

직사각형 평판의 진동모드 해석에 관한 ESPI의 적용성 평가

Applicability estimation of ESPI on the vibration mode analysis of rectangular plate

김경석* 정현철** 김형택**(※) 양승필*** 박경주****

- * 조선대학교 기계설계공학과
- ** 조선대학교 대학원
- *** 동아전문대학 금형설계과
- **** 광주기능대학 금형기술학과

Abstract

The electronic speckle pattern interferometry (ESPI) has been applied to many technical problems such as deformation and displacement measurement, strain visualization and surface roughness monitoring. In this study, we used an ESPI system based on the dual beam speckle interferometric method in order to measure in-plane displacement and vibration mode using the ESPI technique. This research was carried out for the purpose of applying the vibration analysis method employing Electro-Optic holographic interference technique to the vibration analysis of uniform rectangular cantilever plate(SS400, STS304) with cantilever span to breadth ratio of 150 by 75. And thickness of 1mm and 0.8mm respectively. We improved the ESPI technique in order to obtain the distribution of displacement component resolved in one direction through a CCD camera combined with an image processing system. To certify and to assess the accuracy in measuring by this ESPI, the results obtained with the speckle method and vibration mode analysis are to be compared with those results by Warbuton's Theoretical expression and vibration mode in FEM analysis.

Key words : Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), In-plane displacement, SS400, STS304, Vibration mode analysis, Non-contact, Electro-Optic Holographic Interference, Image Processing System, FEM Analysis

1. 서론

최근 공업기술의 급속한 발달에 따라 기계구조 재료가 다양한 조건하에서 사용되어지고 있다. 대형 구조물, 예를 들어 항공기와 일반 수송기와 같은 것들은 충분한 강도와 함께 경량화가 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 일반적으로 이용되는 판재는 전체적인 구조물의 형상과 조건에 비해서 상대적으로 박판

이 되는 경향이 있으며, 따라서 판재에 대한 여러 가지 사용조건에 따라 다양한 하중이 작용하게 되면서 피로파괴와 이상 진동 등과 같은 현상이 발생하게 된다. 그 중에서도 진동 현상은 안전설계와 시공에 있어서 가장 큰 문제가 아닐 수 없으며, 직접적으로 항공기와 일반 차량과 같은 대중 운송 수단의 안정성에 큰 문제로 대두 되고 있다.³⁾

일반적으로 진동 측정을 위한 방법으로는 여러 가지가 있지만 오늘날 레이저의 출현에 의해 많은 새로운 측정법의 개발이 가능하게 되었다. 레이저광은 단색성, 가간섭성(Coherency)이며, 지향성, 집속성이 좋고, 에너지의 공간적 시간적인 집중, 짧은 Pulse광의 발생이 가능하다는 특징⁷⁾을 가지고 있다. 우리가 적용하고자 하는 전자처리 스펙클 패턴간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry:ESPI)⁴⁾은 측정물에 아무런 처리를 할 필요가 없고 완전한 비접촉 측정이 가능하며 또한 감도가 높은 잇점을 가지고 있다. 본 연구에서는 최근의 광학을 이용한 측정법의 한가지인 ESPI를 이용하여 일단이 고정된 직사각형 평판의 진동모드를 측정하여 이의 정성적인 정확성을 확인하기 위해 FEM(유한요소법)¹²⁾에 의한 해석과 비교하고자 한다. 또한 일단이 고정되어 있는 시험편의 길이와 폭의 비가 2:1인 직사각형 평판의 재질별(SS400, STS304), 두께별(0.8mm, 1mm) 진동모드를 관찰하여 이를 Warbuton이 제안한 이론식¹¹⁾을 근거로 한 이론치와 FEM 해석 결과와의 비교 분석으로 진동모드 측정실험에 대한 ESPI의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 홀로그래피 간섭법(HI)의 이론

