크랙이 있는 복합재료 보 자유진동특성의 이론과 실험적 입증

Theory and Experiments of Free Vibration Characteristics for the Composite Beam with Transverse Open Cracks

하 태 완*
Ha, Tae-Wan

ABSTRACT

Theoretical and experimental free vibration characteristics of cantilevered laminated composite beams with single or multiple transverse non-propagating open cracks are investigated. The presence of intrinsic cracks in beams modifies the flexibility and in turn free vibration characteristics of the structures, and the existence of the multiple cracks in an anisotropic composite beam affects the free vibration characteristics in a more complex fashion compared with the beam with a single crack. Also the experimental results are well coincide with the numerical results in the decrease of natural frequencies and the transformation of mode shapes because of intrinsic cracks in the composite or aluminum beams. It is revealed that non-destructive crack detection(NDT) or vibration based inspection(VBI) is possible by analyzing the free vibration responses of cracked composite beams.

주요기술용어 : Composite Beam(복합재료 보), Single Crack(단일 크랙), Multiple Cracks(다중 크랙)

1. 서 론

단일 혹은 다수의 크랙과 같은 결함이 존재하는 복합재료 보를 대상으로 Timoshenko 보 이론을 적용하여 이론적으로 운동방정식을 유도하고 수치해석을 통하여 보의 자유진동특성의 변화를 연구 고찰한 바 있다[1,2,3]. 이들 연구에서는 복합재료에 존재하는 크랙을 보의 길이 방향에 대해 불연속 부분으로 고려하고, 파괴역학 이론 및 Castigliano 정리를 이용하여 연성(flexibility)을 구하고 등가의 에너지를 갖는 회전스프링으로 변환시킴으로써 이론적인 표현이 가능한 방법을 사용하였다. 크랙과 같은 결함의 존재는 구조물의 연성을 증가시키므로써 고유진동수를 낮추는 방향으로 전이시키는 효과를 발생한다. 특히 복합재료를 구성하는 변수로 섬유체적비 및 섬유적층각과 크랙의 기하학적 변수인 크랙의 위치, 깊이 및 수량의 상호

* 국방과학연구소

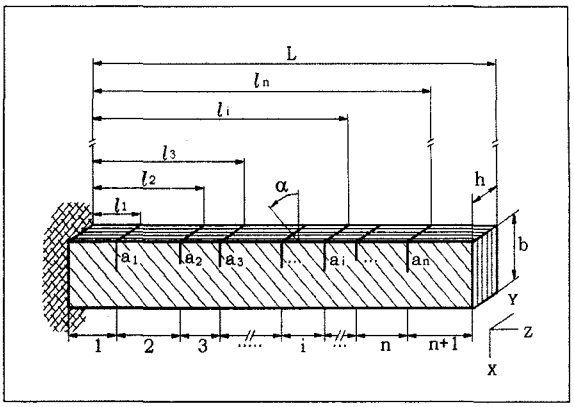
관계에 따라 다양하게 변화함을 이론 해석 과정을 통하여 입증하였다. 특히 다중 크랙이 있는 보의 자유진동특성은 단일 크랙이 있는 보에 비해서 훨씬 복잡하고 다양하게 변화한다. 그러나 이와 같은 현상은 단순히 고유진동수의 변화만으로 크랙의 위치, 깊이, 수량의 변화에 따른 특성을 표현할 수 없으며, 최소 1~3차까지의 병진 또는 회전모드 형상을 동시에 고찰하므로써 보다 정확한 특성을 파악할 수 있음을 보여주고 있다. 이 같은 이론 해석의 결과는 1개 또는 2개까지의 크랙을 가진 경우나, 등방성 재료를 대상으로 한 유사 연구 결과[4,5,6]와의 비교를 통하여 이미 타당성을 입증한 바 있다. 그러나 본 논문에서는 앞에서 언급한 이론 해석의 타당성을 근본적으로 확인할 목적으로 주요 이론 해석의 내용과 조건을 근접시켜 실험을 실시하고 그 결과를 상호 직접 비교하였다. 본 연구의 실험과정에서도 나타났지만 실제로 복합재료는 등방성 재료에 비해 제작에 따른 변수가 훨씬 많고 결함의 내재 가능성이 높은 점이 고려되어야 하며, 이와 같은 차이를 고찰할 수 있도록 등방성 재료도 실험에 포함 시켜 이론 해석과 상호 비교함으로써 이론 해석의 신뢰성을 한층 더 확인하였다.

2. 이론 및 해석

2.1 운동방정식 및 경계조건

이론 및 해석에 적용한 복합재료는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 x-z 평면상에서 모든 층을 한 방향으로 적층하여 횡방향 굽힘과 축방향 인장운동이 연성(couple)되어 나타나는 CAS(Circumferentially Asymmetric Stiffness) 구조물 형태의 외팔보이다.

