적층복합재료 패널의 확률론적 비선형 초기파단하중 및 좌굴하중에 관한 연구

Studies on Probabilistic Nonlinear First Ply Failure Loads and Buckling Loads of Laminated Composite Panels

방 제 성^{1)*}

Je-Sung Bang

Abstract

Probabilistic nonlinear first ply failure loads of flat composite panels and nonlinear buckling loads of curved composite panels with cutouts are estimated to provide the more reliable main load carrying structure in the renewable energy industry and offshore structures. The response surface method approximates limit state surface to a second order polynomial form of random variables with the results of deterministic finite element analyses at given sampling design points. Furthermore, the iterative linear interpolation scheme is used to obtain a more accurate approximation of the limit state surface near the most probable failure point (MPFP). The advanced first order second moment method and the Monte Carlo method are performed on an approximated limit state surface to evaluate the probability of failure. Finally, the sensitivity of the reliability index with respect to transformed random variables is investigated to figure out the main random variables that have an effect on failures.

Keywords : Response surface method, Advanced first order second moment method, Monte Carlo method, Nonlinear first ply failure load, Nonlinear buckling load

1. 서 론

기존의 토목, 건축 분야에서는 주로 강재와 콘크리트를 이용하여 구조물을 설계 및 시공하였으나, 복합재료의 우수한 비강도, 비강성 그리고 설계의 유연성 때문에 최근 내진설계를 위한 보강재로 복합재료가 많이 적용되고 있다 (Han and Kim, 2007; Kim et al., 2010; Chang et al., 2012). 질이 좋은 바람을 얻기 위해서 점점 해상에 부유식 (floating type)으로 건설이 예상되고 있는 풍력발전기의 경우 블레이드 뿐만 아니라 타워구조물도 복합재료로 제작하려는 연구 (Lim et al., 2013)가 수행되고 있으며, 파력, 조력, 태양광, 수소와 같은 신재생에너지 산업과 기타 해양구조물 등에도 사용이 확대되고 있다. 그러나 복합재료는 기존 등방성 금속재질에 비해 성형 과정에서 많은 임의성 (randomness)과 불확실성 (uncertainty)을 가지고 있어 아직 하중을 감당하는 주부재로 널리 사용되지

못하고 있으며, 사용되더라도 상대적으로 큰 안전계수값을 적용하고 있다. 따라서 복합재료가 효율적으로 사용되기 위해서는 불확실성을 고려한 설계변수들을 이용한 확률론적 해석을 통하여 파괴확률을 계산하고, 구조물의 신뢰도를 확보하는 것이 필요하다.

복합재료의 파손과 관련하여 기존에 선형초기파단하중 (first ply failure)이나 분기좌굴 (bifurcation buckling)에 관한 연구 (Han et al., 2007; Yhim et al., 2004; Lee et al., 2005)가 다수 수행된 바 있으나, 비선형 특성을 고려하고 확률론적 접근방법을 수행한 사례는 없는 상태이다. 풍력발전기의 블레이드나 타워와 같이 두께에 비해 길이가 상대적으로 긴 경우 기하비선형 (geometry nonlinearity) 거동을 보이며, 취약한 좌굴거동을 보이게 된다.

본 연구에서는 기존의 확정론적 (deterministic) 비선형초기파단하중과 비선형좌굴하중이 존재하는 적층복합재료 패

1) 정회원, 한국기체연구원 기계시스템안전연구본부 선임연구원, 교신저자

* Corresponding author : jsbang@kimm.re.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

널에 대하여 강성, 강도 및 lamina의 두께를 확률변수로 하여 확률론적 해석을 수행하고, 확정론적 하중값보다 낮은 하중값들에서의 신뢰도 (reliability)를 분석해 보았다.

확률론적 해석 방법의 하나인 향상된 일계이차모멘트법 (Advanced First Order Second Moment method (AFOSM))에서는 최대파손가능점 (Most Probable Failure Point (MPFP))에 도달할 때 까지 주어진 설계변수값들을 이용하여 유한요소해석 수행 및 한계상태면을 이용한 파손여부를 반복적으로 계산해야 하므로 많은 계산 시간이 요구된다.

