실험 모드해석을 이용한 균열 적층복합판의 손상평가

Damage Evaluation of Cracked Laminated Composite Plates Using Experimental Modal Analysis

김 주 우¹⁾

Kim, Joo Woo

요 약 : 본 연구에서는 실험적 모드해석 기법을 이용하여 캔틸레버 및 양단고정 직사각형 적층복합판의 동적 테스트가 수행되었다. 균열 성장으로 인한 손상평가를 위하여 적층복합판에 인위적인 단계별 손상(균열)을 가하였으며, 충격해머 모드실험에 의해 얻어진 주파수응답함수(FRF), MAC(Modal Assurance Criterion) 값 및 모드매개변수(진동수, 모드형상, 감쇠비)의 변화를 분석하였다. 각 단계별 손상에 대한 적층복합판의 실험적 모드매개변수를 검증하기 위하여 유한요소해석으로부터 구한 고유진동수와 모드형상을 비교하였다. 손상은 벤치마크로서의 유한요소모델을 보정하는 과정으로부터 얻게 되는 적층복합판의 기하학적 특성 및 구조적 거동의 변화를 통하여 평가될 수 있음을 보여 주었다.

ABSTRACT : In this study, vibration tests are performed on cantilevered and clamped-clamped laminated composite rectangular plates using experimental modal analysis technique. The damages are simulated by applying progressive line cracks to the laminated composite plates for damage evaluations due to crack growth. The changes of frequency response functions(FRFs), MAC values, and modal parameters (frequency, mode shape and damping ratio) of the damaged composite plates, which are obtained by the modal testing of impact hammer, are investigated. Each experimental modal parameter of the progressively damaged composite plates is compared with natural frequencies and mode shapes obtained by finite element analysis. It is seen that the damage can be evaluated from the changes in the geometric properties and structural behaviors of the laminated composite plates resulting from the model updating process of the finite element model as a benchmark.

핵심용어 : 적층복합판, 실험 모드해석, 손상평가, 주파수응답함수(FRF), MAC, 모드매개변수, 균열성장

KEYWORDS : laminated composite plate, experimental modal analysis, damage evaluation, frequency response function(FRF), MAC, modal parameters, crack growth

1. 서론

지난 수십 년간 다양한 건설 분야에서 유리섬유 또는 탄소섬유로 보강된 복합재료의 이용이 급증하고 있는 실정이며, 특히 이러한 복합재료는 중량에 비해 상대적으로 상당히 큰 강도 또는 강성을 요구하는 구조물에서 더욱 폭넓게 적용되고 있다. 일반적으로, 복합재료 역시 여러 가지 등방성 재료와 마찬가지로 균열, 박리(delamination), 또는 인위적인 V노치 및 개구부 등과 같은 다양한 형태의 손상을 받게 된다(Gaderlab, 1996; Krawczuk 등, 1997; Ousset and Roudolff, 1997; 지효선 등, 2011).

구조물에 있어서 구조요소의 손상은 현재 또는 미래에 구조물의 성능을 저하시키는 구조시스템의 변화로 정의되며, 구조물의 손상 탐지 문제는 일반적인 구조식별(System Identification(SI)) 문제의 특별한 경우로 생각될 수 있다. 수치해석에 있어서 일반적인 SI 문제가 이미 알고 있는 하중 및 응답조건을 사용하여 미지의 시스템 변수(질량, 강성, 감쇠 행렬의 미지의 부분)를 결정하는 것임에 비해, 실험적 모드해석을 통한 손상발견 문제는 서로 다른 두 상태(즉, 손상 전과 후)의 구조물에서 모드매개변수(고유진동수, 모드형상, 감쇠비)와 같은 구조시스템 변수의 변화를 통해 손상을 탐지하고자 하는 것이다.

1) 교신저자. 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
(Tel: 043-649-1329, Fax: 043-649-1755, E-mail: jw_kim@semyung.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

다양한 반복하중을 받는 적층복합판으로 구성된 구조요소의 갑작스런 파괴는 균열진전(crack propagation) 또는 박리진전(delamination propagation)의 결과로서 생각될 수 있다. 이러한 이유로 진전 초기단계로부터 손상을 탐지하는 것이 매우 중요하다. 진동실험은 여러 가지 형태의 구조물에서 구조요소의 다양한 파괴를 파악하는데 매우 빠르고 효과적인 방법으로 인식된다(Adams 등, 1978).

