

논문

복합재 샌드위치 구조의 개선된 확률론적 설계 및 신뢰성 기반 최적설계

이석제*, 김인걸***, 조우제*, 설창원***

Advance Probabilistic Design and Reliability-Based Design Optimization for Composite Sandwich Structure

Seokje Lee*, In-Gul Kim***, Wooje Cho*, and Changwon Shul***

ABSTRACT

Composite sandwich structure can improve the specific bending stiffness significantly and save the weight nearly 30 percent compared with the composite laminates. However, it has more inherent uncertainties of the material property caused by manufacturing process than metals. Therefore, the reliability-based probabilistic design approach is required. In this paper, the PMS(Probabilistic Margin of Safety) is calculated for the simplified fuselage structure made of composite sandwich to provide the probabilistic reasonable evidence that the classical design method based on the safety factor cannot ensure the structural safety. In this phase, the probability density function estimated by CMCS(Crude Monte-Carlo Simulation) is used. Furthermore, the RBDO(Reliability-Based Design Optimization) under the probabilistic constraint are performed, and the RBDO-MPDF(RBDO by Moving Probability Density Function) is proposed for an efficient computation. The examined results in this paper can be helpful for advanced design techniques to ensure the reliability of structures under the uncertainty and computationally inexpensive RBDO methods.

초 록

복합재료 샌드위치 구조는 굽힘 강성을 향상시키고 복합재 적층판에 비해 30% 이상의 무게를 절감할 수 있다. 그러나 일반 금속에 비해 제작과정에서 발생하는 재료물성의 불확실성이 많이 내재되어 있으므로 신뢰성 기반 확률론적 설계방법이 요구된다. 본 논문에서는 안전계수를 이용한 고전적인 설계 방법이 구조물의 안전을 보장하지 않는다는 확률론적 증거를 제시하기 위하여 단순화된 복합재 샌드위치 동체에 대해 PMS(Probabilistic Margin of Safety)를 계산하였다. 이 과정에서 CMCS(Crude Monte-Carlo Simulation)에 의해 계산된 확률밀도함수를 이용하였다. 더 나아가 신뢰성 기반 최적설계를 수행하고 효율적인 계산을 위해 RBDO-MPDF(RBDO by Moving PDF) 방법을 제시하였다. 본 논문의 결과는 구조물의 신뢰성을 보장하기 위한 개선된 설계 방법과 효율적인 신뢰성 기반 최적설계 방법 연구에 유용할 것이다.

Key Words : 복합재 샌드위치(composite sandwich), 불확정성(uncertainty), 신뢰성해석(reliability analysis), PMS(probabilistic margin of safety), RBDO-MPDF(RBDO by moving PDF)

접수: 2012년 10월 03일, 수정: 2013년 2월 01일, 게재승인: 2013년 2월 15일

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

*** 충남대학교 항공우주공학과, Corresponding author(E-mail: igkim@cnu.ac.kr)

*** 국방과학연구소

1. 서론

복합재료는 최근 민간 항공기 뿐 아니라 군용, 우주비행체 구조물에서의 사용이 날로 증가하고 있다. 특히 복합재 샌드위치 구조를 항공우주 구조물에 적용할 경우 비강도, 비강성을 획기적으로 증가시킬 뿐 아니라 단열, 보온 및 피로 수명에 대한 성능을 개선할 수 있다.

그러나 높은 비용과 제조공정의 어려움 뿐 아니라 설계과정에 내재되어 있는 많은 불확실성(기지합침률, 불연속 공간의 유무, 각 층의 두께 등) 때문에 적용이 어려운 실정이다. 현재까지는 주로 실험에 의존하여 설계허용치를 획득하고, 이를 이용한 보수적인 설계에 의존하고 있으며, 이는 많은 경제적, 물질적 소비를 요구하게 된다. 그러므로 다양한 설계요구조건에 만족하고 신뢰성 있는 샌드위치 구조를 효과적으로 개발하기 위해서는 확률론적 해석방법을 도입할 필요가 있다.