또 다른 방법인 몬테카를로법 (Monte Carlo Method (MCM))은 가장 강건하고 정확한 결과를 주지만 파괴확률이 작을 경우에는 상당히 많은 추출점 (sampling point)에서 유한요소해석을 수행해야 하기 때문에 파괴확률이 작거나 대상 구조물이 거대한 경우 사실상 적용이 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 효율적인 계산을 위하여 근사모델 기법 (meta modeling approach)을 도입하였으며, MPFP 근처에서 좀 더 정확한 근사모델을 얻기 위해 반복적인 선형보간법을 적용하였다. 이렇게 얻어진 근사된 한계상태면 상에서 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법을 적용하여 파괴확률을 계산하였다.

2. 확률론적 해석

2.1 한계상태면과 파괴확률

신뢰도를 평가하기 위하여 한계상태면 Z 를 식 (1)과 같이 정의한다.

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

여기서 X_i 는 각 확률변수이다. 한계상태면은 안전한 영역과 파괴가 일어나는 영역의 경계인데, 한계상태면의 값이 0보다 작을 때 파괴가 일어나며, 파괴확률 P_f 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_f = \int \dots \int_{g(X) < 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

여기서 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 은 확률변수 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 들의 결합확률밀도함수 (joint probability density function)이다. 이러한 파괴확률을 계산하는 방법으로는 몬테카를로법,

일계이차모멘트법 및 이계이차모멘트법 등이 사용되어 왔다.

2.2 몬테카를로법

전체 확률변수 set의 개수를 N 이라 하고, 한계상태면이 0보다 작은 경우의 수를 N_f 라 했을 때 파괴확률은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (3)$$

2.3 신뢰도지수와 향상된 일계이차모멘트법

향상된 일계이차모멘트법에서는 먼저 식 (4)와 같이 각 확률변수의 평균을 0, 표준편차를 1로 변환한다.

$$U_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (4)$$

μ_{X_i} 와 σ_{X_i} 는 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차이다.

신뢰도지수 (reliability index)는 식 (5)와 같이 표현될 수 있으며, 기하학적으로 원점에서 $g(U) = 0$ 인 한계상태면까지의 거리이다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{|g(U=0)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial U_i} \right)^2}} \quad (5)$$

가장 파괴가 일어나기 쉬운 점 MPFP U^* 는 $g(U^*) = 0$ 을 만족하면서 원점에서 가장 가까운 점으로, 이를 이용하면 신뢰도지수는 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\beta = \sqrt{U^{*T} U^*} = - \frac{G_U^T U^*}{G_U^T G_U^*} \quad (6)$$

$$G_{U^*} = \left\{ \frac{\partial g(U^*)}{\partial U_1}, \frac{\partial g(U^*)}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial g(U^*)}{\partial U_n} \right\}^T \quad (7)$$

신뢰도지수가 구해지게 되면 파괴확률을 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \Phi(-\beta) \quad (8)$$

여기서 Φ 는 표준정규분포 확률변수의 누적분포함수 (cumulative distribution function)이다.

확률변수에 대한 신뢰도지수의 감도는 식 (9)와 같이 구해진다.

$$\frac{d\beta}{dU^*} = - \frac{G_{U^*}^T}{G_{U^*}^T G_{U^*}} \quad (9)$$

만일 감도가 0보다 작다면 그 확률변수는 저항요소의 역할을 하며 파괴확률을 감소시키고, 감도가 0보다 크다면 그 확률변수는 하중요소의 역할을 하며 파괴확률을 증가시킨다.

3. 근사모델기법

3.1 반응면 기법

근사모델기법 중 하나인 반응면기법 (Response Surface Method (RSM))은 관심 있는 응답이 여러 설계 변수들에 의해 영향을 받을 때 설계 변수에 대하여 반응면을 근사적으로 모델링하고 해석하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술로서 확률변수들에 대해 내재적 (implicit)인 한계상태면을 확률변수의 다항식으로 근사할 수 있다 (Young Soon Yang et al., 1999; Halder and Mahadevan, 2000). 본 연구에서는 연계항 (coupling term)이 없는 2차 다항식으로 근사하였으며, 먼저 변환된 변수를 식 (10)과 같이 정의한다.

$$x_i = \frac{X_i - X_i^C}{h_i \sigma_{X_i}} \quad (10)$$

여기서 X_i^C 와 σ_{X_i} 는 각각 확률변수 X_i 의 중앙점과 표준편차이다. X_i^C 는 처음에는 X_i 의 평균값과 일치한다. h_i 는 일반적으로 1부터 3까지의 값이다.

