

ESPI에 의한 인장하중 하에서의 복합재 적층판의 진동 거동에 관한 연구

양승필* · 김경석** · 정현철*** 장호섭*** 김종수***

A Study on the Vibration Behavior of Composite Laminate under Tensile Loading by ESPI

Seung-pil Yang, Koung-suk Kim, Hyun-chul Jung,
Ho-seob Chang and Chong-soo Kim

Key Words: Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리 스펙클 패턴 간섭법 : ESPI), Vibration(진동), Vibration Mode(진동모드)

Abstract

Most of studies, using ESPI method, have handled tension, thermal and vibration analysis, and is limited to isotropic materials. However, tension and vibration simultaneously are loaded in real structure.

Also, almost study using ESPI method is locally limited to the analysis on the isotropic materials and a few studies on the anisotropic materials have reported.

Existing methods, such as the accelerometer method and FEA method, to analyze vibration have some disadvantages. Using the accelerometer method that is generally used to analyze vibration phenomena, it is impossible to analyze vibration on the oscillating body and one can observe no vibration mode shape during experiment. In case of the FEA method, it is difficult to define boundary conditions correctly if the shape of a body tested is complex, and one can just obtain vibration mode shapes on the peak amplitude in each modes.

In this study, plane plate of stainless steel(STS304), isotropic material, that is used as structural steel is analyzed about vibration characteristics under tension.

Also, in the study of stainless steel, the characteristics of composite material(AS4/PEEK) used as high strength structural material in aircraft is evaluated about vibration under tension, and studies the effect of tension on vibration.

기 호 설 명

T : Time

I : Intensity

U_{Oav} : Reconstructed wave proportional to the time average

U_{Oav}^* : Conjugation of complex amplitude

J_0 : The zero-order Bessel function of the first kind

1. 서 론

가간섭성이 우수한 레이저가 출현한 이후 광계측 기술은 그 발전속도가 더욱 가속화되고 있다. 기계가공에 있어서는 계측의 정밀도가 가공물의 정밀도를 좌우한다고 할 수 있듯이, 계측의 정밀도는 모든 연구를 행함에 있어서 연구 개시 이전에 반드시 고려되어야 할 원천적인 문제로써 매우 중요한 의미를 갖는다. 현재 최고의 정밀도와 고속화를 추진하고자 하는 분야에 있어서 레이저의 사용이 필수적인 요소가 되어 있다.

* 동아인재대학 자동차기계열

** 조선대학교 공과대학 기계공학부

*** 조선대학교 대학원

레이저 응용 계측법은 모아레법과 홀로그래피 간섭법, 스펙클을 이용한 스펙클 패턴 간섭법 등으로 발전해 왔으며, 여기에 컴퓨터 화상처리를 적용시킨 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI)으로 발전하였다.^(1,2)

지금까지 ESPI법을 이용한 재료의 특성연구의 대부분은 인장이나 열에 의한 면내변위 계측과 외부 진동에 의한 진동특성 해석이 별개의 개념으로 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 구조재료는 인장이나 진동이 별개의 개념으로 작용하는 경우보다는 인장과 진동이 동시에 작용하는 것이 일반적이다. 또한 ESPI법에 의한 연구의 대부분은 등방성 재료의 특성파악에만 치중되어 있었다.^(3,4)

따라서 본 연구에서는 먼저 등방성 재료인 STS304 평판에 대한 진동특성을 파악하고 인장하중이 가해진 상태에서 재료의 진동특성을 파악하고자 한다.

또한 이러한 연구를 바탕으로 이방성 재료이면서 고강도 재료인 복합재료(AS4/PEEK)에 대해서도 인장이 가해진 상태에서 재료의 진동 특성을 파악하여 인장이 진동에 미치는 영향에 대해 고찰하고, 기존의 진동특성 해석에서 주로 사용되고 있는 가속도계법과 유한요소 해석의 결점을 보완하는 새로운 진동해석법으로써의 ESPI법의 유용성을 확인하고자 한다.

