

論文

복합 반응면 기법을 이용한 복합재 적층판의 신뢰성해석

이석제*, 김인걸**+

Reliability Analysis for Composite Laminated Plate Using Hybrid Response Surface Method

Seokje Lee*, In-Gul Kim**+

ABSTRACT

In this paper, the hybrid response surface method(HRSM) is proposed and examined. Hybrid response surface method calculate a approximate model repeatedly based on MPP coordinates. To verify the performance, probability of failure, MPP(Most Probable failure Point) and reliability index are calculated for nonlinear function and composite laminated plate by using reliability analysis method and compared with results by using typical response surface method(RSM). Probability of failure is calculated under the assumption of the nonlinear limit state equation and given failure criterion. The results of proposed method shows performance improvement in estimating the probability of failure.

초 록

본 논문에서는 복합 반응면 기법을 제안하고 성능을 고찰하였다. 복합 반응면 기법은 MPP의 좌표를 기준으로 하여 근사 모델을 반복 계산하는 기법이다. 성능을 검증하기 위해 비선형 함수와 복합재 적층판에 대하여 신뢰성 해석 기법을 적용하여 파괴확률, MPP(Most Probable failure Point), 신뢰도 지수를 계산하고 일반적인 반응면 기법의 결과와 비교하였다. 파괴확률은 비선형 한계상태식을 가정하고 임의의 파괴 기준을 정의하여 계산하였다. 제안한 복합 반응면 기법을 이용하여 파괴확률을 계산한 결과 일반적인 반응면 기법보다 향상된 성능을 나타내었다.

Key Words : 복합 반응면 기법(hybrid response surface method), 신뢰성해석(reliability analysis), 최다확률 파괴점(Most Probable failure Point, MPP), 복합재 적층판(composite laminated plate)

1. 서 론

지금까지 일반적으로 사용해 온 확정론적 접근방법(Deterministic approach)은 설계 변수들이 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각하여 구조물의 거동을 해석하였다. 만약 설계대로 한 치의 오차도 없는 구조물이 제작되어 설계시 고려된 환경에서만 구조물이 동작한다면 구조물의 파괴는 일어나지 않을 것이며, 안전성 관점에서 여유강도를 고려할 필요도 없

을 것이다. 그러나 실제 많은 경험에 비추어 볼 때 구조해석에 사용되는 외부하중이나 재료의 역학적 특성들은 설계자가 일정하다고 가정한 기대값을 중심으로 임의적으로 분포되어 있음을 알 수 있으며, Fig. 1과 같이 구조물의 저항요소(R)와 외부하중에 의한 구조물의 응답(L)의 적절한 안전계수(\bar{R}/\bar{L})를 적용한 경우라도 분포특성이 반영될 경우 겹친 영역에서 응답이 저항요소를 초과할 수 있으므로 구조물의 파괴가 일어날 수 있다[1].

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

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

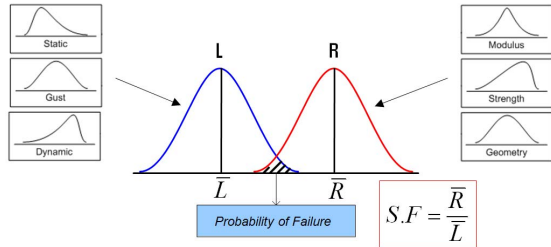


Fig. 1 Probability of failure due to uncertainty.

특히, 비강도 및 비강성이 좋고 피로특성이 우수하여 항공 우주, 선박, 기계 같은 다양한 공학분야에 널리 사용되고 있는 복합재료의 경우 더 큰 변동성을 갖는다. 변동성을 갖게 하는 주요 원인으로는 경화시의 온도 및 습도, 섬유 내로의 기지 함침률, 복합재 내의 불연속 공간의 유무, 각 층(Ply)의 두께 등을 들 수 있다. 따라서 복합재 구조물의 다양한 설계 요구조건에 대한 합리적인 검토를 위해서는 이들 물성치의 변동량을 정량적으로 고려할 수 있는 신뢰성 해석에 기반한 확률론적 접근방법(Probabilistic approach)이 요구된다고 할 수 있다[2].

