

홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동 모드의 계측에 관한 연구

김 광 래*

A Study on the Measurement of Vibration Mode Shape using Holographic interferometry

Kwang-Lae Kim*

Abstract

In this study, the vibration behavior of the stiffened double cylinder was experimentally analyzed. Due to the complex structure of the double cylinder, the outside cylinder frequency responses to the exciting forces applied on various positions were analyzed by using spectrum analyzer in conjunction with an accelerometer and the natural frequencies were obtained. The technique of time-averaged holographic interferometry is applied to study the vibration characteristics of outside cylinder with stiffening T frame. The experimental data showed that the T frame had salient effect of damping on the testing structure at most of resonances. However, the experimental results also revealed interesting phenomenon. At some particular frequencies the T frame seemed to behave as a transmitter. In addition it has been successfully demonstrated that optical methods such as holographic interferometry is well suited for the identification of mode shapes. They can give us a whole-field, non-contact measurement instead of the point-wise measurement by accelerometer in classical modal testing.

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래픽 간섭법), Time-average Method(시간평균법), Hologram(홀로그램), Fringe Pattern(간섭무늬), Vibration Mode Shape(진동모드), Stiffened Double Cylinder(보강된 이중 실린더)

1. 서 론

대부분의 기계구조물은 고유한 진동특성을 가지며, 그 진동은 소음발생의 원인이 되고 진동이 심할 경우에는 구조물이 파괴된다. 실제의 구조물과 설계되어 개발되어질

구조물의 소음과 진동문제를 해결하기 위해서 동적 구조물의 연구는 필수적이다. 복잡한 구조물에서, 이것의 정적 강도와 강성은 응력 해석 및 강도이론에 의해서 해석되어 질 수 있다. 그러나 구조물이 진동할 때, 복잡한 구조물의 동적 거동은 해석하기가 매우 어렵다. 모든 소음과 진동문

* 인덕대학 기계과

제는 공진 현상과 관련되어진다. 공진은 작용력이 하나 혹은 그 이상의 진동모드로 가진할 때 일어난다. 외란에 의한 가진 주파수 범위 내에 있는 진동 모드는 항시 위상 차로 나타난다.

일반적인 모달해석법은 이상화된 질량과 강성을 갖는 탄성요소로 구성된 구조물을 해석하는 유한요소법 (finite element method)이다. 이 방법의 장점은 실제 구조물을 제작하기 이전에 해석적으로 실행할 수 있다는 것이다. 복잡한 구조물에 대한 유한요소 해석법은 비록 근사적인 결과를 사용할지라도 모델링의 복잡성과 기계적 구속특성의 상호작용 등 아직도 해결해야 할 많은 문제들이 있다.

기존의 실험적 모달해석법은 대체적으로 가속도계 (accelerometer)와 변환기(transducer)를 연결한 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 기본으로 이용한다. 가속도계는 그것이 부착된 위치의 진동을 검출하며, 모드 형태는 가속도계의 배열에 의하여 인식할 수 있다. 그러나 복잡한 진동모드를 갖는 측정 대상물의 표면에 가속도계를 배열하는 점 단위 측정법은 표면전체를 측정하기 위해서 많은 시간과 수고를 필요로 하며, 구조물에 부착된 가속도계의 질량 때문에 오류의 가능성도 크게 나타난다.

홀로그래피(holography)의 원리는 Gabor¹¹⁾가 제안하였으며, 1961년 He-Ne 레이저가 개발된 후 Leith¹²⁾에 의하여 오늘날의 홀로그래피가 재발견되었다. 한편, Powell 등¹³⁾은 Osterberg¹⁴⁾가 처음으로 소개한 시간평균 개념을 홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry)에 확장하여 전기를 마련하였으며, 이후 많은 연구자들¹⁵⁻¹⁹⁾에 의해서 홀로그래픽 간섭법이 발전되었다.

홀로그래픽 간섭법은 진동하는 물체의 전체영역을 측정하기 쉬운 비접촉, 비파괴 방식이며, 진동으로 인한 물체의 변형특성을 가시적으로 명확하게 살펴볼 수 있어 실린더의 진동해석을 수행하는데 많은 장점을 갖고 있다. 이러한 특성은 본 연구에서 선정한 얇은 두께를 갖는 유연한 실린더와 같은 시스템의 진동특성을 규명하기에 매우 적합한 방법이다.¹¹⁾¹²⁾ 홀로그래픽 간섭법의 종류로는 이중 노출법, 실시간법, 시간평균법을 들 수 있다.

