

## 보강된 실린더의 진동특성에 관한 연구

김 광 래\* · 장 용 훈\*

(2000년 5월 15일 접수, 2000년 9월 15일 심사완료)

### A Study on the Vibration Characteristics of Stiffened Cylinder

Kwang Lae Kim and Yong Hoon Chang

**Key Words:** Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭법), FEM(유한요소법), Hologram(홀로그램), Fringe Pattern(간섭무늬), Stiffened Cylinder(보강된 실린더)

#### Abstract

The structural characteristics of the stiffened double cylinder was investigated through experiment and analysis. The outside cylinder was excited with piezoelectric actuator and the mode shape of the cylinder with stiffening T frame was obtained by using holographic interferometry. Finite element method was applied for further modal investigation of the stiffened cylinder. The experimental results showed that the mode shape of cylinder was dependent on the exciting frequencies and the T frame showed salient effect of damping at most of the resonent frequencies. In particular frequencies, the T frame worked as a transmitter. FEM showed similar results with the experiments. This paper showed that the laser-based method such as holographic interferometry is well suited for investigation of the whole-field mode shapes and FEM has good performance to estimate the modal characteristics of the mechanical structure.

#### 1. 서 론

기계구조물은 질량과 강성 그리고 댐핑에 의한 고유한 진동특성을 가진다. 이 진동은 환경문제로서는 소음을 발생시키고 안전문제로서는 피로하중을 가함으로서 구조물의 파괴를 일으킨다. 구조물 진동문제의 해결을 위하여 설계시작부터 유한요소법을 이용한 모달해석을 통해 진동원과 진동형태를 연구하며, 기계의 제작후 실험적인 모달해석으로 실제의 구조물 동특성을 측정하게 된다. 이론과 실험의 통합연구는 새로운 기계구조물의 설계시 기초 자료로서 사용되어 제작에 따른 위험요소를 사전에 줄여 준다.

일반적으로 실험에 의한 진동모드의 측정은 충격용 햄머와 가속도 센서 그리고 증폭기를 이용하여 상대적인 진폭의 비율을 계산함으로써 가능하다. 이 경우 측정위치마다 가속도 센서를 부착하는 점 단위의 측정법을 사용함으로써 평면이나 입체구조물의 진동 모드의 측정은 많은 수고와 시간을 필요로 한다. 또한 가속도 센서의 질량과 크기등의 구조적인 문제로 인하여 일부의 경우 진동모드 측정에 제한을 받게 된다.<sup>(1)</sup>

가속도 센서에 의한 진동모드 측정의 단점을 극복할 수 있는 방법이 홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry)으로서 1940년대에 Gabor<sup>(2)</sup>가 원리를 제안하였으며, 1960년초 He-Ne 레이저의 개발과 함께 Leith,<sup>(3)</sup> Osterberg<sup>(4)</sup> 등의 연구에 의하여 홀로그래피의 기초가 마련된 이후 Powell<sup>(5)</sup> 등이 시간평균 개념으로 확장하는 전기를 마련하였다. 1980년대와 90년대에 국내외의 많은 연구자들<sup>(6-10)</sup>에 의해 학문적인 관심과 산업현장의 적용을 연구 대상으로 하여 발전되어왔

\* 책임저자, 인덕대학 기계계열

\* 회원, 인덕대학 기계계열

E-mail : yhchang3@mail.induk.ac.kr

TEL : (02)901-7637 FAX : (02)901-7630

다. 홀로그래픽 간섭법은 진동하는 물체의 전체 모드를 한번에 3차원적으로 측정이 가능한 비접촉, 비파괴방식이다. 진동모드를 가시적으로 명확하게 볼 수 있고, 특히 광원의 파장을 이용한 진폭을 측정함으로써 얇은 두께의 실린더 등에서 나오는 고주파의 미세 진동에 매우 유용한 수단이다.<sup>(11,12)</sup>

유한요소법은 복잡한 공학문제를 해석하는 강력한 수단이다. 이상화된 질량과 강성을 갖는 탄성요소로 구성된 구조물을 만들어 실제 구조물을 제작하기 전에 해석적으로 실험을 할 수 있다. 이 방법은 실제 구조물이 아닌 선형화된 모델로서 실제 비선형이 많은 기계적 구속특성을 어떻게 근사적으로 보상하는지가 중요하다.