최종적으로 한계상태면을 식 (11)과 같이 근사한다.

$$g(x) \approx \hat{g}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{j=1}^k a_j x_j^2 \quad (11)$$

여기서 k 는 전체 확률변수의 갯수이고, a_i 는 다항식 구성

을 위한 미지수이다. 전체 미지수의 갯수와 미지수를 구하기 위한 추출점의 갯수는 모두 $2k+1$ 이다.

3.2 반복적 선형보간법

정확한 파괴확률을 구하기 위해서는 MPFP 근처에서 매우 정확한 근사모델이 요구된다. 하지만 처음에는 정확한 MPFP의 위치를 알지 못하기 때문에 이를 보완하기 위해서 반복적인 선형보간법 (Bucher and Bourgund, 1990)이 제안되었으며, 본 연구에서는 2회의 선형보간이 수행되었다. 따라서 확률변수의 개수가 k 개 일 때 반응면기법과 선형보간법을 이용하여 한계상태면을 근사하는데 전체적으로 $3(2k+1)$ 개수만큼의 확률론적 유한요소해석이 수행된다.

본 연구에서 수행하는 확률론적 해석의 전체 절차는 Fig. 1과 같다.

4. 적용 사례

4.1 적층복합재료평판의 비선형 초기파단하중

적층복합재료 평판을 대상으로 비선형 초기파단하중 (first ply failure load)에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 평판의 크기는 $0.229\text{m} \times 0.127\text{m}$ 이며, 재료는 T300/5208 Graphite/Epoxy로 확정론적 유한요소해석 결과를 비교할 수 있는 대상체로 선정하였다 (Reddy and Reddy, 1992). 길이 대 두께비 (side-to-thickness ratio)가 7 이상이 되어 초기파단이 발생하기까

Response surface approximation

Fig. 1 Overall procedure of the present method with FEM, RSM, AFOSM and MCM

Table 1 Statistics of random variables of flat composite panel

	Mean	COV (%)
E_1	1.325E+11 Pa	3.6
$E_2 = E_3$	1.080E+10 Pa	4.3
$G_{12} = G_{13}$	5.700E+09 Pa	5.5
G_{23}	3.400E+09 Pa	5.5
ν_{12}	2.400E-01	5.9
h	1.270E-04 m	1.5
X_T	1.515E+09 Pa	2.2
X_C	1.697E+09 Pa	2.2
$Y_T = Z_T$	4.380E+07 Pa	4.2
$Y_C = Z_C$	4.380E+07 Pa	6.2
R	6.760E+07 Pa	5.9
S	8.690E+07 Pa	5.9
T	8.690E+07 Pa	5.9

COV : Covariance

Table 2 Three types of flat composite panel

	Lay-up	
Type 1	$[-45/45/-45/45]_T$	Anti-symmetric
Type 2	$[45/0/-45/0/-45/0/45/0]_S$	Anti-symmetric
Type 3	$[0/90/90/0]_T$	Crossply-symmetric

지 기하비선형 거동을 보인다.

14개의 확률변수는 통계적으로 서로 독립이고 정규분포를 갖는다고 가정하였으며, 확률변수의 통계적 특성은 Table 1과 같다. 하나의 lamina를 기준으로 E_1 , E_2 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν_{12} 은 강성값이고, X_T , X_C , Y_T , Y_C , R , S , T 는 강도값이며, h 는 두께이다. Fiber 각도의 불규칙성이 파괴확률에 미치는 영향이 적다는 기존 연구 (S. C. Lin et al., 1998)가 있어 본 연구에서는 이를 확률변수에 포함시키지 않았으며, 적층형태는 Table 2와 같은 세 가지 종류에 대해 적용하였다.