홀로그래피는 다음과 같은 2단계로 원래의 회절파를 재생시킨다. 먼저, 물체에서 나오는 회절파(물체파 A_d)가 기준파(표준파 또는 참조파 A_r)와 간섭을 일으켜 간섭무늬를 만들어서, 홀로그래피 기록재(Holographic Recording Material)에 기록시킨다. 이 기록된 것을 홀로그램(Hologram)이라고 부른다. 다음에, 기록된 간섭무늬에 기준파를 다시 입사시켜 물체파 A_d 를 재현한다. 단, 이때 A_d 이외에 함께 직진하여 나가는 회절되지 않은 파동 A_0 와 수렴하는 파동 A_c 가 발생하나, 이들은 서로 분리 시킨다. 홀로그래피 간섭법(HI)⁴⁾의 기본 원리는 홀로그래피에 의해 형성된 이미지는 원래의 물체, 또는 또다른 물체의 홀로그래피 이미지와 간섭적으로 비교가 가능하다는 것이다. 물체가 응력, 진동, 또는 열에 의한 영향을 받는다면 간섭줄무늬 패턴은 수분 이내로 화상 안에서 관측된다. 즉, 줄무늬의 수로써 물체의 변위량을 결정할 수 있다.

2.2 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)

ESPI란 스펙클 패턴 간섭법(Speckle Pattern Interferometry)에 TV 카메라와 화상처리 장치를 조

합시켜 변형을 측정하는 방법을 말한다. 스펙클 패턴은 TV 카메라로 해석할 수 있을 정도로 카메라의 조리개를 움직여서 정확한 상이 형성되게 한다. 먼저, 어떠한 초기상태에 있는 물체의 스펙클 패턴을 카메라로 촬영하여 화상처리 장치의 메모리에 저장시킨다. 그 다음 물체가 변형을 일으킨 후에 새로운 패턴이 발생되기 때문에 이것을 새로운 메모리에 저장시킨다. 이 두 개의 화상 데이터를 감산함으로써 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다. 또 PC로 화상처리 장치를 제어하면, 화상을 얻을 때의 처리시간은 1/30초 정도로 거의 실시간적으로 간섭 줄무늬의 관찰이 가능하다. 만일, 화상 데이터의 줄무늬가 불량할때는 Contrast를 조정하여 처리할 수가 있다. 본 연구에 사용되는 레이저는 연속파 아르곤 이온 레이저(CW Ar+ Laser)인데 파장(λ)은 514.5mm이며, 최대출력은 8W이다.

Laser와 같이 Spatial coherence가 우수한 빛으로 광학적으로 거친 표면을 조사하여 그 물체의 사진을 찍으면 Fig.2.1과 같이 곡식의 알갱이가 흩뿌려진 것 같은 위치에 따라 무작위적으로 변화하는 밝기의 분포로서 물체의 모습이 나타난다. 이러한 현상을 스펙클 효과(Speckle Effect)라 한다.

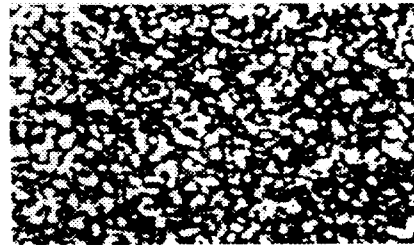


Fig. 2.1 Shape of speckle pattern

이것은 Random한 위상변화를 가지는 반사광이 관측면상의 각 점에서 겹치면서, 서로 간섭을 일으키기 때문에 발생 하는 것이다. 이때, Image Plane (또는 Screen)에 형성되는 Objective Speckle의 평균 크기 S_{obj} 는 Fig. 2.2에서 보듯이 조사영역의 직경을 D, 관측면과 Image Plane 사이의 거리를 L이라 할 때,

$$S_{obj} \approx 1.2 \lambda L/D \quad (2-1)$$

와 같이 쓸 수 있는데 여기서, λ 는 레이저광의 파장이다. 그리고 상면상의 알갱이 모양의 반점의 크기 즉, 스펙클의 크기는 결상계의 분해능에 의해 결정되고 스펙클의 최소 크기 $\sigma = 0.6 \theta / \sin \beta$ 또는 $\sigma = 1.2(1+M) \lambda f$ 이며, 여기서 M은 촬영배율, f는 렌즈의 F-Number이다.

