함수, 2차 변위매핑 함수 또는 더 높은 차수의 변위매핑 함수를 사용해야 한다. 식 (5)와 식 (6)은 1차 변위매핑 함수이고 식 (8)과 식 (9)는 2차 변위매핑 함수이다.

$$\xi_1(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad (5)$$

$$\eta_1(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad (6)$$

$$\Delta x = x_i - x_0, \quad \Delta y = y_j - y_0 \quad (7)$$

$$\xi_2(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + 0.5u_{xx} \Delta x^2 + 0.5u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \quad (8)$$

$$\eta_2(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + 0.5v_{xx} \Delta x^2 + 0.5v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \quad (9)$$

여기에서  $u_x, u_y, v_x, v_y$  는 변위의 1계 도함수이고  $u_{xx}, u_{yy}, u_{xy}, v_{xx}, v_{yy}, v_{xy}$  은 변위의 2계 도함수이다.

변위의 1계 도함수를 사용하여 서브픽셀 단위의 변위를 계산할 때 먼저 벡터  $\mathbf{P}$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$\mathbf{P} = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y) \quad (10)$$

다음 식 (11)에 표기한 것처럼 SSD에 대입하여  $r(\mathbf{P})$ 의 값이 0에 접근하는 벡터  $\mathbf{P}$ 의 값을 구하면 된다.

$$r(\mathbf{P}) = F(x_i, y_j) - G(x_i + u + u_x \Delta x_i + u_y \Delta y_i; y_j + v + v_x \Delta x_i + v_y \Delta y_i) \approx 0 \quad (11)$$

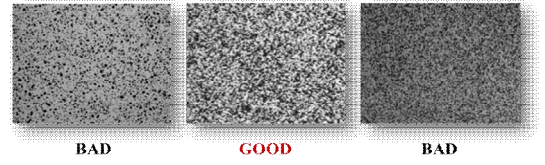


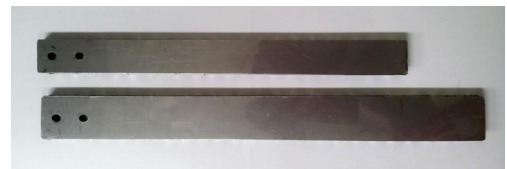
Fig. 3. Speckle patterns on specimens

이 방법으로 계산된 변위의 최대 오차는 2D-DIC 에서  $\pm 0.02$  픽셀 이하 이고 3D-DIC에서  $\pm 0.03$  픽셀 이하이며 이것은 단순히 알고리즘으로 변위를 계산할 때 생성되는 오차이다[5].

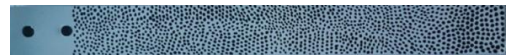
디지털 영상 상관 기법으로 구조물의 변형을 계측하기 위해서는 구조물의 표면에 스페클 패턴을 만들어 주어야 한다. 스페클 패턴은 대비도가 높은 흰색과 검은색으로 이루어져야 하며 점의 크기는 측정하려는 면적의 크기에 의하여 결정되는데 일반적으로 하나의 미소면에 7개 또는 8개의 점이 있는 것이 적당하다. 시편의 크기, 계측 면적에 의하여 미소면의 크기는 자유롭게 설정이 가능하다. Fig. 3은 구조물 표면에 만든 스페클 패턴의 예이며 가운데 것이 제일 우수하다.

## 2.2 시편

실험에서 사용한 시편은 Fig. 4와 같이 알루미늄 하니콤 샌드위치 보이다. 길이가 다른 두 개의 시편을 제작하였으며 치수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 4(b)에는 DIC 기법을 적용하기 위해 필요한 스페클 패턴을 도포한 것을 나타내었다.



(a) Two specimens



(b) Specimen with speckle pattern

Fig. 4. Aluminum honeycomb sandwich beam used for vibration test

Table 1. Size of two aluminum honeycomb sandwich beams

	Beam 1	Beam 2
Length (mm)	225	280
Width (mm)	30	37

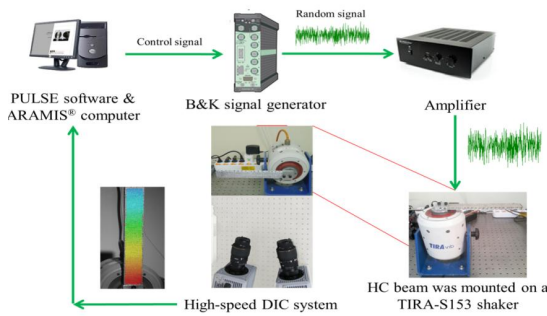


Fig. 5. Vibration measurement system for aluminum honeycomb sandwich beam using high speed digital cameras