이와 같이 한 방향 적층 복합재료를 대상으로 선정



[그림 1] Configuration of the composite beam with multiple transverse open cracks

하게 된 것은 복합재료의 파괴역학적 표현의 한계성 때문이다[7,8]. 보의 축 방향을 따라 위치한 크랙은 단일 크랙의 경우를 포함하여 다수의 크랙을 대상으로 비전파형 크랙이 모두 보의 상하 경계면에 수직한 횡방향의 개구형으로 존재하는 경우이다. 복합재료 보의 정확한 운동방정식을 도출하기 위해 Timoshenko 보 이론을 적용하였으며, 변위장은 그림 1 외팔보의 좌표계를 기준으로 FSDT(First Order Shear Deformation Theory)에 다음과 같이 표현된다[1,2].

$$u(x,y,z,t) = u_o(z,t) - y\phi(z,t) \tag{1}$$

$$v(x,y,z,t) = v_o(z,t) + x\phi(z,t) \tag{2}$$

$$w(x,y,z,t) = w_o(z,t) + y\theta_x(z,t) + x\theta_y(z,t) \tag{3}$$

여기에서 u_0, v_0, w_0 는 x, y, z방향의 병진변위(translation)를 나타내고, θ_x, θ_y, ϕ는 x, y, z축 중심의 보 단면의 회전각(rotation)을 나타낸다. 그림 1에서 일반적인 직교이방성 복합재료의 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{yz}\\ \sigma_{xy}\\ \sigma_{xz}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{13} & 0 & 0 & \overline{Q}_{16}\\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{23} & 0 & 0 & \overline{Q}_{26}\\ \overline{Q}_{13} & \overline{Q}_{23} & \overline{Q}_{33} & 0 & 0 & \overline{Q}_{36}\\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{44} & \overline{Q}_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{45} & \overline{Q}_{55} & 0\\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{36} & 0 & 0 & \overline{Q}_{66}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{zz}\\ \varepsilon_{yy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{xz}\end{pmatrix} \quad (4)$$

Stress resultants와 stress couples는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix}N_{zz}\\ N_{xz}\\ L_{zz}\\ L_{xz}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}K_{11} & K_{12}\\ K_{21} & K_{22}\\ K_{41} & K_{42}\\ K_{51} & K_{52}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{zz}\\ \gamma_{xz}\end{pmatrix} \quad (5)$$

여기에서 K_{ij}는 A, B, D 행렬의 요소들로 표현되는 수정강성계수들이다. 각 각의 크랙은 회전스프링으로 연결되는 불연속면으로 고려하여 i 번째 크랙을 기준으로 보의 고정단 방향을 i 구간, 자유단 방향을 $i+1$ 구간으로 설정하고 해밀톤 원리를 이용하여 운동방정식과 경계조건을 유도하였다. 최종적으로 유도해낸 크랙 사이의 구간별 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.($i=\overline{1,n+1}$).

$$\delta u_{oi}\ ;\ a_{44}(\theta_{yi}'+u_{oi}'')-b_1\ddot{u}_{oi}=0 \quad (6)$$

$$\delta\theta_{yi}\ ;\ a_{22}\theta_{yi}''-a_{44}(\theta_{yi}+u_{oi}')-b_5\ddot{\theta}_{yi}=0 \quad (7)$$

여기에서

$$a_{22}=\int_{-b/2}^{b/2}K_{11}x^2dx,$$

$$a_{44}=\int_{-b/2}^{b/2}K_{22}dx,$$

$$b_1=\int_{-b/2}^{b/2}\rho hdx,$$

$$b_5=\int_{-b/2}^{b/2}x^2\rho hdx$$

그리고 보의 고정단, 자유단, 크랙위치에서의 경계조건 및 적합조건은 다음과 같이 표현된다.($i=\overline{1,n}$)

$$\text{at}\ \ z=0\ ,\ \ u_{o1}=\theta_{y1}=0 \quad (8)$$

at i-th crack $z=l_i$.

i) $u_{oi}=u_{oi+1}$

ii) $\theta_{y\,i+1}-\theta_{y\,i}=\dfrac{a_{22}}{K_{Ri}}\theta_{yi+1}'$ (9.1-4)

iii) $\theta_{yi+1}+u_{oi+1}'=\theta_{yi}+u_{oi}'$

iv) $\theta_{yi}'=\theta_{yi+1}'$

$$\text{at}\ \ z=L,\ \theta_{yn+1}+u_{on+1}'=\theta_{yn+1}'=0 \quad (10)$$

본 논문에서는 복합재료 보의 굽힘 자유진동 형태에 적합하도록 n개의 크랙을 각 각 회전스프링으로 변환하였다. 따라서 K_{Ri}는 파괴역학 및 Castigliano 정리를 통해 i 번째 크랙선단에서 부가되는 연성을 등가의 회전스프링 상수로 나타낸 값이다.