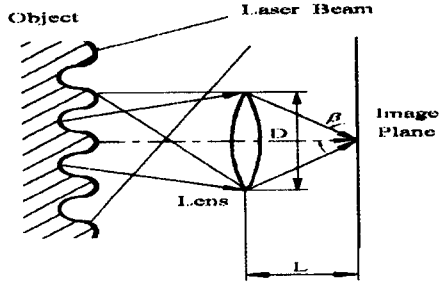


Fig. 2.2 Formation of subjective speckle pattern

2.3 일단 고정된 평판의 진동 모드

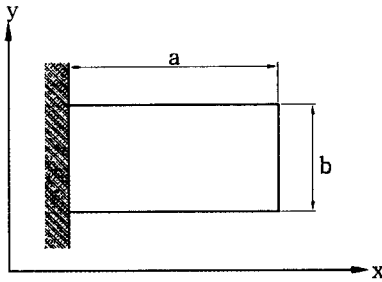


Fig. 2.3 Rectangular plate which is clamped along one edge and free along three edges

본 연구에서 사용되는 평판은 균일한 두께를 가진 균질적인 등방성의 탄성체 평판이라 가정하였으며, Fig.2.3과 같이 일단 고정된 평판의 진동 특성에 대해 고려하였다. G. B. Warburton은 판의 진동 해석에 있어서 Rayleigh method를 적용하여 진동하는 판과 Beam의 파형이 유사하다고 가정함으로 근사적인 주파수 방정식을 유도하였다. 이러한 근사 방정식은 평판의 크기와 평판 재질에 따른 고유상수값 그리고 Nodal line과 평판의 경계 조건의 견지에서 주파수를 나타내고 있다. Warburton에 의한 이론적인 고유진동수를 f_w 라 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_w = \frac{\lambda \pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho t}} \quad (2-2)$$

여기서 a 는 평판의 길이이고, t 는 두께, ρ 는 평판의 밀도, 그리고 D 는 평판의 굽힘강성으로서 다음과 같이 주어진다.

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2-3)$$

여기서 E 는 본 실험에서 사용된 평판의 Young's modulus이고 ν 는 포와송의 비이다. 또한 식 (3-1)에서 λ 는 Warburton에 의해 구하여진 Frequency factor로서 $a/b=2$ 인 평판에 있어서 x 축과 y 축 방향의 Nodal line 수를 각각 m 과 n 이라고 하면, 그에 따른 λ 를 다음과 같이 구하였다.

$$\lambda = [G_x^4 + G_y^4 (a/b)^4 + 2(a/b)^2 [\nu H_x H_y + (1-\nu) J_x J_y]]^{1/2} \quad (2-4)$$

여기서 $G_x, G_y, H_x, H_y, J_x, J_y$ 는 m, n 의 함수이다.

3. 실험

3.1 실험장치

3.1.1 시험편

본 실험에서는 STS304와 SS400 평판을 시험편으로 사용하여, 각 재질별로 두께를 각각 0.8mm와 1.0mm의 두가지로 구분하여 실험하였다. Table 3.1에 실험에 사용된 시험편의 치수를 나타냈고, 각 시험편의 기계적 특성을 Table 3.2에 나타냈다.