신뢰성 해석을 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)과 개선된 1계 2차 모멘트법(AFOSM), 2계 2차 모멘트법(SOSM)등 이 있다.

그러나 확률변수가 많은 대형 구조물의 경우, 신뢰성 해석 과정에서 많은 해석 비용을 필요로 하게 되므로 정확성을 보장하면서 효율을 높일 수 있는 방법의 연구가 필수적이다. 이를 해결하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션의 표본점 추출 방법을 달리 하거나 반응면 근사 모델의 성능을 개선하는 연구가 수행되었다[3,4]. 최근 공학문제의 다양성과 복잡성이 증대되는 가운데 주목받고 있는 반응면 기법은 Fig. 2와 같이 표본점 영역의 선정과 표본점 개수, 근사 모델의 형태 등에 의해 해석 비용이 급격히 증대되며 최적의 반응면 근사 모델을 생성하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

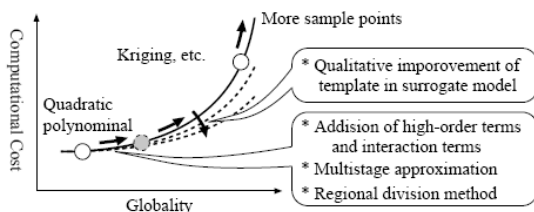


Fig. 2 Computational cost versus globality.

본 논문에서는 효율성과 정확성을 동시에 만족시킬 수 있는 복합 반응면 기법(Hybrid Response Surface Method, HRSM)을 제안하였다. 이는 최다확률 파괴점(Most

Probable failure Point, MPP)을 중심으로 영역별 반응면 근사식을 생성하고 한계상태식에 적용함으로써 설계시 가장 중요하게 고려해야 할 MPP 근처의 특성 뿐 아니라 그 외의 영역에 대한 특성도 동시에 반영할 수 있다. 여기서 MPP란 Fig. 3과 같이 기하학적으로 원점에서 한계상태식까지의 최단거리에 위치한 점을 의미한다. 또한 반응면 기법을 기반으로 하기 때문에 실제 복잡한 수치해석 과정을 단순화할 수 있다.

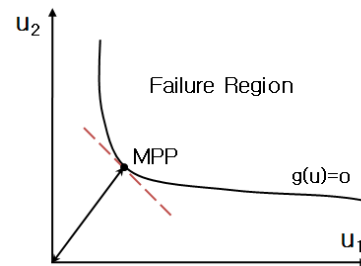


Fig. 3 Geometric concept of MPP.

HRSM을 이용하여 비선형 함수와 복합재 적층판 예제에 대한 파괴확률 및 적합도를 계산하였으며, 이를 통해 제안된 기법의 성능을 검증하고자 하였다.

2. 이론 해석

2.1 반응면 기법(RSM)

RSM은 적은 횟수의 구조해석 결과를 이용하여 회귀분석 등의 방법으로 관심 있는 구조응답을 확률변수의 함수 형태로 명확히 근사한 다음, 근사된 한계상태식을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하고 안전성을 평가하는 방법이다[5].

RSM의 일반적인 해석 절차는 Fig. 4와 같이 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 이용하여 확률변수들의 표본을 선택하고 선정된 표본점들에 대한 적은 횟수의 확정론적 해석을 수행한다. 그 다음 해석 결과를 회귀분석을 통해 1차 혹은 2차의 반응면 근사식(Response Surface Model, RS model)을 구성한다. 이를 한계상태식에 대입하여 신뢰성 해석 기법을 이용하여 파괴확률을 계산한다.

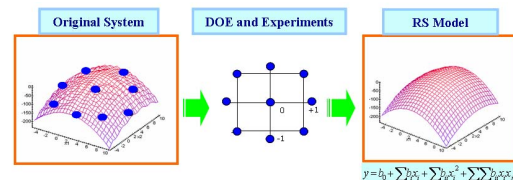


Fig. 4 Response surface method.

또한 신뢰성 해석에 있어서 가장 관심있는 영역은 파괴가 발생하기 쉬운 영역이다. 즉, 표준화된 확률변수의 공간에서 원점으로부터 가장 가까이 있는 한계상태식상의 점, MPP 근처이므로 반응면 기법에 의해 근사된 한계상태식은 이 영역에서 근사의 정확도가 만족스러워야 한다.