본 연구에서는 산업용 목적으로 많이 사용되는 실린더의 설계에 이용하기 위한 정보를 얻기 위하여 시간평균 홀로그래픽 간섭법을 이용하였다. 제작된 홀로그램으로 진동모드 형태를 조사하였으며, 공진주파수들에 대한 진폭을 구하였다.

2. 홀로그래픽 간섭법

물체로부터 반사되는 빛의 강도(Intensity)만을 기록하게 되는 일반적인 사진촬영(photography)과는 달리, 홀로그래픽 간섭법은 가간섭성 빔(coherent beam)을 물체파(object wave)와 기준파(reference wave)로 분리시킨 다음, 물체파를 확산하여 물체에 조사시키고 물체로부터 반사된 빛이 기록매체에 닿을 수 있도록 광학 측정시스템을 구성하여 빛의 강도와 위상을 동시에 기록한다.

홀로그래픽 간섭법은 물체표면의 변형결과에 해당하는 간섭무늬(fringe pattern)가 일정한 변위마다 등고선의 형태로 관측되는 시각적인 측정방법이다. Fig. 1과 같이 레이저에서 발생된 빛이 물체에서 반사, 회절된 물체파를 그 빛과 간섭성이 있는 기준파와 간섭시켜 얻은 간섭무늬를 필름에 기록한 것이 홀로그램(hologram)이다. 실제로 필름은 보강간섭이 되어 빛이 강한 데서는 노출이 많아져 검게 변하고, 소멸간섭이 되는 부분에서는 필름이 투명한 채로 남게 된다. 그리고 홀로그램을 재생하기 위해서 간섭무늬가 기록된 필름을 원래의 기준파에 놓으면 필름을 통과한 빛은 빛의 회절 원리에 의하여 물체에서 나온 것과 같은 파가 나오게 된다.

홀로그램에서 나타나는 간섭무늬는 Powell 등¹⁴⁾의 이론을 따라 해석된다. 진동모드 형태를 나타내는 진폭의 윤곽은 홀로그램에 기록되는 간섭무늬로 나타나며, 제1종 0차 베셀함수(bessel function) J_0 의 근을 통하여 해석된다. 간섭무늬는 다음과 같을 때 나타난다.

$$J_0(x) = 0 \tag{1}$$

그리고 x는 다음과 같이 정의 된다.

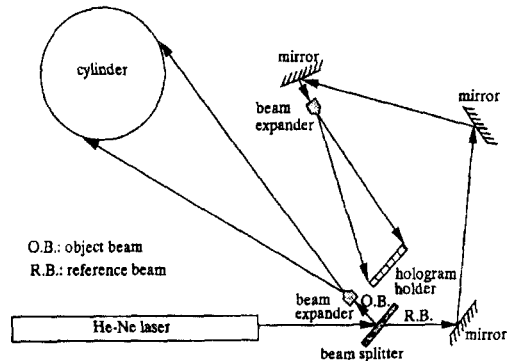


Fig. 1 Setup for performing holographic interferometry

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_1 + \cos\theta_2] A \quad (2)$$

여기서, J_0 : 제1종 0차 베셀함수, λ : 레이저의 파장, θ_1 : 진동표면과 입사 물체파가 이루는 각, θ_2 : 진동표면과 반사 물체파가 이루는 각, A: 진폭을 나타내고 있다.

3. 실험방법

3.1 실린더

Fig. 2는 본 연구를 위하여 General Dynamics Electric Boat Division에서 제작하여 제공한 직경 0.64m, 높이 1.28m 인 이중 실린더의 단면도이다. 내부 실린더는 이음 이 없이 제작되었으며, 내부 실린더 안의 중간부분에 위치한 벌집 모양을 갖는 원형 칸막이(bulkhead)는 열수축 박음을 하였다. T 프레임을 기준으로 상부와 하부로 구분되어 조립된 두 개의 외부 실린더는 상부 실린더의 상단과 하부 실린더의 하단에서 볼트로 체결되어 있으며, T 프레임에 접한 부분들은 썩기 형태로 조립되었다. 이중 실린더를 구성하는 구조물 전체의 재질은 스테인레스 강이며 무게는 230kg 이다. 이중 실린더는 세 개의 받침 블록을 사용하여 수직하게 세웠으며, 레이저로부터 실린더에 조사