Table 1 Dimension of specimen

(단위 : mm)

재질(두께)	시험편의 치수 (L × W)	측정면의 치수 (L × W)	a : b
STS304 (t=0.8)	130 × 50	100 × 50	2 : 1
STS304 (t=1.0)			
SS400 (t=0.8)	130 × 50	100 × 50	2 : 1
SS400 (t=1.0)			

Table 3.2 Properties of STS304 and SS400

	E(가로탄성계수)	ν (포와송의 비)	ρ (밀도)
STS304	193GPa	0.3	8.0g/cm ³
SS400	206GPa	0.28	7.85g/cm ³

본 실험에서는 일단이 고정된 평판의 길이와 폭은 일정하게 하면서 각 재질별 진동 특성과 두께에 따른 영향을 고려하기 위해 평판의 치수를 각각 100mm × 50mm × 1mm(a×b×t)와 100mm × 50mm ×

0.8mm(a×b×t)로 하여 총 네개의 시험편을 사용하였다. 측정면에는 금속 광택을 제거하고 조사된 레이저 광의 산란 특성을 향상시키기 위해서 흰색 무광 도료를 도포 하였다. 또한 ESPI 의한 각시험편의 진동 특성을 확인하기 위해 시험편 뒷면에 격자를 그어 가진 위치에 대한 정확성을 기하고자 하였다. Fig. 3.1에서는 시험편의 형상과 가진점의 위치를 나타냈다.

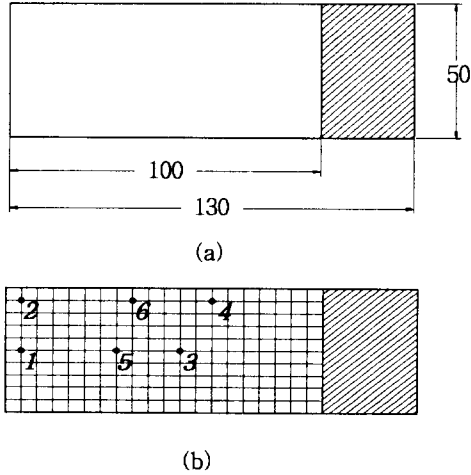


Fig. 3.1 (a) and (b) respectively shows dimensions and exciting points of rectangular plate for vibration experiment

3.1.2 광학계의 구성 및 배치

본 연구에 사용된 광학계의 평면 배치도를 Fig 3.2에 나타냈다. 레이저 광의 간섭에 의해 발생하는 줄무늬를 해석하는 것이므로, 기존의 HI와 마찬가지로 하나의 레이저 광을 Beam Splitter에 의해 두개의 광으로 분리시켰다. 그 중 하나의 광은 Spatial Filter에 의해 직접 물체 표면으로 조사되고 다시 그 표면으로부터 산란되어 CCD 카메라의 렌즈를 통하여 수광소자에 결상되도록 하였다. 이것을 물체광(Objective beam)이라고 하며, 다른 광은 물체광과 동일한 광로 길이를 가지면서 Spatial Filter를 거쳐 직접 CCD 카메라의 수광소자에 입사 되는데 이것을 참조광(Reference beam)이라 한다. 여기에서 참조광은 일반적으로 구면파로 되든지 평면파로 되든지 그다지 중요치 않다. 본 실험에서는 불필요한 광학적인 노이즈를 제거하고 빔을 확산시키기 위해 Spatial Filter를 사용하였으며, 물체과 역시 물체까지의 광로상에 Spatial Filter를 두어 광을 확산시켜 물체에 조사되도록 하였다. 또한 물체광과 참조광의 광량을 조절하기 위해 참조광로 중에 두개의 Polarizer를 배치하여 레

이저 고유의 편광 상태에 변함없이 물체광의 광량에 따라 참조광을 조절할 수 있도록 하였다.

