

적층배열 변화에 따른 진동하는 복합재료 적층 구조의 미시역학적 물성변화 추정

김규동* · 이상열**†

Determination of Degraded Properties of Vibrating Laminated Composite Plates for Different Layup Sequences

Kim Gyu-Dong*, Lee Sang-Youl**†

ABSTRACT: This paper presents a method to detect the fiber property variation of laminated GFRP plates from natural frequency response data. The combined finite element analysis using ABAQUS and the inverse algorithm described in this paper may allow us not only to detect the deteriorated elements from the micro-mechanical point of view but also to find their numbers, locations, and the extent of damage. To solve the inverse problem using the combined method, this study uses several natural frequencies instead of mode shapes in a structure as the measured data. Several numerical results show that the proposed system is computationally efficient in identifying fiber stiffness degradation for complex structures such as composites with various layup sequences.

초 록: 본 연구의 목적은 고유진동 응답데이터로부터 적층된 GFRP 판구조의 섬유 물성 변화를 추정하는 것이다. 고등유한요소 상용프로그램(ABAQUS)과 연동된 알고리즘은 미시역학적 관점에서 손상된 요소를 추정할 뿐만 아니라 위치, 개수 및 정도를 탐색할 수 있다. 연동된 기법을 적용하여 역문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 모드형상 대신 제한된 몇 개의 고유진동수 데이터만을 적용하였다. 몇가지 수치해석 결과로부터 제안된 시스템 기법은 다양한 적층배열을 갖는 복합재료 적층판과 같은 복잡한 구조물의 섬유 강성 변화를 추정하는 데 수치해석적으로 효율적임을 보여준다.

Key Words: 시스템 인식기법(System identification method), 복합재료(Composite materials), 적층배열(Layup sequence), 미시역학(Micro-mechanics)

1. 서 론

복합재료는 두 가지 이상의 재료가 적절히 조합이 되어 보다 유용한 기능을 발현하는 재료이다. 그리고 재료의 성능에 비해서 경량이면서 모재와 섬유의 종류, 적층배열에 변화로 다양한 구조적 특성을 나타낼 수 있기 때문에 우주, 건설, 항공, 기계 등의 다양한 분야에서 수요가 증가하고 있

다. 복합재료의 특성상 미시역학적으로 섬유의 물성이 전체 구조성능에 지배적인 영향을 미치게 되며, 섬유의 물성 저하는 복합재료의 중요한 손상유형 중 하나라고 할 수 있다.

손상이 발생한 구조 부재의 동적 특성은 중요한 연구주제로서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 보와 같은 구조 부재에 발생한 손상은 부재의 고유진동수를 감소시킴으로서 강성을 약화시키는 작용을 하게 된다. 따라서 부재의 고유진

Received 30 September 2015, received in revised form 28 October 2015, accepted 29 October 2015

*Department of Civil Engineering, Andong National University

**†Department of Civil Engineering, Andong National University, Corresponding author (E-mail: lsy@anu.ac.kr)

동수 변화는 부재에 발생하는 균열 특성을 파악하는 중요한 요인이 되며, 고유진동수 측정치로부터 균열 및 손상의 위치 혹은 크기를 찾아내는 역문제를 해결하는 다양한 해석적 연구가 진행되었다[1]. Yang 등(1985)은 동적 응답치로부터 구조물의 동적 방정식을 규명하기 위한 기법을 도입하였으며[2], Rizos 등(1990)은 다양한 경계조건을 갖는 보에 대하여 손상과 고유진동수와의 함수식 관계를 유도하였다[3]. Ostachowicz 등(1991)은 캔틸레버 보의 고유진동수변화가 두 개의 균열이 미치는 영향을 분석하였다[4]. 이 밖에도 근사 해석적 방법으로 고유진동수와 균열과의 역문제를 풀기 위한 다양한 연구가 진행되었다[5-7]. 그러나 이러한 연구들은 역문제를 수학적 해석적으로 해결하기 위한 방법들을 제시한 것으로서 해석 모델 및 물성 조건 등에 대하여 일정한 제한성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 이용한 역문제 해결을 위하여 유전 알고리즘(Genetic algorithm) 기법을 도입하였다. 유전 알고리즘은 자연선택과 유전학에서 발견된 몇몇 중요한 특징과 컴퓨터 알고리즘을 접목한 확률적 탐색도구로서 Holland(1975, 1991)에 의하여 처음 개발된 후 다양한 개발연구가 진행되었다[8]. 유전알고리즘은 기존의 알고리즘들이 해결하기 어려웠던 복잡한 문제를 성공적으로 해결할 수 있으며 근래에는 다양한 공학문제에 응용되고 있다[9]. 다양한 분야에서 여러 형태의 유전알고리즘이 개발되었으나 재생산을 알고리즘으로 구현하는 룰렛 휠선택 기법은 수치적 효율성을 좌우하는 요인이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 유전알고리즘을 자유 진동하는 복합재료 적층판 구조물을 대상으로 섬유 물성 저하를 역문제의 해결기법으로서 확대 적용한다.

