

ESPI 기법에 의한 하중을 받는 균열 박판의 진동 특성에 관한 연구

A Study on the Vibration Characteristics of Thin Plate with Crack under Tension using ESPI

김경석*, 강기수**, 최지은**, 박찬주**, 홍진후***

Koung-Suk Kim*, Ki-Soo Kang**, Ji-Eun Choi**, Chan-Ju Park** and Jin-Who Hong***

초 록 대부분의 실제구조물은 인장과 진동 등이 동시에 작용하는 복합하중 상태가 되며 이러한 환경에서 물체의 거동을 해석하는 것이 중요하다. 이 논문에서는 α 축에 대해 45° 결함이 있는 평판이 하중을 받고 있을 때, 진동 특성을 시간평균 electro speckle pattern interferometry(ESPI)를 이용하여 해석하였다. 결함이 있는 박판 시험편에 인장력을 증가하면서 물체의 고유진동수 변화와 모드의 형태 변화를 동시에 관찰하였다. 실험결과에서 결함은 저차모드에서는 진동모드에 영향을 주지 않았으나, 고차모드에서는 진동모드에 변화를 주었으며, 특정 진동모드에서 결함의 영향으로 현저하게 고유주파수가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 실험결과는 유한요소해석과 비교하여 주파수 비교에서는 5% 이내의 오차를 보였으며, 진동모드 비교에서는 완전히 일치하였다.

주요 용어: 전자차리스페클 간섭법, 고유주파수, 진동모드, 복합하중

Abstract This paper presents the vibration characteristics of a rectangular plate with 45° oblique crack subjected to a uniaxial tension. The experiment is adopted by the time-average Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) method. The natural frequency and mode shape are considered accurately according to the increase of tensile load. When tensile load is zero, the vibration modes are agreed with the smooth and the 45° obliquely cracked plate. But according to the increasement of load, it is shown that vibration modes are extremely varied. The effects of the crack under the vibration are discussed in detail. It is indicated that the increase of load makes the variation of the frequencies and modes complicate in the range of even a small load. The results are agreed with the FEM analysis within 5 %.

Keywords: eletronic speckle pattern interferometry(ESPI), natural frequency, vibration mode shape, complex load

1. 서론

항공기와 일반수송기와 같은 것들은 충분한 강도와 함께 경량화가 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 일반적으로 이용되는 판재는 전체적인 구조물의 형상과 조건에 비해서 상대적으로 박판이 되는 경향이 있으며, 따라서 판재에 대한 여러 가지 사용조건에 따라서 다양한 하중이 작용하게 되고 더불어 피로 파괴나 이상 진동 등과 같은 현상이 발생하게 된다. 이와 같은 판재에 균열이

처음부터 존재하든지 아니면 운행 중에 어떠한 이유로 균열이 발생하는 경우 비선형적인 요소가 생기면서 응력 분포는 매우 복잡하게 된다. 그 중에서도 진동현상은 안전적인 설계와 시공에 있어서 가장 큰 문제가 아닐 수 없으며, 직접적으로 항공기와 일반 차량과 같은 대중 운송수단의 안정성에 큰 문제로 대두되고 있다. 이제까지 균열 박판의 좌굴과 진동에 관한 이론적인 연구로서는 Litvinenkova가 무한 평판에 균열이 있는 경우를 연구하였다[1]. 그 이후, Markstöm이 균열위치와 하중조건을

변수로 한 균열판의 국부좌굴을 유한요소법을 이용하여 수치해석하였다[2].