2.2 해석(엄밀해)

이론적인 해는 라플라스 변환법에 의한 엄밀해로 가능하다. 크랙이 있는 보의 각 구간에서 다음과 같은 동기운동(synchronous motion)의 해를 가정한다. ($i=\overline{1,n+1}$)

$$[u_{oi}(z,t),\theta_{yi}(z,t)]=[U_{id}(z),Y_{id}(z)]e^{j\omega t} \quad (11)$$

그리고 다음과 같이 무차원양을 정의한다.

$$[u_{oi}(\eta, t), \theta_{yi}(\eta, t)] = [U_i(\eta), Y_i(\eta)] e^{j\omega t} \quad (12)$$

여기에서

$$\eta \equiv \frac{z}{L}, c \equiv \frac{l_i}{L}, \bar{a} \equiv \frac{a_i}{b}, U_i(\eta) = \frac{U_{id}(z)}{L} \quad (13)$$

식 (6-10)을 무차원화 하면 다음과 같다.

$$Y_i' + U_i'' + \omega^2 f_1 U_i = 0 \quad (14)$$

$$Y_i'' - f_2(Y_i + U_i') + \omega^2 f_3 Y_i = 0 \quad (15)$$

무차원 경계조건 및 적합조건은 다음과 같다.

$$\text{at } \eta = 0, \quad U_1 = Y_1 = 0 \quad (16)$$

$$\text{at } \eta = c_i, \; U_i = U_{i+1}$$

$$Y_{i+1} - Y_i = \frac{a_{22}}{K_{Ri} L} Y_{i+1}' \quad (17.1\text{-}4)$$

$$Y_i + U_i' = Y_{i+1} + U_{i+1}'$$

$$Y_i' = Y_{i+1}'$$

$$\text{at } \eta = 1, \; Y_{n+1} + U_{n+1}' = Y_{n+1}' = 0 \quad (18)$$

여기에서

$$f_1 = \frac{b_1}{a_{44}} L^2, \; f_2 = \frac{a_{44}}{a_{22}} L^2, \; f_3 = \frac{b_5}{a_{22}} L^2 \quad (19.1\text{-}3)$$

식(14), (15)를 라플라스 변환하고 이에 식(16)을 대입하여 $\overline{U_i}(s), \overline{Y_i}(s)$를 구하고 이를 라플라스 역변환을 취하여 각 각 $U_i(\eta), Y_i(\eta)$를 구한 후 앞의 경계조건 식(16), (18) 및 적합조건 식(17)을 적용하여 행렬식 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$[K]\{q\} = \{0\} \quad (20)$$

식(20)에서 $det\,[K] = 0$을 만족하는 ω의 값들이 고유진동수이며 각 고유진동수에 대응되는 벡터 $\{q\}$를 구하여 $U_i(\eta)$, $Y_i(\eta)$식에 대입하면 모드형상을 구할 수 있다.

3. 실 험

3.1 복합재료 특성 및 물성 측정

본 시험에서 사용한 적층 복합재료의 프리프레그(prepreg)는 (주)한국카본 제품인 Carbon(T-300)/Epoxy(모델명 CU125NS)이며 특성 및 물성치는 표 1과 같다. 본 논문에서 연구대상으로 한 복합재료 보의 특성을 갖도록 하기 위하여 모든 층(laminae)을 단일 방향으로 적층하여 Autoclave 내에서 온도 130 ℃, 압력 3기압으로 1시간 동안 가압 성형한 후 가공하였다.

[표 1] The prepreg properties of the composite used for experiments

Item	Description
Prepreg weight, g/m^2	200
Fiber areal weight, g/m^2	125
Resin content, %	37
Volatile content, %	Max. 1.0
Ply thickness, mm	0.13
Fiber volume fraction, %	55±3

또 복합재료는 이론 해석에 적용 가능한 기계적 물성치 파악을 위해 ASTM D3039-76에 의거 섬유방향 0°, 45°, 90° 3종의 시험편을 제작하고 인장시험을 실시하여 최종적으로 구한 복합재료의 기계적인 물성치는 다음과 같다.