한편, 기존의 알고리즘들은 구조물의 손상을 탐지하기 위한 계측 자료로서 각 진동 모드 형상을 이용한 경우가 대부분이었다. 이는 구조물의 고유진동수만으로는 역추정을 위한 기본자료가 부족하여 민감도가 저하되기 때문이다. 그러나 수치해석적 관점에서 가능한 적은 양의 자료를 사용할 수 있다면 바람직할 것이다. 최근 마이크로 알고리즘이나 신경망-유전 하이브리드 알고리즘 등의 개선된 기법은 고유진동수만으로부터 보 혹은 뼈대구조물의 손상을 추정하기 위하여 개발되었다[10]. 따라서 본 연구에서는 박판 구조물로 확장하여 모드형상이 아닌 몇 개의 고유진동수만을 가지고 수치해석 관점에서 손상을 역추정하는 방법을 사용하기로 한다. 본 연구는 크게 세가지 특징을 갖는다. 첫째, 미시역학적 관점에서의 섬유 물성저하를 주요 손상 변수로 하며, 둘째 역문제를 해결하기 위하여 ABAQUS 프로그램과 연동된 고등 시스템 인식 기법을 적용한다. 세 번째로 복합소재 구조물의 주요 설계 변수인 적층배열 변화가 섬유의 물성저하 추정에 미치는 영향을 상세 분석한다. 본 연구는 적은 수의 계측 자료임에도 불구하고 제안한 알고리즘을 적용하여 자유 진동하는 유리섬유보강(GFRP)

적층판의 섬유 물성저하 위치 및 정도를 수치적 효율성 관점에서 효과적으로 추정할 수 있음을 입증하고자 한다.

2. 역문제의 정식화

2.1 미시역학 기반 섬유물성저하 모델

유한요소법을 비롯한 다양한 수치해석적 접근방법에서 구조 시스템의 강성행렬은 재료적 특성, 기하학적 형상 그리고 경계조건 등의 조합으로 표현되며 손상의 대표적인 사례는 임의의 분할요소에서의 탄성계수, 프와송비 등의 재료적 물성저하이다. 예를 들면, 임의의 분할 요소에서 30% 손상은 탄성계수 혹은 프와송비의 30% 감소로 정의할 수 있다. 이러한 정의는 Gudmudson(1982) 그리고 Christdes 등(1984)에 의하여 손상을 갖는 등방성 보의 유한요소 해석에서 적용되었다[11,12].

한편, 미시역학적 접근방법은 복합재료를 구성하는 모재와 섬유에 대하여 각각의 역학적 특성을 고려하여 강성 또는 강도를 추정하는 방법이다. 복합재료의 미시역학적 접근법에서 가장 중요한 변수는 모재에 결합되는 섬유의 함침비율이다. 섬유의 함침비율은 복합재료의 강성변화를 가져오게 되며, 거시적 구조성능에 중요한 영향을 미치게 된다[13]. 탄성적 재료역학적 관점에서 복합재료의 물성치는 모재와 섬유 각각의 상대적인 체적 비율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = C_{ij}(E_f, \nu_f, V_f, E_m, \nu_m, V_m) \quad (1)$$

여기서, E_f, E_m 는 등방성 섬유 및 모재의 탄성계수, ν_f, ν_m 는 등방성 섬유 및 모재의 포아송 비, V_f, V_m 는 전체 복합소재 체적에 대한 섬유와 모재의 체적 비율을 각각 나타낸다. 재료역학적 접근법에서 가장 중요한 가정 사항은 F1방향 섬유 보강 복합재료의 최대변형률은 섬유의 최대 변형률과 같아야 한다는 것이다. 그 이유는 섬유가 모재보다 더 적은 변형률에 파괴가 되기 때문이다. 변형률이 같지 않다는 것은 섬유와 모재 사이에 균열이 발생했음을 의미 한다. 이러한 가정에 의해서 1방향 탄성계수 E_1 은 혼합법칙(Rule of mixture)에 의해서 선형적인 관계로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (3)$$

2방향 탄성계수 E_2 와 전단탄성계수 G_{12} 는 다음과 같은 비선형적 관계이며, 섬유보다는 모재에 지배적인 특성을 보인다.

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)는 섬유가 모재에 일정한 간격으로 정렬이 되어 있다는 가정 하에 유도된 것이다. 본 연구에서는 복합소재 적층판 구조의 손상을 전술한 미시역학 기반의 섬유의 물성 저하로 가정하고, 손상으로 인한 고유진동의 변화로부터 물성저하 위치 등을 추정하도록 한다.