신뢰성 기반 확률론적 해석방법은 신뢰성 기반 최적설계를 위한 중요한 정보를 제공한다. 또한 설계단계에서 불확실성을 고려하는데에 합리적이며 특정 시스템으로부터 얻어진 경험이나 전문 기술도 접목시켜 효율적인 설계를 할 수 있다[1]. 이 방법은 외부하중이나 재료의 역학적 특성들의 기댓값을 중심으로 한 분포특성을 정량적으로 반영하고 파괴확률을 계산함으로써 설계결과의 신뢰도를 보장한다. Fig. 1과 같이 안전계수와 A/B-basis 강도값을 이용한 고전적인 방법에서는 구조물의 파괴가 일어나지 않지만, 불확실성을 고려할 경우 외부하중에 의한 응력이 재료의 강도를 초과하여 파괴되는 영역이 발생하게 된다. 이 방법의 단점은 구조물이 복잡해질수록 계산시간이 급격히 증가하는 것이다. 이를 해결하기 위해 다양한 신뢰성 이론과 근사기법을 적용한 연구가 수행되었다[2].

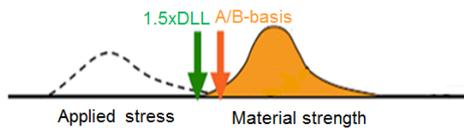


Fig. 1 Schematics of deterministic and probabilistic concept.

본 논문에서는 신뢰성 해석을 기반으로 하는 PMS를 계산하고, 효율적인 신뢰성 기반 최적설계를 위한 RBDO-MPDF (Reliability-Based Design Optimization by Moving Probability Density Function)를 제안하였다. 이 방법을 검증하기 위해 외팔보와 복합재 샌드위치 동체 예제를 이용하였다. 우선 DO (Deterministic Optimization)를 이용하여 구해진 결과에 확률 변수의 분포특성을 적용하여 파괴확률을 계산하고 고전적 설계방법의 한계를 제시하였다. 그리고 파괴가 거의 일어나지 않는 수준의 확률이아가 되도록 확률밀도함수를 이동시켜 PMS를 계산하고 개선된 설계안을 제시함으로써 구조물의 신뢰성을 확보하였다. 또한 계산시간을 줄일 수 있는 효율적인 신뢰성 기반 최적설계를 위하여 이동된 확률밀도함수의 평균을

만족하는 값을 초기값으로 하여 반복과정을 줄이는 RBDO-MPDF 방법의 적용 가능성을 고찰하였다. 이 과정에서 확률 변수는 재료의 강성, 강도, 하중조건을 선정하였다.

2. 이론 해석

2.1 PMS

일반적으로 항공기 구조 설계에서는 1.5의 안전계수를 적용하고, 재료에 따라 A 또는 B-basis 강도값을 이용하여 식 (1)과 같이 안전여유(MS)를 계산한다[3,4].

$$MS = \frac{R_u}{S_u} - 1 \geq 0 \quad (1)$$

여기서 R_u 는 재료의 극한강도를, S_u 는 극한하중에서의 응력을 나타낸다.

이 방법은 여러 변수들의 불확실성을 경험적 근거로 보완하고자하는 보수적인 설계방법이며, 신뢰성을 보장할 수 있는 명확한 증거를 나타낼 수 없다.

그러므로 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 불확실성을 적용하여 구조응답 분포(항복강도 R_y , 최대응력 S_l)의 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)를 구하고 이를 3σ 만큼 이동시켜 파괴확률이 거의 발생하지 않는 기준인 PMS ($\bar{R}_y/\bar{S}_l - 1$)를 제시하였다. 여기서 3σ 란, 표준편차의 3배, 즉 정규분포의 경우 0.3%만이 포함되는 경계를 기준으로 하여 두 분포의 간격을 선정하는 것이다. 보수적인 설계 방법에서는 강도 PDF의 A 또는 B-basis 값(\bar{R}_y), 응력 PDF의 평균(\bar{S}_l)과 같은 확정된 값을 사용하지만, PMS 방법은 비교적 간단한 개념과 계산과정을 통하여 보수적인 설계방법의 결과를 보완하고 분포특성을 반영할 수 있다.

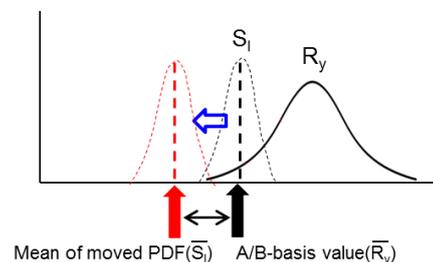


Fig. 2 Schematics of PMS calculation.

2.2 RBDO-MPDF

식 (2)는 신뢰성 기반 최적설계의 일반적인 정의를 나타낸다[5].