진동실험을 통해 균열과 박리를 발견하기 위해서는 손상으로 인한 구조물의 동적특성의 변화를 면밀히 분석하는 것이 필요하다. 구조요소의 손상은 모드매개변수, 강제진동의 진폭, 및 진동모드의 결합(coupling) 등에 변화를 가져온다. 손상된 구조부재의 동적특성은 손상의 위치와 크기에 상관관계가 있으며(Papadopoulos 등, 1987; Shen 등, 1990), 이러한 관계는 구조물의 안전진단을 위해 사용될 수 있다(Bently 등, 1986; Ju 등, 1988). Adams 등(1978)은 복합재료로 만든 실험체의 손상은 고유진동수의 감소와 감쇠비의 증가로부터 탐지될 수 있다는 것을 알아내었다. 또한 Manivasagam 등(1992)도 실험을 통해 균열에 의해 손상된 적층복합판의 기본진동수(fundamental frequency)가 감소됨을 제시하였다. 지난 30여 년간 건축 및 토목 구조물의 동적특성에 기초한 손상평가 및 건전도 모니터링(Structural Health Monitoring(SHM)) 분야에서 괄목할 만한 연구가 이루어졌으며(Richardson 등, 1974; Banks 등, 1996; Wang 등, 1997; Straser 등, 1998; Parloo 등, 2003; Catabas 등, 2008; 윤성원 등, 2010), 이는 지능형 구조물(Smart Structure)에 관련한 기술의 잠재적 적용 성으로 인해 매우 중요한 부분을 차지한다.

이러한 이유로 본 연구에서는 수치해석 및 실험적 모드해석을 통해 균열로 인한 적층복합판의 모드매개변수의 변화를 알아보고, 이를 통한 손상평가를 수행하고자 하였다. 유리섬유와 에폭시를 이용한 적층복합판이 제작되었으며, 유한요소해석을 위하여, 제작된 복합판의 이방성 재료특성을 인장시험을 통해 알아내었다. 고정단을 포함하는 직사각형 적층복합판(즉, 캔틸레버 및 양단고정 판)의 균열성장(crack growth)으로 인한 손상평가를 위하여 실험대상의 직사각형 적층복합판에 인위적인 단계별 손상을 가하였다. 또한 실험적 모드해석결과와의 비교 및 모델개선(model updating)을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(2011)를 이용한 해석모델이 제시되었다.

2. 이론적 배경

2.1 적층복합판의 고유치 이론

그림 1과 같이 길이가 a , 폭이 b , 두께가 h 인 직사각형 적층

복합판을 고려할 때, 동적 에너지는 한개 층의 두께가 t_p 이고 섬유배향각이 θ 인 N 개의 직교이방성 층으로 구성된 판에 대해서 유도될 수 있다. 복합판 한개 층에 대한 섬유의 길이방향($\theta = 0^\circ$)의 탄성계수는 E_{11} , 섬유의 길이방향과 직각($\theta = 90^\circ$)인 탄성계수는 E_{22} 로 각각 정의된다. 여기에서 적층복합판의 각층은 완전히 부착된 무한히 얇은 접착면으로 형성되어 어떠한 면내전단변형도 일어나지 않는다고 가정한다.

그림 1. 직사각형 적층복합판

그림 1에서와 같이 3차원의 면내변위(u, v)와 면외변위(w)가 각각 x, y, z 축으로 일어난다고 볼 때, 변형률 벡터 $\{\epsilon\}$ 은 다음 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T \quad (1)$$

적층복합판에 대해서, p 번째 층의 응력 벡터는 식(2)와 같다.

$$\{\sigma\}_{(p)} = [Q]_{(p)} \{\epsilon\} \quad (2)$$

여기서 $\{\sigma\}_{(p)} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}_{(p)}^T$ 이고 $[Q]_{(p)}$ 는 적층판의 직교이방성에 대한 강성행렬 계수이다(김주우, 2006 참조).

식 (1)과 (2)를 이용하여 복합적층판의 전체 체적에 대한 변형률에너지는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \iiint \{\sigma\}_{(p)}^T \{\epsilon\} dV \quad (3)$$

여기서, $dV = dxdydz$ 이다.

적층복합판의 총 운동에너지는

$$T = \frac{1}{2} \iiint \rho_{(p)} (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dV \quad (4)$$

여기서, $\rho_{(p)}$ 는 p 번째 층의 밀도를 나타내고 점($\dot{\cdot}$)은 시간에 대한 미분을 나타낸다.

수학적으로 완전한 허용함수(mathematically complete and admissible function)로 가정한 변위함수를 식 (3)과 (4)에 적용한 후, 변위함수에 포함되어있는 미결정된 계수에 대해 최소화 과정을 거치게 되면 질량과 강성 행렬을 포함하는 고유치 방정식을 얻게 되며, 이 식을 통하여 적층복합판의 진동수와 모드형상을 위한 자유진동 문제를 해결하게 된다.

