

# Laser Holography 기법에 의한 균열 박판의 결함 진전에 따른 진동 특성에 관한 연구

김인권\*, 김경석\*\*, 윤성운\*\*, 강기수\*\*\*

## A Study on Vibration Characteristic of Thin Plate in Crack Propagation by Laser Holography Method

In-Gwon Kim\*, Koung-Suk Kim\*\*, Sung-Un Yoon\*\*, Ki-Soo Kang\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the vibration characteristics of a rectangular plate with 45° oblique crack and a smooth plate subjected to a uniaxial tension. The experiment is adopted by the time-average holography method. The natural frequency and mode shape are considered accurate according to the increasement of tensile load in the study. When tensile load is zero, the vibration modes are almost agreed with the smooth and the 45° obliquely cracked plate. But since then, according to the increasement of load, it is shown that vibration modes are extremely varied. The effects of the crack length in the vibration characteristic are discussed in detail. It is indicated that the increase of the crack length makes the variation of the frequencies and modes complicate in the range of even a small load.

**Key Words** : Holography Method(홀로그래피 기법), Obliquely Cracked Thin Plate(경사 균열 박판), Natural Frequency(고유 진동수), Vibration Mode Shape(진동 모드), Time-Average Method(시간평균법)

### 1. 서론

최근 각종 구조물에 사용되는 판재는 구조물의 경량화가 요구됨에 따라 박판의 사용범위가 넓어지고 있다. 특히, 대형화와 함께 경량화가 요구되는 수송기와 여객기 등에 많이 사용되는 판재는 가혹한 하중 조건하에 처해 있다고 말할 수 있다. 이와 같은 판재에 균열이 처음부터 존재하든지 아니면 운행 중에 어떠한 이유로 균열이 발생하는 경우 응력분포는 매우 복잡하게 된다. 인장하중을 받는 판

에서 균열이 존재하는 경우, 균열 선단부에서는 압축응력장이 생겨 그 결과로써 인장하중이 증가하면 균열근방에 국부적으로 좌굴이 발생하게 된다. 이 균열 좌굴현상은 판의 정적강도와 피로파괴에 대한 내구한도의 저하, 균열 성장속도의 증가와 같은 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 항공기 구조 설계 시에 균열에 의해 생기는 영향을 사전에 고려하기 위하여 균열발생부와 진전 방향 등에 대하여 이론과 실제의 양면에서 상세한 검토를 필요로 한다. 지금까지 균열이 없는 박판의 좌굴과 진동에 관한

\* 조선대학교 우주항공공학과

\*\* 조선대학교 기계공학부

\*\*\* 조선대학교 대학원

이론적인 연구로서는 Cherepanov가 균열좌굴의 정성적인 성질을 밝혔다. 그 이후, Litvinenkova가 무한 평판에 균열이 있는 경우를 연구하였다<sup>(1)</sup>. 최근에는 Markstöm이 균열위치와 하중조건을 변수로 한 균열판의 국부좌굴을 유한요소법을 이용하여 수치해석하였다<sup>(2)</sup>. 균열판의 진동에 관한 이론적인 연구로서는 면내력이 작용하는 경우에 있어서 중앙부의 균열과 직교한 방향에 인장하중이 작용한 판의 고유진동수를 유한요소해석법으로 이용하여 수치해석하였다<sup>(3)~(5)</sup>. 그러나 인장하중을 받는 균열박판의 진동 및 좌굴특성에 대한 연구는 거의 미비한 상태이므로 본 연구에서는 인장하중을 받는 경사 균열박판에 있어서 국부좌굴에 의한 진동특성에 관하여 연구하였다. 연구방법으로 인장하중을 받는 균열이 없는 박판 시험편과 45° 경사균열 시험편의 고유진동수측정을 위하여 Laser holography기법을 이용하여 진동모드 측정을 하여 그 결과를 비교, 분석하는 실험방법을 택하였으며, 균열이 없는 박판에 대해서만 무차원 하중의 증가에 따른 고유진동수의 변화관계를 실험치와 Ritz method에 의한 유한요소 해석치와 비교하였다.