2.2 ABAQUS 연동 시스템 인식 기법

전술한 바와 같이 손상을 규명하는 역문제의 목적은 각 분할 요소에 대한 다음 식으로 표현되는 강도 감소 계수들을 계산하는 것이다.

$$\{\eta^{(k)}\} = \{\eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \eta^{(3)}, \dots, \eta^{(K)}\} \quad (6)$$

여기서 K 는 적층판의 분할 요소의 총 개수이며, 손상 개수를 사전에 알 수 있는 경우에는 손상된 요소의 총 개수를 의미한다. 역문제를 이용한 손상 규명에서 신중하게 고려되는 과정 중의 하나는 측정된 고유진동수와 역문제 과정에서 가정되어 계산된 고유진동수를 비교하여 최적 함수값 (Fitness function value)을 효과적으로 계산하고 이를 평가하는 것이다. 이러한 과정은 초기 세대에서의 측정치와 계산치 사이에서의 오차 ε_k 계산에 영향을 미치게 되어 수치 해석상의 수렴성을 크게 좌우하므로 매우 중요하다. 본 연구에서는 다음과 같이 각 세대(Generation)에서의 최적 함수값(최적오차, 대표오차) 값을 결정하였다.

$$\varepsilon_k = \sum_{n=1}^N (\bar{\omega}[n] - \omega[n])^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

여기서, $\bar{\omega}[n]$ 및 $\omega[n]$ 는 측정 및 계산된 n 번째 모드의 고유진동수를 각각 의미하며, N 은 전체 고유진동수의 개수를 의미한다. 한편, 식 (7)에 의하여 계산된 각 세대에서의 최적 값은 살아남아 다음 세대로 전달되고 나머지 개체에 의해 계산된 값들은 소멸된다. 이러한 최적 값들은 각 세대를 지나면서 발전하여 참값과의 오차 ε_k 를 감소시켜 수렴하게 되며 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \min\{\varepsilon_k\}, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

여기서 L 은 각 세대에서의 가정되는 집단의 개수를 의미한다. 식 (6)에서 구한 최종 적합도 Ψ 가 세대의 증가에 따라 미리 결정한 허용 오차보다 작으면 계산은 종료되며, 최종적으로 알고리즘은 주어진 조건에 대한 최적 손상의 위치 및 상태를 결정하게 된다.

본 연구에서는 고등 유한요소 상용프로그램(ABAQUS)를 적용하여 전향해석을 수행하고 유전자 알고리즘을 연동하는 방법을 적용하며, 다단계 추정방법을 적용한다. 상세 과정은 Fig. 1과 같다.

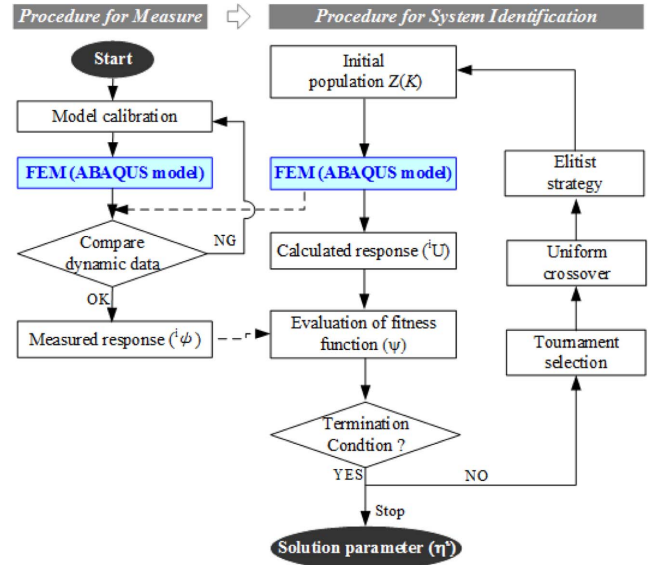


Fig. 1. System identification procedure proposed in this study

3. 수치해석 결과

3.1 해석모델

복합재료 구조물의 손상을 예측하기 위해서는 동적시험 결과나 고유진동데이터 등과 같은 강도를 추정할 수 있는 데이터가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 고유진동해석을 수행하고 그 데이터를 기반으로 GFRP 박판 구조의 섬유 강성저하추정을 수행하였다. 복합재료를 미시역학적 관점을 고려하기 위해서는 모재와 섬유의 물성이 각각 필요하다. 모재와 섬유의 물성은 $E_m = 3.45$ GPa, $E_f = 85.3$ GPa, $G_f = 35.58$ GPa, $G_m = 1.26$ GPa, $\nu_m = 0.35$, $\nu_f = 0.5$ 이다. 이 물성을 기반으로 Halpin-tsai 공식을 통해서 추정된 GFRP의 물성은 Table 1과 같다. 해석에 적용된 박판 구조의 형상은 Fig. 2와 같이 가로 1.25 m, 세로 1.0 m이고 두께는 0.1 m이며, 9개 및 16개의 분할 요소를 갖는 경우에 대하여 알고리즘을 적용하였다.