2.2 손상평가 이론

구조물의 손상평가는 손상되지 않은 구조물과 손상된 구조물의 모드실험으로부터 얻어낸 서로 다른 두 세트의 고유치벡터를 이용하는 MAC(Modal Assurance Criterion) 테크닉을 이용하여 수행될 수 있으며, 다음 식 (5)로 나타낸다(Allemang and Brown, 1982).

$$MAC(\{\psi_r\}_i, \{\psi_c\}_j) = \frac{|\{\psi_r\}_i^T \{\psi_c^*\}_j|^2}{(\{\psi_r\}_i^T \{\psi_r^*\}_i)(\{\psi_c\}_j^T \{\psi_c^*\}_j)} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

여기서, N : 측정 점에 따른 전체 좌표 수

$\{\psi_r\}$: 첫 번째 모드형상(손상되지 않은 구조물)

$\{\psi_c\}$: 두 번째 모드형상(손상된 구조물)

첫 번째 데이터 세트 $\{\psi_r\}_i$ 의 i 번째 모드와 두 번째 데이터 세트 $\{\psi_c\}_j$ 의 j 번째 모드 사이의 상관성(correlation)을 결정해주는 식 (5)의 MAC 값은 최적 직선에 대한 최소제곱편차(least-squares deviation)를 계산함으로써 구해진다. MAC 값은 두 개의 모드 세트가 일치하면 1.0의 값으로 표현되는데, 이것은 두 개의 구조물이 동일하다는 것, 즉 손상이 발생되어 있지 않은 것으로 분석될 수 있는 것을 의미한다. 만약 두 개의 모드가 일치하지 않는다면 MAC 값은 1.0 미만이며, 이러한 값을 이용해서 구조물에 대해 손상정도를 평가할 수 있게 된다.

3. 실험 모드해석

3.1 실험대상 적층복합판

본 연구를 위하여 그림 2와 같이 길이 $a = 180\text{mm}$, 폭 $b = 90\text{mm}$, 한 층의 두께 $t_p = 3.18\text{mm}$ 인 캔틸레버(그림 2(a)) 및 양단고정(그림 2(b)) 직사각형 적층복합판을 대상 시험체로 채택하였다. 적층복합판은 E-glass 조성의 유리섬유와 이를 고정시키기 위한 에폭시(E-glass/epoxy)를 이용하여 제작되었으며, 복합판의 적층수는 단층(single-layer)과 3층(three-layer)으로 두 가지 경우를 고려하였다. 단층 복합판 한 개 층에 대한 일 방향 섬유배향각 θ 는 각각 0° 와 90° 로 하였으며, 3층 적층복합판에 대해서는 적층순서를 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ 로 하여 각층에 대한 직교이방성의 재료적 특성을 포함시켰다.

균열성장 또는 진전으로 인한 손상평가를 위하여 3층 캔틸레버 적층복합판에 대해서 최대휨모멘트가 발생하는 지지단부(그림 2(a) 참조)에 인위적인 단계별 선균열(line crack) 형태의 손상을 가하였고, 양단고정 적층복합판에는 중앙(그림 2(b) 참조)에 같은 방법으로 손상을 가하였다. 여기에서 적층복합판에 가해지는 균열의 크기 $c = 22.5\text{mm}, 45.0\text{mm}, 67.5\text{mm}, 90.0\text{mm}, 112.5\text{mm}, 135.0\text{mm}$ 의 6단계로 나누었다. 각 손상 단계별로 주파수응답함수(Frequency Response Function; FRF)와 모드매개변수를 얻기 위하여, 입력가진을 위한 충격해머와 출력응답을 위한 가속도계를 이용한 모드실험이 수행되었다.

(a) 캔틸레버 적층복합판

(b) 양단고정 적층복합판

그림 2. 적층복합판의 경계조건

3.2 실험방법

캔틸레버 및 양단고정 직사각형 적층복합판에 대한 실험적 모드해석의 가진을 위하여 충격해머(impact hammer)를 이용하였으며, 해머에 의해 발생하는 임펄스(impulse) 가진에 대한 응답으로부터 적층복합판의 모드매개변수를 구하였다. 충격해머에 내장된 힘변환기는 사용되는 해머 팁의 경도에 따라 민감도(sensitivity)가 변화하며, 본 실험에서는 중저주파수대역의 가력을 위해 중간경도의 경도를 갖고 있는 플라스틱 팁을 사용하여 가진하였다. 또한 가진에 의한 전기적 신호상태의 응답을 받아들이기 위하여 가속도계를 사용하였다.