유한요소해석을 위하여 Fig. 2와 같이 type 1과 type 2에 대해서는 9×5개의 요소 (element)를 가지는 전체 모델 (full model)이, type 3에 대해서는 6×3개의 요소를 가지는 1/4 모델이 사용되었다. 균일한 횡방향 분포하중이 가해지고, 모든 경계에서 clamped 경계조건이 사용되었다.

적층복합재료평판의 파단여부를 결정하기 위해 다항식 형태의 파단판별식 중 하나인 Tsai-Wu 파단식이 식 (12)와 같이 사용되었다.

$$\lambda^2 F_{ij} \sigma_i \sigma_j + \lambda F_i \sigma_i - 1 = 0 \quad (12)$$

Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions

(a) Reduced gauss point (b) Ply numbering within laminate

Fig. 3 Notation for failed location

여기서 λ 는 강도비 (strength ratio)이고 F_{ij} , F_i 는 강도매개변수 (strength parameter)이며, σ_i 는 재료방향 (material direction)의 응력이다.

최소강도비 λ_{min} 를 찾기 위해서 Fig. 3과 같이 유한요소 모델의 각 요소 - 감소적분점 (reduced integration point) - 각 lamina의 위면과 아래면에서 강도비가 계산되었다. 선형 해석의 경우 한 번의 해석으로 이를 구할 수 있으나, 비선형 해석의 경우 Fig. 4와 같은 반복적인 절차가 필요하다.

확정론적 유한요소해석의 결과를 보면 Table 3과 같이 Reddy and Reddy (1992)가 수행한 결과와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

한계상태면은 식 (13)과 같이 정의되며, 근사모델기법에 의해 식 (14)와 같이 14개 확률변수에 대한 2차 다항식으로

Fig. 4 Procedure for deterministic nonlinear first ply failure analysis

근사되었다.

$$g(X) = \lambda_{\min} - 1 \quad (13)$$

$$g(X) \approx \hat{g}(X) = \hat{g}(E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, h, X_T, X_C, Y_T, Y_C, R, S, T) \quad (14)$$

반응면기법에 의하여 근사되고 두 번의 선형보간을 통해 좀 더 정확하게 근사된 한계상태면은 세 가지 적층 타입에 대해 모두 MPFP 근처에서 확률변수들에 대해 거의 선형의 형태를 가졌다. Fig. 5는 Type 1의 경우를 보여주고 있다.

이렇게 얻어진 한계상태면 상에서의 파괴확률을 구하기 위하여 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법이 적용되

었으며, 본 연구에서 사용한 방법의 정확도를 평가하기 위해 1000번의 확정론적 유한요소해석을 수행하는 단순 (simple) 몬테카를로법의 결과와 비교하였다. Fig. 6은 횡방향 분포하중이 변함에 따른 신뢰도 즉 $(1 - P_f)$ 의 변화를 보여주고 있다. ‘AFOSM+RSM’은 근사된 한계상태면 상에서 향상된 일계이차모멘트법을 적용한 결과이고, ‘MCM+RSM’은 근사된 한계상태면 상에서 몬테카를로법에 적용한 결과이며, ‘MCM+1000FEM’은 검증을 위하여 1000번의 확정론적 유한요소해석을 수행하는 단순 몬테카를로법의 결과이다. 근사된 한계상태면을 이용하는 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법은 1000번의 확정론적 유한요소해석을 수행하는 단순 몬테카를로법의 결과와 1.96% 이내의 차이를 보이며, 비교적 정확한 값을 주고 있다. 이는 근사모델기법을 도입함으로써 87번의 확정론적 유한요소해석이 1000번의 확정론적 유한요소해석을 대신할 수 있어 확률론적 해석에서 많은 시간단축을 할 수 있음을 보여주고 있다.

Type 1의 경우에 확정론적 초기파단하중 (128,486 Pa)보다 24.8% 작은 하중 (96,526 Pa)에서 99.5%의 신뢰도를 가지며, Type 2의 경우에는 확정론적 초기파단하중 (140,184 Pa)보다 21.3% 작은 하중 (110,315 Pa)에서 99.9%의 신뢰도를 가진다. Type 3의 경우에는 확정론적 초기파단하중 (75,518 Pa)보다 26.9% 작은 하중 (55,158 Pa)에서 99.6%의 신뢰도를 갖는 것을 알 수 있었다. 이는 신뢰도 기반 설계 및 안전계수 산정에 활용될 수 있을 것이다.

