

층간 분리가 있는 복합재 구조물의 동적특성 회복

손 정 우¹ · 김 흥 수^{2*}

¹금오공과대학교 기계설계공학과, ²동국대학교 기계로봇에너지공학과

Dynamic Characteristics Recovery of Delaminated Composite Structure

Jung Woo Sohn¹ and Heung Soo Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh Nat. Inst. Tech., Gumi, 730-701, Korea

²Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

Abstract

In this paper, feasibility of dynamic characteristics recovery of delaminated composite structure is numerically studied by using active control algorithm and piezoelectric actuator. Macro-fiber composite(MFC), which has great flexibility and high actuating force, is considered as an actuator in this work. After construction of finite element model for delaminated composite structure based on improved layerwise theory, modal characteristics are investigated and changes of natural frequencies and mode shapes, caused by delamination, are observed. Then, active control algorithm is realized and implemented to system model and control performances are numerically evaluated. Dynamic characteristics of delaminated composite structure are effectively recovered to those of healthy composite structure.

Keywords : dynamic characteristic, delamination, composite structure, active control, piezoelectric actuator

1. 서 론

최근 에너지 사용 효율을 높이기 위하여 자동차산업, 항공 산업, 풍력발전 등에서 구조물의 경량화와 함께 고강도화를 요구하고 있다. 이에 다른 구조용 재료보다 구조물의 질량에 비해 상대적으로 큰 강도를 가지는 적층 복합재료에 대한 연구 및 이의 활용한 구조물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이러한 적층형태의 복합재 구조물은 횡방향의 하중에는 취약하여 층간 분리와 같은 손상을 입을 수 있으며, 이러한 손상은 구조물의 안정성을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 복합재의 정적, 동적거동을 정확하게 예측하는 것이 중요한 문제로 대두되었고 최근까지 다양한 연구가 진행되고 있다. Kirchoff-Love 가정을 바탕으로 하는 고전 판이론(CPT: Classical Plate Theory)과 횡방향의 전단 응력을 고려하지 않는 고전 판이론의 단점을 보완하기 위하여 일차전단 변형이론(FSDT: First-order Shear Deformation

Theory)이 개발되었다. Kim 등(2006)은 개선된 일차 전단 변형이론을 제안하여 복합재료 적층평판의 정확한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 고전적 일차전단 변형이론과 3차원 탄성해 등과 비교하여 검증하였다. 또한, 적층 복합재 구조물에 발생한 층간 분리의 움직임을 고찰하기 위하여 고차 지그재그 변위장 이론을 이용한 연구도(Cho *et al.*, 2001) 진행되었다. Kim 등(2011)은 최근층평판의 응력 해석의 정확성을 향상시키기 위하여 개선된 형태의 고차전단 변형이론을 제안하였다.

또한, 최근에는 적층 구조물에 발생한 손상과 구조물의 동적특성 변화와의 관계를 파악하기 위한 연구도 다양한 형태로 진행되고 있다. Campanelli와 Engblom(1995)은 층간 분리가 적층 복합재 평판의 동적특성에 미치는 영향을 정확하게 예측하기 위하여 전단 변형이 가능한 8-노드 평판 요소들 기반으로 하는 유한요소모델을 개발하였다. Saravanos와 Hopkins(1996)는 층간 분리가 있는 보와 평판에서 구조물

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2260-8577; E-mail: heungsoo@dgu.edu
Received September 25 2014; Revised November 6 2014
Accepted November 7 2014