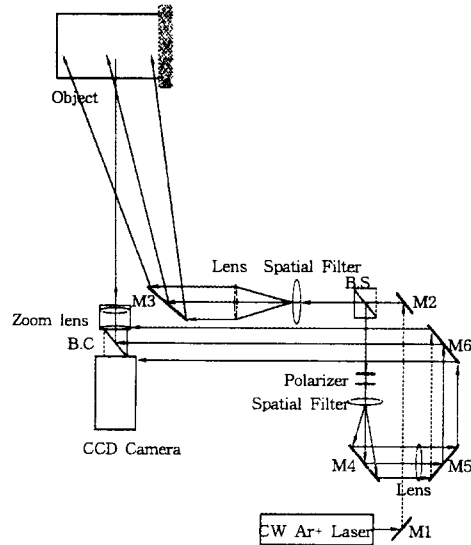


Fig. 3.2 Experimental optical system layout

3.1.2 화상처리 장치 및 System 구성

화상처리의 순서는 먼저 변형전의 상태에 있는 물체로부터 산란된 광은 CCD 카메라의 결상렌즈로 집광되며 이것은 참조파면과 간섭하여 카메라의 수광소자에 화상을 형성한다. 이렇게 형성된 초기 기준 화상은 화상처리장치의 메모리에 디지털 데이터로 저장되며, 또한 진동 상태에 있는 물체로부터 산란된 광은 화상처리 장치 내부에서 미리 저장되어진 초기 화상과 전자적으로 감산 처리된다. 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 화상처리 장치를 제어하고 화상을 수록하여 처리하는 시간은 약 1/30초 정도이며, 대부분 실시간 적으로 간섭줄무늬를 관찰할 수 있었다. 본 연구에 사용된 화상처리 장치는 Fig. 3.3에 나타냈다.

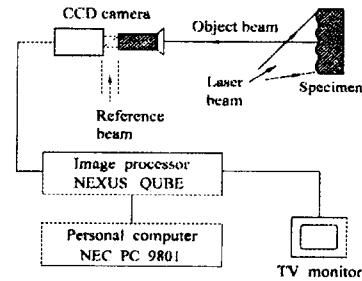


Fig. 3.3 Block diagram of image processing system for the measurement of out of plane information

3.2 실험방법

본 실험에서는 기존의 시간 평균 HI를 기본으로 하여 CCD 카메라와 TV 모니터, 화상처리장치 그리고 데이터 해석을 위한 컴퓨터를 조합한 ESPI를 적용하여 일단 고정된 평판의 진동 특성을 Warbuton의 이론식 및 FEM(유한요소법)과 비교하여 그 오차율을 확인 하였다. 일단 고정된 평판에서 재료에 따른 진동 특성을 살펴보기 위해 SS400과 STS304를 선정 하였으며 평판의 두께에 따른 영향을 조사하기 위해 각 재질별로 1mm 와 0.8mm두께의 시험편을 선정 하였다. 또한 가진위치에 대한 정확한 위치 표정을 위하여 Fig 3.1 과 같이 시험편 뒷면에 격자를 그어 표시 하였다. 본 실험에서 사용된 가진시스템의 개략도를 Fig. 3.4에 나타냈다. 또한 평판의 일단 고정을 위한 Jig를 제작 하였으며, 스피커는 일정한 가진점에 대하여서만 집중된 음압을 통하여 가진할 수 있도록 Frame을 제작 하였고 스피커의 음이 방출되는 부분에 직경 약 8mm의 Corn을 제작하여 부착 하였다. 또한 FEM 해석을 위하여 ANSYS 사의 ANSYS5.0를 사용하였으며, 각 시험편의 재질과 물성치를 입력하여 그 결과를 비교 하였다. 스피커(FOSTEX FF125K) 가진을 통하여 일정한 선형적인 진동 상태를 줄무늬 패턴으로서 조사하고자 하였으므로 일정한 주파수를 갖는 음파가 스피커에서 발생될 수 있도록 Function Generator(IWATSU Electric FG-350)를 사용하였다.