본 연구는 잠수함이나 보우트 등의 실린더형 구조물이 강성증대를 위한 보강대를 가지는 경우의 구조물 진동특성을 파악한다. 이의 관측을 위해 시간평균 홀로그래픽 간섭법을 이용한 실험을 수행하고, 유한요소법을 사용하여 이론적인 검증을 하고자 한다.

## 2. 홀로그래픽 간섭법

홀로그래픽 간섭법은 이중노출법, 실시간법, 시간평균법 등으로 분류되며, 본 연구에서는 시간평균 홀로그래픽 간섭법(time average holographic interferometry)를 사용한다. 이 방법은 물체의 진동주기를 고려한 노출을 하여 시간에 따른 변위의 평균이 밝기의 정도로서 기록된다. Fig. 1과 같이 레이저에서 발진된 레이저광을 광분할기 (beam splitter)를 거쳐 물체광(object beam)과 기준광(reference beam)으로 분리된 다음, 홀로그램 건판에서 실린더에 조사와 반사의 과정을 거친 물체광과 반사경(mirror)을 거친 기준광과의 간섭현상으로 홀로그램을 형성한다.

홀로그래픽 간섭법은 주기함수의 외란을 실험 대상물에 가함으로서 생기는 물체표면의 변형결과를 레이저를 이용하여 간섭무늬(fringe pattern)를 측정한다. 이 무늬의 차수에 따른 변위가 등고선의 형태로 관측되는 3차원적 측정방법이다.

홀로그램에서 나타나는 간섭무늬는 Powell과 Stetson<sup>(2)</sup>의 이론을 따라 진폭으로 해석된다. 시간평균 간섭법의 경우 진동모드로부터의 진폭에 대한 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

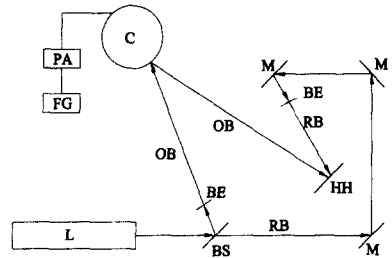


Fig. 1 Holographic interferometry system configuration: L, laser; BS, beam splitter; M, mirror; BE, beam expander; OB, object beam; RB, reference beam; HH, hologram holder; C, cylinder; PA, piezoelectric actuator; FG, function generator

$$A_i = \frac{\lambda x_i}{2\pi [\cos \theta_1 + \cos \theta_2]} \quad (1)$$

여기서,  $A_i$ : 간섭무늬의  $i$ 번째 진폭,  $\lambda$ : 레이저의 파장,  $x_i$ : 제1종 0차 베셀함수  $i$ 번째 제곱근의 값,  $\theta_1 / \theta_2$ : 진동방향과 입사/반사 물체파가 이루는 각을 나타낸다.

## 3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용되는 이중 실린더는 General Dynamics Electric Boat Division에서 제작하여 제공하였다. 보우터와 같은 구조물은 가벼우면서도 강성을 올리기 위하여 중간에 T 프레임이나 칸막이(bulkhead) 등의 보강부를 가지고 있다. Fig. 2와 같이 실린더는 직경 0.64m, 높이 1.28m이며 내부 셀은 이음이 없이 제작되었고, 중간부분에 벌집 모양의 칸막이를 내부실린더에 열수축 박음으로 고정하였다. 외부실린더는 T 프레임을 기준으로 상부와 하부의 두 개의 실린더를 가지며, 상부 실린더의 상부와 하부 실린더의 하부는 볼트로 체결되어 있고 T 프레임에 접한 부분은 책기 형태로 조립되었다. 실린더의 재질은 스테인레스 강이며 전체의 무게는 230 kg이다. 실험시 지지부의 경계조건 효과를 없애기 위해 세 개의 받침 블록을 사용하여 수직하게 세웠으며, 실린더의 외부전체를 형광테이프에 부착하여 물체광의 강도를 증가시켰다.