Fig. 7은 세 가지 적층형태에 대한 무차원화된 확률변수들에 대한 신뢰도지수의 감도를 보여주고 있다. 모든 적층 형태에서 E_1 , Y_T 는 저항요소로 E_2 는 하중요소로 역할을 하고 있으며, h 는 Type 2에서, T 는 Type 1에서 각각 추가적으로 중요한 저항요소의 역할을 하고 있다. 모든 적층 형태에서 Y_T 가 가장 중요한 확률강도성분이라는 것은 인장에 의한 기지파단 (matrix cracking)이 지배적인 초기 파단모드

Table 3 Statistics of random variables of flat composite panel

	FLD		FEL		FGP		FPL		FL	
	Current	Reddy	Current	Reddy	Current	Reddy	Current	Reddy	Current	Reddy
Type 1	128486	126643	21 (25)	21	1 (4)	1	1	1	1	1
Type 2	140184	140043	21 (25)	21	1 (4)	1	2	2	1	1
Type 3	75518	74647	16	16	3	3	1	1	1	1

FLD : first-ply failure load (Pa)

FEL : failed element number in the finite element mesh

FGP : failed reduced Gauss point number within the failed element

FPL : failed ply number within the laminate

FL : failed location on the laminate (1=bottom 2=top)

() : Element and reduced Gauss point that fail simultaneously

Fig. 5 Approximated limit state surface in the transformed random variables space (Type 1 & applied load is 119,279 Pa)

(a) Type 1

(b) Type 2

(c) Type 3

Fig. 6 Reliability versus variation of deterministic transverse load

(a) Type 1

(b) Type 2

(c) Type 3

Fig. 7 Sensitivity of the reliability index with respect to transformed random variables

라는 것을 의미한다.

4.2 원공과 곡률이 있는 적층복합재료판의 비선형 좌굴하중

원공과 곡률이 있는 적층복합재료판의 비선형 좌굴하중에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 본 구조물은 첫 번째 한계점 (first limits point)을 지나 snap back 현상이 발생한 뒤 하중 지지를 더 받다가 원공 주변의 응력집중부를 중심으로 층간분리 (delamination)가 발생하고, 최종적으로 파단이 발생한다. Fig. 9는 확률변수들의 평균값을 이용한 확률론적 해석의 결과로 모드형상을 1차원으로 가시화 하기 위하여 수직방향 (x) 변위의 분포를 나타낸 것이며, 빨간색 부분이

Fig. 8 Geometry of curved composite panel and boundary conditions

Table 4 Statistics of random variables of curved composite panel with cutouts

	Mean	COV (%)
E_1	1.350E+11 Pa	3.6
$E_2 = E_3$	1.300E+10 Pa	4.3
$G_{12} = G_{13}$	6.400E+09 Pa	5.5
G_{23}	4.300E+09 Pa	5.5
ν_{12}	3.800E-01	5.9
h	1.420E-04 m	1.5

각 평형점 (equilibrium point)에서의 최대값을 보여주고 있다. 처음에는 대칭형태로 변형이 일어났다가 첫 번째 한계점을 지나면서 비대칭 변형의 형태를 보여준다. 본 연구에서는 첫 번째 한계점에서의 하중을 확률론적 비선형 좌굴하중 P_{cr}^* 로 정의하였다.

구조물의 형태, 가해지는 하중, 경계조건은 Fig. 8과 같이 0.356m의 square platform (L, C), 0.381m의 곡률반경 (R)을 갖는 복합재료판이 고려되었다. 가운데에 있는 원공의 지름

Fig. 9 Deterministic nonlinear and postbuckling analysis of curved composite panel with mean value of random variables and contour plots and maximum values of vertical displacement (u) at some equilibrium points. (left: rear edge, right: front edge)

d 는 0.05m이며, 적층형태는 $[\pm 45/90/0/0/90/\mp 45]_2$ 이다. 경계조건은 rear edge에서는 fully clamp 경계조건, front edge에서는 z 방향을 제외하고 나머지는 clamp 경계조건, straight edge들을 따라서는 simply supported 경계조건이 적용되었다. 집중하중 P 가 front edge에서 축방향으로 작용하며, 확률론적 해석을 위하여 front edge에서의 변위 δ 를 얻었다.