2. 원리

진동운동의 수 주기보다 더 긴 시간 T 에 대해서 물체광과 참조광으로 기록된다. 재생된 물체파는 시간 T 에 대한 U_0 의 시간 평균에 비례하는 복소 진폭을 갖으며, 이때의 U_0 는

$$U_{Oav} = A_{av}(x, y) \frac{1}{T} \int_0^T e^{i\left[\phi(x, y) + \frac{4\pi}{\lambda} z(x) \sin \alpha t\right]} dt \quad (2-1)$$

이며, 식 (2-1)의 적분항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_0\left[\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)z(x)\right] \quad (2-2)$$

J_0 는 제1종 0차 베셀함수이다. 광의 세기는 $U_{Oav}U_{Oav}^*$ 로써 계산되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(x, y) = A^2(x, y) J_0^2\left[\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)z(x, y)\right] \quad (2-3)$$

이때, 이미지에는 줄무늬들이 겹치게 되는데, 이러한 줄무늬들은 0차 베셀함수의 제곱의 최소값들에 해당된다. 1차는 이후의 차수보다 더 큰 진폭을 갖으며, 가장 밝은 노달(Nodal)영역을 만든다.

3. 실험

본 실험에서는 일반 구조용 강으로 널리 사용되고 있는 두께가 0.8mm인 STS304 평판($E = 193GPa$, $\nu = 0.3$)을 등방성 평판의 인장하중이 작용하고 있는 상태에서의 진동특성 평가의 대상 시험편으로 사용하였으며, STS304 평판과 AS4/PEEK 복합재 평판은 두께를 제외한 길이와 폭 등의 형상은 동일하므로 시험편의 치수를 따로 구분하지 않고 Fig. 3.1에 나타냈으며 Table 3.1에는 실험에 사용된 STS304 평판과 AS4/PEEK 복합 적층판의 치수를 나타냈다

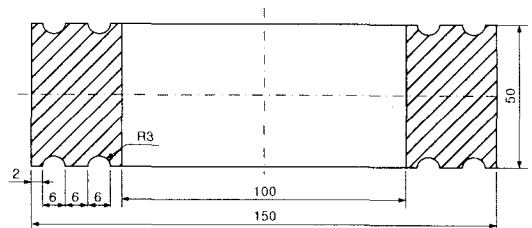


Fig. 3.1 Configuration of specimens for ESPI

Table 3.1 Dimension of specimens for ESPI and accelerometer testing

(단위 : mm)

| Thickness(T) | | Dimension (L × W) | Gage length (a × b) |
|--------------|----------|----------------------|------------------------|
| STS304 | AS4/PEEK | | |
| 0.8 | 0.84 | 150 × 50 | 100 × 50 |

AS4/PEEK 복합 적층판은 탄소 강화 섬유 제품 중의 하나로서, 사용 섬유는 AS4(12K)(Hercules Co.(U. S. A)제품)이며, 사용수지는 결정성 열가소성 PEEK($T_g = 143^\circ C$, $T_m = 334^\circ C$)(I. C. I.(U. K)제

품)이며 $[30/-30/90]_s$, 6 ply로 구성되었다. 성형 방법은 프레스 성형(410℃, 5분간 $6\text{kg}/\text{cm}^2$)을 하였다. 시험편의 측정 면에는 금속광택을 제거하기 위하여 백색 도료를 도포 하였다.

Table 3.2에 사용된 복합재 시험편의 재료정수를 나타내었으며 시험편의 크기는 Table 3.3에 나타내었다.

Table 3.2 Material properties of AS4/PEEK composite laminate

| E_{11} [GPa] | E_{22} [GPa] | ν_{12} | G_{12} [GPa] | ρ [kg/m^3] |
|----------------|----------------|------------|----------------|-----------------------------------|
| 138.60 | 10.07 | 0.32 | 4.12 | 1600 |

Table 3.3 Dimension of AS4/PEEK composite laminate

| Gage Length of Specimen [mm] | Ply Number [ply] | Ply Thickness(h_0) [mm] | Laminate Thickness(h) [mm] |
|------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 100×50 | 6 | 0.14 | 0.84 |

시험편에 가해지는 인장력은 본 실험실에서 자체 제작한 하중부가장치를 사용했다. Fig 3.2에 나타낸 하중부가장치의 가이드에 시험편을 부착하고 시험편 전체에 균등한 하중이 걸리도록 했다. 시험기의 상부축은 고정되어 있으며, 웜과 웜 휠에 의해 하부축에 인장하중을 주어 시험편이 인장되는 구조로 되어 있으며 상단에 고정된 로드셀에 의해 하중값을 전기적인 신호로 변환시켜 디지털 지시계에 하중값을 나타내도록 했다.