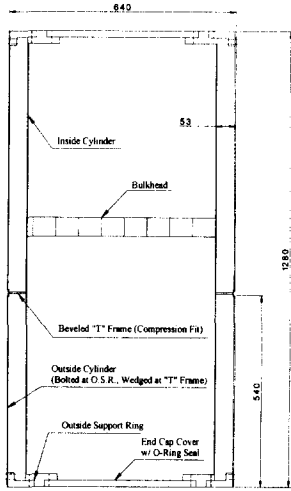


Fig. 2 Schematic diagram of the double cylinder

시스템의 기본적인 주파수 분석을 위하여 임팩트 가진기, 가속도센서(B&K: 4384)와 스펙트럼 분석기(Rockland: 5820B)를 사용하였다. 실험으로 구해진 주파수 특성은 실린더의 가진 주파수를 찾는 기초자료로서 이용된다. 가진주파수는 함수 발생기(Global specialties)에 의해 형성이 되며, 상대적인 가진 효과를 높이기 위하여 압전가진기(piezo-electric actuator)를 상부실린더와 하부실린더의 중간위치에 설치하여 각각 실험을 하였다. 가진주파수에 의한 실린더의 진동을 검출하도록 가속도계와 오실로스코프(Tecktronix: 2213A)를 연결한 시간영역, 가속도계와 스펙트럼 분석기를 이용한 주파수영역에서 동특성을 확인하였다. 실험에서 관찰되는 실린더의 상대적 진폭은 공진주파수에서 최대가 된다.

실험에서 사용된 광학시스템은 앞에서 설명된 Fig. 1과 같다. 홀로그램 제작을 위해 사용된 광원은 40mW He-Ne 레이저이며, 홀로그래픽 필름은 Agfa 10E75 Holotest이다. Jodon ES-100셔터를 사용하여 노출시간이 실린더의 진동주기 보다 길게 되도록 설정하였다. 이중 실린더와 광학 측정 시스템은 대형 석정반 위에 설치하였으며, 광학 시스템은 금속블록의 상부에 두어 실린더의 중간높이(0.6m)와 맞도록 하였다. 홀로그래픽 간섭법은 주위의 진동 및 소음에 매우 민감한 관계로 외란의 영향이 상대적으로 낮은 심야에 실험을 하였다.

## 4. 실험 및 해석결과

본 실험에서는 상하부 실린더의 조화가진력에 의한 진동모드를 측정하였다. 홀로그램을 이용한 줄무늬 모양의 진동모드는 가시적이면서도 입체적인 모양을 나타내며, 특히 시각적으로 인식하기 어려운 미세 진동도 측정되었다. 그리고 상용 유한요소해석용 프로그램인 ANSYS 5.3을 이용하여 수치적인 결과와 시간 평균 홀로그래픽 간섭법을 이용한 실험 결과를 비교분석하였다.

### 4.1 실험결과

본 실험은 상부와 하부 실린더가 자기 다른 도달특성을 가지고 있어 상부와 하부를 각각 조화가진을 하였다. Fig. 3는 상부 실린더, Fig. 4는 하부 실린더를 가진하여 얻은 홀로그램들로 이중 실린더를 구성하는 외부실린더의 진동특성을 간섭무늬 모드형태로 볼 수 있다. 이들은 상하부 실린더에서 대표적으로 선택된 자기 다른 공진주파수에 대한 실험결과이다.

홀로그램에서 정상적인 진동모드를 갖는 실린더 표면은 바둑판 모양으로 구분된 진동특성을 갖는다. 바둑판 모양을 구분하는 밝은 부분들은 절선(nodal line)이며 각각 클램프 경계조건(clamped boundary)으로 고려되어 질 수 있다. 그림에서 한 진동모드의 반에 해당되는 반쪽 무늬의 수, 즉 원주방향과 세로방향의 절선의 수를 각각  $m$ 과  $n$ 이라고 할 때  $m \times n$  모드로 표현하여 Fig. 3(a)와 (c)는 상부 지배형(Dominant Upper Frame: 이하 DUF)의 DUF 6\*1 모드와 DUF 10\*2 모드, Fig. 4(a)와 (c)는 하부 지배형(Dominant Lower Frame: 이하 DLF)의 DLF 7\*1 모드와 DLF 9\*1 모드를 나타낸다. 이들 모드에서는 진폭이 T 프레임을 지나면서 감소하므로, T 프레임은 상부 실린더와 하부 실린더 사이에서 진동에너지의 전달을 억제하는 감쇄기(Damper)의 역할을 한다. 즉 상부 가진시 하부 실린더에서 간섭무늬가 보이지 않는 것은 감쇄기의 효과로 하부의 진폭이 너무 작아 홀로그램의 감도 한계를 벗어난 것으로 고려된다. 식 (1)을 이용하여 He-Ne 레이저의 파장이 632.8nm임을 고려할 때 절선에서 첫 번째 간섭무늬 위치까지의 진폭은 약  $0.12 \mu\text{m}$ 로서 상대적인 미세 진동의 정도를 볼 수 있다.