Table 1. Material properties

Density		1850 kg/m ³
Young's Modulus	E_1	44.27 GPa
	E_2	11.79 GPa
	E_3	11.79 GPa
Shear Modulus	G_{12}	3.49 GPa
	G_{13}	3.49 GPa
	G_{23}	5.89 GPa
Poisson Ratio	ν_{12}	0.275
	ν_{13}	0.275
	ν_{23}	0.300

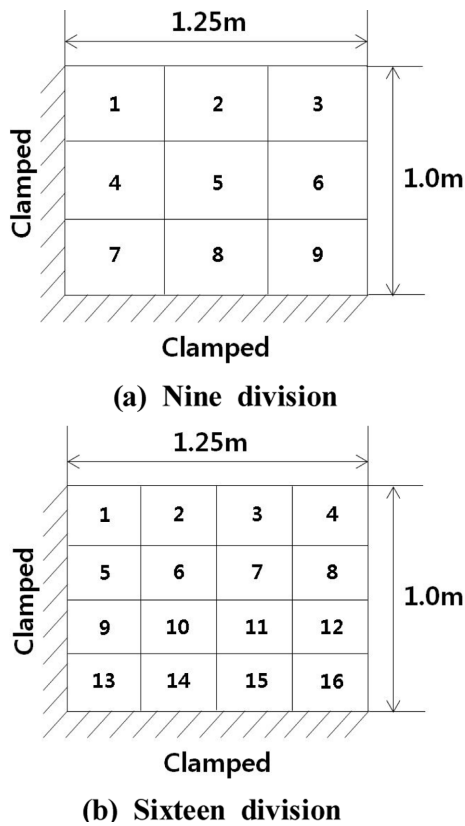


Fig. 2. Numerical model for SI

Table 2. Cases for SI

Case	Total Element No.	Damaged Element No.	Layup sequence
I	9	7	[0]
II	16	6	[0]
III	16	6	[0/90] _s
IV	16	6	[15/-75] _s
V	16	6	[30/-60] _s
VI	16	6	[45/-45] _s

해석 경우 및 유전자 알고리즘의 옵션은 Table 2와 같다. Case I의 요소는 Fig. 2(a)와 같이 9개이며 7번 요소에 대하여 섬유 탄성계수를 85.3 GPa에서 20 GPa로 변화시켰다. Case II~VI는 요소 수를 16개로 증가시키고 6번 요소에도 섬유의 탄성계수를 저하시키고 적층배열을 변화 시키면서 해석을 진행하였다. 역해석을 위하여 적용한 유전자 알고리즘의 입력변수를 요약하면 Table 3과 같다. 초기 생성은 해의 경계조건을 만족시키는 랜덤 초기변수를 생성하는 옵션을 사용하였다. 선택은 룰렛 선택법을 택하였으며 교차는 목적함수가 낮은 변수에 가중을 두어 교차하는 옵션을 선택하였다.

유전자 알고리즘을 통하여 목표한 값을 정확하게 추정

Table 3. Genetic algorithm options for analysis case

Genetic algorithm options	Case I	Case II~VI
Generations	600	300
Populationsize	25	50
CreationFcn	gacreationlinearfeasible	
SelectionFcn	selectionroulette	
EliteCount	2	
MutationFcn	mutationadaptfeasible	
CrossoverFcn	crossoverheuristic	
TolFun	1e-15	
Search range	10 GPa~100 GPa	

Table 4. Induced correlation coefficients

Case	Eigenvalue	Mode			
		I	II	III	IV
I	100.0%	99.99%	99.96%	99.82%	99.50%
II	99.97%	99.93%	99.84%	98.56%	99.62%
III	100.0%	99.94%	99.48%	97.69%	95.70%
IV	99.67%	98.08%	98.05%	96.88%	91.84%
V	98.54%	98.07%	96.57%	92.39%	82.81%
VI	97.52%	99.39%	98.01%	91.93%	87.63%

하기 위해서는 고유진동해석 데이터의 손상 전과 후의 값이 변화가 있어야 하여 이러한 차이를 추적하여 정확한 손상 위치를 탐색하게 된다. 이러한 손상 전후의 차이는 상관계수를 계산하여 분석하는 방법이 합리적이다. Table 4는 정상상태인 경우와 임의의 섬유 손상이 발생한 경우에 대한 각 모드별 고유진동수의 상관계수를 보여준다.

3.2 Case I

Fig. 3은 Case I에 대한 알고리즘 실행 결과를 보여준다. Fig. 3(a)는 각 분할 요소에 대하여 추정된 최종 결과를 보여주며, 7번 요소의 섬유 강성변화 현상을 정확하게 관찰할 수 있었다. Fig. 3(b)는 역해석을 위한 유전자 알고리즘의 각 세대별 결과를 보여준다. 여기서, 한 세대(Generation)에서 개체(Population) 만큼의 해가 생성되면 그 값들의 적합도의 평균값을 계산하게 된다. Fig. 3(c)는 한 세대(Generation)에서 가장 적합도가 높은 개체에 대한 적합도 값을 의미한다.