## 2. 홀로그래피(Holography)간섭법의 원리

Fig. 1은 Holography의 원리를 나타낸 것으로서, 먼저 레이저에서 나온 간섭성 빛을 Beam Splitter에서 둘로 나누어서 하나는 시험편에 난반사 시켜서 홀로그래피 감광재에 비추이는데 이 빛을 물체광(Object Beam)이라한다. 다른 하나는 Beam Expander를 통하여 직접 감광재에 비추어 지는데 이 빛을 참조광(Reference Beam)이라한다. 이 두 광선이 간섭을 일으켜 간섭무늬를 만들고 이를 기록한 사진을 홀로그램(Hologram)이라 한다. 일반적인 사진에서는 광의 진폭만이 기록되지만 홀로그램에서는 광의 진폭과 위상을 동시에 축적하고 있다. 이 홀로그램을 원래의 위치에 두고 참조광만을 조사하면 간섭무늬가 회절격자의 역할을 해서 시험편의 표면이 재생되어 그 자리에 3차원 허상이 얻어 지는데 이 때 카메라의 초점을 맞추어 상을 촬영할 수 있다. 또한, 축적된 홀로그램상에 위상관계가 완전히 다른 별도의 화상정보를 다중 기록하여 일시에 재생할 수 있어서 이를 이용해서 여러 가지 간섭측정을 행할 수 있다. 이와 같은 방법을 홀로그래피 간섭법이라 한다<sup>(6)</sup>.

## 3. 실험

### 3.1 시험편

실험에서 사용된 재료는 항공기의 구조재료로 많이 사용되는 비교적 항복강도가 높은 7075-Ti-6-Al 합금을 이용하였으며, 시험편은 Fig. 2에 표시된 바와 같이 폭 2W가 50 mm, 두께 h는 0.4 mm이고 길이 2L이 100 mm인 균열이 없는 평판 시험편과 동일한 기하학적 형상에 45° 경사균열을 가진 시험편을 사용하였다. 가공된 판 시험편을 잘 연마한 후 균열시험편은 x축과 45° 균열을 주었으

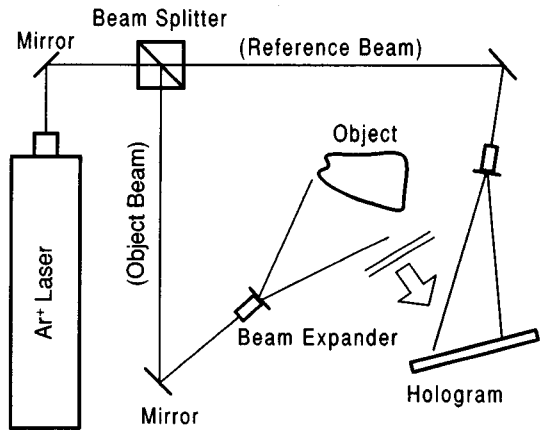
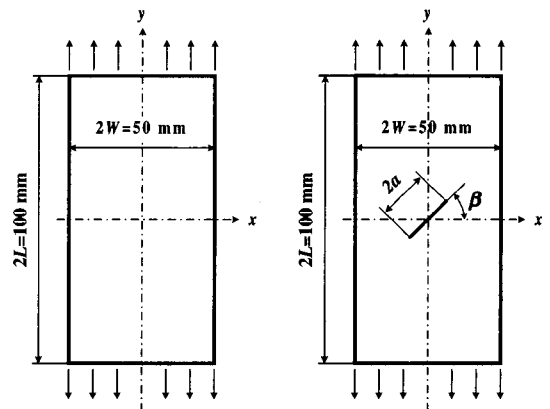


Fig. 1 Schematic diagram of holography



(a) Smooth plate (b) 45° obliquely cracked plate  
Fig. 2 Geometry of specimen

며, 균열길이  $2a = 20 \text{ mm}$ 이고, 예리하고 정밀 가공이 되도록 짧은 시간동안 레이저 출력을 크게 할 수 있는 Q-switching 방법에 의한 레이저가공을 하였다. 재료의 물성치는 다음과 같다.

- Young's Modulus :  $E = 68.67 \text{ GPa}$
- Poisson's Ratio :  $\nu = 0.31$
- Density :  $\rho = 2.755 \text{ kg/m}^3$