균열판의 진동에 관한 이론적인 연구로서는 면내력이 작용하는 경우에 있어서 중앙부의 균열과 직교한 방향에 인장하중이 작용한 판의 고유진동수를 유한요소해석법을 이용하여 수치해석 하였다[3-5]. 그러나 이는 대상체의 형상이 단순하며, 예상되어진 비선형적인 요소가 존재하는 경우로 하여 해석을 하였다. 그러나, 실제 구조물의 경우 현상이 매우 복잡하고, 비선형적인 요소를 예측할 수 없으므로 이론적인 해석 방법으로는 정확한 예측을 할 수 없게된다. 따라서 실험적인 연구가 수행되어야 하며, 현재 가장 널리 사용되는 방법으로는 가속도계 및 laser scanning vibrometer가 있다. 그러나, 이는 point 검사라는 절대적인 단점이 있으며, 가속도계의 경우 접촉식에 따른 센서의 자중 효과가 남아 있게 된다. 따라서, 본 연구에서는 최근 비접촉, 비파괴, full-field 검사로 기존의 검사 기법의 단점을 보완할 수 있는 electronic speckle pattern interferometry(ESPI) 기법을 사용하여 시험편 전면(full filed)에 대해 전체적인 진동 모드와 고유진동수를 찾아 분석하였으며, 유한요소 해석 결과와 비교하였다. 연구방법으로 45° 경사균열을 가진 0.4mm의 박판 시험편의 양단을 고정하여 시험편 후면에서 가진을 하고 ESPI 기법을 이용하여 진동모드 및 고유주파수를 측정하였다. 결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 5% 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다.

2. ESPI 기법의 이론

ESPI 기법은 광학적으로 거친 표면에 간섭성을 가진 두 빔이 서로 중첩을 일으켜 광 경로 차나 위상관계에 의해 보강과 소멸을 일으키면서 생성되는 밝고 어두운 반점 모양인 스페클간의 간섭현상을 이용하여 대상체를 측정하는 방법이다. 측정원리는 레이저에서 발생된 빔이 빔 분리기(beam splitter)에 의해 두 빔으로 나누어져 한 빔은 CCD camera에 연속적으로 입사되는 기준빔(reference beam)이 되고 또 한 빔은 대상체에 조사되어 반사된 빔이 모여져서 CCD camera에 입사되는 물체빔(object beam)이 된다. 이 물체 빔과 기준 빔이 카메라의 앞에서 간섭을 일으키게 되고 이때의 이미지가 CCD 카메라의 수광소자에 입사된다. 측정체의 변형(진동)진후의 변위값은 변형 전 상태와 변형 후 상태 각각의 이미지를 상기방법에 따라 저장시켜 화상처리장치에서 그 차이를 계산함으로써 구하게 된다. 다음은 CCD camera

의 수광소자에 기록되는 변형 전과 변형 후 빔의 세기 분포식이다[6].

$$I_{before} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi$$

$$I_{after} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi)$$
(1)

여기서, R 와 I_R 은 물체빔과 기준빔의 강도이며, ϕ 와 $\Delta\phi$ 는 스페클의 위상과 변형된 위상이다. TV system은 물체에 변위가 일어나기 전 이미지의 세기 분포에 해당되는 전자적인 비디오 신호를 CCD의 수광소자를 통하여 화상처리장치의 메모리에 기록하고, 변위가 발생하면, 그에 상당하는 이미지의 강도 분포를 비디오 신호로 전환하여 변형전의 이미지 신호와 전자적으로 감산 처리한다. 출력 카메라의 신호 I_{before} 와 I_{after} 가 입력 화상의 강도에 비례하므로, 감산된 광의 강도는 식 (2)와 같다.

$$I = I_{before} - I_{after} = 2\sqrt{I_R I_O} [\cos \phi - \cos(\phi + \Delta\phi)]$$
(2)

이때, 빛의 휘도(brightness) 분포식은 식 (3)으로 정의되며 밝고 어두운 줄무늬 패턴이 나타나게 된다.

$$B = K \left| \sqrt{I_R I_O} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right|$$
(3)

3. 실험

3.1. 실험 장치

3.1.1. 시험편 및 하중부가 장치

본 연구에 사용되는 재료는 항공기의 구조재료로 많이 사용되는 비교적 항복강도가 높은 Al7075-T6 합금을 이용하였으며, 시험편의 형상은 Fig. 1에 표시된바와 같고 시험편의 두께 t 는 0.4mm이다. 가공된 평판 시험편은 x 축과 45° 균열을 주었으며, 균열길이 $2a = 20$ mm이고, 예리하고 정밀 가공이 되도록 짧은 시간동안 레이저 출력을 크게 할 수 있는 Q-switching 방법에 의한 레이저 가공을 하였다. 가공된 시험편 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

하중 부가 장치로는 시험편 하단 부에서 웜기어(Worm-gear)회전에 의해 강제 변위를 시험편에 가하는 방식의 하중 제어방식 하중 장치를 사용하였다. 부하능력이 1ton인 비교적 소형 경량의 1축 인장부하장치로서 상부의 로드 셀(load-cell)에 디지털 인디케이터(digital indicator)를 접속하여 실시간으로 하중을 읽을 수 있다.