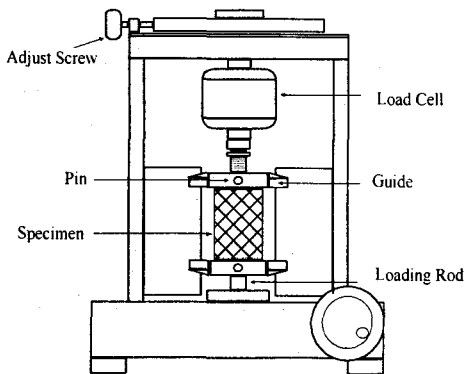


Fig. 3.2 Configuration of the loading device

본 연구에서 적용하려는 ESPI법에 의한 실험

과 동일한 조건 하에서 기존의 진동해석에 가장 많이 적용되는 방법인 가속도계를 이용하여 각각의 하중에 따른 진동특성을 파악하였다. 사용된 가속도계는 PCB352A10이며, 데이터의 획득을 위해 NI-DAQScope 5102를 사용하였다.

하중 부하장치에 STS304 평판과 AS4/PEEK 평판을 장착하여 ESPI법의 적용 시와 동일한 조건으로 각각의 시험편에 대해 각 하중별(0, 300, 600, 900 N) 주파수를 확인하였다.

본 실험에서는 광학 정반 위에 가진장치(Speaker)를 설치하고 레이저가 조사되는 시험편의 후면에서 음압에 의한 가진을 했다. 이때 스피커에서 발생하는 음파의 집속을 위해 스피커용 지그를 제작하고 전면에 개구부의 직경 8mm인 콘을 제작하여 부착하였으며 함수발생기로 정현파를 생성하여 증폭기에 의해 증폭시켜 시험편을 가진했다.

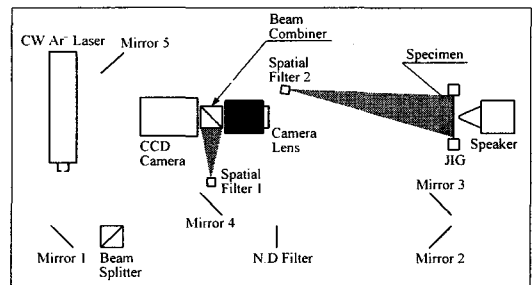


Fig. 3.3 Arrangement of out-of-plane ESPI optical system

정반의 아래에 위치한 CW Ar⁺ Laser에서 편광된 레이저 빔이 거울에 의해 정반 위로 올려지게 된다. Mirror 1을 지난 빔은 광 분리기(beam splitter)에 의하여 두 개의 빔으로 나누어지며, 이때 물체쪽으로 향하는 빔을 물체광, CCD 카메라 쪽을 향하는 빔을 참조광이라 한다. Spatial filter 1에 도달한 빔은 편광에 의하여 노이즈가 제거된 상태로 확산된다. 확산된 빔은 빔 합성기(Beam combiner)에 의해 CCD 카메라의 수광소자로 입사된다. Spatial filter에 의하여 나뉘어진 빔 중 물체광은 Spatial filter 2에 의하여 확산된 후 시험편에 조사된다. 시험편에 의해 반사된 물체광은 카메라 렌즈를 거쳐 빔 합성기를 통하여 CCD 카메라의 수광소자에 입사된다.

레이저 광에 의한 양질의 간섭 줄무늬를 얻기 위해 참조광과 물체광의 광로길이를 서로 같도록 하였으며, 10cm 이내의 오차는 무시하였다.

레이저는 LEXEL사의 Model 95 Ar Ion Laser이며, 최대 출력은 8W이다. 또한 전압의 불안정을 막기 위하여 3상 15KVA AVR(Automatic voltage regulator)을 설치하였다.

광학 정반 위에 설치된 CCD 카메라에 의하여 전송되어 들어온 신호를 처리하기 위하여 일본 NEXUS사의 QUBE 화상처리장치를 이용하였으며, 컴퓨터와 화상처리장치 NexusQube와의 인터페이스는 GP-IB(IEEE-488) 보드를 이용하였다.