### 3.2 실험장치 및 방법

본 실험에서는 웜기어(Worm-gear)회전에 의한 기계적인 강제변위를 시험편에 가하였다. 부하 능력 1 ton인 비교적 소형경량의 1축 인장부하 장치 상부에는 로드셀(Load-cell)을 부착하고 여기에 데이터로거(Data-logger)를 접속하여 실시간에서의 하중을 읽었다. 인장부하장치의 시험편 고정용 장치에 가공된 시험편을 예폭시 수지로 접착한 후 볼트로 고정하였다. 면의 변위의 측정에는 Ti-Ba계 압전 소자를 이용하였고, 가진 방법으로는 시험편 후면에서 스피커에 의한 음향가진을 이용하였으며 Fig. 3에 그 개략도를 표시하였다. 고유진동수는 가진용 스피커의 단자전압과 시험편에 부착한 압전소자의 응답출력 전압을 리사주다이아그램(Lissajous diagram)에 의하여 진동모드 주파수를 측정하였다. 물체광과 참조광이 홀로그래프에 도달하는 거리에 반비례하도록 물체광 : 참조광 = 1 : 3의 광량으로 측정을 행하였으며, 실험방법으로는 소정의 하중을 상부의 Load cell에서 확인한 후 고유진동수와 고유진동모드 측정을 하였다. 이와 같은 일련의 조작으로 인장하중을 단계적으로 가하면서 진동모드 측정 실험을 행하였다.

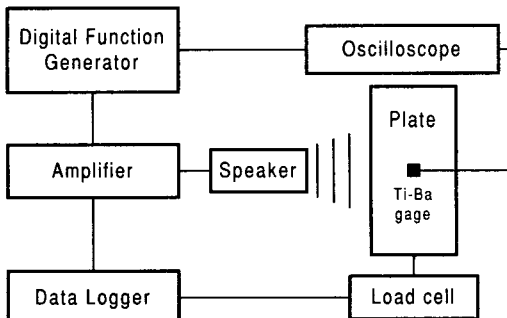


Fig. 3 Flow chart of measurement system

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 균열이 없는 박판 시험편

시험편의 폭과 길이의 비( $L/W$ )가 2인 경우, 진동 제 1, 2 및 3 모드에 있어서 무차원화 시킨 인장하중 ( $\Lambda = P(2W)/D$ )과 고유 진동수  $\Omega = \omega \sqrt{\rho h(4W)^4/D}$ 의 변화관계를 Fig. 4에 나타냈다. 여기에서  $D$ 는 평판의 굽힘강성계수,  $\rho$ 는 밀도,  $h$ 는 판두께,  $\omega$ 는 판의 처짐이다. [Fig. 4]에서 보느냐와 같이 제 1 모드와 제 2 모드에서는 비교적 완만한 증가 추세를 보인 반면에 제 3 모드에서는 인장하중의 증가에 따른 고유진동수의 변화가 급격한 증가를 보였다. 또한 이때 시험편에 균열을 주지 않은 상태에서는 단순 인장 응력을 받으므로 어떤 형태의 좌굴현상도 나타나지 않았다. 실험에서 채택된 제 1모드( $\circ$ ) 제 2모드( $\square$ ) 및 제 3모드( $\triangle$ )의 무차원 하중의 증가에 따른 고유진동수의

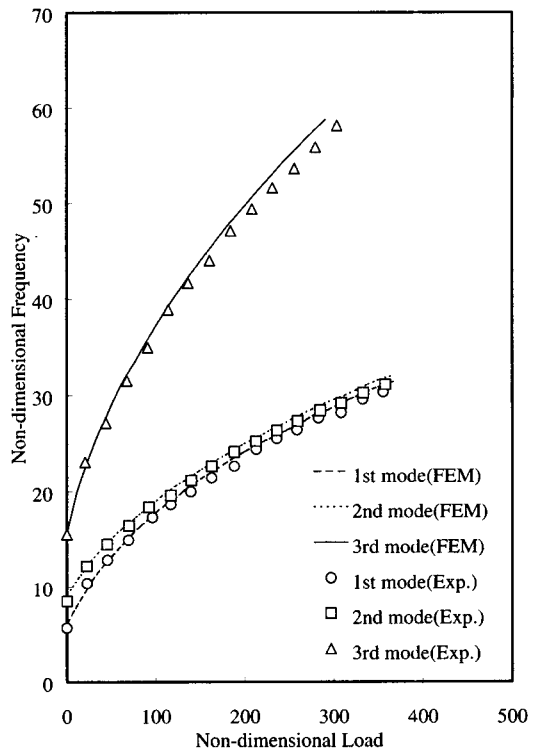


Fig. 4 Eigen-frequency( $\Omega$ ) vs. tensile load( $\Lambda$ ) of a smooth plate

변화를 관찰한 결과와 Ritz method에 의한 유한요소법의 결과와는 잘 근사하고 있어서 실험결과와 타당성을 입증할 수 있었다. 고유진동모드의 결정은 음향가진 시스템에 의한 진동수의 증가에 따라 생성된 간섭줄무늬의 가장 선명한 상태를 단계적으로 제 1, 2, 3 모드로 결정하였다.