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 진동특성에 대한 연구를 해석적 접근과 함께 실험적 접근을 수행하여 층간 분리가 구조물의 동적특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 층간 이론을 기반으로 하여 복합재 보 구조물에 발생한 층간 분리의 각도, 위치, 크기 등에 따른 구조물의 진동특성 변화를 고찰한 연구도 진행되었다(Lee, 2000). Radu와 Chattopadhyay(2002)는 고차전단변형 이론을 사용하여 적층 복합재 구조물에 발생한 층간 분리가 구조물의 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. Kim 등(2005)은 층간 분리가 발생한 적층 복합재 구조물의 동적특성 변화를 고찰하여 위하여 압전 재료를 적용하였으며, 층간 접촉에 의한 "breathing" 현상을 예측하고자 하는 연구를 수행하였다. Swann 등(2006)은 적층 복합재 구조물에서 발생하는 층간 분리의 탐지를 위하여 압전 감지기를 적용하였으며, 성능 향상을 위하여 최소 수량의 감지기를 최적의 위치에 부착시키기 위한 최적화 연구를 수행하였다. 이러한 연구들을 통해 알려진 바와 같이, 층간 분리와 같은 손상이 구조물에 발생하게 되면, 구조물의 강성이 저하되는 현상이 발생하고, 이에 따라 구조물의 고유 진동수 또한 감소하게 된다. 고유 진동수의 감소 정도에 따라 구조물의 안정성에 미치는 영향이 차이가 있겠지만, 감소된 고유 진동수가 구조물 또는 시스템의 작동 주파수에 가까워지게 되면, 시스템에 공진 현상이 발생하게 되어 구조물 또는 시스템의 파괴와 같은 큰 피해가 발생할 수 있다. 최근에는 재료적 접근으로 에폭시 등을 이용하여 복합재 구조물에 발생한 손상을 일시적으로 스스로 치료하여 시스템의 안정성을 유지하고자 하는 연구(Pingkarawat *et al.*, 2012)가 진행되고 있다. 그러나 이러한 접근 또한 실제 시스템에 적용하는 데는 한계가 있으며, 보다 효율적인 방안에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 복합재 구조물에서 자주 발생하는 손상 중 하나인 층간 분리가 발생할 경우, 손상에 의해 변화된 구조물의 동적특성을 건강한 상태로 회복하여, 전체 시스템의 안정성을 유지할 수 있도록 하였다. 층간 분리가 있는 구조물의 유한요소모델 구축을 위하여 향상된 층간 변위장 모델을 적용하였으며, 유한요소해석을 진행하여 구조물의 고유 진동수와 모드 형상을 관찰하였다. 능동제어 알고리즘과 압전 작동기를 적용하여 구조물의 진동 응답특성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 구조물의 동적특성을 회복할 수 있는지 확인하였다.

2. 시스템 모델

압전 작동기가 부착된 적층 복합재 평판 구조물을 Fig. 1에 나타내었다. 구조물의 한 쪽 끝단은 고정되어 있으며, 고정된 끝단으로부터 10mm 떨어진 구조물의 위쪽 면에는 압

전 작동기가 부착되어 있다. 압전 작동기와 구조물의 접촉은 완벽한 것으로 가정하였고, 접착제의 두께는 고려하지 않는다. 본 연구에서 고려된 구조물과 압전 작동기의 치수는 Table 1에 정리하였다. 복합재 구조물은 carbon cyanate를 고려하였으며, 0도와 90로 8층을 교차하여 적층하고, 가운데 면을 중심으로 위와 아래가 대칭을 이루는 형태로 고려되었다. 압전 작동기는 MFC(Macro-fiber Composite)를 고려하였으며, 각 재료의 물성치는 Table 2에 나타내었다. 고정된 끝단으로부터 길이 방향으로 100mm 떨어진 위치에 길이 100mm, 폭 50mm 크기의 층간 분리가 있는 것으로 가정하였으며, 두께 방향 가운데 면, 세 번째와 네 번째 면 사이, 여섯 번째와 일곱 번째 면 사이에 존재하는 층간 분리를 각각 D0, D3, D6로 구분하였다. 층간 분리는 각각 독립적으로 하나만 있는 것으로 가정하였다.

적층 복합재 구조물은 방향에 물성치가 달라지는 비등방성을 가지고 있으며, 이러한 특성을 나타내기 위하여 다양한 모델이 제안되었다. 특히 층간 분리가 존재하는 경우에도 각 층간의 전단응력을 정확하게 표현할 수 있어야 구조물에 발생하는 변형을 정확하게 묘사할 수 있다. 이에 본 연구에서는 향상된 층간 변위장 모델을 바탕으로 한 층간 분리 현상을 정확하게 나타낼 수 있는 모델을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 향상된 층간 변위장 모델은 1차 전단 변위장 모델을 사용하여 적층 복합재 구조물의 전체적인 거동을 묘사하고, 지그재그 층간 변위장 모델을 사용하여 두께 방향의 층간 전단응력 연속조건과 경계조건을 만족하도록 하였다. 향상된 층간 변위장 모델을 바탕으로 제안된 시스템의 유한요소 운동방정식은 다음과 같이 표현된다(Kim *et al.*, 2005).

$$M\ddot{d}_u + C\dot{d}_u + K_{uu}d_u + K_{u\phi}d_\phi = F_u \tag{1}$$

$$K_{\phi u}d_u + K_{\phi\phi}d_\phi = F_\phi$$

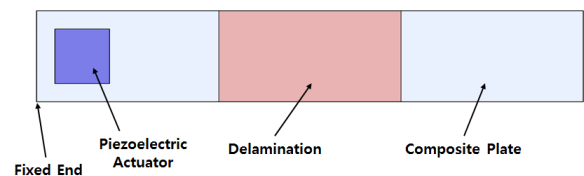


Fig. 1 Configuration of composite structure and piezoelectric actuator

Table 1 Dimensions of the proposed structure

	Composite Structure	Piezoelectric Actuator
Length	300mm	30mm
Width	50mm	30mm
Thickness	2mm	0.3mm