3.3 Case II

Fig. 4는 Case II에 대한 알고리즘 실행 결과를 보여준다. Case I에 비하여 전체적으로 탐색하는 요소의 수가 16개로 증가하였기 때문에 정확한 위치를 찾는 것이 난해할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 16개의 요소에 대하여 1차 알고리즘을 실행한 후, 물성저하가 예측되는 몇 개의 요소로 스크린

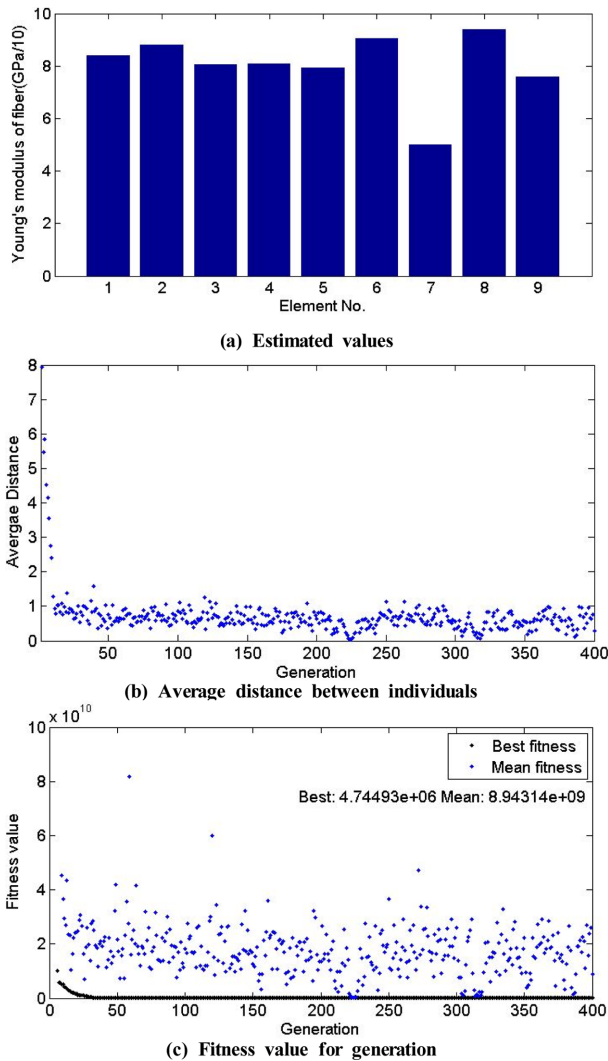


Fig. 3. Genetic algorithm results of case I

하였다. 다음으로 예측된 몇 개의 요소에 대하여 2차 알고리즘을 실행하여 정확한 물성저하 요소의 최종 위치와 값을 추정하도록 하였다. Fig. 4(a)는 16개의 요소에 대하여 1차 알고리즘을 실행한 결과를 보여준다. 그림으로부터 물성이 저하된 것으로 예측된 요소는 5, 6, 10, 14번임을 관찰할 수 있다.

Fig. 4(d)는 4개의 요소에 대하여 2차 알고리즘을 실행한 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 2번째 요소, 즉 6번 요소에서 물성저하가 발생하며, 추정된 값도 정확하게 계산함을 알 수 있다.

3.4 Case III~VI

Table 5는 Case III~VI에 대하여 시스템 인식 알고리즘 해석을 수행 결과를 보여준다. 이 경우는 복합소재의 적층 배열을 변화시켜 해석을 수행하였으므로, 섬유와 매트릭스의 강도와 진동 형상과의 복잡한 거동으로 인하여 물성저하를 추정하