Table 1 Material Properties of specimen

Young's Modulus (E)	allowable stress	Poisson's Ratio (ν)	Density (ρ)
68.67 GPa	492 MPa	0.31	2755 kg/m ³

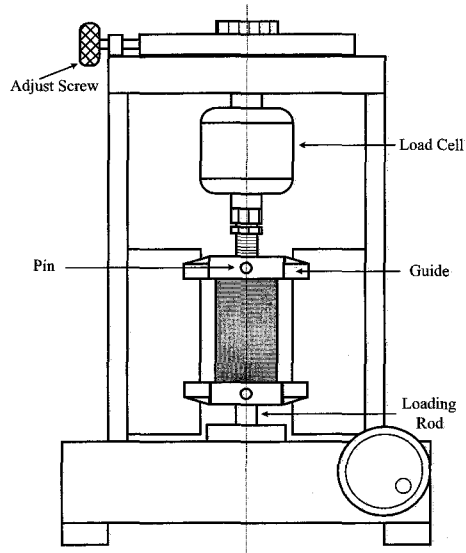
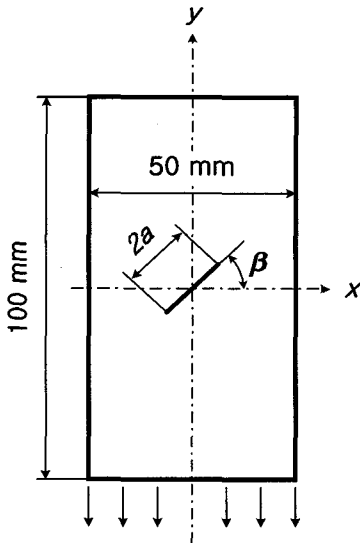


Fig. 1 45° Obliquely cracked plate and guide configuration

3.1.2. 간섭계 구성

ESPI 기법은 측정하고자하는 변위에 따라 크게 두 가지로 달라지며 본 연구에 사용된 간섭계는 면외변위에 민감한 간섭계를 구성하여 실험을 하였다. 광원은 Ar⁺ Laser(파장 514.5nm)이다.

3.1.3. 가진 시스템 및 화상처리장치

시험편의 정현 가진을 위하여, 시험편의 후면에서 스피커를 이용하여 가진하였다. 일반적인 스피커 가진과는 달리 본 연구에서는 가진 효과를 증대하기 위하여 Fig. 3과 같이 스피커의 전면에 콘을 부착하여, 음압의 집중을 유도하였다. 정현파 발생을 위해서 함수발생기를 사용하여 증폭기로 증폭시킨 후 이것을 스피커에 전달하였다. 화상처리 장치는 CCD camera에 의하여 전송되어 들어온 신호를 처리하는 장치로서 일본 NEXUS사의 QUBE을 이용하였으며, 기준 화상으로부터 변형 화상의 각각의 정보를

실시간 감산 처리하여 간섭 줄무늬를 얻는다.

3.2. 실험방법

시험편의 경계조건은 상하 양단고정으로 하였으며, 경계조건을 만족시키기 위하여 가공된 시험편을 예폭시 수지로 양단을 접착한 후 볼트로 고정하였다. 가진 레이저가 조사되는 시험편 뒷쪽에서 시험편의 후면을 가진하였다. 하중의 변화는 무부하상태, 경사크랙이 있는 상태에서의 항복응력의 10%(36 kgf), 20%(72 kgf), 30%(144 kgf)의 4가지 하중상태에 대하여 실험하였다. 고유 주파수 및 그 때의 진동 모드를 찾기 위하여 함수발생기로 주파수를 0Hz에서부터 서서히 증가하면서 특정 주파수에서 선명한 진동모드가 모니터에 출력되고, Nodal line이 가장 조밀할 때의 주파수를 고유주파수로 하여 측정하였다. Nodal line의 조밀한 정도는 1Hz 차이에서도 쉽게 구분할 정도의 줄무늬 변화가 나타난다. Fig. 4는 실험장치의 전체적인 구성도이다.