#### 4.2 45° 경사 균열 시험편

경사균열 시험편은 Fig. 2(b)에 나타난바와 같이  $x$ 축에 대하여  $\beta=45^\circ$  방향으로 초기균열  $a=10$  mm로 주었으며, 이때의 균열진전길이를 0 mm로 기준해서 그 후 1 축 Worm gear 회전에 의한 강제적인 인장하중을 단계적으로 가하여 발생한 균열진전 길이가 3 mm일 때와 6 mm일 때를 측정대상으로 삼았다. 일단, 하중증가에 따라 생성된 성장균열은 초기균열 방향과 무관한 비직선 성장을 하였다. 성장길이는 초기 균열선에서 다음 단계의 단까지의 직선거리를 말하며, 균열 성장길이가 0 mm, 3 mm, 및 6 mm 일때의 진동 제 1, 2 및 3 모드에 대한 작용하중과 고유진동수의 변화관계를 Fig. 5~7에 복합적으로 표시하였다.

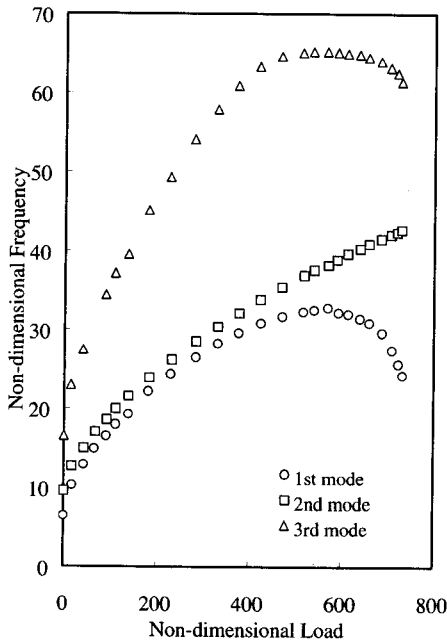


Fig. 5 Eigen-frequency( $\Omega$ ) vs. tensile load( $\Lambda$ ) of a 45° cracked plate(Crack growth : 0 mm)

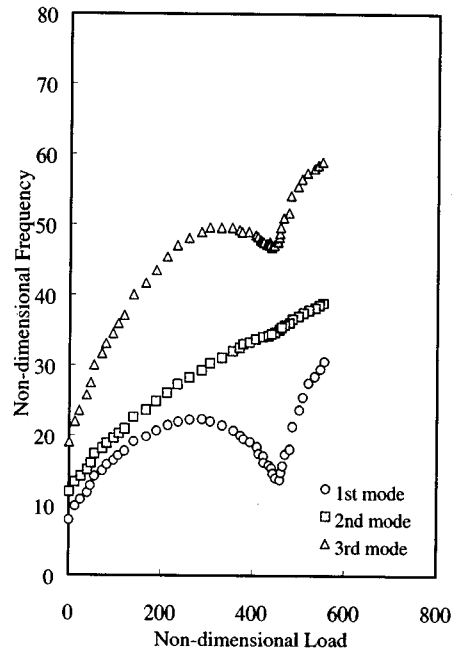


Fig. 6 Eigen-frequency( $\Omega$ ) vs. tensile load( $\Lambda$ ) of a 45° cracked plate(Crack growth : 3 mm)

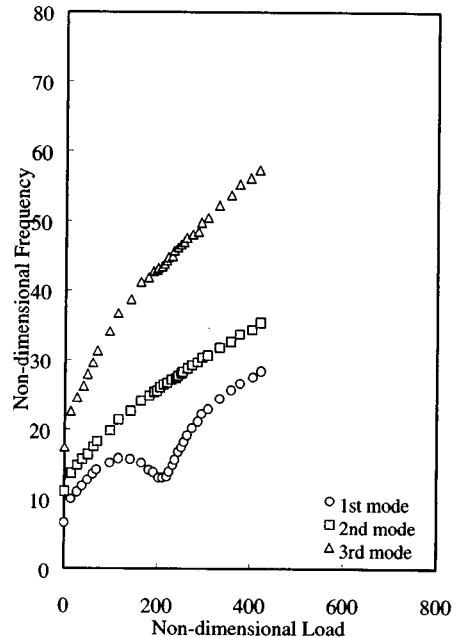


Fig. 7 Eigen-frequency( $\Omega$ ) vs. tensile load( $\Lambda$ ) of a 45° cracked plate(Crack growth : 6 mm)