E_1 , E_2 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν_{12} 는 확률론적 강성값, h 는 lamina의 확률론적 두께이다. 7개의 확률변수들은 통계적으로 서로 독립이며, 정규분포를 갖는다고 가정하였다. 확률변수들의 통계적 특성은 Table 4에 나타나 있다.

한계상태면을 식 (15)와 같이 정의하였으며, 이를 다시 식 (16)과 같이 7개의 확률변수로 이루어진 2차 다항식으로 근사하였다.

$$g(X) = P - P_{cr}^* \quad (15)$$

$$g(X) \approx \hat{g}(X) = \hat{g}(E_1, E_2, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, h) \quad (16)$$

두 번의 선형보간법이 추가로 적용된 한계상태면 상에서 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법을 적용하였다. 근사된 한계상태면은 MPFP 점 근처에서 모든 확률변수들에 대하여 거의 선형의 형태를 이루었다.

Fig. 10은 front edge에서의 변위 δ 이 변화함에 따른 신뢰도의 변화를 보여주고 있다. 근사된 한계상태면을 이용하는 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법은 거의 비슷한 신

Fig. 10 Reliability versus front edge displacement

Fig. 11 Sensitivity of the reliability index with respect to transformed random variables

되도를 구해주고 있다. 첫 번째 한계점이 발생할 때의 변위 (1.1815 mm)보다 21.7% 적은 0.9248mm일 때는 좌굴이 발생하지 않을 가능성이 99.4%이었으나 첫 번째 한계점 이후 외부하중의 큰 증가 없이 급격하게 좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 확률론적 해석 결과를 바탕으로 상태모니터링 등의 방법을 통해 구조물을 효율적으로 운영 및 관리하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 11은 무차원화된 확률변수에 대한 신뢰도지수의 감도를 보여주고 있다. 모든 확률변수들이 저항요소로 역할을 했으며, 그 중에서 lamina의 두께가 가장 중요한 저항요소로서의 역할을 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재료가 좀 더 신뢰도를 가지고 구조물의 주하중부재로 사용되기 위하여 재료의 강성, 강도, 두께를 확률변수로 하여 적층복합재료 패널의 비선형 초기파단 하중 및 비선형 좌굴하중에 대한 확률론적 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 확률론적 초기파단하중이나 그보다 작은 하중 조건에서 가질 수 있는 신뢰도를 분석해 보았으며, 각 적층 형태마다 다소 상이하기는 하나 확률론적 초기파단하중보다 21.3%~26.9% 작은 하중에서 99.5%~99.9%의 신뢰도를 갖는 것을 알 수 있었다. 좌굴하중의 경우 좌굴이 발생했을 때의 변위보다 21.7% 적은 변위일 때 99.4%의 신뢰도를 갖지만 점차 낮은 신뢰도를 가지는 것을 알 수 있었다.
- (2) 파단이나 좌굴에 영향을 주는 주요한 확률변수를 파악하기 위하여 변환된 확률변수에 대한 신뢰도지수의 감

도를 계산하였다. 모든 적층 형태에서 E_1 , Y_T 는 저항요소로 E_2 는 하중요소로 역할을 하였으며, Y_T 가 가장 중요한 확률강도성분이라는 것을 통해 지지파단이 지배적인 초기 파단모드라는 것을 알 수 있었다. 좌굴하중에 있어서는 lamina의 두께가 가장 중요한 저항요소로서의 역할을 하였다.

- (3) 확률론적 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 근사모델기법이 도입되었고, 근사된 한계상태면 상에서 향상된 일계이차모멘트법이나 몬테카를로법이 적용되어 많은 수의 확정론적 해석을 수행해야 하는 단순 몬테카를로법이나 한계상태면 상에서의 MPFP점을 탐색하기 위해 반복적으로 확정론적 해석을 수행해야 하는 향상된 일계이차모멘트법을 대신할 수 있었다.