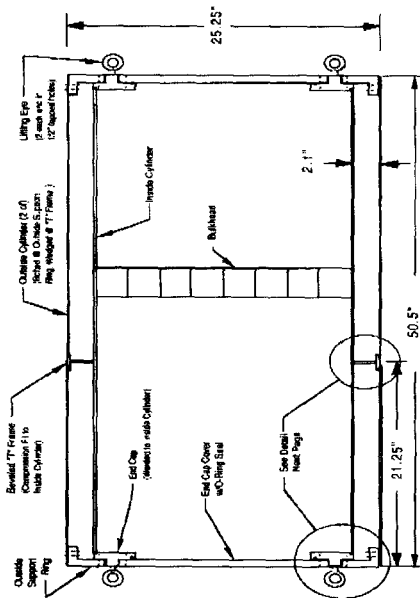


Fig.2 Schematic diagram of the double cylinder

되는 물체파의 강도를 증가시키기 위해서 외부 실린더의 표면 전체에 형광 테이프를 부착하였다.

3.2 실험장치의 구성

임펄스 입력에 의한 진동신호를 분석하고 응답 주파수 그래프를 얻기 위하여 가속도계(Bruel & Kjaer: 4384)와 스펙트럼 분석기(Rockland: 5820B)를 사용하였다. 구해진 주파수 특성을 가진 주파수를 찾는 기초자료로서 사용된다. 진동원으로 사용된 함수발생기(Global specialties)에 의하여 생성된 가진력을 실린더에 전달하기 위하여 연결된 가진기(piezoelectric actuator)의 위치를 상부실린더와 하부실린더의 중간부분인 두 곳에 선정하였다. 그리고 가진된 입력 주파수에 의한 실린더의 상대적 진폭을 검출하도록 가속도계와 오실로스코프(Tecktronix: 2213A)를 연결하였다. 실험에서 관찰되는 실린더의 상대적 진폭은 공진주파수에서 최대가 된다.

실험에서 적용한 광학적 개략도는 앞에서 설명된 Fig. 1과 같다. 홀로그램을 제작하기 위하여 사용된 광원은 40mW HeNe 레이저이며, 기록매체는 Agfa 10E75 Holotest 필름이다. 노출시간은 셔터(Jodon; ES-100)를 사용하여 선택된 주파수에 대한 실린더의 진동주기 보다 길게 설정하였다. 모든 광학 측정시스템은 건물의 바닥으로부터 절연된 위치에 있는 대형 석정반 위에 구성하였으며, 실린더의 중간 높이(0.6m)와 맞도록 금속 블록에 올려 놓았다. 홀로그래픽 간섭법은 매우 민감하여 주위환경의 진동 및 소음에 대한 세심한 절연을 요하기 때문에 일상시간 보다 외란이 덜한 자정을 택하여 실험하였다.

3.3 간섭무늬의 해석

실린더의 진동으로 인한 간섭무늬를 정량적으로 해석하기 위해서는 베셀함수 J_0 의 근을 구해야 한다. 간섭무늬 중 어두운 부분들은 Fig. 3과 같이 $J_0(x) = 0$ 이 되는 곳에서 나타난다. 간섭무늬들은 베셀함수 J_0 의 주기적인 특성 때문에 일정한 간격을 갖는다. 진동물체의 표면에 대한 각 점의 진폭은 홀로그램상에 나타난 간섭무늬의 차수를 이용하여 식(2)로 구할 수 있다.

실험장치의 구성에서 θ_1, θ_2 는 매우 작아지므로 무시할 수 있다. 따라서 실린더 진폭문제에서 $\cos\theta_1 \approx \cos\theta_2$ 로 계산된다. 다행히 파동은 조화진동이므로, 진폭을 계산할 때 실린더 원주방향의 작은 영역인 파장의 1/4 정도만 이용하여도 충분하다. 본 실험에서는 HeNe 레이저를 사용하였으므로 파장 λ 는 632.8nm 이다. $J_0(x) = 0$

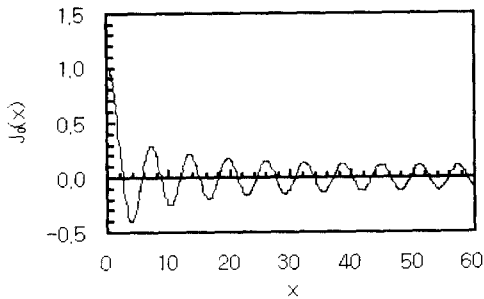


Fig. 3 Zero order Bessel function of the first kind

의 첫번째 근인 x_1 을 구하면, 절선(nodal line)에서 첫 번째 간섭무늬 위치에 있는 진폭을 계산할 수 있다.

$$x_1 = 2.4048 = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_1 + \cos\theta_2] A_1$$

따라서

$$A_1 = \frac{\lambda x_1}{4\pi} = \frac{0.6328 \times 2.4048}{4 \times 3.14} = 0.1211 \mu\text{m}$$

같은 방법으로 나머지 진폭들이 계산된다.

