

복합소재 결함 추정을 위한 ABAQUS 프로그램 연동 시스템인식 기법

System Identification Techniques Associated with ABAQUS Program for Detecting Defects of Composites



김규동 (Gyu-Dong Kim) | 학생회원 | 안동대학교 토목공학과 박사과정 | kkd1514@hanmail.net

이상열 (Sang-Youl Lee) | 이사 | 안동대학교 토목공학과 교수 | lsy@anu.ac.kr

1. 서론

복합재료는 두 가지 이상의 재료가 적절히 조합이 되어 보다 유용한 기능을 발현하는 재료이다. 그리고 재료의 성능에 비해서 경량이면서 모재와 섬유 종류, 적층배열에 변화로 다양한 구조적 특성을 나타낼 수 있기 때문에 우주, 건설, 항공, 기계 등의 다양한 분야에서 수요가 증가하고 있다. 복합재료의 특성상 미시역학적 으로 화이버의 물성이 전체 구조성능에 지배적인 영향을 미치게 되며, 화이버의 물성저하는 복합재료의 중요한 손상유형 중 하나라고 할 수 있다.

손상이 발생한 구조 부재의 동적 특성은 중요한 연구 주제로서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 보와 같은 구조 부재에 발생한 손상은 부재의 고유진동수를 감소시킴으로서 강성을 약화시키는 작용을 하게 된다. 따라서 부재의 고유진동수 변화는 부재에 발생하는 균열 특성을 파악하는 중요한 요인이 되며, 고유진동수 측정치로부터 균열 및 손상의 위치 혹은 크기를 찾아내는 역문제를 해결하는 다양한 해석적 연구가 진행되었다. 기존 연구들은 역문제를 수학적 해석적으로 해결하기 위한 방법들을 제시한 것으로서 해석 모델 및 물성 조건 등

에 대하여 일정한 제한성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 이용한 역문제 해결을 위하여 유전 알고리즘(Genetic algorithm) 기법을 소개하고자 한다. 유전 알고리즘은 자연선택과 유전학에서 발견된 몇몇 중요한 특징과 컴퓨터 알고리즘을 접목한 확률적 탐색 도구로서 Holland에 의하여 처음 개발된 후 다양한 개발연구가 진행되었다. 유전알고리즘은 기존의 알고리즘들이 해결하기 어려웠던 복잡한 문제를 성공적으로 해결할 수 있으며 근래에는 다양한 공학문제에 응용되고 있다. 다양한 분야에서 여러 형태의 유전알고리즘이 개발되었으나 재생산을 알고리즘으로 구현하는 룰렛 휠선택 기법은 수치적 효율성을 좌우하는 요인이 되고 있다. 따라서 본 기사에서는 유전알고리즘을 자유진동하는 복합재료 적층판 구조물을 대상으로 화이버의 물성 저하를 역문제의 해결기법을 기술하고자 한다.

본 기사에서는 미시역학적 관점에서의 화이버 물성 저하를 주요 손상 변수로 하며, 역문제를 해결하기 위하여 ABAQUS 프로그램과 연동된 고등 시스템 인식 기법을 적용한다. 몇가지 예제로부터 제안한 알고리즘을 적용하여 자유진동하는 적층판의 화이버 물성저하 위치 및 정도를 수치적 효율성 관점에서 효과적으로 추

정할 수 있음을 검증하고자 한다.

2. 미시역학적 복합소재 섬유물성 저하 모델

미시역학적 접근방법은 복합재료를 구성하는 모재와 섬유에 대하여 각각의 역학적 특성을 고려하여 강성 또는 강도를 추정하는 방법이다. 복합재료의 미시역학적 접근법에서 가장 중요한 변수는 모재에 결합되는 화이버의 함침비율이다. 화이버의 함침비율은 복합재료의 강성변화를 가져오게 되며, 거시적 구조성능에 중요한 영향을 미치게 된다. 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. 재료 역학적 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. 그러나 실제 섬유보강 복합재료의 섬유는 불규칙하게 정렬되어 있다. 이 부분을 고려하여 섬유의 함침비율에 따라 비선형 관계를 보이는 E_2 와 G_{12} 의 값은 탄성론적 관점에서 정확해를 산정할 수 있으며, 요약하면 다음과 같이 나타낼 있다[4].