Table 2 Material properties

Carbon Cyanate			
Young's modulus, E_1	380GPa	Young's modulus, E_2	16.6GPa
Shear modulus, G_{12}	4.2GPa	Density, ρ	1800Kg/m ³
Poisson ratio, ν_{12}	0.31	Poisson ratio, ν_{23}	0.42
MFC(poling: direction 1)			
Young's modulus, E_1	30GPa	Young's modulus, E_2	15.86GPa
Shear modulus, G_{12}	5.51GPa	Density, ρ	7750Kg/m ³
Poisson ratio, ν_{12}	0.31	Poisson ratio, ν_{21}	0.16
Piezoelectric Constn, d_{11}	400pC/N	Permittivity, ϵ_{11}/ϵ_0	0.31

Table 3 Natural frequency change

Mode	Healthy	Delaminated		
		D0	D3	D6
1st bending	40.5Hz	39.2Hz	39.7Hz	40.3Hz
1st twisting	125.3Hz	113.8Hz	117.9Hz	123.2Hz
2nd bending	251.3Hz	247.1Hz	248.7Hz	250.8Hz
2nd twisting	432.9Hz	406.8Hz	414.5Hz	426.5Hz

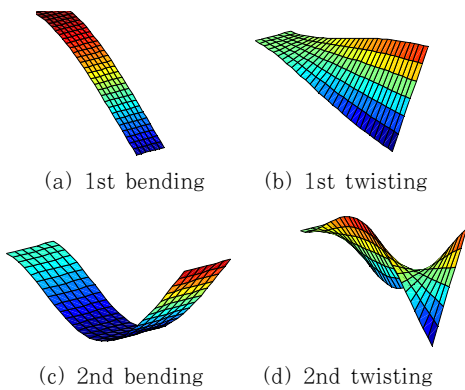


Fig. 2 First four mode shapes of the composite structure

여기서, d_u 는 유한요소의 절점 변위, d_ϕ 는 압전층의 절점 전기장을 나타낸다. 매트릭스 M 과 C 는 질량과 감쇠행렬을 나타낸다. 매트릭스 $K_{u\phi}$ 와 $K_{\phi u}$ 는 압전-탄성 연성효과에 의해서 나타나는 강성행렬이다. K_{uu} 는 구조물의 강성행렬, $K_{\phi\phi}$ 는 압전 강성행렬을 나타낸다. 그리고, 벡터 F_u 와 F_ϕ 는 기계적, 전기적 외력을 나타낸다.

Fig. 1에 나타난 구조물의 모드 해석을 수행하여 고유 진동수와 모드형상을 확인하였다. 구조물에 층간 분리의 손상이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 해석을 각각 수행하였으며, 이 때 얻어진 고유 진동수를 Table 3에 정리하여 비교

하였다. 구조물에 층간 분리가 발생하면 손상이 없는 경우에 비하여 고유 진동수가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 층간 분리로 인해 구조물의 강성이 낮아짐에 따라 발생한 것이다. 또한, 층간 분리의 위치에 따라 D0 경우보다 D6 경우에 감소하는 고유 진동수의 크기가 작아지는 것으로 보아 층간 분리의 위치가 중립면으로부터 멀어질수록 손상으로 인한 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 구조물의 모드 형상은 Fig. 2에 나타내었으며, 손상이 있는 경우와 없는 경우가 크게 다르지 않은 것으로 나타났다(Sohn *et al.*, 2013).

3. 제어 결과

능동제어 알고리즘을 적용하기 위해 제안된 시스템의 상태 공간 모델을 식 (1)의 운동방정식으로부터 다음과 같이 구성하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2}$$

여기서, A 는 시스템행렬, B 는 입력행렬, u 는 제어입력 행렬이다. 본 연구에서는 극점배치기법을 적용하였으며, 모든 상태 변수는 측정 및 되먹임이 가능하고, 제어입력은 제한되지 않는다고 가정하였다. 능동제어 알고리즘으로 극점배치기법을 선정하였으며, 모든 상태 변수는 측정이 가능하고 되먹임이 가능하며, 제어 입력에는 제한이 없다고 가정하였다. 제어입력 u 는 다음과 같이 Ackermann의 공식으로부터 결정되었다(Sohn *et al.*, 2013).