E_1 = 117.0 Gpa,

$E_2 = E_3$ = 8.5 Gpa,

$\nu_{12} = \nu_{13}$ = 0.32, ν_{23} = 0.45,

G_{23} = 2.931 Gpa,

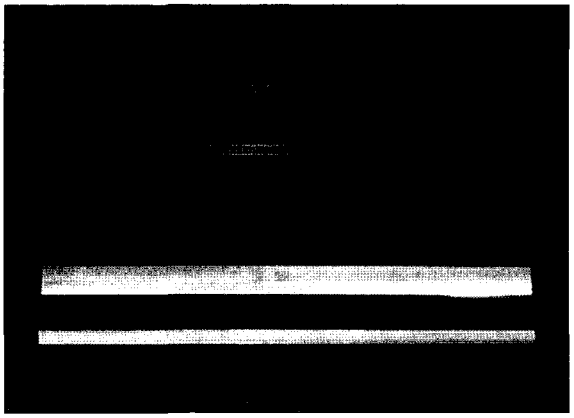
$G_{12} = G_{31}$ = 6.061 Gpa,

ρ = 1538.46 Kg/m^3

3.2 모드시험용 시편

모드시험용 시편은 앞 절에서 언급한 복합재료와 아울러 보다 폭넓은 비교 고찰이 이루어질 수 있도록 등방성 재료인 알루미늄 보 시편 등 모두 2종류를 준비하였다. 복합재료 보 시편은 모든 층을 한 방향으로 하여 60 ply를 적층하고 섬유적층각이 각 각 0° 및 90°가 되도록 가공하였다. 또 복합재료 보의 크기는 클램프 부위를 제외한 길이(L)×폭(h)×높이(b)가 300×8×25 mm가 되도록 제작하였으며, 알루미늄 보의 크기는 300×10×20 mm로 하였다. 그림 2는 이와 같이 제작한 2종류의 모드시험용 시편을 나타내는 사진이다.

모드시험용 시편은 먼저 크랙 삽입 전에 연속 보 상태에서 고유진동수를 측정하여 이론 해석 및 다른 시편의 측정값과 상호 비교를 통해 건전성을 판단하였다. 복합재료 보는 경도가 대단히 커 크랙의 삽입이 쉽지 않지만 먼저 두께 0.35 mm의 소형 탄소강 톱날

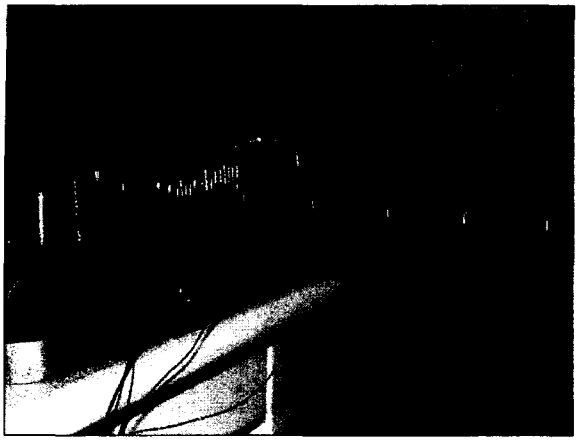


[그림 2] Composite and aluminum beams for modal tests

을 이용하여 초벌 가공을 한 뒤에 크랙 선단부를 직경 0.01″(0.254 mm)의 다이아몬드가 코팅된 wire blade를 장착한 South Bay Technology, Inc.의 Model 850 wire saw를 이용하여 마무리하였다. 이 때 삽입한 크랙의 폭은 J.M. Montalvao 등[9]의 연구결과를 참고하여 설정하였다.

3.3 모드시험(modal test)

크랙이 없는 상태의 복합재료 연속 보 및 알루미늄 보의 모드시험시 주파수분석기는 Diagnostic Instruments Ltd.의 DI 2200 FFT Analyzer를 사용하였으며, Impact hammer는 PCB 086C03, 가속도계는 Kistler 8728A500을 사용하였다. 또 크랙이 삽입된 보의 모드시험에서는 정확도를 높이기 위하여 다중 채널 신호 획득이 가능하도록 주파수분석기는 B&K 3550, Impact hammer는 B&K 8203을 사용하였으며, 가속도계는 B&K miniature type 4374 7개를 사용하여 보를 6등분한 경계선에 부착하여 동시에 측정하였다. 보의 클램프 부위는 4면이 최대한 구속되도록 설치하였다. 그림 3은 복합재료 보에 7개의 가속



[그림 3] Closed-up accelerometers on the clamped composite beam

도계를 등간격으로 부착한 모습을 나타내며, 보의 자유단 끝부분의 하부를 윗방향으로 가진하였다.

[표 2] Comparison of the natural frequencies between theoritical analysis and modal tests for non-cracked composite beams

Mode	ply angle (°)	① Experimental value (Hz)	Timoshenko		Euler-Bernoulli	
			② value (Hz)	③ error (%)	④ value (Hz)	⑤ error (%)
1st	0	100.0	118.84	15.85	119.29	16.17
	90	338.0	386.03	12.44	396.71	14.79
2nd	0	609.0	728.79	16.43	747.59	18.53
	90	1782.0	2107.73	15.45	2486.19	28.32
3rd	0	1644.0	1975.32	16.77	2093.27	21.46
	90	4047.5	5045.24	19.74	6961.41	41.85

*③=100×(②-①)/②, **⑤=100×(④-①)/④

4. 비교 및 고찰

4.1 연속 보

모드시험에 의하여 측정한 크랙이 없는 복합재료 연속 보 시편의 고유진동수와 이 시편의 조건에 해당하는 이론 해석 결과를 표 2에 나타내었다. Timoshenko 보 이론의 경우가 Euler-Bernoulli 보 이론에 비해서 실험에 의한 측정값에 가깝게 나타나 이론 해석의 타당성을 보여주고 있다.