TV 모니터상에 나타나는 진동모드패턴과 노달 라인(Nodal line)은 이미지 데이터로서 플로피 디스크에 저장하였으며, 각각의 진동 모드에 따른 줄무늬 패턴을 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과

진동특성을 해석하기 앞서 진동평가에 있어서 보편적으로 사용되고 있는 가속도계를 이용하여 인장부가장치의 가이드에 의해 양단이 고정된 상태에서 제 1 모드에서 제 4 모드까지의 진동특성을 평가했다. 인장부가장치의 가이드에 의해 양단이 고정된 상태에서 시험편에 가속도계를 밀납에 의해 부착시키고 임팩트 햄머에 의해 충격을 가하여 그 응답특성으로부터 각 모드에 따른 응답 주파수의 피크치와 모드별 주파수 대역을 확인 할 수 있었다. 또한 ESPI법과의 비교를 위해 하중이 가해지지 않는 무부하 상태에서 하중을 300N씩 증가시켜 900N까지 총 4단계로 하중을 증가시키면서 각 하중에 따른 모드별 진폭이 최대인 점을 고려하여 가속도계를 부착시켰다. 각 하중과 모드별 가속도계에 의한 주파수 분석결과를 등방성 재료인 STS304평판과 이방성재료인 AS4/PEEK 복합재 평판으로 구분하고 하중의 증가에 따른 주파수 특성을 파악하기 위해 0, 300, 600, 900N의 하중이 작용할 때의 결과치를 하나의 그래프에 중첩시켜 Fig. 4.1와 Fig. 4.2에 나타냈다. 진동 가속도계를 이용한 주파수 분석결과를 통해 주파수의 피크치나 주파수 대역은 알 수 있었으나 진동 모드 형태의 파악은 불가능 했다.

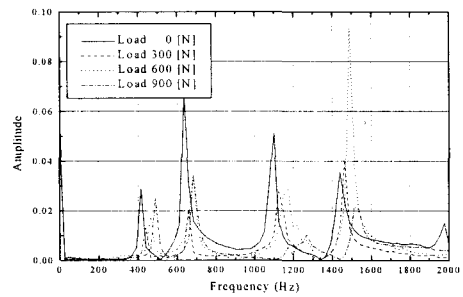


Fig. 4.1 Experimental results by accelerometer system on the STS304 plate at each loads

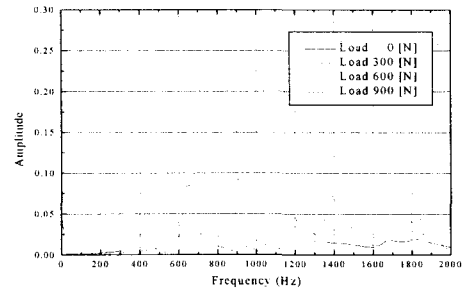


Fig. 4.2 Experimental results by accelerometer system on the AS4/PEEK composite laminate at each loads

대부분의 구조용 재료에는 인장이나 진동이 단독적으로 작용한다기보다는 복합적으로 작용하는 경우가 대부분이다. 따라서 등방성 재료인 STS304 평판과 이방성 재료인 AS4/PEEK 복합재 평판에 대해 하중부가장치에 의해 인장이 가해진 상태에서 스피커에 의해 음압 가진하여 인장진동에 미치는 영향을 분석했다.

실험결과와 비교를 위해 가속도계에 의한 실험에서 시험편에 가한 하중과 동일한 하중조건 하에서 실험했으며 각 하중별 진동 모드 패턴과 주파수를 유한요소 해석 결과를 비교하여 등방성 평판인 STS304 평판에 대해 Fig. 4.3과 Fig. 4.4에 나타냈다.

각 하중과 모드로 구분하고 실험결과 중 모드 검출이 시작되는 주파수에서 모드가 소멸되는 주파수까지의 5개를 추출하여 모드형상과 주파수를

나타내고 FEM 해석결과와 비교하였으며 전체적으로 시험편의 중심을 기준으로 상하, 좌우 대칭을 유지하고 있음을 알 수 있었으며, 하중의 증가에 따른 모드형상의 변화는 나타나지 않았다. 또한 가속도계에 의한 실험결과에서와 마찬가지로 하중의 증가에 따라 주파수가 높아짐을 확인할 수 있었다.