$$E_2 = 2[1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m) V_m][\alpha + \beta] \quad (6)$$

$$G_{12} = (1 - \xi)\gamma + \xi\delta \quad (7)$$

여기서,

$$\alpha = (1 - \xi) \frac{\lambda_f(2\lambda_m + G_m) - G_m(\lambda_f - \lambda_m) V_m}{(2\lambda_m + G_m) + 2(\lambda_f - \lambda_m) V_m},$$

$$\beta = \xi \frac{\lambda_f(2\lambda_m + G_f) + G_f(\lambda_m - \lambda_f) V_m}{(2\lambda_f + G_f) - 2(\lambda_m - \lambda_f) V_m},$$

$$\gamma = G_m \frac{2G_f - (G_f - G_m) V_m}{2G_m + (G_f - G_m) V_m},$$

$$\delta = G_f \frac{(G_f + G_m) - (G_f - G_m) V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) V_m} \text{ 이며,}$$

$$\lambda_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f)}, \quad G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)}, \quad \lambda_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m)},$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \text{ 이다.}$$

여기서, ξ 는 섬유의 연속성 정도를 나타내는 계수이며, 섬유들이 모재안에서 독립적으로 함침된 경우에는 0을 사용하며, 모두 접촉되어 함침된 경우는 1.0의 값을 사용한다.

3. ABAQUS 연동 시스템 인식 기법

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

$$\{\eta^{(k)}\} = \{\eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \eta^{(3)}, \dots, \eta^{(K)}\} \quad (8)$$

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 수치해석상의 수렴성을 크게 좌우하므로 매우 중요하다. 본 연구에서는 다음과 같이 각 세대(Generation)에서의 최적 함수값(최적오차, 대표오차) 값을 결정하였다.

$$\epsilon_k = \sum_{n=1}^N (\bar{\omega}[n] - \omega[n])^2, n=1,2,\dots,N. \quad (9)$$

여기서, $\bar{\omega}[n]$ 및 $\omega[n]$ 는 측정 및 계산된 n 번째 모드 고유진동수를 각각 의미하며, N 은 전체 고유진동수의 개수를 의미한다. 한편, 식 (9)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 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \text{Min}\{\epsilon_k\}, k=1,2,\dots,L. \quad (10)$$

여기서 L 은 각 세대에서의 가정되는 집단의 개수를 의미한다. 식 (10)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.