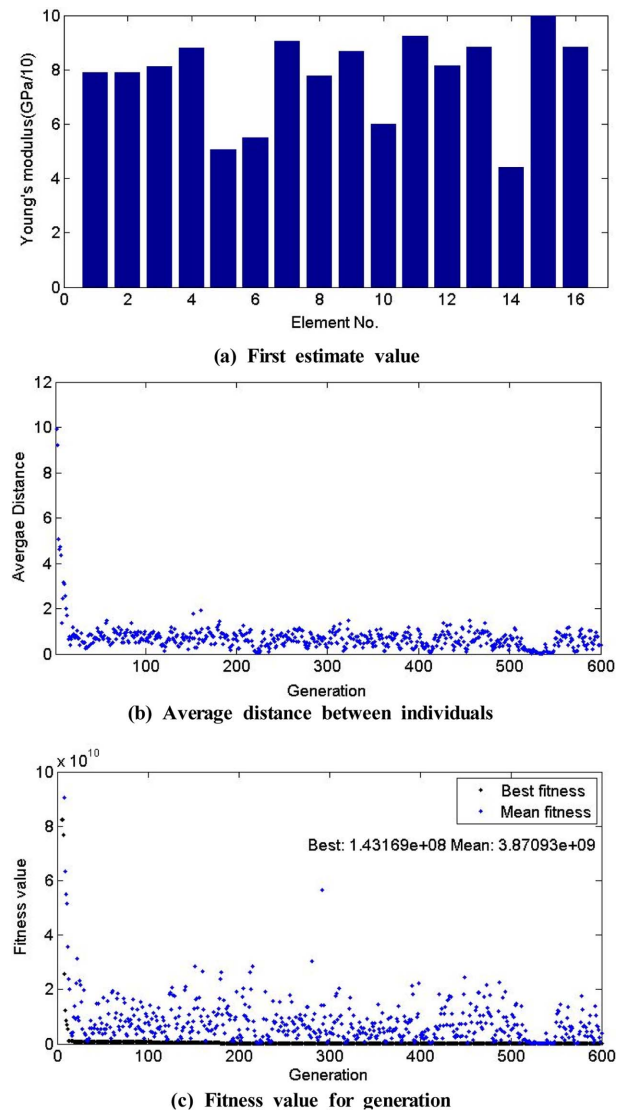


Fig. 4. Genetic algorithm result of case II

는 것이 더욱 난해하다[14]. 따라서 3.3절과 같이 다단계 추정 기법을 적용하였으며, 적층배열 변화에 따른 물성 저하 추정 결과를 비교 분석하였다. Table 5와 같이 16개의 요소를 모두 미지수로 하여 알고리즘을 실행한 경우에는 물성 저하 위치를 정확하게 추정하지 못하였다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 섬유의 강도저하가 전체구조물의 고유

Table 5. Outcome of the first run in the fine searching step. the symbols o and x denote the damaged and undamaged conditions, respectively (The values higher than 70 GPa are considered to be undamaged)

Element No.	Original value	Estimate value (Case III)	Evaluation	Estimate value (Case IV)	Evaluation	Estimate value (Case V)	Evaluation	Estimate value (Case VI)	Evaluation
1	85.3	83.37	x	95.65	x	96.58	x	91.57	x
2	85.3	75.01	x	85.85	x	93.35	x	71.00	x
3	85.3	92.74	x	94.29	x	95.54	x	89.92	x
4	85.3	52.25	o	64.93	o	67.13	o	97.68	x
5	85.3	78.47	x	63.65	o	98.71	x	86.66	x
6	20	54.29	o	27.00	o	17.67	o	42.50	o
7	85.3	76.31	x	93.35	x	83.76	x	95.01	x
8	85.3	91.09	x	81.57	x	95.33	x	95.68	x
9	85.3	99.64	x	68.31	o	94.39	x	84.95	x
10	85.3	70.83	x	67.09	o	77.30	x	32.77	o
11	85.3	60.11	o	77.71	x	90.44	x	68.13	o
12	85.3	92.89	x	98.36	x	92.52	x	77.28	x
13	85.3	98.22	x	90.47	x	99.64	x	64.25	o
14	85.3	40.30	o	52.36	o	82.30	x	94.52	x
15	85.3	56.38	o	84.35	x	52.76	o	83.87	x
16	85.3	99.99	x	99.96	x	61.84	o	98.79	x