본 연구결과를 바탕으로 향후에는 많은 계산이 소요되는 좀 더 실제적인 풍력발전 블레이드 및 타워 구조물에 적용할 계획이며, 확률변수에 대한 신뢰도지수의 감도를 이용하여 각 확률변수마다 안전계수를 정량적으로 산정하는데 활용하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 각 확률변수의 분포나 공분산 (covariance)값을 기존 문헌 값에서 참조하였으나 좀 더 정확한 값을 얻기 위해서는 많은 시험이 수행되고 데이터베이스화 되어야 할 것이다.

References

1. Bucher, C. G., Bourgund, U., "A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems", Structural Safety, Vol. 7, No. 1, 1990, pp.57-66.
2. Chang, C. H., Kwon, M. H., Kim, J. S. and Joo, C. H., "Numerical Study for Seismic Strengthening of RC columns Using Fiber Reinforced Plastic Composite", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 16, No. 3, 2012, pp.117-127 (in Korean).
3. Haldar, A., Mahadevan, S., Reliability assessment using stochastic finite element analysis, John Wiley & Sons, 2000.
4. Han, B. K., Kim, S. W., "Failure Strength Analysis of Simply Supported Sandwich Slab Bridges made by Composite Materials", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 11, No. 1, 2007, pp.77-84 (in Korean).
5. Han, T. H., Na, T. S., Han, S. Y. and Kang, Y. J., "Buckling Sensitivity of Laminated Composite Pipes Under External Uniform Pressure Considering Ply Angle", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 11, No. 3, 2007, pp.123-131 (in Korean).
6. Kim, D. K., Go, S. H. and Kim, J. Y., "Seismic Retrofit Effect for Column of Subway Tunnel Reinforced by FRP-

-
- Ductile Material Layered Composites”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 14, No. 6, 2010, pp.85-92 (in Korean).
7. Lee, S. B., Lee, S. Y. and Lee, R. C., “Finite Difference Nonlinear Analysis of Composite Plate Structures with Various Layer Sequences”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 9, No. 4, 2005, pp.159-168 (in Korean).
8. Lim, S. J., Kong, C. D. and Park, H. B., “A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems”, Int. Journal of Composite Materials, Vol. 3, No. 1, 2013, pp.15-23.
9. Lin, S. C., Kam, T. Y. and Chu, K. H., “Evaluation of buckling and first ply failure probabilities of composite laminates”, Journal of Solids and Structures, Vol. 35, No. 13, 1998, pp.1395-1410.
10. Reddy, Y. S. N., Reddy, J. N., “Linear and nonlinear failure analysis of composite laminates with transverse shear”, Composites Science and Technology, Vol. 44, No. 3, 1992, pp.227-255.
11. Yang, Y. S., Suh, Y. S. and Lee, J. O., Structural Reliability Engineering, Seoul National University Press, 1999 (in Korean).
12. Yhim, S. S., Chang, S. Y. and Park, D. Y., “Analysis of Laminated Composite Stiffened Plates with arbitrary orientation stiffener”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 8, No. 2, 2004, pp.147-158 (in Korean).
- Received : 09/10/2013
Revised : 10/07/2013
Accepted : 10/11/2013

요 지

복합재료가 신재생 에너지 산업 관련 구조물 및 해양 구조물에서 좀 더 신뢰도 있는 주 하중 부재로 사용되기 위하여 복합재료평판의 확률론적 비선형 초기 파단 하중과 원공과 곡률이 있는 복합재료판의 확률론적 비선형 좌굴 하중이 평가되었다. 주어진 설계 추출점에서의 확률론적 유한요소해석 결과를 바탕으로 반응면기법을 이용하여 한계상태면을 확률변수로 이루어진 2차 다항식으로 근사하였다. 또한, MPFP 근처에서 좀 더 정확하게 한계상태면을 근사하기 위하여 반복적 선형보간법이 적용되었다. 파괴확률을 평가하기 위하여 근사된 한계상태면 상에서 향상된 일계이차모멘트법과 몬테카를로법이 수행되었다. 마지막으로 파단에 영향을 주는 주요한 확률변수를 파악하기 위하여 변환된 확률변수에 대한 신뢰도지수의 감도를 계산하였다.

핵심 용어 : 반응면 기법, 향상된 일계이차모멘트법, 몬테카를로법, 비선형 초기파단하중, 비선형 좌굴하중