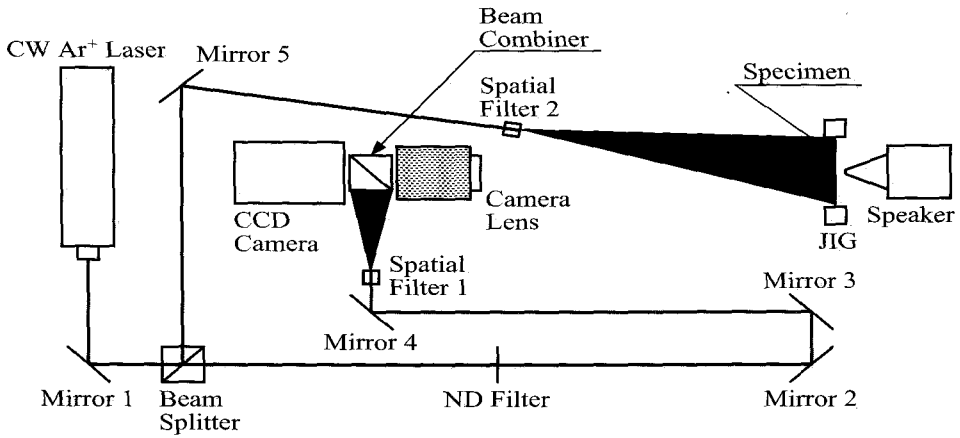


Fig. 2 Interferometer for measuring out-of-plane displacement

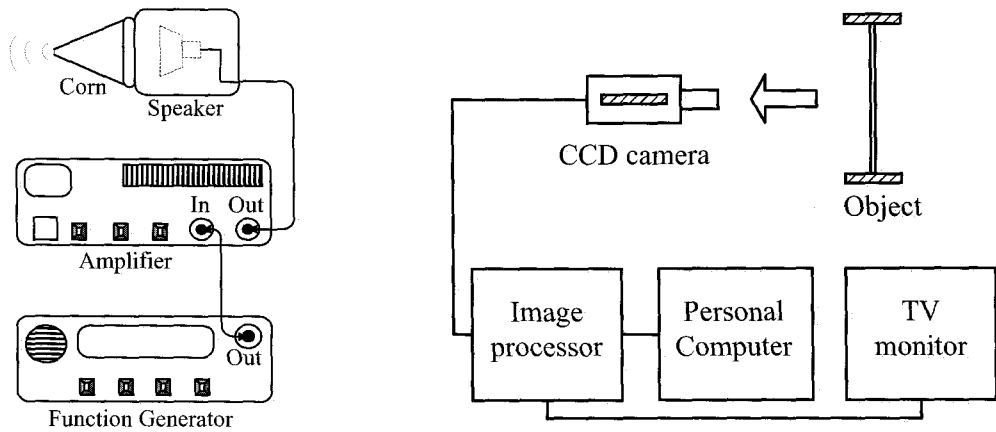


Fig. 3 Exciting system and image processing system

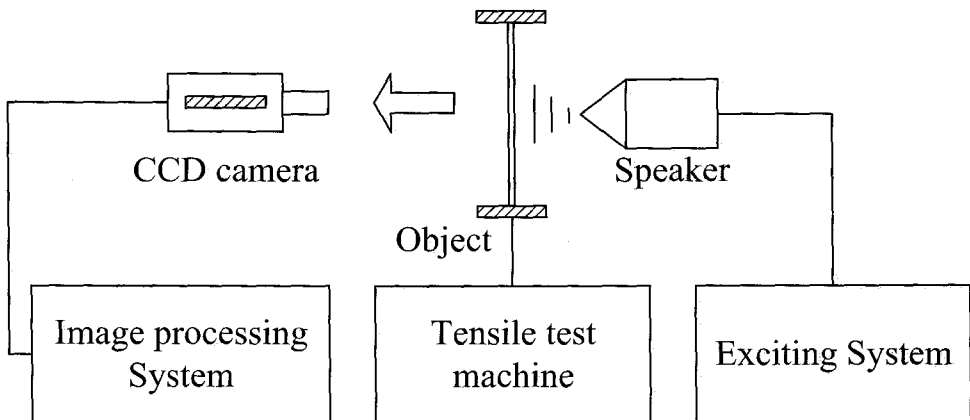


Fig. 4 Schematic of measurement system

4. 실험결과

4.1. Crack을 갖는 평판의 하중 증가에 따른 고유진동수 비교

진동 시험을 하는 가장 중요한 목적은 시스템의 고유진동수를 구하는데 있으며, 또 다른 중요한 이유는 시스템의 수학적 모델의 타당성을 검증하는데 있다. 그러나, 복잡한 형상, 복합적인 하중 상태 및 결함 등의 비선형적인 요소가 있는 경우에는 수학적 모델링 및 예측이 힘들어지고, 실험적인 기법이 적용되어야 한다. 