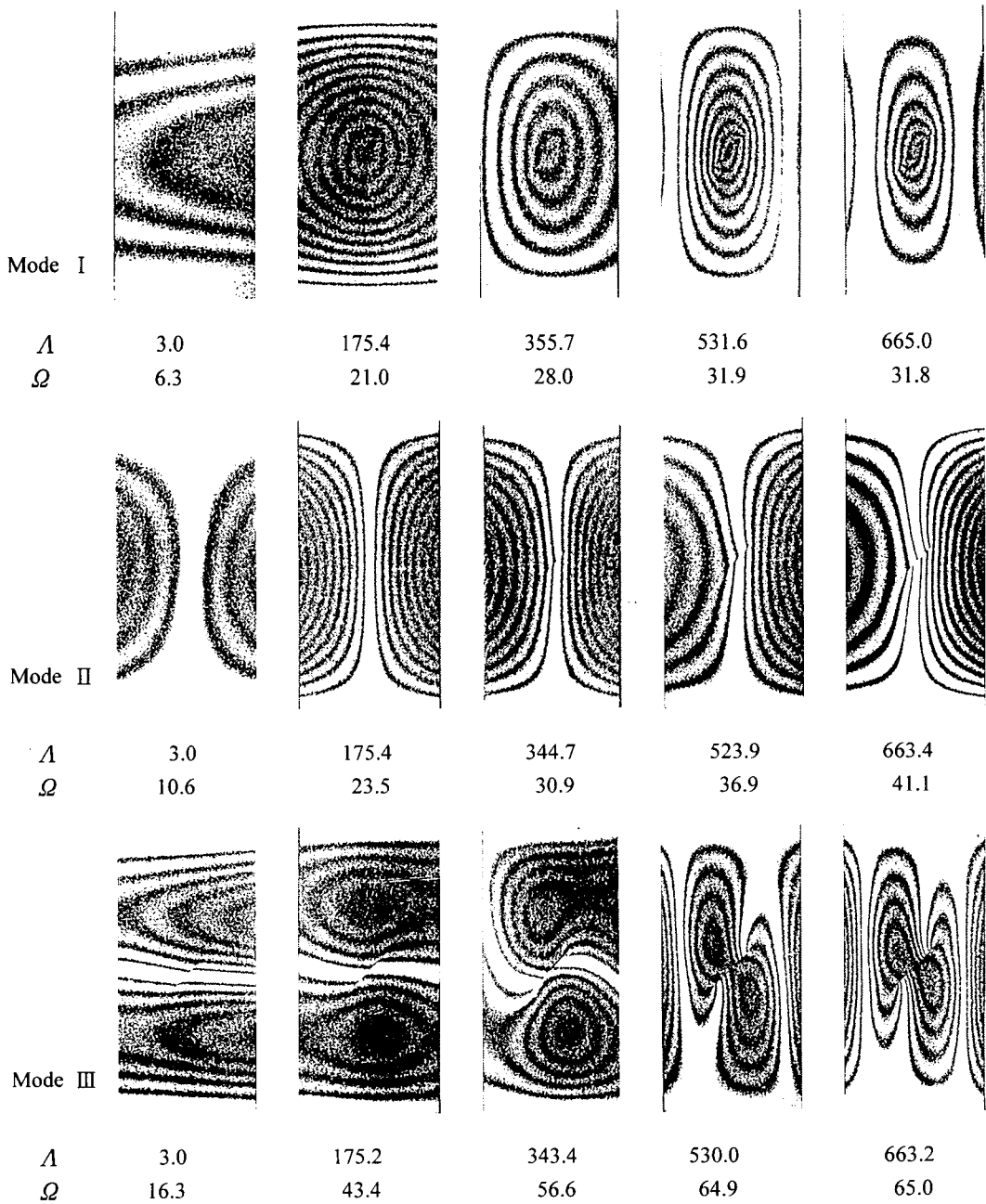


Fig. 8 Variation of vibration mode shape in the 45° cracked plate under tensile load