본 연구에서 수행된 실험과정은 충격해머의 타격점(driving point)을 한 점에 고정시켜 가진함으로써 입력신호를 측정하고, 출력신호는 가속도계를 옮겨가며 받아들이는 단독입력-다중출력(Single Input-Multi Output: SIMO) 방법으로 설명될 수 있다. 캔틸레버 및 양단고정 직사각형 적층복합판의 출력신호를 측정하기 위하여 계측점을 그림 3(a)와 같이 총 14개소로 구성하였으며, 이 점들에서 적층복합판의 휨모드를 고려하기 위하여 평면에 대한 수직(z 축)방향으로 응답가속도를 측정하였다. 충격해머의 타격점은 가진으로 인한 떨림 현상이 비교적 적게 일어나는 지지단 근처로 하여(즉, 그림 3(a)와 (b)에서 1번 측정점) 이중타격(double hit)으로 인한 오차를 최소화 하였다.

충격해머의 입력신호와 가속도계의 응답신호를 증폭 및 필터링하여 종합적으로 취득 및 기록하고 시간영역과 주파수영역에서의 신호변환 및 모드해석을 수행하여 모드매개변수를 추정하였다. 실험 모드해석을 위한 실험과정 및 실험장비와 모드해석 소프트웨어(Smart Office Analyzer, ver. 4.0)가 그림 4에 묘사되어있다.

효율적인 실험을 수행하기 위하여 적층복합판에 대한 유한요소해석을 선행하였으며, 그 결과 실험 데이터 수집을 위한 주파수 대역 및 샘플링 수, 측정시간 등을 표 1과 같이 정하였다. 출력신호의 누설(leakage)을 최소화하기 위하여 직사각형 창(rectangular window) 함수를 사용하였으며, 불규칙한 신호의 랜덤 오차(random error)를 최소화하기 위하여 4회 가진의 평균값을 사용하였다. 실험오차를 최소화시키고 실험결과에 대한 정확성을 높이기 위해 각각의 시험체에 대해서 3회 이상의 반복실험을 수행하였다.

(a) 캔틸레버 적층복합판

(b) 양단고정 적층복합판

그림 3. 가진 및 응답 측정점

그림 4. 실험 set-up 및 과정

표 1. 데이터 수집 및 분석 조건

Data Analyzer	Window: Rectangular Averages: 4 times Number of samples: 1024 Sampling frequency: 3200Hz Maximum Frequency: 1250Hz Measurement Time: 0.32sec
---------------	---

3.3 분석과정

그림 5는 손상을 가하지 않은 캔틸레버 및 양단고정 3층 적층복합판의 14군데의 계측점(그림 3 참조)에서 측정된 입력 및 출력 데이터를 이용하여 산정된 각각의 주파수응답함수를 오버레이(overlay)한 전형적인 모습이다. 그림 5(a)와 5(b)에서 5Hz 미만의 데이터는 실험과정에서의 잡음 또는 데이터의 누설로 판단하였으며, 캔틸레버 적층복합판의 경우 주파수응답함수 영역 5Hz~400Hz와 양단고정 복합판인 경우 5Hz~700Hz를 첨두치(peak value) 영역으로 설정하여 직교다항식(orthogonal

polynomial)을 이용한 커브피팅(curve fitting)을 수행함으로써 모드매개변수를 구하였다. 여기에서 각각의 영역에 4개의 피크가 존재함을 볼 수 있다.

앞 절에서 언급한바와 같이, 균열성장 또는 진전으로 인한 손상평가를 위하여 캔틸레버 및 양단고정 3층 적층복합판에 인위적인 단계별 손상(균열)을 가하였으며, 손상을 가하지 않은 적층복합판에서와 같은 실험을 수행하였다. 그림 6은 캔틸레버 및 양단고정 적층복합판에 균열의 길이를 0mm, 22.5mm, 67.5mm, 112.5mm로 증가시킨 경우, 주파수응답함수의 변화를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 주파수응답함수의 피크값들이 경계조건에 관계없이 균열의 크기가 증가할 때 왼쪽으로 이동하는(즉, 진동수 값이 작아지는) 현상을 볼 수 있으며, 이는 주파수응답함수의 변화를 면밀히 분석함으로써 손상의 크기뿐만 아니라 위치까지 추정할 수 있는 가능성을 의미하는 것이다.

(a) 캔틸레버 적층복합판

(b) 양단고정 적층복합판

그림 5. 주파수응답함수의 overlay 및 커브피팅

그림 7에 손상되지 않은 캔틸레버 적층복합판(Base Mode로 정의)과 각각 45.0mm, 90.0mm, 135.0mm의 균열길이를 포함하는 적층복합판(Ref. Mode로 정의) 간의 MAC 테크닉의 수행 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7로부터 균열길이가 비교적 작은 45.0mm인 경우 MAC 값(표에서 대각선 항)이 고차 모드로 갈 때 감소하지만, 모든 모드에서 1.0에 근접한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 반면, 균열길이가 증가할 경우 MAC 값은 더욱 감소하여 1.0보다 훨씬 작아지는 경향을 보이고 있

으며, 이는 모드 간의 상관관계의 정도가 떨어지고 있음을 나타낸다. 이는 MAC 값의 변화를 면밀히 분석함으로써 손상의 크기뿐만 아니라 위치까지 추정할 수 있음을 의미하는 것이다.