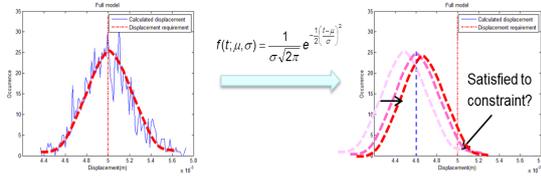


Fig. 3 Schematics of RBDO-MPDF method.

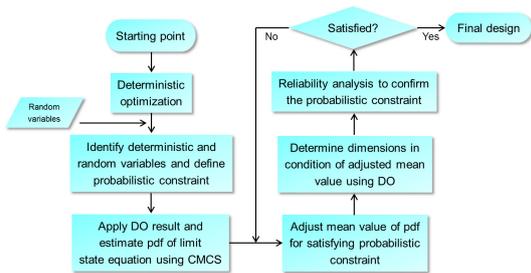


Fig. 4 Flowchart of RBDO-MPDF method.

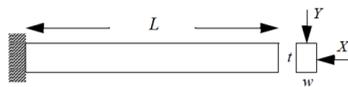


Fig. 5 Schematics of the cantilever beam.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } Cost(d) \\ & \text{Subject to } P_f(G_i(X_R) \leq 0) - \Phi(-\beta_i) \leq 0, \quad (2) \\ & \quad \quad \quad i = 1, \dots, np, \quad d^L \leq d \leq d^U \end{aligned}$$

여기서 Cost(d)는 요구조건, d는 설계변수, X_R은 확률변수, G_i(X_R)은 파괴를 판단하는 기준인 한계상태식, β_i는 목표하는 파괴확률이다.

이 방법에서의 가장 큰 문제는 반복되는 최적화 과정 중 확률론적 제약조건을 계산하는 수치해석 비용이 과도하게 요구되는 것이다. 그래서 일반적으로 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)과 같은 1차 신뢰도 해석법을 사용하게 되는데, 이는 한계상태식을 1차 함수로 근사화하므로 실제값과의 오차가 내재되어 있는 이론이다. 그러므로 본 논문에서는 확률론적 제약조건을 정확히 계산할 수 있는 CMCS(Crude Monte-Carlo Simulation)를 이용하고, 해석의 효율을 증가시키기 위해 이동된 확률밀도함수의 평균값을 시작점으로 하는 RBDO-MPDF 방법을 제안하였다. 이 방법은 PMS와 같이 목표하고자 하는 파괴확률에 만족하도록 확률밀도함수를 이동시키고, 그 때의 구조물 치수를 시작점으로 정의함으로써 최적해를 찾아가는 과정을 단축할 수 있다. Fig. 3은 RBDO-MPDF의 개념도를 나타내며, 분포형태가 정규분포인 경우 Fig. 3에 제시된 확률밀도함수 형태에서 평균과 표준편차를 계산하여 최적화 시작점 선정에 이용한다. Fig. 4는 계산 과정의 flowchart이다.

3. 수치예제 및 결과

3.1 금속 외팔보

본 예제는 신뢰성 해석과 최적화 문제에 많이 사용되는 금속 외팔보이다. Fig. 5는 외팔보 형상을 나타내며, Table 1에 각 변수의 특성을 정리하였다[6,7].

Table 1 Properties of variables (beam)

	Mean	COV	Distribution
X	2,225N	0.2	Normal
Y	4,450N	0.1	
R _y	276MPa	0.05	
R _u	400MPa	0.05	
E	200GPa	0.05	
L	2,540mm	-	-
D	57.2mm	-	-

여기서 w와 t는 각각 외팔보 단면의 폭과 두께를 의미하며, X와 Y는 횡, 종방향 하중, R_y는 항복강도, R_u는 극한강도, E는 탄성계수, L은 외팔보 길이, D는 변위에 대한 제한 조건, COV(Coefficient of Variance)는 평균에 대한 표준편차의 비를 의미한다.

본 예제에서는 식 (3), (4)와 같이 응력과 변위에 대한 각각의 한계상태식이 수식으로 정의된다.

$$G_s = R - \frac{15,240}{wt} \left(\frac{Y}{t} + \frac{X}{w} \right) \quad (3)$$

$$G_D = D - \frac{4L^3}{Ewt} \sqrt{\frac{Y^2}{t^4} + \frac{X^2}{w^4}} \quad (4)$$

여기서 R은 하중 조건(설계제한하중 또는 극한하중)에 따라 R_y 또는 R_u 값을 의미하며, D는 본 문제에서 확정적으로 정의된 변위에 대한 제한조건이다.