상기의 주파수들은 T 프레임의 경계효과에 의한 비교적 규칙적이고 정상적인 간섭무늬의 진동 특성을 보이고 있다. 그러나 본 실험에서 55개의 홀로그램을 조사한 결과 많은 진동모드에서 더욱 복잡적이며 불규칙적인 현상을 보였다. Fig. 3(b)는 446Hz로 상부 실린더를 가진 경우로서 하부 실린더의 간섭무늬 차수는 감소하지만, 진동은 비교적 자유롭게 T 프레임을 통과하여 전달되었다. 이 현상은 Fig. 4(b)의 경우와 같이 458Hz로 하부 실린더 가진 시에도 측정되었다. 이는 T 프레임의 경계효과는 같으나 상하부 실린더의 고유 진동수가 근접하게 있어 상대적으로 민감한 진동 에너지의 전달효과를 보이고 있다. 일정한 가진 주파수에 대해 상하부 실린더의 원주 파동수가 서로 다르게 나타남은 상하부 실린더의 높이차이에서 기인한 것으로 판단된다. Fig. 3(d)와 Fig. 4

(d)는 각각 상부 996 Hz와 하부 1046 Hz로 가진 것으로 절선과 주기적인 파동형상이 전체적으로 파괴되는 현상을 보이며, 이는 고주파일수록 많이 나타난다. 이와 같은 비틀림 모드나 복합 모드의 형상은 외부적으로는 가진되는 비틀림 모드 또는 내부적으로 고유주파수 성분끼리의 간섭이나 경계조건의 복잡성에 기인한 것으로 판단된다. 상하부 끝단의 볼트체결이나 실린더가 T 프레임에 열수축 끼워맞춤 한 결과로 구조물의 강성형태에 대한 변형이 저주파에서 보다 고주파에서 진동모드에 영향을 크게 미침을 보인다. 즉 고주파영역에서는 제작공정에서 발생하는 불균일과 비대칭 등의 비선형성과 얇은 두께의 실린더가 갖는 높은 모달 밀도 등에 의해 간섭무늬가 파괴된다고 고려된다.

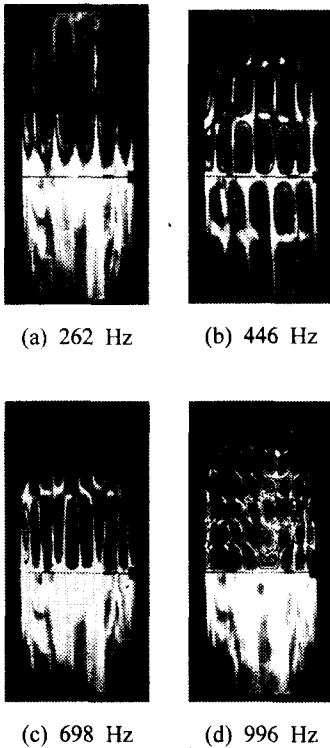


Fig. 3 Fringe patterns of the stiffened double cylinder with excitation at upper cylinder

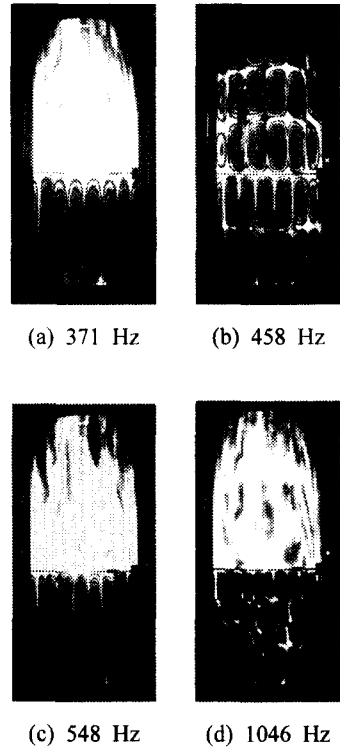


Fig. 4 Fringe patterns of the stiffened double cylinder with excitation at lower cylinder

4.2 진동모드별 FEM 해석

본 절에서는 실험에서 얻어진 진동모드를 수치 해석적으로 검증을 하려고 한다. 실험결과중에서 비교적 규칙적이고 정상적인 간섭무늬를 보이는 진동모드에 대하여 해석을 수행하였다.