본 연구에서는 검증 및 실험 기법으로 ESPI 기법을 제시하며, 수학적 방법으로 유한요소해석 결과를 얻어, 그 결과를 비교함으로써 그 신뢰성을 확인하였다. Fig. 6은 각 모드별 및 하중 변화에 따른 고유진동수의 변화를 유한요소 해석과 비교하여 보여 주고 있다. 결과는 5 %이내의 차이를

보여 주고 있다.

4.2. ESPI 기법과 유한요소 해석의 진동모드 비교

결함이 없는 평판의 유한요소 해석을 한 결과, 하중이 증가됨에 따라 진동 모드는 상하 좌우 대칭성의 예상한 진동 모드 변화를 보였다. 그러나, 경사 결함이 있는 경우, 다음 페이지의 Fig. 5에서와 같이 fringe pattern은 결함이 없는 평판과는 달리 Nodal line이 구부러지는 현상을 볼 수 있었으며, 하중이 증가할수록 강성 저하가 더욱 심화되고 Nodal line의 구부러지는 정도도 현저해졌다. 또한, 대각선 대칭으로 fringe pattern(진동모드)이 나타났다. ESPI 실험의 결과는 유한요소해석 결과와 비교하였으며, 모드의 형태는 모두 일치하였다. 유한요소 해석 프로그램은 상용 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였다.