설계 목적은 확률론적 제약조건하에서 단면적의 크기를 최소화 하는 것이다. 신뢰도 수준 3.0을 적용할 경우 식 (5)와 같이 정식화할 수 있다. DO의 경우 확률론적 제약조건 대신에 확정된 강도 또는 변위가 제약조건으로 대체된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } Weight(w, t) \\ & \text{Subject to } P_f(G_s \leq 0) - \Phi(-\beta_s) \leq 0 \\ & \quad \quad \quad P_f(G_D \leq 0) - \Phi(-\beta_D) \leq 0 \\ & \quad \quad \quad 25.4mm \leq w, t \leq 101.6mm \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 β는 확률론적으로 안전한 정도를 판단하는 신뢰도 지수를 의미하며, 본 예제에서는 3.0을 적용하였으므로 이를 파괴확률(P_f, Probability of Failure)로 변환하면 0.13%이다.

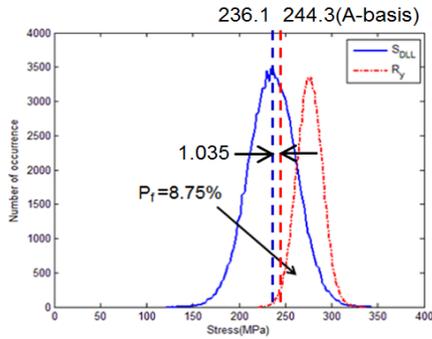


Fig. 6 Distribution of MS based design (beam, stress).

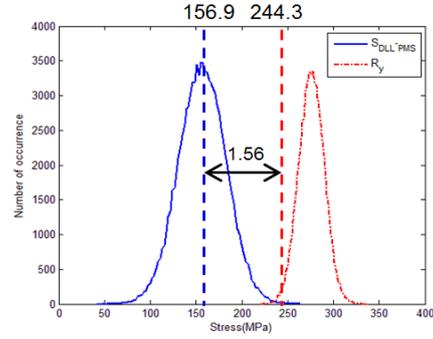


Fig. 8 Distribution of PMS based design (beam, stress).

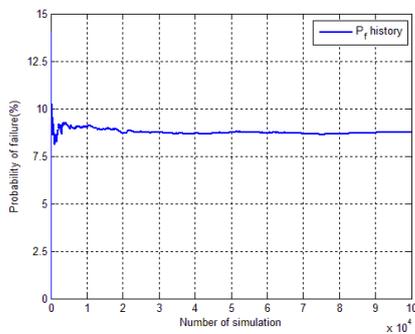


Fig. 7 History of probability of failure (beam, stress).

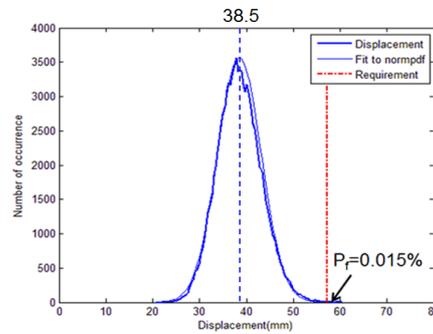


Fig. 9 Distribution of MS based design (beam, displacement).

PMS를 계산하기 위하여 응력에 대한 한계상태식(G_s)을 이용하였다. 그 이유는 안전계수와 A/B-basis 강도값을 이용한 고전적인 안전여유 기반의 설계(MS based design)를 수행하고 확률론적 설계방법과 비교하기 위해서 이다. 우선 각 방향의 초기 하중(design limit load)에 안전계수(1.5)를 적용하고 재료 극한강도의 A-basis 값을 이용하여 최적화를 수행하였다. 일반적으로 편차가 크지 않은 금속 재료는 A-basis, 편차가 큰 복합재료는 B-basis 강도값을 적용하여 재료 물성의 불확실성에 의한 영향을 보완한다. 최적화된 외팔보의 폭(w)과 두께(t)에 대해 확률변수의 불확실성을 적용하고 원래의 초기 하중을 가할 경우, 최대 응력(S_{DLL})은 Fig. 6과 같은 분포를 갖게 된다. 여기서 하첨자 DLL은 design limit load의 약자로 본 논문에서는 Table 1에 제시된 원래의 하중을 의미한다. 결과적으로 하중과 재료물성의 불확실성의 영향을 극복하기 위하여 안전계수와 A-basis 값을 이용하였지만 최대응력이 항복강도를 초과하는 영역이 생기게 된다. Fig. 6의 1.035는 기존의 안전여유 기반의 설계를 수행하여 계산된 안전여유를 의미한다. 외팔보 구조물의 파괴확률은 8.75%로 계산되었다. 이는 CMCS를 100,000회 수행한 결과이며, 95% 신뢰수준에서의 오차범위는 $\pm 0.18\%$ 이다. Fig. 7은 시뮬레이션이 진행되는 동안 파괴확률의 변화를 나타낸다. 파괴확률 결과가 잘 수렴되었고 시뮬레이션 횟수가 충분한 것을 확인하였다.