사용된 실린더는 2.54mm의 스테인리스 강이며 ANSYS 5.3에서 Shell 요소를 사용하였다. 실린더 상하부의 끝단과 중간의 T 프레임부분을 클램프 경계조건으로 사용하기에는 미세한 비선형성이 많은 관계로 실험 결과를 이용하여 해석의 경계조건이 조정되었다. 그 결과 상하부 실린더의 얇은 판의 끝단이 클램프되는 것이 아닌 판을 고정하는 T 프레임의 지지부와 외각 지지링(outside support ring)의 하단부를 클램핑하는 경계조건을 선택하였다. 이는 홀로그램에 의한 시각적인 간섭무늬의 절선부분에 해당하는 상하부 끝단의 볼트체결과 중앙부의 열수축 끼워맞춤한 부분을 클램핑한 해석의 경우 실험에 비해 고유진동수가 상승함에 기인된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 상부 프레임이 가진된 결과로서 각각 DUF 6\*1, DUF 10\*2 모드를 나타낸다. 각 그림의 (b)는 상부 프레임의 횡방향 단면을

나타내며, (c)는 종방향 단면을 나타낸다. 진동모드는 실험과 일치하며 고유진동수는 Fig. 3의 실험에서 262 Hz와 698 Hz로 측정되었고, FEM에서는 각각 265 Hz와 677 Hz를 해석되었다. 실험과 해석의 오차가 약 3% 인 것은 실험적인 경계조건 선택에 기인한다. Fig. 5와 Fig. 6의 그림에서 상부 실린더의 진동 모드가 고주파일수록 T 프레임의 감쇄효과는 커져서 하부 실린더의 상부에 대한 상대적인 진동이 감소함을 볼 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 하부 실린더를 가진한 경우로서 각각 DLF 7\*1 모드와 DLF 9\*1 모드를 보인다. 상부지배형의 진동모드에서와 같이 하부지배형 진동모드도 Fig. 4의 실험과 일치함을 보이며, 고유주파수는 실험에서 371 Hz와 548 Hz를 보인 반면 해석에서는 각각 374 Hz와 527 Hz를 보여 근소한 오차를 나타내었다. 본 연구에 적용된 경계조건은 홀로그램의 간섭무늬가 의미하는 진동 모드에는 영향이 적으나, 고유진동수의 경우에 민감함을 보이는 관계로 실험적 경계조건 측정방법이 유효함을 보였다.

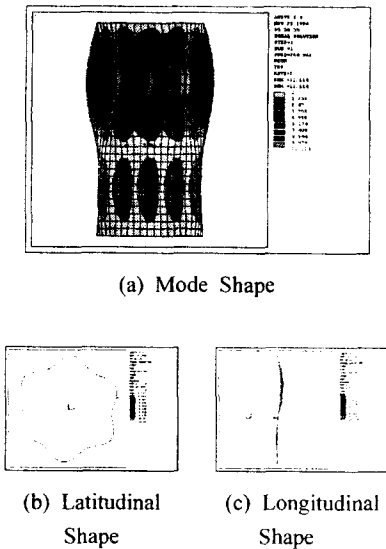


Fig. 5 DUF 6\*1 mode shape at 265 Hz

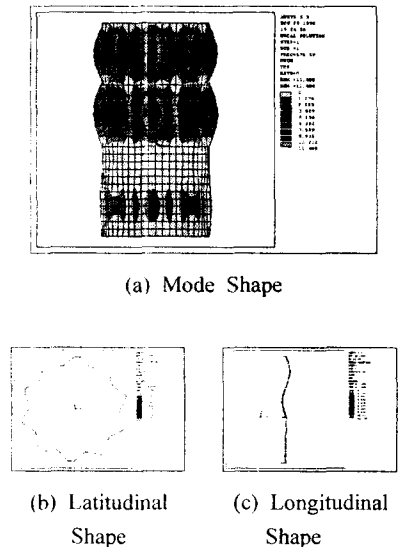
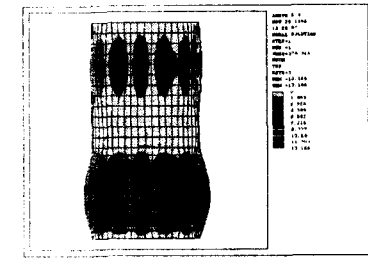
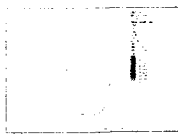