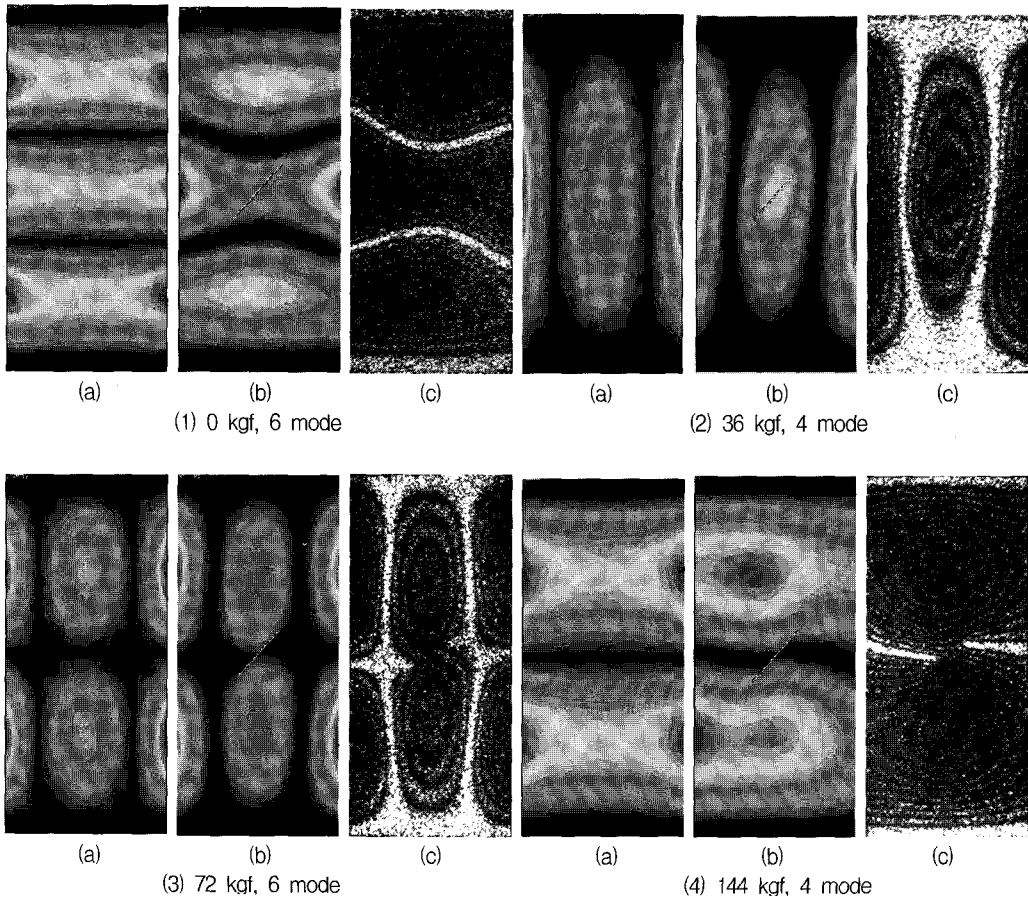


Fig. 5 Variation of vibration mode((a) Smooth plate(FEM), (b) Cracked(FEM), (c) Cracked(ESPI))

4.3. 인장하중을 받는 결함이 없는 평판과의 고유주파수 비교

균열이 없는 상태에서의 평판의 진동해석은 많은 연구가 되어 왔으며, 결과는 어느 정도 예상을 하고 있다. 본 연구에서는 경사 crack을 갖는 시험편의 ESPI기법을 적용한 결과가 유한 요소 해석과 잘 일치하고 있으므로, 결함이 있는 평판의 경우에도 적용 가능할 것으로 사료된다.

결함이 없는 평판과 45° 결함이 있는 평판의 유한요소

해석 비교 결과에서는 항복강도의 10 %의 인장력이 가해졌을 때는 고유주파수의 변화는 볼 수 없었으며, 20 %와 30 %가 가해졌을 때는 현저하게 고유주파수가 낮아지는 경향을 보였다. 결과로부터 지속적인 하중증가는 주요 손상의 원인이 되는 1 mode와 2 mode에서도 고유주파수 저하를 예상할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형적인 요소(결합) 및 복잡한 형상

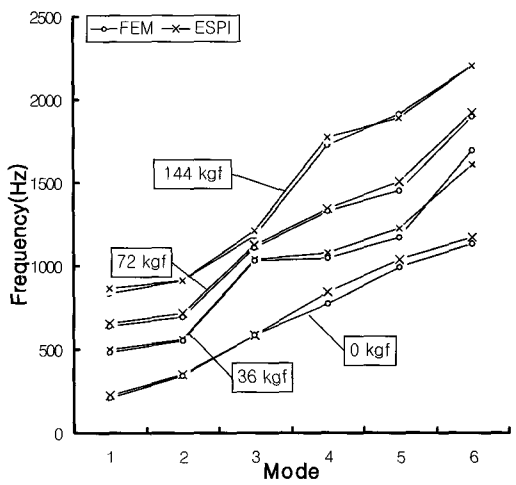
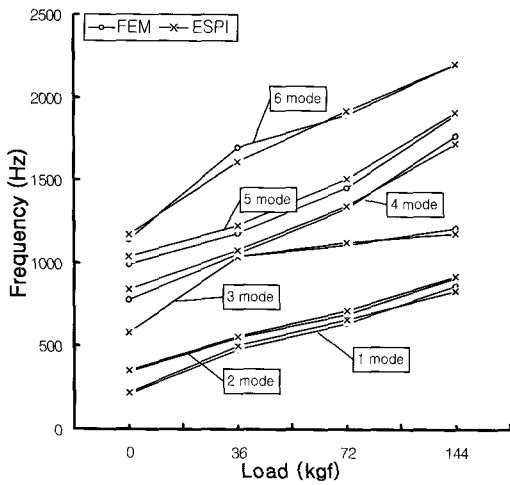