(a) 캔틸레버 적층복합판

(b) 양단고정 적층복합판

그림 6. 균열길이에 따른 주파수응답함수

(a) $c = 45.0\text{mm}$

(b) $c = 90.0\text{mm}$

(c) $c = 135.0\text{mm}$

그림 7. 균열길이에 따른 캔틸레버 적층복합판의 MAC 값

(a) $c = 45.0\text{mm}$

(b) $c = 90.0\text{mm}$

(c) $c = 135.0\text{mm}$

그림 8. 균열길이에 따른 양단고정 적층복합판의 MAC 값

4. 유한요소해석

4.1 복합판의 재료특성

본 연구에서 제작된 일 방향 섬유보강 복합판에 대한 섬유의 길이방향의 탄성계수 E_{11} 과 섬유의 길이방향과 직각인 탄성계수 E_{22} (그림 1 참조) 및 프와송 비 ν_{12} 를 구하기 위하여, 섬유배향각 $\theta = 0^\circ$ 인 경우와 $\theta = 90^\circ$ 인 유리섬유 보강 에폭시(E-glass/epoxy) 시편을 3개씩 제작하여 인장시험을 수행하였다. 이에 따른 선형적인 응력-변형률 관계가 그림 9에 나타나 있다. 인장시험으로부터 발생된 섬유방향과 섬유직각방향의 최종 파단 모습을 그림 10에서 보여주고 있다.

또한 일 방향 섬유보강 복합판의 전단탄성계수를 구하기 위하여 섬유배향각 θ 가 45° 인 인장시편 3개가 추가로 제작되었으며, 그림 1에서의 x -축 방향으로 인장력을 가하는(즉, 섬유방향과 힘의 방향이 45° 로 형성되는) 인장시험을 수행하였다. 식(6)은 이러한 시험결과로부터 전단탄성계수 G_{12} 를 구하는 식을 보여주고 있으며, 유한요소해석에 필요한 E-glass/epoxy 복합판의 재료 및 기하학적 특성이 표 2에 요약되어 있다.

$$G_{12} = \frac{E_{xx}}{2(1 + \nu_{xy})} \quad (6)$$

여기서,

E_{xx} = x -축 방향에 대한 탄성계수

ν_{xy} = xy 평면내의 프와송비

(a) $\theta = 0^\circ$

(b) $\theta = 90^\circ$

그림 9. E-glass/epoxy의 응력-변형률 관계

(a) $\theta = 0^\circ$

(b) $\theta = 90^\circ$

그림 10. E-glass/epoxy 인장시편의 파괴모드

표 2. E-glass/epoxy의 재료특성

E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	Density (kg/m ³)	두께 (mm)
9.6×10^3	5.5×10^3	2.1×10^3	0.26	1,500	3.18

4.2 유한요소 해석모델

앞 절의 인장시험으로부터 구한 복합판의 재료특성과 범용 유한요소 소프트웨어인 ANSYS(2008)를 이용하여 단층 및 3층 복합판에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 그림 11은 캔틸레버 및 양단고정 3층 적층복합판의 재료 및 기구학적 특성이 고려된 8절점 Shell 281 요소를 이용한 유한요소 모델을 고정단의 경계조건과 함께 나타낸 것이다. 균열 적층복합판의 손상평가를 수행하기 전, 모드실험 결과의 정확성을 검증하기 위하여 균열이 고려되지 않은 단층 및 3층 복합판에 대한 유한요소해석이 선행되었다.

표 3은 단층 및 3층 캔틸레버 적층복합판에 대해 모드실험을 통해 구한 진동수 결과를 유한요소해석을 이용하여 구한 1차 모드에서 4차 모드까지 진동수 결과의 비교를 제시하고 있다. 단층 복합판의 경우 섬유배향각(θ)이 0° 인 경우와 90° 인 경우를 각각 고려하였고, 3층 적층복합판에 대해서는 각층의 섬유배향각을 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ 로 하여 각층에 대한 직교이방성의 재료적 특성을 고려하였다.

그림 11. 3층 적층복합판의 유한요소모델

표 3으로부터 이상화된 유한해석모델을 이용한 전체 모드에서의 진동수 값이 모드실험을 통한 진동수 값보다 다소 크게

나타났음을 알 수 있는데, 이는 제작된 적층복합판 시험체에 포함되어 있는 여러 가지 결함으로 인한 강성의 저하를 의미한다고 볼 수 있다. 단층 캔틸레버 복합판의 경우 모든 모드에서 섬유배향각이 0° 인 경우의 진동수 값이 90° 인 경우의 진동수 값보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 전자가 후자보다 더 큰 강성을 지니고 있음을 의미하는 것이며, 강성이 가장 클 것으로 예상된 3층 적층복합판의 진동수가 가장 크게 나타났음을 알 수 있다. 단층 복합판의 경우 모드실험과 유한요소해석의 진동수의 차이가 2.69%~15.56% 범위에 있어 모드에 따라서 비교적 큰 차이를 보이고 있는 반면, 3층 적층복합판의 경우 2.26%~9.43% 범위로 비교적 근접한 결과를 보이고 있다.