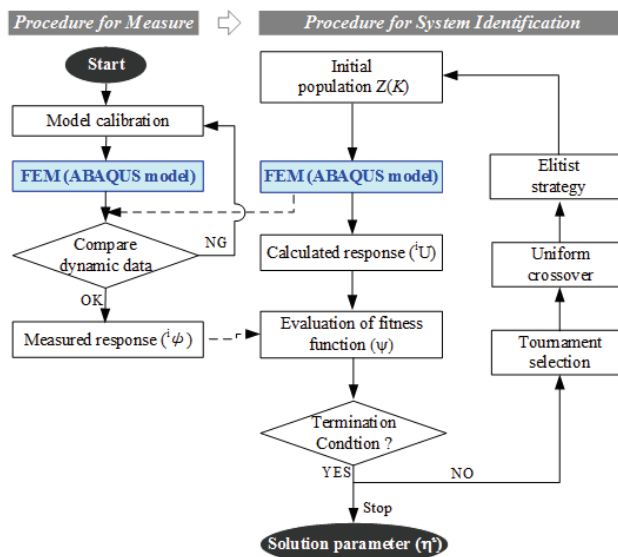


Fig 1. ABAQUS 연동 시스템인식 기법 흐름도

```

4 %% Young's Modulus/단위:Pa/matrix에서 1.5e11부분 손상
5 modulus = [2.1e11 2.1e11 2.1e11 2.1e11 1.5e11 2.1e11 2.1e11 2.1e11...
6            2.1e11 1.4e11];
7
8 %% truss.inp를 기준으로 Input_test.inp만들기
9 fid1 = fopen('truss.inp','r');
10 fid2 = fopen('input_test.inp','w');
11 for i=1:148
12     s=fgets(fid1);
13     fprintf(fid2,'%s',s);
14 end
15 for i=1:11
16     fprintf(fid2,'Material, name=MATERIAL-%i\n',i);
17     fprintf(fid2,'Density\n');
18     fprintf(fid2,'7700.\n');
19     fprintf(fid2,'Elastic\n');
20     fprintf(fid2,'%g,0\n',modulus(i));
21 end
22 for i=149:203
23     s=fgets(fid1);
24 end
25 for i=204:232
26     s=fgets(fid1);
27     fprintf(fid2,'%s',s);
28 end
29 fclose(fid1);
30 fclose(fid2);
31 %% Run ABAQUS CAE
32 !abaqus job=input_test.inp interactive
    
```

input file 생성

```

73 %% output_test.dat 파일에서 결과값 불러오기
74 fid5=fopen('output_test.dat','r');
75 for i=1:6
76     fgets(fid5);
77 end
78
79 a = fscanf(fid5,'%g %g %g %g %g', [6 inf]); % It has three rows now.
80 a = a';
81 for i=1:15
82     fgets(fid5);
83 end
84
85 a1 = fscanf(fid5,'%g %g %g', [3 inf]); % It has three rows now.
86 a1 = a1';
87 for i=1:15
88     fgets(fid5);
89 end
90
91 a2 = fscanf(fid5,'%g %g %g', [3 inf]); % It has three rows now.
92 a2 = a2';
93 for i=1:15
94     fgets(fid5);
95 end
96
97 a3 = fscanf(fid5,'%g %g %g', [3 inf]); % It has three rows now.
98 a3 = a3';
99 for i=1:15
100    fgets(fid5);
101 end
102
103 a4 = fscanf(fid5,'%g %g %g', [3 inf]); % It has three rows now.
104 a4 = a4';
105 fclose(fid5);
106
123 disp_m(1:18,1:2) = a1(:,2:3);
124 disp_m(19:36,1:2) = a2(:,2:3);
125 disp_m(37:54,1:2) = a3(:,2:3);
126 disp_m(55:72,1:2) = a4(:,2:3);
127 disp_m(73:76,1:2) = a(:,2:3);
128 save disp_m
    
```

ABAQUS 결과값
MATLAB에 저장

```

131 % INPUT OPTIONS =====
132 % Fitness function
133 fitnessfcn = @gaevalfun_test;
134 % Number of variables
135 nvars = 11;
136 % Linear inequality constraints
137 A = []; b = [];
138 % Linear equality constraints
139 Aeq = []; beq = [];
140 % Bounds
141 LB = [5 5 5 5 5 5 5 5 5 5];
142 UB = [30 30 30 30 30 30 30 30 30 30];
143 % Nonlinear constraints
144 nonlcon = [];
145 % =====
146
147 % OPTION CONTROL =====
148 % Start with default options
149 options = gaoptimset;
150
151 % Modify some parameters
152 options = gaoptimset(options,'PopulationSize',40);
153 options = gaoptimset(options,'Generations',350);
154 options = gaoptimset(options,'FitnessLimit',-Inf);
155 options = gaoptimset(options,'TolFun',1e-7);
156 % options = gaoptimset(options,'HybridFcn',{'patternsearch []});
157 options = gaoptimset(options,'Display','iter');
158 options = gaoptimset(options,'PlotFcns',{'gaplotbestf','@gaplotbestindiv,...
159 @gaplotstopping','@gaplotdistance});
160 % =====
161
162 % Run Genetic Algorithm: Tolerance = 1e-007 =====
163 tic;
164 [x,fval,exitflag,output,population,scores] = ga(fitnessfcn,nvars,A,b,...
165 Aeq,beq,LB,UB,nonlcon,options);
166 rt = toc;
    
```

```

110 % 목적함수를 정의한다.
111 er1 = 0; er2 = 0; er3 = 0;
112 % mode shape
113 for i=1:df1_max-4
114     er1 = er1 + (disp_m(i,1)+100-disp_f(i,1)+100)^2;
115     er2 = er2 + (disp_m(i,2)+100-disp_f(i,2)+100)^2;
116 end
117 % frequency
118 for i=df1_max-3:df1_max
119     er3 = er3 + (disp_m(i,2)-disp_f(i,2))^2;
120 end
121 val = er1 + er2 + er3;
    
```

Fig 2. MATLAB을 사용한 ABAQUS 및 유전알고리즘 제어 Code 요약

4. MATLAB Code

전술한 알고리즘을 구동하기 위하여 MATLAB을 적용하여 연동하는 프로그램 코드를 개발하였다. 프로그램 Input 및 Output을 요약하면 다음과 같다.