Fig. 6 Natural frequency of cracked plate under tension

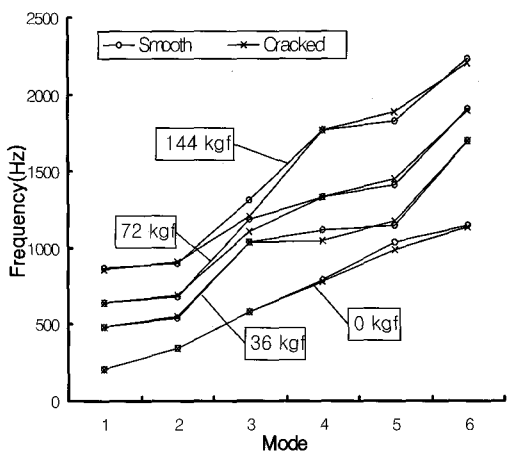
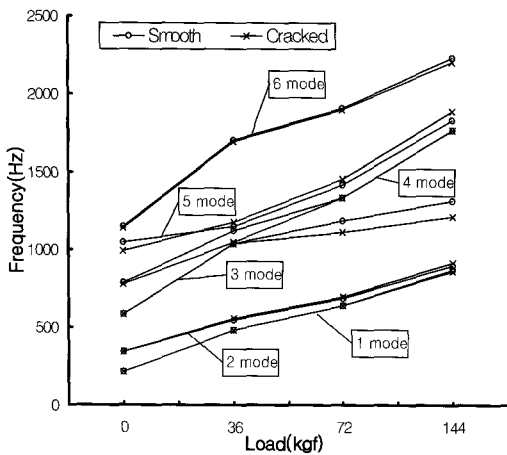


Fig. 7 Comparison of Natural Frequency

등으로 인해 수치해석이 어려운 대상체의 진동 해석을 위해, 실험적인 방법으로 ESPI 기법을 제시하였다. 시험편은 유한요소해석이 용이하도록 항공기 재료로 사용하는 Al7075-T6의 50×100 mm의 평판의 중앙에 45° 경사 균열을 인공적으로 가공하여 항복강도의 10%(36kgf), 20%(72kgf), 30%(144kgf)의 하중을 가한 상태에서 ESPI 기법에 의한 진동해석 결과와 유한요소 해석결과를 비교하였다.

1. ESPI 기법에서 얻은 고유진동수를 유한요소 해석 결과와 비교하여 5% 이내의 차이를 보였으며, 이는 실제 구조물의 진동역제 설계를 위한 검사 및 검증 기법으로 유용하다는 것을 알 수 있다.
2. 45° 경사 균열에 대한 영향으로 부분적으로 강성 저하가 생기며, 이로 인하여 진동 모드가 구부러지는 현상 및 대각선으로 대칭이 되는 현상을 알 수 있었으며, 하중이 증가함에 따라 그 정도가 심화되었다.
3. 결함이 없는 평판과 45° 결함을 가진 평판과의 고유진동수 비교로부터 항복 용력의 20%의 인장력을 가하였을 때, 현저하게 고유주파수가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 급격한 강성 저하가 원인이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 1999년 조선대학교 교내학술연구비 지원을 받아 연구 되었습니다.

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, 藤木 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] 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*, NY, The American Society of Mechanical Engineers, pp 215-220, (1994)
- [5] Lee, H.P., "Vibration of cracked rectangular plates including transverse shear deformation and rotary inertia," *Computer and Structures Elmsford, NY*, Pergamon Press, Vol. 49, No. 4, pp. 715~718, (1993)
- [6] Smith, Howard Michael, "Principles of Holography, 2nd Edition," John Wiley Sons, Inc, pp. 220~267, (1975)