표 4의 캔틸레버 적층복합판의 진동수 값보다 더 큰 값을 갖는 양단고정 적층복합판의 경우에서도 캔틸레버 복합판의 진동수 값의 변화와 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있으며, 3층 적층복합판의 경우 2.82%~4.02% 범위로 매우 근접한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 결과를 기초로 하여 균열 적층복합판의 손상평가를 수행하기 위하여 3층 복합판에 인위적인 단계별 균열 손상을 가하여 모드실험과 유한요소해석을 병행하여 수행하였다.

표 3. 캔틸레버 적층복합판의 고유진동수의 비교(단위 : Hz)

No. of layers (Fiber orientation angle)	Method	Mode Number			
		1	2	3	4
Single-Layer (0°)	Exp. ⁺	8.43	30.82	51.62	98.27
	FEA ⁺⁺	9.24	31.65	57.73	106.57
	Diff. (%)	9.61	2.69	11.84	8.45
Single-Layer (90°)	Exp.	6.04	26.69	41.23	94.64
	FEA	6.98	30.21	43.67	98.25
	Diff. (%)	15.56	13.19	5.92	3.81
Three-Layer ($0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$)	Exp.	28.72	91.37	176.05	313.84
	FEA	29.37	99.99	182.67	335.30
	Diff. (%)	2.26	9.43	3.76	6.84

⁺Experimental modal analysis; ⁺⁺Finite element analysis

표 4. 양단고정 적층복합판의 고유진동수의 비교(단위 : Hz)

No. of layers (Fiber orientation angle)	Method	Mode Number			
		1	2	3	4
Single-Layer (0°)	Exp. ⁺	48.68	79.61	127.19	160.14
	FEA ⁺⁺	58.92	82.81	162.28	197.83
	Diff. (%)	21.04	4.02	27.59	23.54
Single-Layer (90°)	Exp.	41.08	71.84	112.64	153.40
	FEA	44.56	73.05	122.74	166.86
	Diff. (%)	8.47	1.68	8.97	8.77
Three-Layer ($0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$)	Exp.	193.84	267.88	525.70	638.50
	FEA	186.04	260.32	507.91	617.16
	Diff. (%)	4.02	2.82	3.38	3.34

⁺Experimental modal analysis; ⁺⁺Finite element analysis

5. 실험 및 해석결과 분석

표 5는 균열손상의 크기에 따라 수행된 모드실험으로부터 구한 캔틸레버 3층 적층복합판(그림 2(a) 참조)의 모드매개변수(모드형상, 고유진동수, 감쇠비)를 나타내고 있다. 손상되지 않은($c = 0$) 적층복합판의 모드형상은 낮은 진동수 구간부터 1차 휨, 1차 비틀림, 2차 휨, 2차 비틀림 순으로 나타나며, x -축과 y -축에 대해서 대칭성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

표 5로부터 상대적으로 작은 균열길이인 $c = 45.0\text{mm}$ 의 손상이 가해진 경우 전체 모드에서 유사한 변형형상을 보이고 있으나, 대칭성이 어느 정도 상실되었음을 볼 수 있다. 손상의 크기가 증가하게 되면(즉, $c = 90.0, 135.0\text{mm}$) 각 모드에서 휨과 비틀림 모드형상이 복합적으로 일어나게 되면서 대칭성 상실이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 표 6은 캔틸레버 3층 적층복합판의 유한요소해석 결과를 보여주고 있으며, 표 5의 실험결과와 비교할 때 매우 유사한 모드형상을 나타내고 있다.

표 7과 표 8은 양단고정 3층 적층복합판(그림 2(b) 참조)에 대해 균열손상의 크기에 따라 수행된 실험과 해석결과를 나타내고 있으며, 전반적으로 높은 진동수와 낮은 감쇠비 범위에서 캔틸레버 적층복합판의 모드거동과 유사함을 볼 수 있다. 다만, 균열길이가 상당히 큰 90.0mm 와 135.0mm 인 경우 유한요소해석 결과와 대응하는 실험 결과가 획득되지 못했음을 주지해야 한다.

그림 12와 그림 13은 각각 캔틸레버와 양단고정 3층 적층복합판에 대해 균열비(c/a)의 증가에 따른 실험과 해석을 통한 1차에서 4차 모드까지의 진동수 값의 변화를 보여주고 있다. 전반적으로, 균열비에 따른 실험값과 해석값의 변화가 매우 유사하며, 그 차이가 크지 않음을 볼 수 있다.