### 2.3 고속 카메라 이용 진동 계측 실험장치

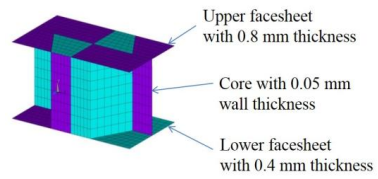
본 연구에서는 고속 카메라를 이용하여 진동을 계측하는 시험 장치를 구성하였으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 고속 카메라(Photron APX-RS), FFT 해석기(B&K 3560-B40), 가진기(Tira-S153), ARAMIS 소프트웨어, PULSE 소프트웨어 등으로 구성되어 있다. 특히 고속 촬영 시 조도를 높여 주기 위하여 2개의 할로겐 램프를 사용하였다. 512×1024 픽셀의 해상도와 초당 2000 프레임의 속도로 2.048초의 동안의 진동 영상을 저장하였다. 주파수 분석을 위하여 랜덤 신호로 구조물을 가진하였다. 실험을 시작하기 전에 보정 패널을 이용하여 고속 카메라에 대한 보정을 수행하였다. 이에 대한 자세한 사항은 참고 문헌 [6]에 기술되어 있다.

고속 카메라를 이용한 진동 측정 결과를 가속도계를 사용하는 전통적인 방법과 비교하기 위하여 별도의 실험 장치를 구성하였다. FFT 해석기(B&K 3560-B40), 가진기(Tira-S153), PULSE 소프트웨어 등을 이용하여 실험 장치를 구성하였으며 가속도계(PCB 352A24)를 사용하여 진동을 계측하였다. 이 경우에는 사인 스위치 방법으로 신호를 생성하여 가진하였다.

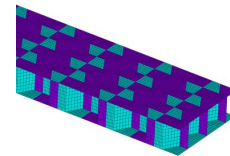
### 2.4 신호 후처리

고속 카메라를 이용하여 획득한 영상은 ARAMIS 소프트웨어에서 미소면의 변위 정보로 계산하였다. 알루미늄 보의 고유 진동수 계측을 위하여 보 끝점의 변위를 시간에 대하여 추출하여 시간-변위 데이터로 변환하였다. 이를 MATLAB®의 FFT 알고리즘을 이용하여 주파수 분석을 수행하였다.

랜덤 신호로 가진하여 계측한 구조물의 주파수 응답에는 잡음이 많이 포함되어 있기 때문



(a) Unit cell



(b) Whole model

Fig. 6. Finite element model of the aluminum honeycomb sandwich beam

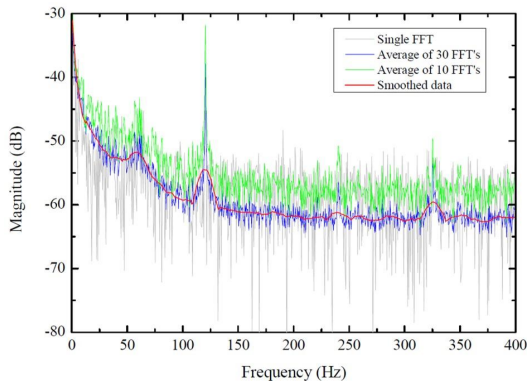
에 스펙트럼 평균화 기법과 Savitsky-Golay 디지털 필터를 사용하여 잡음을 제거하였다. 스펙트럼 평균화 기법이란 랜덤 가진에 대한 결과를 여러 번 중첩하여 잡음을 줄이는 기법이고, Savitsky-Golay 디지털 필터는 신호를 매끄럽게 하는 기법이다[7,8].

### 2.5 유한요소 해석

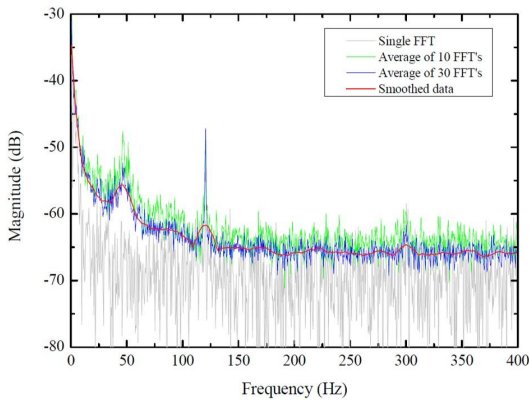
실험 결과를 유한요소해석과 비교하기 위하여 ANSYS® 소프트웨어를 사용하였다. 하니콤 코어 샌드위치 보를 쉘 요소를 이용하여 모델링하였다. 즉 하니콤의 표면과 쉘 벽은 모두 쉘 요소 SHELL93으로 모델링하였다. 먼저 Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 단위 구조(unit cell)를 만든 후 이를 이용하여 Fig. 6(b)처럼 전체 모델을 만들었다. Beam1의 경우 전체 쉘 요소수는 96,900개이고 절점의 개수는 293,204이고 Beam2의 경우 쉘 요소수는 156,400개이고 절점의 개수는 473,244개이다.