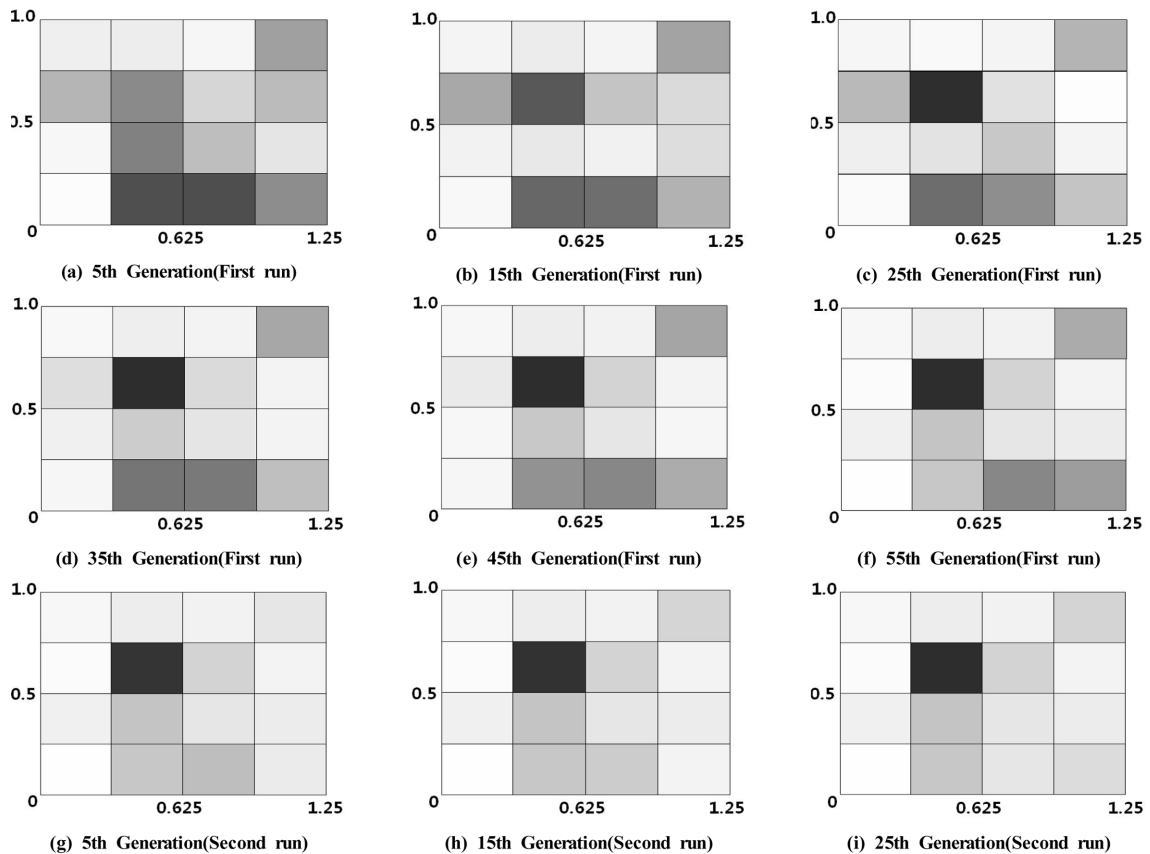


Fig. 5. Damage detection in each generation (Case III)

Table 6. Outcome of the second (final) run in the fine searching step (Case III)

Element No.	Original value	Estimate value	Evaluation
4	85.3	75.83	x
6	20	30.66	o
11	85.3	60.01	x
14	85.3	96.68	x
15	85.3	76.99	x

진동 데이터에 크게 영향이 없다는 것을 의미한다. 1차 스크린 결과 Case III는 5개의 물성저하 후보 요소가 도출되었으며, 이를 미지 변수로 두고 2차 알고리즘을 실행하였다. 2차 추정 결과는 Table 6에 나타나 있으며 6번 요소의 물성저하를 최종적으로 탐지함을 알 수 있다.

Fig. 5는 Case III에 대한 물성저하 탐색 과정을 각 요소의 물성값을 contour로 상대 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 흰색은 물성저하가 발생하지 않은 경우이며, 검정 색으로 갈수록 물성저하가 크게 발생함을 의미한다. 그림에서와 같이, 유전자 알고리즘 내에서의 세대가 증가할수록 6번 요소의 물성저하는 뚜렷하게 관찰 할 수 있으며, 50 이하의 세대에서 이미 정확한 위치로 수렴하고 있음을 알 수 있다(Fig. 5(a)~(f) 참조). 또한, 2차 알고리즘 실행(Fig. 5(g)~(i))의 경우는 25 이하의 세대에서 이미 정확하게 위치를 추정하고 있다. 적층 배열 변화에 따른 물성저하 추정을 비교하면, Case III 및 IV의 경우 1차 해석 이후 5~6개의 미지 요소수를 도출하여 4개의 미지수를 도출한 Case V 및 Case VI에 비하여 상대적으로 추정에 불리한 것으로 분석되었다. 즉, 적층배열의 변화는 진동하는 적층판의 섬유 물성을 추정하는데 민감하다는 것을 보여준다. 이러한 경우, 작은 섬유보강각도의 경우가 손상 추정에 다소 불리하므로 유의해야 한다. 그러나, 2차 알고리즘 실행 단계를 거치면서 최종적으로 물성저하 위치를 정확하게 탐색하기 때문에 수치해석적 수렴성에 대한 차이는 다소 발생하나 오차발생은 적층배열 변화에 따라 우려할 만한 수준은 아닌 것으로 판단된다.

Table 7. Outcome of the second (final) run in the fine searching step (Case IV)

Element No.	Original value	Estimate value	Evaluation
4	85.3	86.33	x
5	85.3	83.72	x
6	20	24.19	o
9	85.3	71.44	x
10	85.3	89.92	x
14	85.3	46.64	x

Table 8. Outcome of the second (final) run in the fine searching step (Case V)

Element No.	Original value	Estimate value	Evaluation
4	85.3	83.81	x
6	20	19.92	o
15	85.3	80.31	x
16	85.3	95.20	x

Table 9. Outcome of the second (final) run in the fine searching step (Case VI)

Element No.	Original value	Estimate value	Evaluation
6	20	23.84	o
10	85.3	99.99	x
11	85.3	87.06	x
13	85.3	66.74	x

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 진동하는 GFRP 구조에 대하여 섬유 물성저하 탐지를 위한 시스템 인식 기법을 개발하였다. 본 논문의 특징은 시스템 인식기법을 실행하기 위하여 역문제 해결로 유전알고리즘을 적용하였으며, 상용프로그램과 연동 기법을 개발한 것이다. 또한, 미시역학 기반으로 섬유의 물성저하 추정 가능성에 대하여 적층배열 변화가 미치는 영향을 분석하였다. 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 9개의 분할 요소를 갖는 단일 적층판에 대하여 알고리즘을 적용하였을 경우 섬유 물성저하 위치를 한 번의 탐색 실행으로 정확하게 추정할 수 있었다.