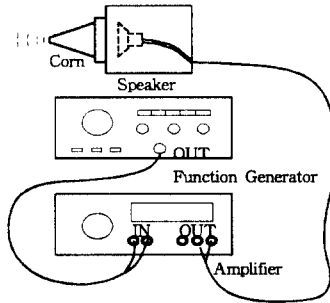


Fig. 3.4 Exciting System used in experiment

4. 실험 결과

본 실험에서도 3차원적인 줄무늬 패턴으로서 일단 고정된 평판의 진동에 대한 정보를 가지고 있는 Holography 이미지를 TV 모니터를 통하여 실시간적으로 관측할 수 있었으며, 모니터상에 나타난 이미지를 플로피 디스크에 기록하고 사진 촬영함으로써 시

간 평균적으로 변화하는 진동 패턴을 기록하고 관찰 할 수 있었다. 또한 Table 4.1과 Table 4.2와 같이 실험에 의한 고유진동수 f_E 와 절선(Nodal line)에 따른 Warburton의 고유진동수 f_T 의 값과 FEM해석을 통한 고유진동수 f_F 를 비교하였고, 이를 Fig. 4.1과 Fig. 4.2와 같이 그래프화 함으로서 ESPI의 적법성을 평가 하였다.

4.1 일단 고정된 STS304 평판

먼저 본 실험에서는 Cantilever의 경계 조건을 만족 하고 있는 STS304 평판의 진동 특성 실험을 행하였다. 두께에 따른 진동 특성을 살펴보기 위해서 두께 0.8 mm와 1mm인 평판을 시험편으로 사용하였으며, Table 4.1과 Fig. 4.1은 두께 0.8mm인 평판의 결과를 나타냈다.

Table 4.1 Value of theoretical and FEM and experimental eigen frequencies

MODE	Frequency (Hz)			Error (%)		
	Theory (f_T)	FEM (f_F)	EXP. (f_E)	$f_T:f_F$	$f_T:f_E$	$f_F:f_E$
1	66.57	65.11	64.5	2.19	3.11	0.94
2	341.05	280.53	273.1	17.75	19.92	2.65
3	416.90	405.97	400.7	2.62	3.89	1.30
4	976.67	914.33	823.1	6.38	15.72	9.98
5	1167.38	1140.10	1150.0	2.34	1.49	0.87
6	1461.10	1758.30	1700.0	20.34	16.35	3.32

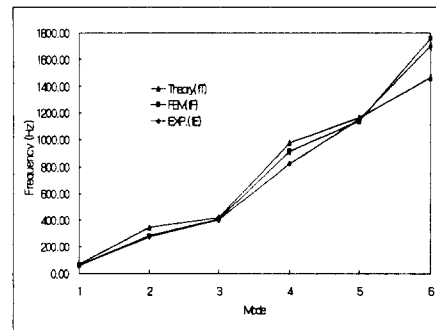


Fig. 4.1 Comparing theoretical, FEM analysis and experimental frequency

4.2 일단 고정된 SS400 평판

앞의 STS304 평판과 같은 방법으로 두께에 따른 진동 특성을 살펴보기 위해서 두께 0.8 mm와 1mm인 평판을 시험편으로 사용하였고, 또한 각 모드별 (Mode1~Mode6) 진동 패턴의 유별성을 검토 하였으며, Table 4.2과 Fig. 4.2는 두께 0.8mm인 평판의 결과를 나타냈다.

Table 4.2 Value of theoretical and FEM and experimental eigen frequencies

SS400 (t=0.8mm)

MODE	Frequency (Hz)			Error (%)		
	Theory (f_T)	FEM (f_F)	EXP. (f_E)	$f_T:f_F$	$f_T:f_E$	$f_F:f_E$
1	68.99	67.68	67.4	1.90	2.30	0.41
2	358.27	294.07	280.1	17.92	21.82	4.75
3	432.06	422.20	416.3	2.28	3.65	1.40
4	1023.95	956.25	855.7	6.61	16.43	10.52
5	1209.84	1185.10	1150.0	2.04	4.95	2.96
6	1522.05	1830.80	1780.0	20.29	16.95	2.77