예상한바와 같이, 그림 12와 그림 13으로부터 경계조건에 관계없이 균열의 크기가 증가할 경우 진동수 값은 감소하며, 양단고정 적층복합판의 2차와 3차 모드를 제외하고는 단조적인(monotonic) 감소를 보이고 있다. 특히 양단고정 3차 모드에서의 진동수 값의 감소가 가장 크게 나타났다. 캔틸레버 적층복합판의 2차와 4차 모드(각각 1차 및 2차 비틀림 모드형상)에서는 균열비가 커질 경우 실험값과 해석값에서의 차이가 커짐을 볼 수 있다.

일반적으로 실제 구조물의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 이상화된 구조모델을 사용하는 해석보다는 실험을 통해 실제 상황에서 측정된 값을 보다 신뢰할 수 있다. 하지만 이러한 실험값들이 유지관리를 위한 구조물의 손상파악, 건전도 등의 예측에 활용되기 위해서는 신뢰도 높은 해석모델이 요구된다. 이에 따라 실험을 통해 얻어진 모드 데이터를 기반으로 해석모델의 매개변수를 보정해주는 모델보정(Model updating)이 필요하다. 이러한 구조물의 모델보정에 관한 지속적인 실험 및 수치적 연구의 진행이 필요할 것이다.

표 5. 균열길이에 따른 캔틸레버 3층 적층복합판의 실험적 모드매개변수

Mode number	Crack length c (mm)			
	0.0	45.0	90.0	135.0
1
	28.72Hz*, 2.39%**	26.38Hz, 1.96%	22.39Hz, 2.45%	15.69Hz, 1.13%
2
	91.37Hz, 2.05%	87.65Hz, 1.65%	75.86Hz, 1.87%	55.03Hz, 1.79%
3
	176.05Hz, 2.57%	172.93Hz, 2.25%	155.39Hz, 1.36%	125.98Hz, 1.90%
4
	313.84Hz, 2.27%	294.92Hz, 2.06%	249.98Hz, 1.97%	217.08Hz, 1.77%

*Frequency value; **Damping ratio

표 6. 균열길이에 따른 캔틸레버 3층 적층복합판의 유한요소해석 모드매개변수

Mode Number	Crack length c (mm)			
	0.0	45.0	90.0	135.0
1
	29.37Hz*	22.92Hz	20.70Hz	17.13Hz
2
	99.99Hz	92.82Hz	82.99Hz	65.88Hz
3
	182.67Hz	143.45Hz	134.55Hz	102.89Hz
4
	335.30Hz	303.43Hz	218.85Hz	122.87Hz

*Frequency value

표 7. 균열길이에 따른 양단고정 3층 적층복합판의 실험적 모드매개변수

Mode Number	Crack length c (mm)			
	0.0	45.0	90.0	135.0
1
	193.84Hz*, 0.62%**	191.54Hz, 0.62%	173.39Hz, 0.61%	155.5Hz, 2.0%
2
	267.88Hz, 0.78%	263.94Hz, 0.83%	258.51Hz, 0.85%	237.57Hz, 1.57%
3
	525.70Hz, 1.18%	520.79Hz, 1.08%	341.76Hz, 0.93%	258.09Hz, 1.57%
4			-	-
	638.50Hz, 0.84%	601.44Hz, 0.81%	-	-

*Frequency value; **Damping ratio

표 8. 균열길이에 따른 양단고정 3층 적층복합판의 유한요소해석 모드매개변수

Mode Number	Crack length c (mm)			
	0	45	90	135
1
	186.04Hz*	157.98Hz	145.17Hz	131.32Hz
2
	260.32Hz	245.24Hz	242.62Hz	218.90Hz
3
	507.91Hz	434.04Hz	317.10Hz	240.85Hz
4
	617.16Hz	549.39Hz	502.72Hz	490.21Hz

*Frequency value

(a) Mode 1

(b) Mode 2

(c) Mode 3

(d) Mode 4

그림 13. 균열 손상된 양단고정 3층 적층복합판의 고유진동수 변화

(c) Mode 3

(d) Mode 4

그림 12. 균열 손상된 캔틸레버 3층 적층복합판의 고유진동수 변화

(a) Mode 1

(b) Mode 2

6. 결론

본 연구에서는 캔틸레버 및 양단고정 직사각형 적층복합판에 대해 충격해머를 이용한 실험적 모드해석을 수행하였으며, 측정된 실험 데이터의 분석을 통해 주파수응답함수와 모드매개변수를 구하였다. 이러한 실험의 적합성 및 신뢰성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 병행하였으며, 손상평가가 벤치마크로서의 유한요소모델을 보정하는 과정으로부터 얻어지는 적층복합판의 기하학적 특성 및 구조적 거동의 변화를 통하여 이루어졌다.