가속도계에 의한 실험결과에서는 각 모드별 주파수는 알 수 있었으나 진동모드를 검출할 수 없었던 반면 FEM 해석에서는 진동모드는 검출할 수 있었으나 각 모드별 피크값에 해당하는 주파수만을 확인할 수 있었다. 그러나 ESPI를 이용한 실험에서는 진동모드의 변화를 전체 주파수 범위 내에서 실시간으로 관찰할 수 있었다.

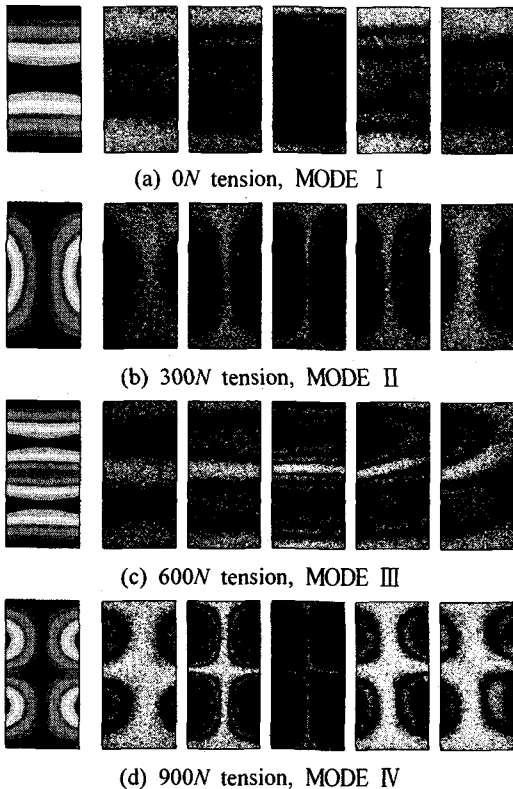


Fig. 4.3 Comparison of the FEM and experimental results on the STS304 plate

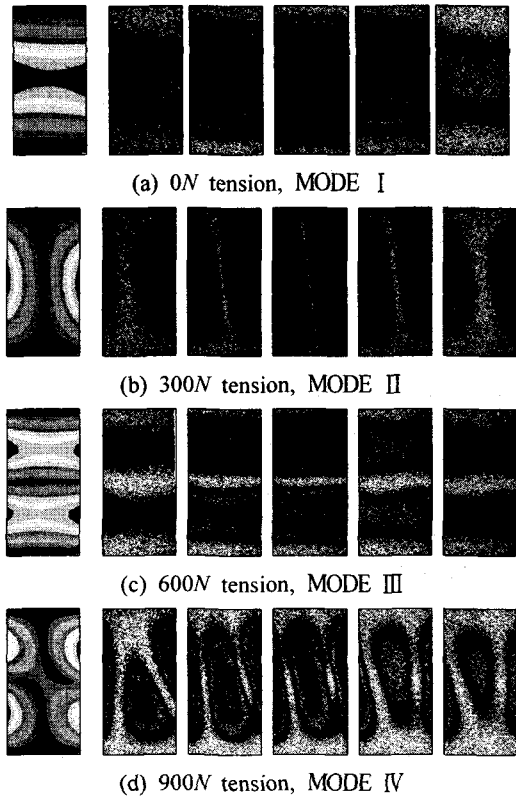


Fig. 4.4 Comparison of the FEM and experimental results on the AS4/PEEK composite laminate

이상과 같은 실험결과로부터 STS304 평판과 AS4/PEEK 평판이 인장하중 상태에 있을 때의 각각의 재료에 대한 모드별 하중의 증가에 따른 주파수 변화를 알아보기 위해 본 연구에서 이용한 ESPI법의 결과와 가속도계 및 유한요소법에 의한 결과를 Fig. 4.5와 Fig. 4.6에 나타냈다.