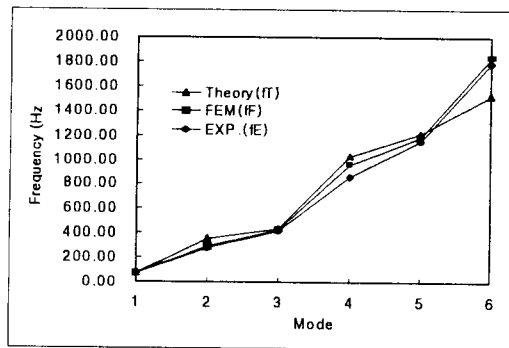
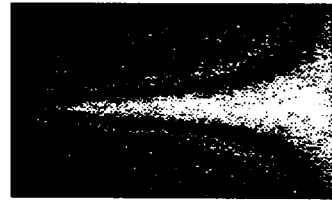


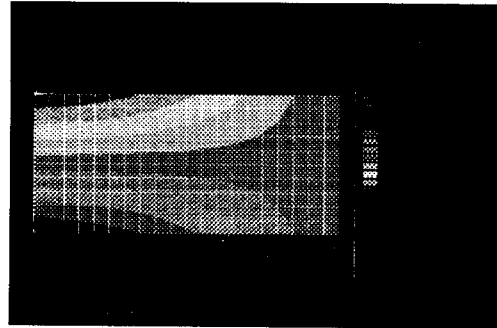
Fig. 4.2 Comparing theoretical, FEM analysis and experimental frequency

4.3 진동모드별 FEM 해석

Fig. 4.3 ~ Fig. 4.4에서 (a)는 실험에 의해 얻어진 각 진동 모드별 스펙클 패턴이며, (b)는 FEM 해석에 의한 진동 모드이다.

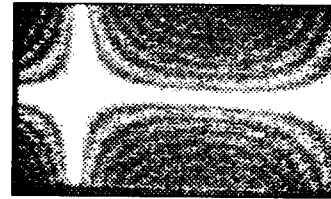


(a) Experiment

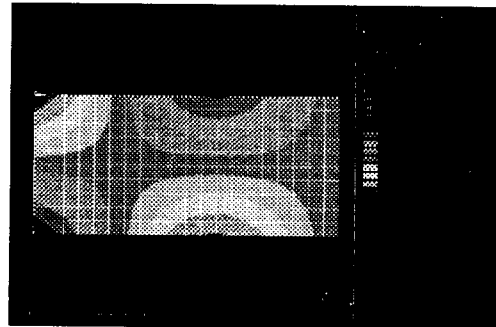


(b) FEM analysis

Fig. 4.3 Comparing fringe patterns of vibration mode 2 (SS400, t=0.8mm)



(a) Experiment



(b) FEM analysis

Fig. 4.4 Comparing fringe patterns of vibration mode 4 (STS304, t=0.8mm)

5. 고 찰

FEM 해석을 통하여 진동모드별 고유 진동수를 얻은 경우, 이론식에 의한 이론값과 2모드, 4모드, 6모드에서 값이 크게 차이가 남을 알 수 있었다. 이것은 이론식에 쓰인 식과 FEM 해석을 위해 Programming된 수식이 서로 일치하지 않기 때문인 것으로 생각되며, 실제 실험에서는 이론치 보다 FEM 해석에 의한 결과값에 더 일치하고 있음을 알 수 있었다. 본 실험은 일단 고정된 평판의 스피커 가진(加振)에 의한 순수 진동특성을 관측 하고자 하였으므로 정확한 실험을 수행하는데 영향을 미칠수 있는 잡음이나 사람과 차량 통행에 따른 외부진동의 영향을 최소화 하고자 야간에 수행하였다.