4.2 크랙이 있는 보

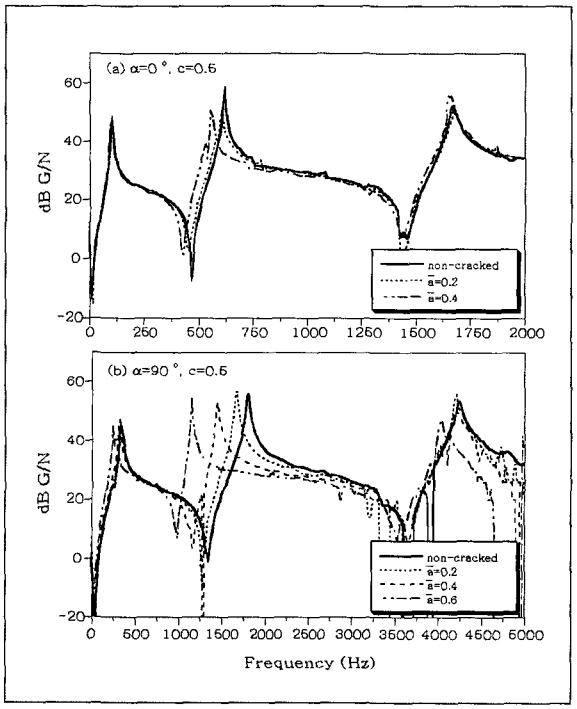
그림 4는 섬유적층각 0°, 90°의 복합재료 보의 동일 위치(c=0.5)에서 크랙 깊이를 달리하였을 때 나타나는 주파수 응답함수의 변화를 보여준다. 이 크랙 위치가 node에 위치해 있는 관계로 1, 3차 고유진동수 변화에 비해 2차 고유진동수 변화가 가장 컸으며, 크랙의 깊이가 깊어짐에 따라 섬유적층각이 0°인 보에 비해서 90°보의 고유진동수 감소 현상이 더욱 뚜렷이 나타났다.

크랙이 있는 보의 모드시험시에는 7개의 가속도계를 보에 등간격으로 부착하고, 모드형상을 구할 목적으로 시험을 실시하여 이론적으로 해석한 결과와 비교 고찰하였다. 경량이지만 다수의 가속도계를 부착함으로 인해 중량 증가 등 원인이 발생하여 비교 값으로 측정한 연속 보의 경우 고유진동수가 앞에서 언급한 측정값과 다소 차이를 보였다.

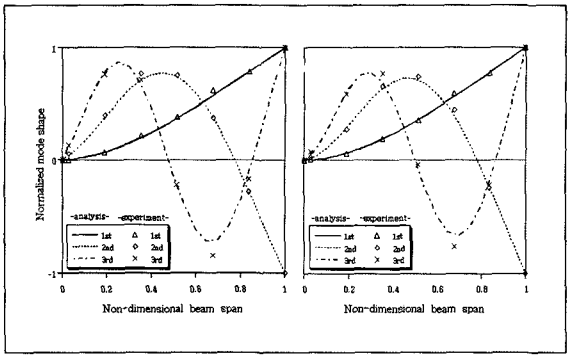
먼저 모드형상을 구한 실험의 타당성을 확인하기 위해 크랙이 없는 복합재료 보와 알루미늄 보에 대해 이론 해석결과와 실험결과를 각 각 비교하였다. 그림 5(a)는 크랙이 없는 복합재료 보를 이론적으로 해석한 1, 2, 3차 모드형상과 모드시험에서 등간격으로 7개소에 부착한 가속도계를 통해 구한 데이터를 정규화

하여 비교한 것으로 매우 잘 일치하고 있어 실험결과에 대해서 curve fitting과 같은 방법을 적용할 필요도 없이 이론 해석치와 직접 비교가 가능할 것으로 판단된다. 또 그림 5(b)도 마찬가지로 크랙이 없는 알루미늄 보에 대해서 동일한 방법으로 비교하여 나타낸 것으로 서로 잘 일치하고 있어 역시 이론 해석치와 실험치의 직접 비교가 가능한 타당성을 보여주고 있다.