4. 실험 결과

Fig. 4는 상부 실린더 그리고 Fig. 5는 하부 실린더를 가진하여 얻은 홀로그램들로 이중 실린더를 구성하는 외부 실린더의 진동특성을 나타내는 모드 형태들을 살펴볼 수 있다. 이들은 대표적으로 선택된 각기 다른 공진 주파수에 대한 것이다.

Fig. 6은 홀로그램에서 나타나는 베셀함수를 따르는 간섭무늬를 해석한 진폭을 나타낸다. 원주 파동수를 n 이라 하면 $n=2\pi a/\lambda_\theta$ 로 정의된다. 여기서 a 는 실린더 표면의 반경이고, λ_θ 는 θ 방향에서의 원주파장이다. λ_θ/a 는 라디안으로 원주방향에 있는 두 개의 인접한 바둑판 모양의 절점 사이를 나타내는 각변위이며 θ (degree)의 함수로 표기하였다.

홀로그램에서 정상적인 진동모드를 갖는 실린더 표면은 바둑판 모양으로 구분된 진동 특성을 갖는다. 그리고 바둑판 모양을 구분하는 밝은 부분들은 절선들을 나타낸다. 외부실린더와 접촉되어 있는 T 프레임 부근에도 항상 진동이 정지된 밝은 영역이 있음을 알 수 있다. 모드형태는 항

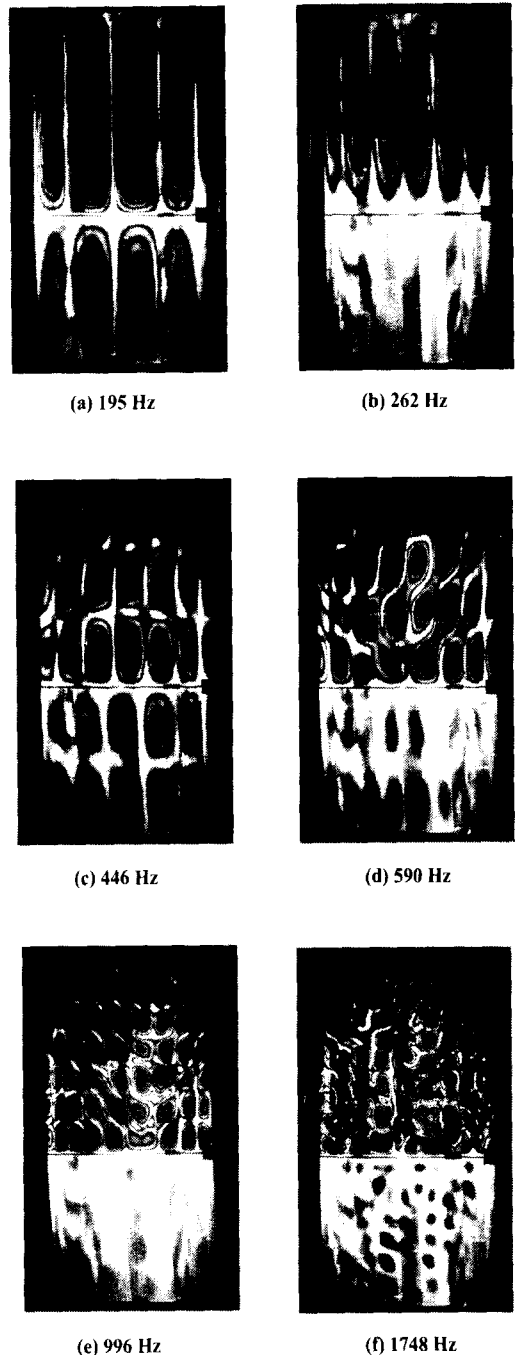


Fig. 4 Holograms showing the vibration mode of stiffened double cylinder(Upper outside cylinder was excited.)