6. 결 론

본 연구는 시간평균법을 기본으로한 ESPI를 이용하여 일단 고정된 SS400과 STS304 평판을 두께별로 6모드 까지 진동 특성을 측정하였고, 각각의 모드에 따른 실험적인 공진주파수를 Warbuton의 이론식과 유한요소법(FEM)에 의한 공진 주파수와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) ESPI를 이용하여 각각 고유한 물성치를 가지고 있는 SS400과 STS304로 제작된 일단 고정된 평판의 진동에 따른 평판 전체의 진폭 분포와 절선(Nodal line)을 실시간적으로 TV 모니터를 통하여 관찰 할 수 있었으며, 각각의 절선(Nodal line)에 따른 공진주파수를 구하여 Warbuton에 의해 제안된 이론식을 통한 고유진동수와 FEM해석에 의해 계산된 고유진동수와 비교함으로써 본 실험의 적법성을 확인할 수 있었다.

2) 실험 결과에서 알 수 있듯이 재료에 따른 일단 고정된 평판의 진동 특성은 SS400과 STS304를 비교해 볼 때 동일 진동 모드라 할지라도 그에 따른 고유진동수는 비교적 강성 재료인 STS304에서 낮게 나타났으며, 실제 실험에서도 SS400보다는 STS304에서 진동모드의 관측이 용이하였다. 따라서 비교적 연성 재료인 SS400이 STS304 보다는 진동에 있어서 보다 뚜렷한 감쇄특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

3) 실험으로 부터 얻어진 주파수를 이론 고유 진동수와 FEM 해석결과와 비교하여 보면 그 오차율이 이론 고유 진동수와 비교한 FEM 해석결과에 의한 비교값에서 훨씬 낮은 오차율을 보이고 있으며, 이는

본 실험결과가 FEM 해석결과에 따르고 있음을 알 수 있었다.

5) 본 방법은 CCD 카메라와 컴퓨터 제어를 조합하여 실시간적으로 간섭줄무늬를 TV 모니터를 통하여 관측할 수 있는 방법으로 최근 주목을 받고 있는 참조광 위상이동법(Phase shifting method)을 적용시키면 물체의 변형에 따른 위상의 정보를 보다 정확하게 얻어 신뢰성 있는 면내·면외, 변형 측정, 진동측정, 비파괴검사 방법으로서 일익을 담당하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. Warbuton,G.B "The Vibration of Rectangular plates", proc. Instn. Mech. Engrs, London, Vol.168,(1954), pp. 371~384.
2. 深堀勝市, 山本廣司, 材田正義, " 호로그래피干涉による振動解釋法の實用化 ", 三菱重工枝報 Vol. 9, No. 3, 1972, pp.18~23.
3. 山本廣司, 材田正義, " 호로그래피振動解釋法の製品開發への應用 ", 三菱重工枝報 Vol. 12, No. 6, pp.680~689.
4. P. K. Rastogi, " Holographic Interferometry Principles and Methods ", Springer-Verlag, 1994, pp.2~316.
5. Gary L. Cloud, " Optical Methods of Engineering Analysis ", Cambridge University press, 1995, pp.21~36, 343~407, 440~475.
6. J. C. Dainty, " Laser Speckle and Related Phenomena ", Springer-Verlag, Heidelberg, 1984, pp.203~252.
7. 李相洙, " 레이저 스펙클과 홀로그래피 ", 敎學硏究社, 1993, pp.36~245.
9. John B. Develis, George O. Reynolds, " Theory and Applications of Holography ", Addison-Wesley Publishing Company, 1967, pp. 7~40.
10. Ichirou Yamaguchi, " Fringe formations in Deformation and Vibration Measurements using Laser light ", Elsevier Science Pubilshers B.V., 1985, pp.273~ 340.
11. John F. ready, Robert K. Erf, " Application of Laser Speckle to Measurement " in the main topic 'Laser Applications', Academic Press, Inc., London, 1980, pp.2~62.
12. "Dynamics, user's Guide for Revision 5.0" , ANSYS. Swanson Analysis System. Inc, 1993.