균열성장으로 인한 손상평가를 위하여 적층복합판에 인위적인 단계별 손상(균열)을 가하였으며, 주파수응답함수, MAC 값 및 모드매개변수의 변화를 분석하였다. 주파수응답함수의 피크값과 MAC 값은 균열의 크기에 따라 변화하며, 이를 통하여 적층복합판의 손상의 크기 및 위치가 파악될 수 있었다. 손

상의 크기가 증가할 경우, 캔틸레버 및 양단고정 적층복합판 자체의 강성의 저하로 인해 고유진동수가 감소하였다. 비대칭으로 가해진 손상의 위치로 인해 적층복합판의 모드형상은 휨과 비틀림의 복합적인 형태로 나타났다.

본 연구 결과는 실제 구조물의 손상의 크기 및 위치를 정확히 파악하기 위해서는 실험과 해석이 병행되어야 하며, 실험을 통해 얻어진 모드매개변수 데이터를 기반으로 해석모델의 모드 결과를 보정해주는 과정이 반드시 필요하다는 것을 보여주고 있다. 특히, 현 결과는 앞으로 더욱 복잡한 형태의 구조물의 실험 모드해석 및 유한요소해석을 이용한 모델보정, 손상평가 및 SHM 기법을 위한 기초적 자료로서 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년 세명대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- 김주우(2006) 고정과 자유경계조건의 조합을 고려한 직사각형 복합적층판의 3차원 진동해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp.161-171.
- 윤성원, 박용(2010) 실측을 통한 건물의 손상 전후 진동특성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.445-453.
- 지효선, 이상열(2011) 중앙개구부를 갖는 복합신소재 적층구조의 비선형 동적거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.607-614.
- Adams, R.D., Cawley, P., Pye, C.J., and Stone, J. (1978) A Vibration Testing for Non-destructively Assessing the Integrity of a Structures, *Journal of Mechanical Engineering and. Science*, Vol. 20, pp.93-100.
- Allemang, R.J. and Brown, D.L. (1982) A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, USA, pp.110-116.
- ANSYS (2011) *Reference manual*, Ver. 13.0.
- Banks, H.T., Imman, D.J., Leo, D.J., and Wang. Y. (1996) Experimentally Damage Detection Theory in Smart Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, pp.859-880.
- Bently, D.E. and Muszyńska, A. (1986) Detection of Rotor Cracks, *Proceedings of the 15th Turbomachinery Symposium*, Corpus Christi, USA, pp.129-139.
- Catabas, F.N., Gul, M., and Burkett, J. (2008) Conceptual Damage-sensitive Features for Structural Health Monitoring: Laboratory and Field Demonstrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, No. 7, pp.1650-1669.
- Gadelrab, R.M. (1996) The Effect of Delamination on the Natural Frequencies of a Laminated Composite Beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 197, pp.283-292.
- Ju, F.D. and Mimovich, M.E. (1988) Experimental Diagnosis of Fracture Damage in Structures by the Modal Frequency Method, *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 110, pp.456-463.
- Krawczuk, M., Ostachowicz, W., and Żak, A. (1997) Dynamics of Cracked Composite Material Structures, *Computational Mechanics*, Vol. 20, pp.79-83.
- Manivasagam, S. and Chandrasekaran, K. (1992) Characterization of Damage Progression in Layered Composites, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 152, pp.177-179.
- Ousset, Y. and Roudolff, F. (1997) Numerical Analysis of Delamination in Multilayered Composite Plates, *Computational Mechanics*, Vol. 20, pp.122-126.
- Papadopoulos, C.A. and Dimarogonas, A.D. (1987) Coupled Longitudinal and Bending Vibrations of Rotating Shaft with an Open Crack, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 117, pp.81-93.
- Parloo, E., Guillaume, P., and Overmeire, V.M. (2003) Damage Assessment Using Mode Shape Sensitivities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 3, pp.499-518.
- Richardson, M.H. and Pootter, R. (1974) Identification of the Modal Properties of an Elastic Structure from Measured Transfer Function Data, *ISAASI 74250-International Instrumentation Symposium*, pp.239-246.
- Shen, M.H.H. and Pierre, C. (1990) Natural mode of Bernoulli Euler Beams with a Single Edge Cracks, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 138, pp.115-134.
- Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S. (1998) A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures, *Report No. 128*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., USA.
- Wang, Z., Lin, R.M., and Lim, M.K. (1997) Structural Damage Detection Using Measured FRF Data,

김주우

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 147, pp.187-197.

(접수일자 : 2012. 6. 4 / 심사일 2012. 6. 18 /
심사완료일 2012. 8. 6)