본 논문에서는 섬유적층각이 90°인 복합재료 보를 대상으로 크랙이 없는 보, 크랙의 깊이비($\bar{a}$)가 0.4이고 위치비(c)가 각 각 0.2, 0.5인 2종의 단일 크랙 보 및 크랙 위치비가 0.1, 0.3, 0.5에 깊이비 0.2로 동일하게 삽입한 1종의 다중 크랙 보를 대상으로 이론 해석한 결과와 모드시험을 통하여 측정한 결과를 1, 2차

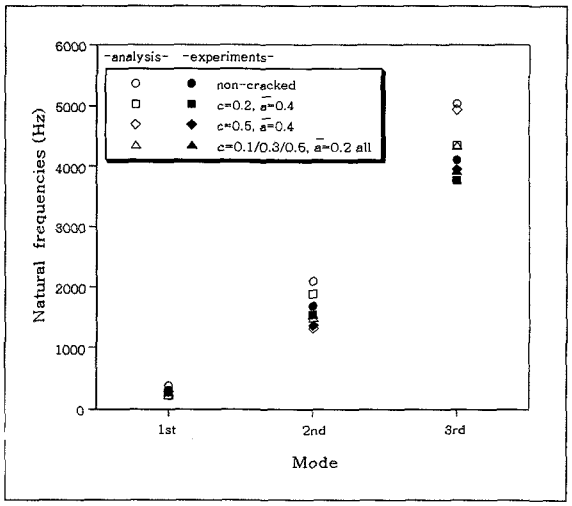


[그림 4] Configuration of the composite beam with multiple transverse open cracks



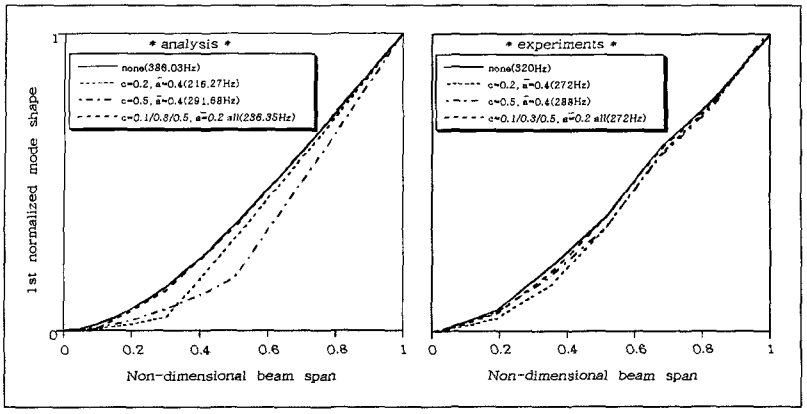
(a) (b)

[그림 5] Comparison of the analytical and experimental mode shapes for the non- cracked beams ; (a)Composite, (b)Aluminum

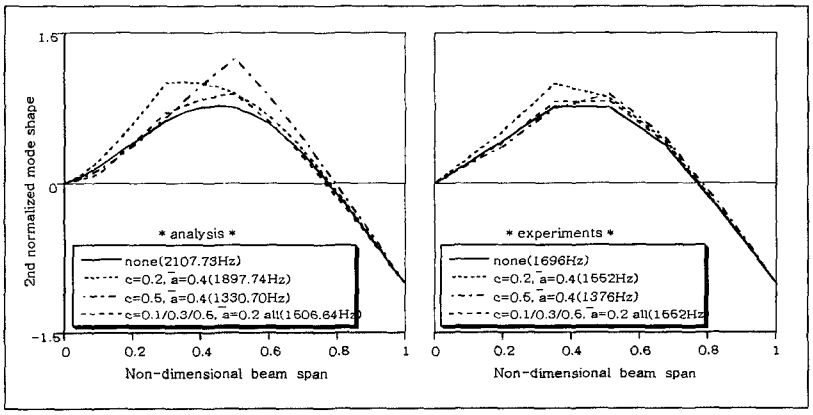


[그림 6] Comparison of the first three analytical and experimental natural frequencies for the cracked composite beams

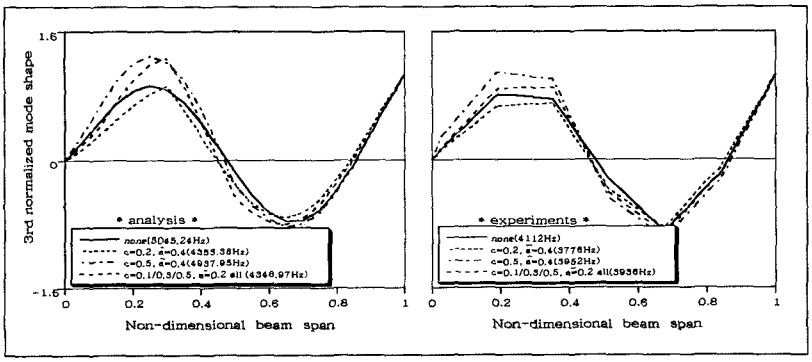
및 3차 병진 모드형상을 중심으로 비교하여 나타낸다. 먼저 크랙이 없는 보에 대해 실험으로 측정한 고유진동수는 이론 해석에 의한 고유진동수에 비해 작은 값을 보이지만, 크랙이 있는 경우에는 오히려 실험으로 측정한 값이 이론 해석에 비해 크거나 비슷한 값을



(a)