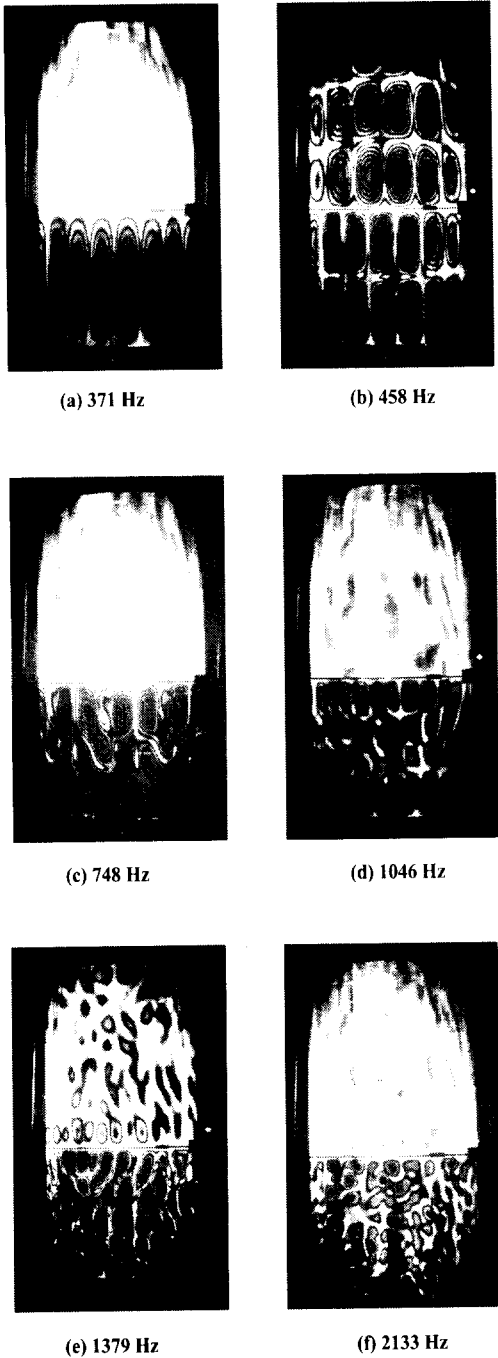


Fig. 5 Holograms showing the vibration mode of stiffened double cylinder (Lower outside cylinder was excited.)

상 규칙적이고 정상적이 아니라는 것이 주목된다. 몇 개의 저주파수 영역에서는 정상적이고 일그러짐이 없는 진동 특성을 얻을 수 있지만, 대부분의 모드 형태는 불규칙적으로 일그러진 형상으로 나타나는 것을 실험에서 제작된 55개의 홀로그램에서 살펴 볼 수 있었다.

대체적으로 진폭은 T 프레임을 지나면서 감소하므로, T 프레임은 상부 실린더와 하부 실린더 사이에서 진동에너지의 전달을 억제하는 감쇄기(damper)의 역할을 한다. Fig. 4의 195Hz, 446Hz에서는 진폭의 크기를 결정하는 간섭무늬의 차수가 감소하지만, 진동에너지가 비교적 자유롭게 T 프레임을 통과하여 전달되어 정상적인 진동모드를 보인다. 이 현상은 Fig. 5의 458Hz에서도 동일하게 나타나며, 특징적으로 하부 실린더에서 상부실린더로 전달된 진동에너지의 원주 파동수가 서로 다르게 나타남을 살펴 볼 수 있다.

Fig. 4의 주파수 996Hz, 1748Hz 그리고 Fig. 5의 주파수 748Hz, 1046Hz, 1379Hz, 2133Hz 에서, 정상적인 진동모드를 나타내는 절점과 절선 그리고 주기적인 파동형상이 전체적으로 파괴되며, 고주파수일수록 심화되고 많이 나타난다. 이와 같은 비틀림 모드 형상이나 복합 모드 형상은 인접한 공진주파수 사이나 가진되는 비틀림 모드에 기인한다고 생각된다. 한편, Fig. 4의 262Hz 등을 포함하는 대부분의 주파수에서 T 프레임의 효과가 강하게 작용하기 때문에 하부실린더에서 간섭무늬가 보이지 않는다. 그리고 Fig. 5에서도 T 프레임의 효과가 Fig. 4의 결과와 같음을 알 수 있다. 이는 진폭이 너무 작기 때문에 시간평균 홀로그래피 간섭법의 감도 한계를 넘는 것과, 실린

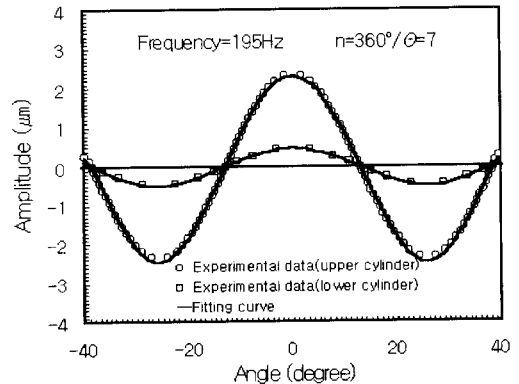


Fig. 6 Radial displacement distribution along the part of circumference of the cylinder

더가 T 프레임에 열수축 끼워맞춤된 결과로 나타나는 구조물강성의 약화에 기인한 것 때문이라고 생각된다.