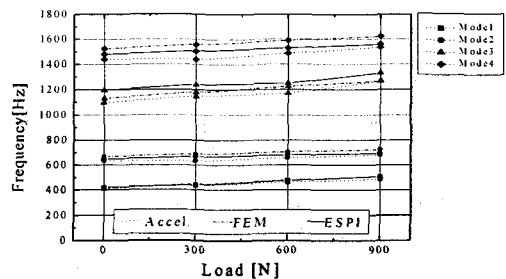


Fig. 4.5 Comparison of the numerical and experimental results of STS304 plate

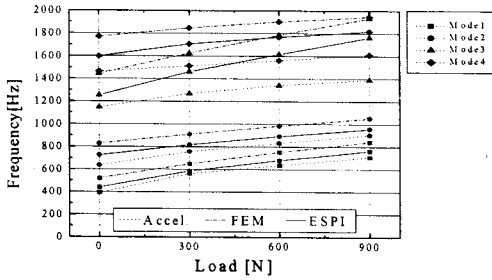


Fig. 4.6 Comparison of the numerical and experimental results of AS4/PEEK composite laminate

4.2 고찰

가속도계에 의한 실험결과에서는 주파수 대역이나 피크값은 알 수 있었으나 검출된 파형으로부터 모드 형태를 파악할 수는 없었으며, 유한요소 해석에 있어서는 각 모드별 주파수의 피크치와 피크인 주파수에 해당하는 진동모드 패턴을 알 수 있었으나 주파수의 대역이나 주파수의 증가에 따른 진동모드 변화에 대한 추이를 파악할 수 없었다.

가속도계를 이용한 진동특성 실험에 있어서 먼저 등방성 재료인 STS304 평판에서는 시험편 상의 어느 한점에 가속도계를 부착하여 전체적인 주파수를 파악할 수 있었지만 AS4/PEEK 복합 적층판에 있어서는 매질이 다른 2개 이상의 재료로 구성되어 있으므로 가속도계의 부착 위치의 변화에 따라 검출되지 않는 모드가 나타남을 알 수 있었다. 또한 가속도계를 시험 대상체에 부착함에 따른 질량효과와 가속도계의 부착 재료로 사용된 필납에 의한 감쇠의 영향 등을 고려해야 한다는 점과 진동하고 있는 물체나 연속파에 대한 진동해석이 불가능하다는 단점이 있다.

그러나 ESPI법을 이용함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있었으며 다른 실험방법에서 구현할 수 없는 주파수 변화에 따른 진동 모드의 변화를 실시간으로 검출할 수 있었다.

5. 결론

ESPI법을 이용해 인장하중이 작용할 때의 진동 거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. STS304 평판에 있어서 가속도계에 의한 결과와 비교할 때 평균 4% 이내, 유한요소 해석 결과와 비교할 때 평균 3% 이내로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었으며, AS4/PEEK 평판인 경우 가속도계에 의한 결과와 평균 10% 이내, 유한요소 해석 결과와는 11% 이내로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.
2. 등방성 재료인 STS304 평판의 진동 모드 패턴은 대칭성을 이루고 있으나 복합재 평판의 경우에는 재료의 섬유방향의 영향을 받아 일정한 경사를 가지고 기울어짐을 알 수 있었다.
3. 가속도계나 유한요소 해석에서는 불가능했던 주파수의 증가에 따른 진동모드 변화의 전반적인 과정을 실시간으로 확인 할 수 있었다.
4. STS304 평판에 대한 실험에서는 가속도계를 어느 한 지점에 부착하여 전체 모드의 주파수를 알 수 있었으며, AS4/PEEK 복합재 평판에서는 가속도계의 부착 위치에 따라 검출되지 않는 모드가 나타나므로 이방성재료에 대한 가속도계법의 한계성을 나타내고 있으나, ESPI법은 기존의 이러한 실험방법의 단점을 보완한 매우 유용한 계측법으로 판단된다.

후기

본 연구(논문)에 사용된 시험장비는 산업자원부지정(사) 부품산업테크노센터에서 제공한 것임.

참고문헌

1. Koungsuk Kim, "In-plane Strain Measurement by using the Electronic Speckle Pattern Interferometry" *KSME International Journal*, pp.215-222, 1998
2. 김경석, "전자처리 Speckle Pattern 간섭법에 의한 균열평판의 Strain 해석에 관한 연구", *대한기계학회지*, 제19권 6호, pp.1382-1390, 1995
3. Boxiang Lu, Xiangyang Yang, Harald Abendroth and Heiner Eggers., "Time-Average Subtraction Method in Electronic Speckle Pattern Interferometry." *Optics Communications* Vol.70, 177-180, 1989.
4. Warburton, G. B., "The Vibration of Rectangular Plates." *Proc. Instn. Mech. Engrs, London* Vol. 168, pp.371~384, 1954.