일반적으로 45° 경사균열의 경우는 균열이 없는 경우나 수평 균열시험편에 비해서 복잡한 형태의 응력분포가 일어나고 고유진동수의 변화 또한

그림에 나타난바와 같이 균열길이가 진전함에 따라 무차원화 시킨 좌굴 하중값은 0 mm일 때 762.0 Hz 이었던 것이 3 mm에서는 439.3 Hz, 6 mm에서는

228.9 Hz로 현저하게 낮아짐을 알 수 있었다. 균열 진진방법은 인장부하장치에 의해서 단계적으로 하중을 가하여 성장시켰으며, 이때의 좌굴하중값을 Table 1에 표시하였다. 여기에서  $P_{cr}$ 는 실제 좌굴 하중값이고,  $\Lambda_{cr}$ 는 무차원 좌굴하중값을 나타낸다. Fig. 5~7에 대응하는 진동 제 1, 2 및 3모드의 변화를 Fig. 8에 나타냈다.

Table 1 Experimental values of buckling load

Crack growth		0 mm	3 mm	6 mm
		Load		
45°	$P_{cr}$	629.5	362.9	189.1
	$\Lambda_{cr}$	762.0	439.3	228.9

Fig. 8에서는 제 1모드의 경우 무차원 진동수 ( $\Omega$ )가 6.3, 제 2 모드의 경우 10.6, 그리고, 제 3모드의 경우 16.3일 때의 측정된 현상을 나타내었다. 특징적으로는 각각의 경우에 있어서 모드의 형태가 균열이 없는 박판의 경우와 흡사하다. 그러나 인장 부하장치와 가진 시스템에 의해 하중과 진동수가 증가됨에 따라 극심한 변화양상을 보이고 있음을 Fig. 8에 나타내었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 레이저 홀로그래피 기법에 의한 인장하중을 받는 균열이 없는 박판시험편 및 45° 균열 시험편에 있어서 좌굴 및 진동 특성에 관하여 연구하였다. 인장 하중을 받는 균열이 없는 박판 시험편과 45° 경사 균열 시험편의 고유진동수의 측정 및 레이저 홀로그래피법을 이용한 진동 모드를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 균열이 없는 박판에서 각 모드의 고유진동수의 결과치는 Ritz Method에 의한 유한 요소 해석 결과 치와 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (2) 45° 경사 균열 시험편의 고유진동수는 좌굴 하중 근처에서는 진동수가 급격히 낮아지며, 그 밖의 하중 영역에서는 거의 일치함을 알 수 있었고, 균열 성장 길이가 3 mm, 6 mm에서 각각 439.3 Hz, 228.9 Hz로 현저하게 낮아짐을 확인 할 수 있었다.

(3) 레이저 홀로그래피 간섭법을 이용하여 균열 박판의 좌굴 및 진동특성을 실험적으로 구하는 방법을 제안하였으며, 본 연구에서는 균열이 없는 박판시험편과 45° 경사 균열 시험편에 있어서 인장 하중값이 0 일때에 진동모드가 거의 일치함을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 홀로그래피 기법을 사용함으로써 고유진동수 및 진동모드 형상을 동시에 알 수가 있었으며, 비접촉 기법으로서 형상의 제약을 받지 않아 이론해석이 어려운 결함진전에 따른 진동 특성을 실제 구조물에 적용 가능성을 확인하였다.

### 후기

본 논문은 1998년 조선대학교 교내 학술연구비 지원을 받아 연구되었습니다.

### 참고문헌

1. Litvinenkova, Z. N., "Stability of a Plate in Tension with an Internal Crack," *Mechanics of Solids*, Vol. 8, No. 5, pp. 132~145, 1973.
2. Markström, K. and Storakers, B., "Buckling of Cracked Membrane Under tension," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 217~229, 1980.
3. 角 誠之助, 藤本 孝, "引張荷重を受ける中央き裂板の振動特性," *日本機械學會 論文集(A編)*, 第53卷 第49號, pp.1124~1129, 1987.
4. 角 誠之助, "構造と材料強度のレーザ應用 計測," *日本機械學會論文集*, 第82卷 第733號, pp. 1320~1325, 1979.
5. Cleghorn, W. L., "Free vibration analysis of rectangular plates with a linear crack along central axis," *Recent Advances in Structural Mechanics : Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Chicago, IL, USA New York, NY, The American Society of Mechanical Engineers, pp. 215-220, 1994.
6. Smith, Howard Michaelm, "Principles of Holography, 2nd Edition," John Wiley Sons, Inc, pp. 220~267, 1975.