이와 같이 T 프레임은 이와 연결된 하나의 실린더에서 다른 실린더로 진동의 전달을 억제하는 기계적 감쇄기로 작용함을 알 수 있었으며, 진동모드 형태의 일그러짐은 실린더의 제작과 조립과정을 거치면서 발생하는 비대칭성과 불균일성에 비례적인 관계를 가지며, 두께가 얇은 외부 실린더의 모달 밀도가 높은 것이 원인^(13,14)이라고 생각된다.

5. 결 론

홀로그래픽 간섭법을 이용하여 실린더의 진동 모드 형태가 실험적으로 해석되었다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 홀로그래픽 간섭법은 물체의 진동 모드 형태와 진폭을 측정하는 실제적인 공학문제에서 매우 유용한 수단이다.
- (2) 물체의 전체영역을 쉽게 나타내므로 실린더와 같은 곡면을 갖는 큰 구조물에 적용할 수 있다는 것이 증명되었다.
- (3) 실린더 표면전체의 진폭분포를 한번에 측정할 수 있었다.
- (4) 외부 실린더의 진동특성은 외부 실린더에 연결된 T 프레임의 영향을 많이 받으며, T 프레임이 진동에너지의 전달을 억제하는 기계적 감쇄기의 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Gabor, D., "A New Microscopic Principle", Nature, Vol.161, pp. 777~778, 1948.
- (2) Leith, E. and Upatnieks, J., "Wavefront Reconstruction with continuous-tone Objects", J. Opt. Soc. Am., Vol.53, pp.1377~1381, 1963.
- (3) Leith, E. and Upatnieks, J., "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-dimensional Objects", J. Opt. Soc. Am., Vol.54, pp. 1295~1301, 1964.
- (4) Powell, R. L., and Stetson, K. A., "Interferometric Vibration Analysis by Wave-Front Reconstruction",

- J. Opt. Soc. Am., Vol.55, No.12, Dec., pp. 1593~1598, 1965.
- (5) Osterberg, H., "An interferometer Method of Studying the Vibrations of An Oscillating Quartz Plate", J. Opt. Soc. Am., Vol.22, No.19, pp. 19~35, 1932.
- (6) Holloway, D. C., Patacca, A. M. and Fourney, W. L., "Application of Holographic Interferometry to a Study of Wave Propagation in Rock", Experimental Mechanics, August, pp. 281~289, 1977.
- (7) Holloway, D. C., "Application of Holographic Interferometry to Stress Wave and Crack Propagation Problems", Optical Engineering, Vol.21, No.3, pp. 468~473, 1982.
- (8) Fallstrom, K. E., Gustavsson, H., Molin, N. E., and Wahlin, A., "Transient Bending Waves in Plates Studied by Hologram Interferometry", Experimental Mechanics, Vol.29, No.4, pp. 378~387, 1989.
- (9) Fallstrom, K. E., Lindgren, L. E., Molin, N. E., and Wahlin, A., "Transient Bending Waves in Anisotropic Plates Studied by Hologram Interferometry", Experimental Mechanics, Vol.29, No.4, pp. 409~413, 1989.
- (10) 강영준, "전자 스펙클 간섭법에 의한 스피커 진동 해석", 한국공작기계기술학회지, 제6권 제1호, pp. 92~99, 1997.
- (11) Aprahamian, R., and Evensen, D. A., "Applications of Holography to Dynamics: High-Frequency Vibrations of Beams", Journal of Applied Mechanics, Vol.37, No.2, pp. 287~291, 1970.
- (12) Aprahamian, R., and Evensen, D. A., "Applications of Holography to Dynamics: High-Frequency Vibrations of Plates", Journal of Applied Mechanics, Vol.37, No.4, pp. 1083~1090, 1970.
- (13) 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.
- (14) Soedel, W., Vibrations of Shells and Plates, Marcel Dekker, Inc., 1993.