Fig. 6 DUF 10\*2 mode shape at 677 Hz



(a) Mode Shape

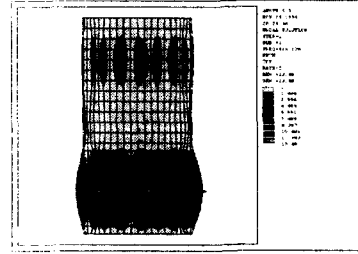


(b) Latitudinal Shape

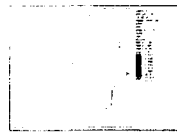


(c) Longitudinal Shape

Fig. 7 DLF 7\*1 mode shape at 374 Hz



(a) Mode Shape



(b) Latitudinal Shape



(c) Longitudinal Shape

Fig. 8 DLF 9\*1 mode shape at 527 Hz

### 5. 결 론

보강된 실린더형 구조물의 진동특성을 연구하기 위하여 홀로그래픽 간섭법을 이용한 실험과 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였으며, 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 외부 실린더에 연결된 T 프레임은 상부와 하부실린더의 경계조건으로 작용하며, 상하부 실린더의 고유주파수가 다른 경우 큰 감쇄기능을 하였고, 상하부 실린더의 고유주파수가 근접한 경우 감쇄기능은 미약하여 상하부가 같은 주파수를 갖으나 다른 진동 모드를 보였다.

(2) 실험에서 규칙적이며 정상적인 질 좋은 간섭 무늬를 만드는 고유진동수는 실험적 경계조건을 사용한 결과 FEM의 해석결과와 약 4%이내의 오차로서 근사함을 보였다.

(3) 비접촉식의 홀로그래픽 간섭법은 실린더와 같은 입체적 구조물에 대한 진동모드 측정에 유용한 수단임을 보였으며, 특히 고주파의 진동모드에서도 측정감도가 뛰어나 질 좋은 간섭무늬를 보였다.

### 후 기

본 연구는 인덕대학에서 연구비 일부를 지원받아 수행하였으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Kyosti, A., Ek, L., and Molin, N., 1985, "Four Ways to Determine Modes of Vibration in a Plate," *International Modal Analysis Conference*, pp. 627~633.
- (2) Gabor, D., 1948, "A New Microscopic Principle," *Nature*, Vol. 161, pp. 777~778.
- (3) Leith, E. and Upatnieks, J., 1963, "Wavefront Reconstruction with Continuous-tone Objects," *J. of Opt. Soc. Am.*, Vol. 53, pp. 1377~1381.
- (4) Osterberg, H., 1932, "An Interferometer Method of Studying the Vibrations of an Oscillating Quartz Plate," *J. of Opt. Soc. Am.*, Vol. 22, No. 19, pp. 19~35.
- (5) Powell, R. L., and Stetson, K. A., 1965, "Interferometric Vibration Analysis by Wave-Front

- Reconstruction," *J. of Opt. Soc. Am.*, Vol. 55, No. 12, pp. 1593~1598.
- (6) Raj, D. M., Narayanan and Khadakkar A. G., 1995, "Effect of Ring Stiffeners on Vibration of Cylindrical and Conical Shell Models," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 179, No. 3, pp. 413~426.
- (7) Lee, K. B., Park, S. J., Kwon, Y. K., Lee, B. H. and Yun, H. S., 1992, "Three-dimensional Displacement and Strain of a Vibrating Plate Determined by Holographic Interferometry and the Finite Element Method," *J. of Sound and vibration*, Vol. 153, No. 1, pp. 63~75.
- (8) Fallstrom, K. E., Gustavsson, H., Molin, N. E., and Wahlin, A., 1989, "Transient Bending Waves in Plates Studied by Hologram Interferometry," *Experimental Mechanics*, Vol. 29, No. 4, pp. 378~387.
- (9) 최장섭, 강영준, 1996, "전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동 물체의 모드형태 계측법," 대한기계학회논문집, 제20권, 제2호, pp. 564~574.
- (10) Hazell, C. R. and Mitchell, A. K., 1986, "Experimental Eigenvalues and Mode Shapes for Flat Clamped Plates," *Experimental Mechanics Bethel, Society for Experimental Mechanics, Inc.*, Vol. 26, No. 4, pp. 337~344.
- (11) Aprahamian, R., and Evensen, D. A., 1970, "Applications of Holography to Dynamics: High-Frequency Vibrations of Plates," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1083~1090.
- (12) Zhu, N. H., 1998, "Study of the Vibration of Bulkhead-Stiffened Cylindrical Shells by Laser-Based Methods," Ph.D Dissertation, Dept. of Mech. Eng., SUNY at Stony Brook.