(2) 16개의 분할 요소를 갖는 단일 적층판의 경우 모든 요소에 대하여 물성저하 계수를 추정해야 하므로 수치해석상 많은 연산시간이 소요될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 물성저하 발생 가능성이 높은 요소를 첫 번째 알고리즘 실행으로 잠정 결정하고 그 요소만을 대상으로 다시 두 번째 실행하는 방법을 사용함으로써 컴퓨터 연산시간을 단축하고 최종적인 손상 위치 및 정도를 정확히 추정할 수 있었다.

(3) 적층배열의 변화에 따른 알고리즘 추정 결과, 진동하는 적층판의 섬유 물성을 추정하는데 보강각도는 민감하며, 작은 섬유보강각도의 경우가 손상 추정에 다소 불리하므로 유의해야 한다.

(4) 적층배열 변화에 따라 수렴성에 영향을 미치게 되나, 2단계 알고리즘 실행 단계를 거치면서 최종적으로 물성저하 위치를 정확하게 탐색함을 알 수 있었다.

결론적으로 상용프로그램 ABAQUS와 유전알고리즘을 접목한 본 연구의 해석 결과는 상대적으로 매우 적은 개수

의 데이터로부터 복합재료 구조물의 미시역학적 손상을 규명하는 데 적용이 가능함을 보여준다. 그러나 상하 및 좌우 대칭인 경우는 고유진동수 만으로는 위치 탐색이 정확하지 못할 수 있다. 또한, 모든 분할 요소에 대하여 미지수를 탐색하는 기법보다는 손상 분포 함수를 정의하여 추정하는 방법을 사용하는 것이 수치해석적 관점에서 보다 효율적일 수 있을 것으로 판단되며, 향후 실험을 통한 검증 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2015R1A2A2A01005637).

REFERENCES

1. Krawczuk, M., "Application of Spectral Beam Finite Element with a Crack and Iterative Search Technique for Damage Detection", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, 2002, pp. 537-548.
2. Yang, J.C.S., Tsai, T., Pavlin, V., Chen, J., and Tsai, W. H., "Structural Damage Detection by the System Identification Technique", *Shock and Vibration*, Vol. 55, 1985, pp.57-68.
3. Rizos, P.F., Aspragathos, N., and Dimarogonas, A.D., "Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes", *J. Sound and Vibration*, Vol. 138, 1990, pp. 381-388.
4. Ostachowicz, W.M. and Krawczuk, M., "Analysis of the Effect of Cracks on the Natural Frequencies of a Cantilever Beam", *J. Sound and Vibration*, Vol. 150, 1991, pp. 191-201.
5. Ruotolo, R. and Shifrin, E.I., "Natural Frequencies of a Beam with Arbitrary Number of Cracks", *J. Sound and Vibration*, Vol. 222, No. 3, 1999, pp. 409-423.
6. Salawu, O.S., "Detection of Structural Damage through Change in Frequency: A Review", *Engng. Struct.*, Vol. 19, No. 9, 1997, pp. 718-723.
7. Morassi, A. and Rollo, M., "Identification of Two Cracks in a Simply Supported Beam from Minimal Frequency Measurements", *J. Sound and Vibration*, Vol. 7, 2001, pp. 729-739.
8. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
9. Chou, J.H. and Ghaboussi, J., "Genetic Algorithm in Structural Damage Detection", *Comput. Struct.*, Vol. 79, 2001, pp. 1335-1353.
10. Au, F.T.K., Cheng, Y.S., Tham, L.G., and Bai, Z., "Structural Damage Detection Based on a Micro-genetic Algorithm Using Incomplete and Noisy Modal Test Data", *J. Sound and Vibration*, Vol. 259, No. 5, 2003, pp. 1081-1094.
11. Gudmudson, P., "The Dynamic Behaviors of Slender Structures with Cross Section Cracks", *J. Mech. and Phys. of Solids*, Vol. 31, No. 4, 1982, pp. 329-345.
12. Christides, S. and Barr, A.D.S., "One-dimensional Theory of Cracked Bernulli-Euler Beams", *I. J. Mechanics and Science*, Vol. 26, No. 11/12, 1984, pp. 639-648.
13. Hewitt R.L. and Malherbe, M.C., "An Approximation for the Longitudinal Shear Modulus of Continuous Fiber Composites", *Journal of Composite Materials*, 1970, pp. 280-282.
14. Kim G.D., Rus G., and Lee S.Y., "Natural Frequency and Mode Characteristics of Composite Pole Structures for Different Layup Sequences", *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 4, No. 1, 2013, pp. 9-14 (in Korean).