5. 해석 예

복합재료 구조물의 손상을 예측하기 위해서는 동적

시험 결과나 고유진동데이터 등과 같은 강도를 추정할 수 있는 데이터가 필요하다. 따라서 본 예제에서는 전술한 바와 같이 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 고유진동해석을 수행하고 그 데이터를 기반으로 GFRP 박판 구조의 화이버 강성저하추정을 수행하였다. 복합재료를 미시역학적 관점을 고려하기 위한 모재와 화이버의 물성은 Table 1과 같다.

유전자 알고리즘의 옵션은 Table. 2와 같다. 유한요소 해석을 위한 복합소재 판구조의 분할 요소는 Fig.3과 같이 9개이며 7번 요소에 대하여 화이버의 탄성계수

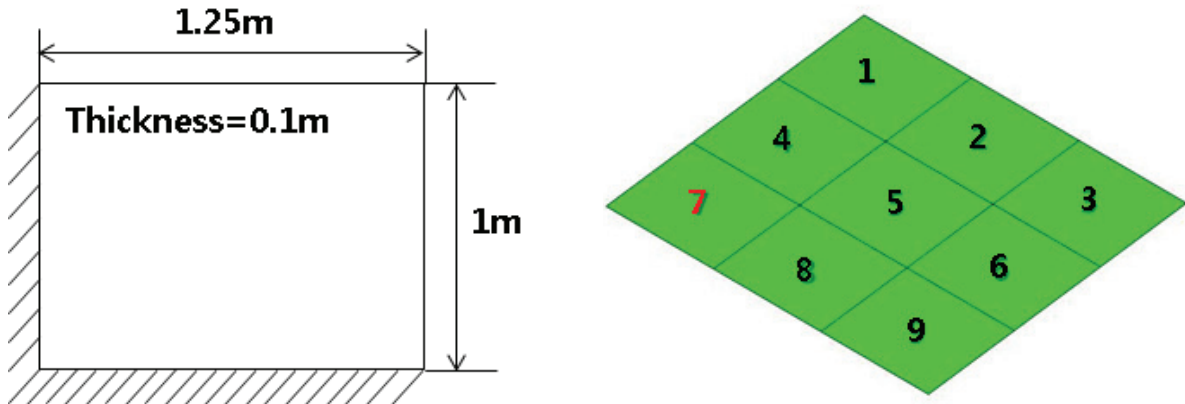


Fig 3. 해석 모델

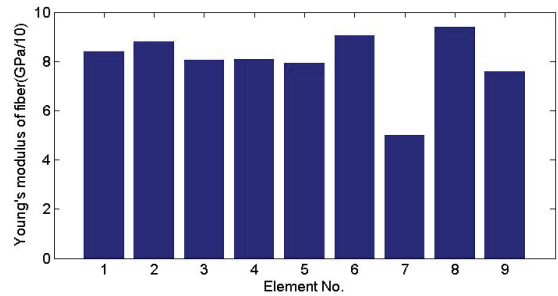
를 85.3GPa에서 20GPa로 변화시켰다. 역해석을 위하여 적용한 유전자 알고리즘의 입력변수를 요약하면 Table 2과 같다. 초기 생성은 해의 경계조건을 만족시키는 랜덤 초기변수를 생성하는 옵션을 사용하였다. 선택은 룰렛 선택법을 택하였으며 교차는 목적함수가 낮은 변수에 가중을 두어 교차하는 옵션을 선택하였다.