Table 2 Comparison with MS and PMS based optimization (beam)

	w(mm)	t(mm)
MS based DO	54.0	101.6
PMS based DO	71.6	101.6

그러므로 변수의 불확실성을 고려할 경우 외팔보 단면의 치수는 증가 되어야 한다. Fig. 8은 항복강도의 A-basis 값과 이동시킨 응력분포의 평균의 비를 이용해서 구한 PMS를 나타낸다. 두 값의 비가 1.56이므로 본 예제의 PMS는 0.56이다. 즉, 최대응력이 156.9MPa 이하가 되어야만 파괴가 거의 일어나지 않는 안전한 구조물이 되는 것이다. Table 2는 고전적인 설계방법을 이용한 최적화 결과와 PMS 기반의 최적화 결과를 비교한 것이다.

RBDO-MPDF 방법을 검증하기 위한 수치예제로는 변위에 대한 한계상태식(G_D)을 이용하였다. 앞서 응력을 이용한 예제와 같이 각 방향의 초기 하중에 안전계수를 적용하고 변위 제약조건을 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적화된 외팔보의 폭과 두께에 대해 확률변수의 불확실성을 적용하고 원래의 초기 하중을 가할 경우 Fig. 9와 같이 최대 변위는 분포를 갖게 된다. 여기서도 마찬가지로 CMCS를 100,000회 수행하였으며, 파괴확률은 0.015%로 계산되었다. 95% 신뢰수준에서의 오차

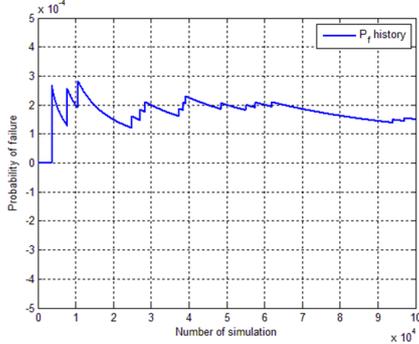


Fig. 10 History of probability of failure(beam, displacement).

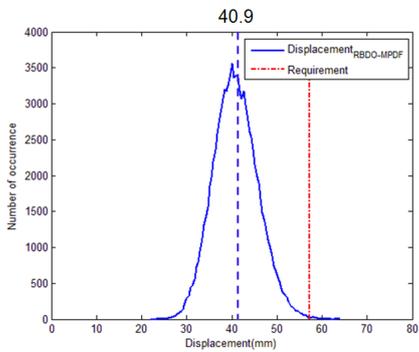


Fig. 11 Distribution of RBDO-MPDF(beam, displacement).

범위는 $\pm 0.0077\%$ 이다. Fig. 10은 시뮬레이션이 진행되는 동안 파괴확률의 변화를 나타낸다.