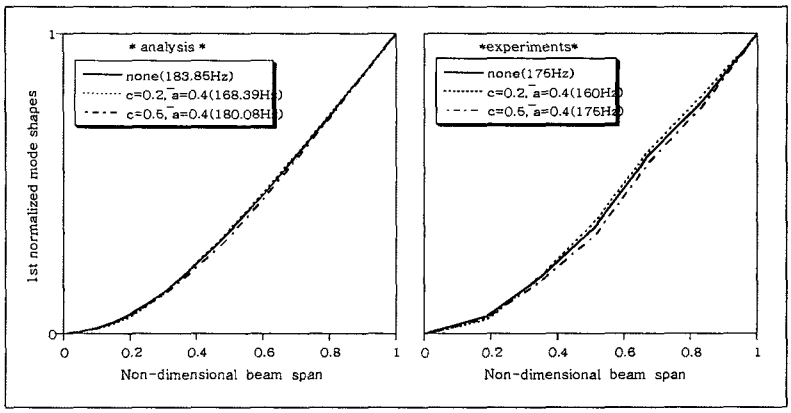


(b)

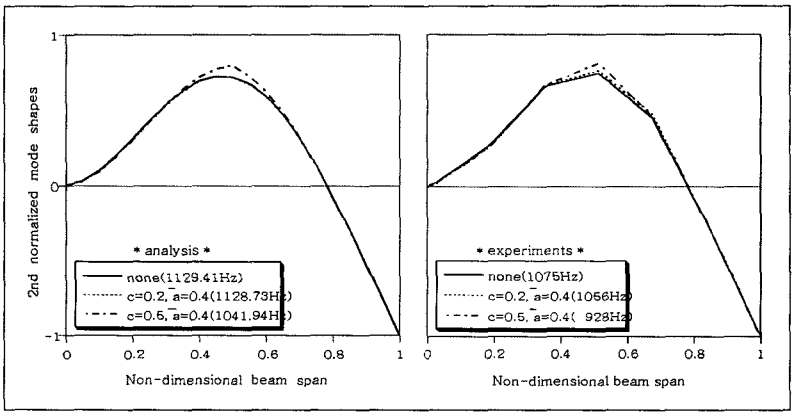


(c)

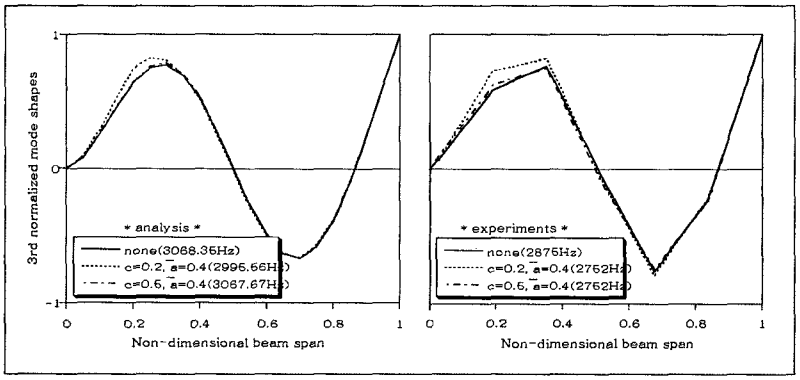
[그림 7] Comparison of the analytical and experimental mode shapes for the cracked composite beams at the same conditions(α =90°); (a) the 1st normalized mode shapes, (b) the 2nd normalized mode shapes, (c) the 3rd normalized mode shapes



(a)



(b)



(c)

[그림 8] Comparison of the analytical and experimental mode shapes for the cracked aluminum beams at the same conditions; (a) the 1st normalized mode shapes, (b) the 2nd normalized mode shapes, (c) the 3rd normalized mode shapes

나타냄으로써, 이론 해석을 통해 나타난 값의 고유진동수 변화의 폭이 큰 것으로 나타난 반면, 실험을 통해 측정한 값은 그 변화 폭이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 그림 6에 종합하여 나타냈다. 이 결과는 이론 해석시에는 복합재료 보를 이상적인 결합 및 제작을 통한 결점이 없는 완전한 재료로 가정하였으나 실제로는 재료 자체 및 제작공정, 인장시험 및 모드시험시 등 많은 과정에서 오차와 결함을 유발할 수 있는 복합재료의 특성에서 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같은 판단은 뒤에서 고찰한 알루미늄 보의 자유진동특성으로부터도 설명이 가능하다.

그러나 모드형상에 있어서는 이론 해석과 시험 측정값의 경향이 대체로 잘 일치한다. 그림 7(a)과 그림 7(b)의 1, 2차 모드형상에서 c=0.5, $\bar{a}$=0.4의 복합재료 보의 시험 결과가 이론 해석에 비해 변화의 폭이 다소 작게 나타난 것을 제외하고는 나머지의 결과는 이론 해석과 시험 결과가 거의 일치하고 있다. 특히 그림 7(c)의 3차 모드형상에 있어서는 1, 2차 모드형상에서는 다소 변화의 폭이 작았던 c=0.5, $\bar{a}$=0.4의 복합재료 보를 포함하여 모든 시편의 시험 결과가 가속도계의 부착 수량 및 위치를 고려하면 이론 해석 결과에 매우 잘 일치하고 있다. 이와 같은 시험 결과로부터 복합재료 보에서 크랙과 같은 결함을 찾아내기 위해서는 고유진동수뿐만 아니라 모드형상을 포함하여 자유진동특성을 파악하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다.