$$u = -Ku \tag{3}$$

$$u = [0 \ 0 \ \dots \ 1] \begin{bmatrix} B \\ AB \\ A^2B \\ \vdots \\ A^{n-1}B \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$|sI - (A - BK)| = (s - \mu_1) \dots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \tag{5}$$

$$\phi(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \tag{6}$$

구조물의 동적특성 회복성능을 평가하기 위하여 4개 모드로 초기 변위를 설정하고, 이를 이용하여 구조물을 가진한 후 제어 알고리즘을 실행하여 구조물의 주파수 응답특성을 관찰하였다. 본 연구에서는 하나의 압전 작동기가 구조물의 폭 방향 가운데에 부착되어 있어 비틀림 모드는 제어하지 않고, 굽힘 모드만을 제어하였다. 층간 분리가 구조물의 두께방향 가운데에 위치하는 D0 층간 분리에 대하여, 초기 4개의

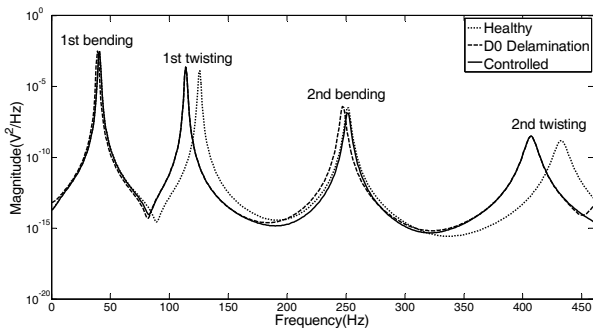


Fig. 3 Frequency response for D0 case

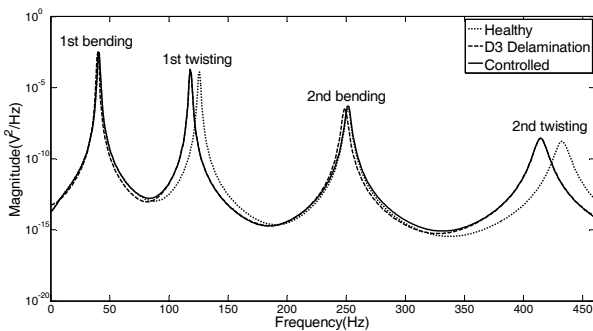


Fig. 4 Frequency response for D3 case

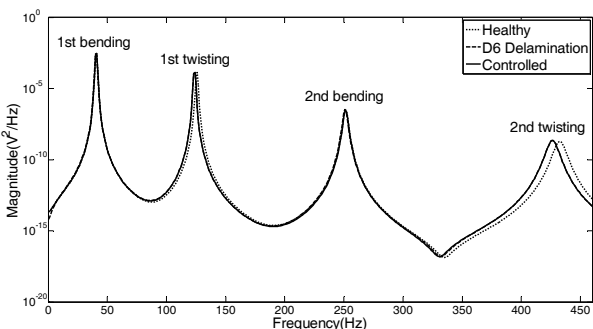


Fig. 5 Frequency response for D6 case

모드로 동시에 가진하고, 첫 번째와 세 번째의 굽힘모드만을 제어한 경우의 주파수 응답특성을 Fig. 3에 나타내었다. 구조물의 손상에 의하여 고유 진동수가 낮아지고, 이에 따라 각 모드의 피크가 왼쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째와 두 번째 굽힘모드의 경우 제어를 수행하여 왼쪽으로 옮겨졌던 고유 진동수가 건강한 상태의 고유 진동수로 회복되는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째와 두 번째 굽힘모드에서는 고유 진동수의 회복으로 건강한 구조물의 주파수 응답 곡선과 제어된 주파수 응답곡선이 일치하고 있다. 또한 제어를 수행하지 않은 비틀림모드의 경우에는 손상된 구조물의 고유 진동수가 건강한 상태의 구조물의 고유 진동수로 회복되지 않은 것을 확인할 수 있다. D3와 D6 층간 분리의 경우에 대한 제어 결과를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다. 층간 분리에 의한 고유 진동수가 왼쪽으로 이동되는 정도는 D0