RBDO-MPDF를 수행하기 위해 이 분포의 확률밀도함수를 계산한 다음, 이 확률밀도함수를 이동시켜 확률론적 제약조건에 만족하는 대략적인 평균을 선정하고, 이 평균값을 만족하는 단면의 폭과 두께를 시작점으로 하여 최적화를 수행하였다. 이 시작점에서의 정확한 파괴확률은 CMCS를 이용하여 계산되고 제약조건에 만족하지 않을 경우 설계점을 이동하여 다시 파괴확률을 검증한다. 이 과정은 허용오차 범위 내로 수렴할 때까지 반복된다. 결과적으로 Fig. 11과 같이 0.13%의 파괴확률을 만족하기 위하여 확률밀도함수가 우측으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이 파괴확률을 만족하는 단면 치수는 Table 3의 세 번째 행에 나타나 있다. 응력에 대한 한계상태식과 달리 고전적인 안전여유 기반의 설계방법은 보수적인 결과를 가져오며, 신뢰성 기반 최적설계를 할 경우 단면적 감소에 따른 무게를 절감할 수 있다. 또한 파괴확률을 구하기 위하여 CMCS를 이용하였음에도 불구하고 계산시간이 줄어든 것을 확인하였다. 반복횟수도 4회로 효율적인 수렴성을 확인하였으며, RBDO-MPDF 방법의 효율성은 확률변수가 많은 대형 구조물에 적용될 경우 더욱 큰 이득을 가져올 것이다. 일반적인 신뢰성 기반 최적설계 방법(General

Table 3 Comparison with deterministic and probabilistic optimization(beam)

	w(mm)	t(mm)	P _f (%)	Time(sec)
MS based DO	66.1	93.5	-	1
General RBDO	68.6	86.6	0.13	18
RBDO-MPDF	65.1	92.1	0.13	4

RBDO)과의 최적화 된 치수의 차이는 다변수 최적화 과정에서 발생할 수 있는 오차인 것으로 판단된다. 이는 step size나 tolerance 등의 설정을 이용하여 조절할 수 있으며, 목적함수인 w와 t의 곱은 서로 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

3.2 복합재 샌드위치 동체

본 예제는 복합재 샌드위치 동체이다[8]. 샌드위치 스킨과 링 프레임으로 구성된 형상은 Fig. 12와 같다. 샌드위치 구조는 T300 Carbon/Epoxy prepreg로 적층된 면재와 알루미늄 허니컴 코어로 구성되어 있고, 추가적으로 알루미늄 링 프레임이 체결되었다. 면재의 적층순서는 [0/+45/-45/90]_s로 가정하였다. Table 4에 각 확률변수들의 분포특성을 정리하였다 [9]. 확률변수는 총 13개이며, 면재를 구성하는 prepreg의 강성과 강도, 4개의 하중조건이 포함되어 있다.

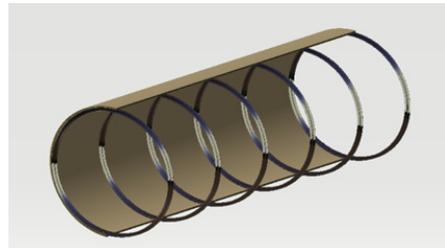


Fig. 12 Configuration of the sandwich fuselage.

Table 4 Properties of variables(fuselage)

	Mean	COV	Distribution
E ₁	133.92GPa	0.046	Normal
E ₂	8.84GPa	0.040	
ν ₁₂	0.336	0.060	
G ₁₂	4.45GPa	0.031	
X _T	1,787MPa	0.14	
X _C	1,185MPa	0.14	
Y _T	58.36MPa	0.11	
Y _C	249.96MPa	0.07	
S	106.93MPa	0.02	
M _x (moment)	2.6×10 ⁶ N·m	0.10	
M _y (moment)	9.5×10 ⁶ N·m	0.10	
T(torsion)	9.0×10 ⁵ N·m	0.10	
P(pressure)	0.13MPa	0.10	

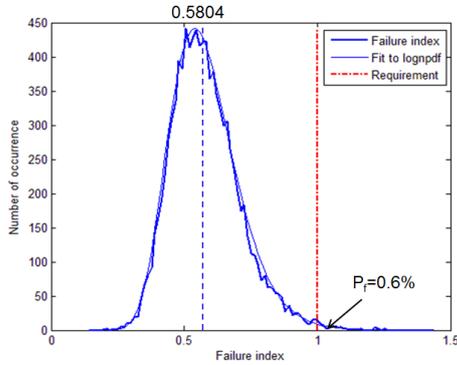


Fig. 13 Distribution of MS based design(fuselage).

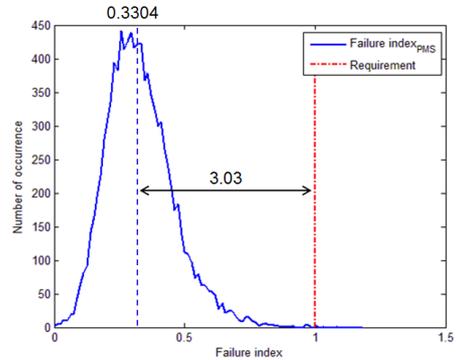


Fig. 15 Distribution of PMS based design(fuselage).