## III. 결과 및 토의

Figure 7에는 두 가지 길이가 다른 보에 대한 주파수 응답을 나타내었다. 랜덤신호 가진에 대한 한 개의 FFT 결과는 주파수 특성을 파악할 수 없을 정도로 잡음이 많았으나, 10개 신호의 스펙트럼을 평균화시키면 잡음을 줄일 수 있었다. 신호의 개수를 30개로 늘리면 잡음을 더욱 제거할 수 있었다. 이렇게 잡음을 제거한 신호를 Savitsky-Golay 디지털 필터를 사용하여 처리하면 분석 가능한 주파수 응답 결과를 얻을 수 있



(a) Beam 1



(b) Beam 2

Fig. 7. Frequency response of the aluminum honeycomb sandwich beams using high speed digital cameras

었다.

Table 2와 Table 3에는 두 가지 형태의 보에 대한 고유진동수를 고속 카메라를 이용한 방법과 가속도계를 이용하는 전통적인 방법, 유한요소 해석 등 세 가지 방법을 사용한 결과를 비교하였다. 세 개의 고유 모드에 대한 고유진동수를 비교한 결과 세 가지 방법에 대한 결과가 유사함을 확인할 수 있었다. 특히 고속 카메라를 이용한 측정과 가속도계를 이용한 측정은 거의 유사한 결과를 내는 것을 확인할 수 있었다.

상대적으로 유한요소 해석 결과는 2, 3 차 모드에 있어서 실험 결과와 오차가 있는데 본 실험에서 사용한 알루미늄 하니콤 샌드위치 보가 항공우주용으로 제작된 것이 아니라 건설용으로 제작된 것이기 때문에 물성치 파악이 어려웠기 때문으로 사료된다.

Figure 8에 고속 카메라로 촬영한 알루미늄 하

Table 2. Natural frequency comparison of Beam 1

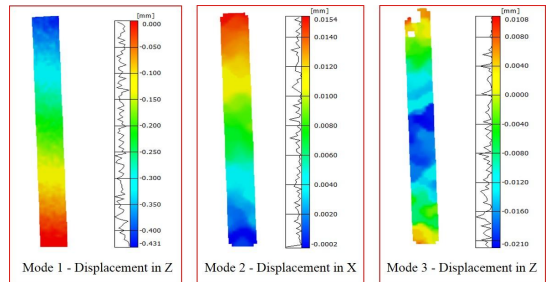
(unit: Hz)

Mode	Camera	Accelerometer	FEM
1	61.5	61	68
2	125	130	149
3	319	325	413

Table 3. Natural frequency comparison of Beam 2

(unit: Hz)

Mode	Camera	Accelerometer	FEM
1	46.5	46	44
2	125	120	128
3	300	300	269



(a) First mode (b) Second mode (c) Third mode

Fig. 8. Natural modes of the aluminum honeycomb sandwich beams using high speed digital cameras

니콤 샌드위치 보의 고유모드 형태를 나타내었다. 첫 번째 고유 모드는 첫 번째 상하 굽힘 모드, 두 번째 고유 모드는 측면 굽힘 모드, 세 번째 고유 모드는 두 번째 상하 굽힘 모드임을 확인할 수 있었다. 두 가지 형태의 보가 같은 형태의 고유 모드 형태를 나타내며, 유한요소 해석 결과와도 같음을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 구조물의 고유진동수와 고유모드를 계측하는 새로운 방법으로 디지털 영상 상관 기법을 이용한 방법을 제안하였다. 고속 디지털 카메라를 이용하여 보의 진동 영상을 획득하고 디지털 영상 상관 기법을 이용하여 변위를 계산하였다. 시간 영역에서의 변위 데이터를 고속 푸리에 변환하여 주파수 영역의 응답으로 변환하

였다. 잡음을 줄이기 위하여 후처리 기법을 적용하였다. 가속도계를 이용한 기존의 방법 및 유한요소 해석 결과와의 비교를 통하여 방법의 정확성을 확인하였다. 이 기법은 센서를 부착하기 어려운 바이오 구조 등의 진동 계측에 적용할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(NRF-2016R1A2B4007443)

## References

- 1) Micro-measurements, "Strain gauge selection: criteria, procedures, recommendations," Tech Note TN-505-4, 2010.
- 2) Peter, W. H. and Ranson, W. F., "Digital imaging techniques in experimental stress analysis," *Optical Engineering*, Vol. 21, 1982, pp. 427-432.
- 3) Jin, T. and Goo, N. S., "Measurement of thermal deformation of a ring structure using digital image correlation technique, J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 39, No. 9, 2011, pp. 877-882.
- 4) Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A., "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009, 062001(12pp).
- 5) Helfrick, M. N., Niezrecki, C., Avitabile, P., and Schmidt, T., "3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, 2011, pp. 917-927.
- 6) ARAMIS, v. 6.0.2 User's Manual, Revision A, GOM mbH, Braunschweig, Germany, 2004.
- 7) Murray, S., "Understanding the Perils of Spectrum Analyzer Power Averaging," Keithley Instruments White Paper, [www.keithley.com/products/rfmicrowave](http://www.keithley.com/products/rfmicrowave), 2006.
- 8) Savitzky, A. and Golay, M. JE, "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures," *Analytical Chemistry*, Vol.36, No. 8, 1964, pp. 1627-1639.