층간 분리 경우에 비하여 상대적으로 작으며 D3 경우 보다 D6 경우에 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 3의 결과와 일치한다. D3와 D6 층간 분리의 경우에도 제어 알고리즘 적용을 통해 손상된 구조물의 고유 진동수가 건강한 상태의 고유 진동수로 회복될 수 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 능동제어 알고리즘과 압전재료를 이용하여 손상이 있는 복합재 구조물의 동적특성을 손상이 없는 구조물의 동적특성으로 회복시킬 수 있는 지 확인하였다. 향상된 층간 변위장 모델을 이용하여 복합재 구조물의 모델을 구성하였으며, 유한요소해석을 통하여 손상의 유무에 따른 복합재 구조물의 동적특성의 차이를 확인하였다. 구조물에 층간 분리가 발생할 경우 고유 진동수는 감소하지만 모드 형상은 크게 변하지 않는 것을 확인하였다. 능동제어 알고리즘과 복합재 구조물에 부착된 압전재료를 이용하여 구조물의 동적특성을 변화시킬 수 있도록 하였으며, 구조물의 진동 응답특성을 관찰하여 손상된 구조물의 동적특성을 손상이 없는 구조물의 동적특성으로 효과적으로 회복시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 다양한 형태의 손상이 있는 복합재의 동적특성 회복에 대한 연구도 진행할 예정이다. 또한 실제 시스템에 적용을 위해 최적제어, 강건제어과 같은 다양한 제어 알고리즘을 적용한 연구도 진행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문임.

References

Campanelli, R.W., Engblom, J.J. (1995) The Effect of Delaminations in Graphite/PEEK Composite Plates on Modal Dynamic Characteristics, *Compos. Struct.*, 31, pp.195~202.

Cho, M., Kim, J.S. (2001) Higher-order Zig-zag Theory for Laminated Composites with Multiple Delaminations, *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*, 68, pp.869~877.

Kim, H.S., Chattopadhyay, A., Choshal, A. (2003) Dynamic Analysis of Composite Laminates with Multiple Delamination using Improved Layerwise Theory, *AIAA J.*, 41, pp.1771~1779.

- Kim, H.S., Kim, J., Choi, S.B.** (2005) Study on Dynamic Characteristics of Delaminated Smart Composite Laminates, *Trans. Korean Soc. Noise & Vib. Eng.*, 15, pp.395~403.
- Kim, J., Cho, M.** (2006) An Accurate and Efficient Analysis of Composite Plates Based on Enhanced First-order Shear Deformation Theory, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 19, pp.407~418.
- Kim, J., Han, J., Cho, M.** (2011) On the Modification of a Classical Higher-order Shear Deformation Theory to Improve the Stress Prediction of Laminated Composite Plates, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24, pp.407~418.
- Lee, J.** (2000) Free Vibration Analysis of Delaminated Composite Beams, *Comput. & Struct.*, 74, pp.21~129.
- Pingkarawat, K., Wang C.H., Varley, R.J.** (2012) Self-healing of Delamination Fatigue Cracks in Carbon Fiber-Epoxy Laminate using Mendable Thermoplastic, *J. Mater. Sci.*, 47, pp.4449~4456.
- Pingkarawat, K., Wang C.H., Varley, R.J.** (2012) Self-healing of Delamination Cracks in Mendable Epoxy Matrix Laminates using Poly[ethylene-co-methacrylic acid] Thermoplastic, *Compos. Part A. Appl. Sci. & Manuf.*, 43, pp.1301~1307.
- Radu, A.G., Chattopadhyay, A.** (2002) Dynamic Stability Analysis of Composite Plates Including Delaminations using a Higher Order Theory and Transformation Matrix Approach, *Int. J. Solids & Struct.*, 39, pp.1949~1965.
- Saravanos, D.A., Hopkins D.A.** (1996) Effects of Delaminations on the Damped Dynamic Characteristics of Composite Laminates: Analysis and Experiments, *J. Sound & Vib.*, 192, pp.977~993.
- Sohn, J.W., Kim, H.S.** (2013) Dynamic Characteristics Modification of Damaged Composite Structure Using MFC and Active Control Algorithm, *Trans. Korean Soc. Noise & Vib. Eng.*, 23, pp.1066~1072.
- Swann, C., Chattopadhyay, A.** (2006) Optimization of Piezoelectric Sensor Location for Delamination Detection in Composite Laminates, *Eng. Optim.*, 38, pp.511~528.

요 지

본 논문에서는 복합재 구조물에 손상이 있을 경우, 손상에 의해 변화된 구조물의 동적특성을 손상이 없는 상태로 회복하여, 전체 시스템의 안정성을 유지할 수 있도록 하였다. 층간 분리가 있는 구조물의 유한요소모델 구축을 위하여 향상된 층간 변위장 모델을 적용하였으며, 유한요소해석을 진행하여 구조물의 고유 진동수와 모드 형상을 관찰하였다. 능동제어 알고리즘과 압전 작동기를 적용하여 구조물의 진동 응답특성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 손상된 구조물의 동적특성을 손상이 없는 상태로 회복할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 동적특성, 층간 분리, 복합재 구조물, 능동제어, 압전재료