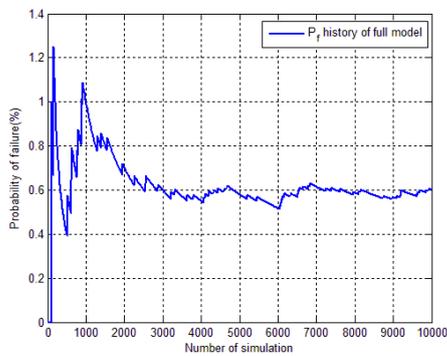


Fig. 14 History of probability of failure(fuselage).

설계 목적은 파손지수에 대한 확률론적 제약조건하에서 동체 무게를 최소화 하는 것이다. 설계변수는 각 층의 두께 (t_{ply})이다. 파손지수 계산을 위해 Tsai-Wu 파손기준식을 사용하였으며, 마찬가지로 신뢰도 수준 3.0을 적용할 경우 식 (6) 과 같이 정식화할 수 있다. DO의 경우 확률론적 제약조건 대신에 파손지수 1이 제약조건으로 대체된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } Weight(t_{ply}) \\ & \text{Subject to } P_f(G \leq 0) - \Phi(-\beta) \leq 0 \\ & \quad \quad \quad 0.125mm \leq t_{ply} \leq 1mm \end{aligned} \quad (6)$$

PMS를 계산하기 위하여 앞선 문제에서와 같이 각각의 초기 하중(design limit load)에 안전계수(1.5)를 적용하고 최대 파손지수가 1이 넘지 않아야 한다는 제약조건하에서 최적화를 수행하였다. 상, 하 각각의 면재에서 같은 각도의 층은 하나의 변수로 취급하였다. 최적화된 결과에 대해 확률변수의 불확실성을 적용하고 원래의 초기 하중을 가할 경우, 최대 파손지수는 Fig. 13과 같이 대수정규분포 형태를 가지게 된다. 결과적으로 파손지수가 1이 넘는 영역이 파괴확률이 되며 Fig. 13과 같이 0.6%의 파괴확률이 계산되었다. 10,000

Table 5 Comparison with MS and PMS based optimization(fuselage)

	Upper facesheet(mm)		
	0°	± 45°	90°
MS based DO	0.287	0.125	0.204
PMS based DO	0.376	0.125	0.296
	Lower facesheet(mm)		
	0°	± 45°	90°
MS based DO	0.244	0.125	0.136
PMS based DO	0.364	0.125	0.260
Weight(kg)			
MS based DO	1,015		
PMS based DO	1,184		

회의 CMCS를 수행하였으며, 95% 신뢰수준에서의 오차범위는 ±0.15% 이다. 또한 Fig. 14와 같이 시뮬레이션이 진행되는 동안 파괴확률이 수렴하는 것을 확인하였다. 외팔보 예제와 달리 수식화된 한계상태식(G)을 알 수 없기 때문에 시뮬레이션이 반복될 때마다 유한요소해석을 수행하였고, 그 결과 계산시간은 약 28시간이 소요되었다.

그러므로 변수의 불확실성을 고려할 경우 면재 각 층의 두께는 증가되어야 한다. Fig. 15는 파손지수 1과 이동시킨 파손지수 분포의 평균의 비를 이용해서 구한 PMS를 나타낸다. 두 값의 비가 3.03이므로 본 예제의 PMS는 2.03이다. 즉, 최대 파손지수가 0.3304 이하가 되어야만 파괴가 거의 일어나지 않는 안전한 구조물이 되는 것이다. Table 5는 고전적인 설계방법을 이용한 최적화 결과와 PMS 기반의 최적화 결과를 비교한 것이다.