Table 1. 화이버와 모재의 물성

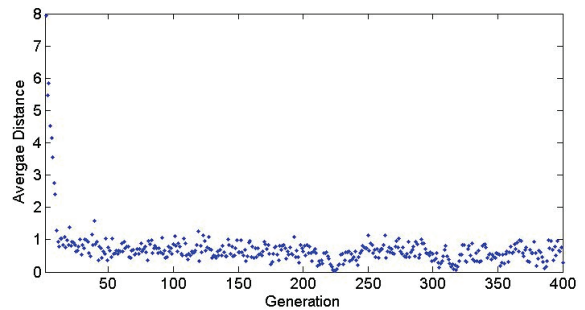
Material Propertise (GFRP) Em=3,45GPa Gm=1,26GPa $\nu m=0,35$ Ef=85,3GPa Gf=35,5GPa $\nu m=0,2$ Vf=50%	Density	1850kg/m ³
	E1	44,275GPa
	E2	11,796GPa
	E3	11,796GPa
	G12	3,494GPa
	G23	3,494GPa
	G13	3,494GPa
	$\nu 12$	0,275
	$\nu 23$	0,275
	$\nu 13$	0,275

Table 2. Genetic algorithm options for analysis case

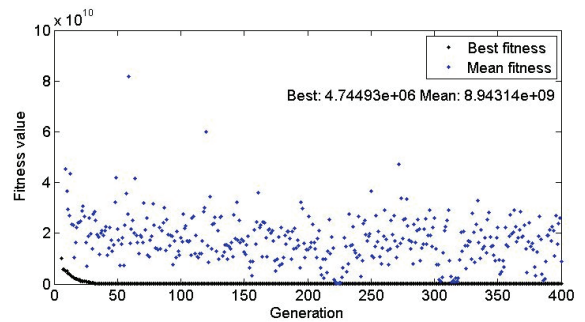
Generations	600
Populationsize	25
CreationFcn	gacreationlinearfeasible
SelectionFcn	selectionroulette
EliteCount	2
MutationFcn	mutationadaptfeasible
CrossoverFcn	crossoverheuristic
TolFun	1e-15
Search range	10GPa~100GPa



(a) Estimated values



(b) Average distance between individuals



(c) Fitness value for generation

Fig 4. Genetic algorithm results

유전자 알고리즘을 통하여 목표한 값을 정확하게 추정하기 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.

Fig. 4는 알고리즘 실행 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 각 분할 요소에 대하여 추정한 최종 결과를 보여주며, 7번 요소의 화이버 강성변화 현상을 정확하게 관찰 할 수 있었다. Fig. 4(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. 4(c)는 한 세대에서 가장 적합도가 높은 개체에 대한 적합도 값을 의미한다.

5. 요약 및 결론

본 기사에서는 시스템 인식기법을 실행하기 위하여 역문제 해결로 유전알고리즘을 적용하였으며, 상용프로그램과 연동기법을 도입하여 실무적 측면에서의 사용성을 증대하는 방안을 소개하였다. 또한, 해석 예를 통하여 미시역학 기반으로 화이버의 물성저하 추정 가능성에 대하여 검증하였다. 해석 결과, 9개의 분할 요소를 갖는 단일 적층판에 대하여 제안한 알고리즘을 적용하였을 경우 화이버의 물성 저하 위치를 한 번의 탐색 실행으로 정확하게 추정할 수 있었다.

상용프로그램 ABAQUS와 유전알고리즘을 접목한 해석 결과는 상대적으로 매우 적은 개수의 데이터로부터 복합재료 구조물의 미시역학적 손상을 규명하는 데 적용이 가능함을 보여준다. 그러나 모든 분할 요소에 대하여 미지수를 탐색하는 기법보다는 손상 분포 함수를 정의하여 추정하는 방법을 사용하는 것이 수치해석적 관점에서 보다 효율적일 수 있으므로 이에 대한 추가적 연구가 필요하다.

후 기

본 기사는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구내용 중 일부를 발췌하였음.
(No.2015R1A2A2A01005637).

참고문헌

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. Salawu, O.S. "Detection of structural damage through change in frequency: A review." *Engng. Struct.*, Vol. 19(9), 1997, pp.718-723.
5. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems." Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
6. Chou, J.H., and Ghaboussi, J., "Genetic algorithm in structural damage detection." *Comput. Struct.*, Vol.79, 2001, pp.1335-1353.
7. Gudmudson, P., "The dynamic behaviors of slender structures with cross section cracks." *J. Mech. and Phys. of Solids*, Vol. 31(4), 1982, pp. 329-345.

8. 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.
9. 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).