또 본 논문에서는 복합재료 보와 더불어 동일한 이론과 시험 방법을 통해 등방성 재료인 알루미늄 보의 이론 해석 및 모드시험을 실시하는 검증작업도 병행하였다. 그림 8(a), (b), (c)는 알루미늄 보의 1, 2차 및 3차의 자유진동특성을 이론 해석 결과와 모드시험 결과를 비교하여 나타낸다. 알루미늄 보의 시험 측정에 의한 고유진동수는 크랙이 있는 경우나 없는 경우 모두 이론 해석 값에 비해서는 약간씩 작게 측정되었으나 앞에서 고찰한 복합재료 보에 비해 더욱 서로 근접함으로써 상대적으로 등방성 재료의 단순함을 반영한 것으로 판단된다. 또 모드형상에 있어서도 진동모드에 관계없이 모두 이론 해석과 시험 결과가 매우 잘 일치하여 이론 해석의 타당성을 보여주고 있다.

이상의 모드시험 결과로부터 기 제시된 이론 해석적 방법으로 크랙이 있는 복합재료 및 등방성 재료 보의 자유진동특성을 판단하고 크랙의 위치 및 깊이 등을 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

한 방향으로 적층하여 횡 방향 굽힘과 축 방향 인장운동이 연성(couple)되어 나타나는 복합재료 보를 대상으로 비전파성 횡 방향 개구형의 단일 크랙 및 다중 크랙이 존재하는 경우의 자유진동특성을 이론과 실험으로 비교 고찰하였다. 이론 해석에서는 파괴역학적 접근을 통해 크랙에 의한 부가적인 연성(flexibility)을 효과적으로 나타낼 수 있도록 모델링하였으며, 복합재료 보의 특성에 적합하도록 Timoshenko 보 이론을 적용하여 운동방정식을 유도하고 수치해석을 실시하였다. 복합재료 보의 1, 2차 및 3차의 자유진동특성을 고찰하였으며, 모드시험을 통한 비교 분석을 통하여 단일 크랙과 다중 크랙이 있는 복합재료 보의 고유진동수 감소현상은 물론, 병진 모드형상의 변화가 해석적으로 예측이 가능하였으며, 동일 조건을 부여한 모드시험 결과와의 비교 분석을 통해 그 타당성을 입증하였다. 본 연구의 이론 해

석 결과를 이용하여 등방성 재료는 물론, 복합재료 보 구조물의 크랙의 존재 여부와 크랙의 위치 및 갯수, 크랙의 진전상황을 파악하여 보다 현실적으로 구조물의 건전성을 판단하고 손상을 예측할 수 있는 비파괴 검사(NDE: Non-Destructive Estimation 또는 VBI: Vibration Based Inspection)가 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] 하태완, 송오섭 "크랙이 존재하는 복합재료 보의 동적 특성 연구", 한국소음진동공학회지, 제9권 제5호, pp.1019~1028, 1999.

[2] 하태완, 송오섭 "다중 크랙이 있는 복합재료 보의 자유진동특성", 한국복합재료학회지, 제13권 제3호, pp.9~20, 2000.

[3] O. Song, T.W. Ha and L. Librescue, "Dynamics of anisotropic composite cantilevers weakened by multiple transverse open cracks" 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, AIAA 2001~1447, 2001.

[4] W.M. Ostachowicz and M. Krawczuk, "Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam", Journal of Sound and Vibration, Vol.150, No.2, pp.191~201, 1991.

[5] R. Ruotolo and C. Surace, "Damage assessment of multiple cracked beams: Numerical results and experimental validation", Journal of Sound and Vibration, Vol.206, No.4, pp.567~588, 1997.

[6] A.S. Sekhar, "Vibration characteristics of a cracked rotor with two open cracks", Journal of Sound and Vibration, Vol.223, No.4, pp.497~512, 1999.

[7] Z. Suo, G. Bao, B. Fan and T.C. Wang, "Orthotropy rescaling and implications for fracture in composites", Int. J. Solids and Structures, Vol.28, No.2, pp.235~248, 1991.

[8] G. Bao, S. Ho, Z. Suo and B. Fan, "The role of material orthotropy in fracture specimens for composites", Int. J. Solids and Structures, Vol.29, No.9, pp.1105~1116, 1992.

[9] J.M. Montalvao, E. Silva and A.J.M. Araujo Gomes, "Experimental dynamic analysis of cracked free-free beams", Experimental Mechanics, Vol.30, pp.20~25, 1991.