본 예제의 PBDO-MPDF 수행 과정은 앞서 소개한 것과 같다. 결과적으로 Fig. 16과 같이 0.13%의 파괴확률을 만족하기 위하여 확률밀도함수가 좌측으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이동된 확률밀도함수의 평균인 0.4004를 만족하기 위한 각 층의 두께는 Table 6에 나타나 있다. 반복횟수는 3회로 효율적인 수렴성을 확인하였다. PMS에 의해 계산된 파손지수의 평균보다 크기 때문에 최적화된 두께는 PMS 기반의 설계방법보다 다소 얇아 졌으나, 안전여유를 기반의 설계방법보다는

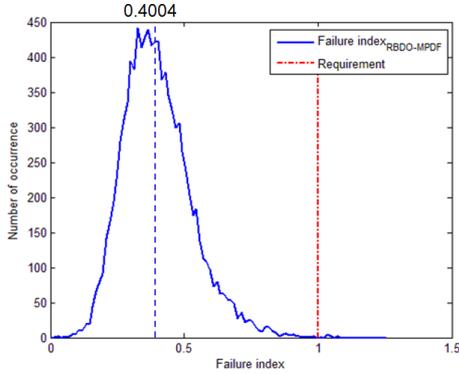


Fig. 16 Distribution of RBDO-MPDF(fuselage).

Table 6 Comparison with deterministic and probabilistic optimization(fuselage)

	Upper facesheet(mm)		
	0°	± 45°	90°
MS based DO	0.287	0.125	0.204
RBDO-MPDF	0.336	0.125	0.244
	Lower facesheet(mm)		
	0°	± 45°	90°
MS based DO	0.244	0.125	0.136
RBDO-MPDF	0.315	0.125	0.228
	Weight(kg)		
MS based DO	1,015		
RBDO-MPDF	1,115		

각 층의 두께와 무게가 증가한 것을 알 수 있다. 또한 0°층이 하중지지에 있어 가장 큰 역할을 한다는 것을 최적설계 결과를 통해 확인할 수 있다.

4. 결론

신뢰성 해석을 기반으로 하는 확률론적 설계 방법은 보다 더 효과적이고 개선된 방법으로 인식되고 있다. 본 논문에서는 금속 외팔보와 복합재 샌드위치 동체 구조에 대해 이 방법을 적용해 보았다.

먼저 기존의 확정론적 최적화 결과를 개선하기 위하여 불확실성을 적용한 경우에도 구조물의 안전을 보장할 수 있는 PMS를 제안하였다. 또한 크고 복잡한 구조물에 대한 효과적인 신뢰성 기반 최적설계를 위하여 RBDO-MPDF 방법을 제안하였고, 그 적용 가능성을 확인하였다. 결과적으로 제안된 방법들은 효과적이고 타당한 근거와 함께 구조물의 신뢰도를 향상시키는 것을 확인하였다.

향후 반응면 기법과 같은 근사 모델을 적용한 효율 및 정확도 검증과 일반적인 신뢰성 기반 최적설계를 수행하여 비교할 필요가 있으며, 본 논문의 결과는 효율적인 최적설계 연구 및 다분야 통합설계 문제에도 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 비행체특화센터 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Haldar, A., and Mahadevan, S., *Reliability Assessment using Stochastic Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- Lee, S.J., and Kim, I.G., "Reliability Analysis for Composite Laminated Plate Using Hybrid Response Surface Method," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 2, 2010, pp. 40-47.
- Niu, M.C.Y., *Airframe; Stress Analysis and Sizing(2nd Edition)*, Conmlit Press Ltd., Hong Kong, 2000, pp. 24-74.
- Corke, T.C., *Design of Aircraft*, Prentice Hall, USA, 2003, pp. 214-215.
- Choi, K.K., and Youn, B.D., "On Probabilistic Approaches for Reliability-Based Design Optimization(RBDO)," *AIAA*, Vol. 14, No. 1, 2002, pp. 684-693.
- Bichon, B., Mahadevan, S., and Eldred, M., "Reliability-Based Design Optimization using Efficient Global Reliability Analysis," *AIAA*, Vol. 3, 2009, pp. 1902-1913.
- Lee, S.J., and Kim, I.G., "A Study on Modified Reliability-Based Optimization Method for Composite Structures," *Proceeding of the 8th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials*, Changwon, Korea, Nov. 2011.
- Yuan, C., Bergsma, O., Koussios, S., Zu, L., and Beukers, A., "Optimization of Sandwich Composites Fuselages Under Flight Loads," *Applied Composite Materials*, Vol. 19, No. 1, 2012, pp. 47-64.
- Jeong, H.K., and Sheno, R.A., "Probabilistic Strength Analysis of Rectangular FRP Plates using Monte Carlo Simulation," *Computers and Structures*, Vol. 76, No. 1-3, 2000, pp. 219-235.