RSM의 필요성을 들면 다음과 같다. 실제 적용되는 구조물에 대한 신뢰성 해석을 위해서는 수학적 모델링의 한계가 있을 수 있기 때문에 유한요소해석이 연동되어야 할 것이다. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 표본 집단의 표본점에 대한 유한요소해석을 수행한다면 가장 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 이는 확률변수의 양과 시뮬레이션 횟수에 따라 매우 큰 전산수치비용을 필요로 한다. 이를 대체하기 위해 한계상태식 자체를 수치적으로 변환하여 파괴확률을 구하는 1차 혹은 2차 신뢰도 해석법이 연구되었지만 근본적으로 한계상태식에 변형을 가하기 때문에 정확한 값이라고 할 수 없다. 그러므로 확률변수에 대해 정형화 된 반응면 근사식의 적용을 필요로 하게 된다.

2.2 복합 반응면 기법(Hybrid Response Surface Method, HRSM)

Fig. 5와 같이 비선형성이 큰 한계상태식(근사하지 않은 원래의 해석모델을 Full analysis model 또는 Full model이라고 정의)을 대표적인 하나의 반응면 근사식으로 표현하기에는 한계가 있다. Fig. 6과 같이 일반적으로 확률변수의 평균점을 중심으로 표준편차의 배수만큼 등간격으로 표본점을 산출하며, 이 국부적으로 모사된 반응면 근사식(RS model)이 전 영역을 대표하기 때문이다.

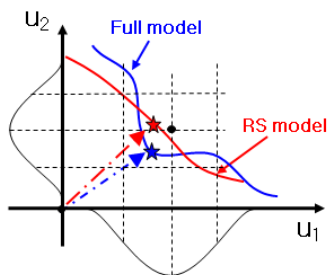


Fig. 5 High nonlinear limit state equation.

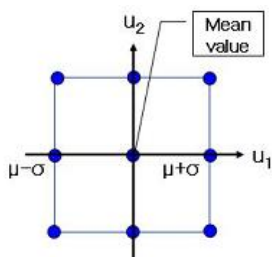


Fig. 6 Typical design of experiment.

본 논문에서 제안한 HRSM은 먼저 표본점의 중심을 각 확률변수의 평균으로 가정하고 표준편차만큼 떨어진 표본점에 대한 반응면 근사식을 계산한다. 이렇게 계산된 반응면 근사식의 MPP를 탐색하여 이를 원점으로 한 표본점을 다시 산출하게 된다. 여기서 실험계획법은 MATLAB Toolbox가 제공하는 D-Optimal 설계법을 사용하였으며, 표본점의 개수는 9개이다. MPP를 찾기 위해 각 확률변수의 초기점을 0으로 하고, 한계상태식 상에서 좌표의 제곱의 합이 최소인 점을 찾는 최적화 과정을 이용한다. 이 과정을 특정 수렴조건 동안 반복 수행하여 영역별로 각각의 반응면 근사식을 생성하면 MPP 근처에서의 정확도를 높일 수 있고, 그 외의 영역에 대한 특성도 반영할 수 있다. 최적의 반응면 근사식 계수를 구하기 위해 Gauss-Newton법을 이용한 비선형 최소자승법을 사용하였다. MPP를 중심으로 한 표본점 산정 방법은 Fig. 7과 같이 기존의 표본점 간격을 그대로 유지하고 중심만 이동하는 방법(HRSM-1)과 MPP가 존재하는 사분면에 대해서만 국부적으로 표본점을 정의하는 방법(HRSM-2)으로 나누어 각각의 해석 결과를 비교하였다.

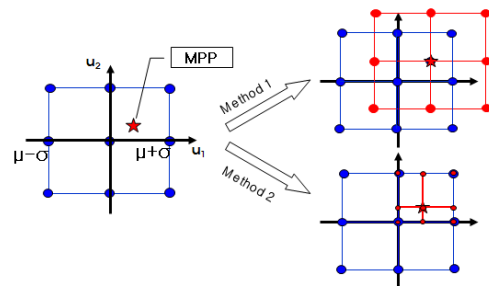


Fig. 7 Hybrid response surface method.

2.3 적합도 계산

2.3.1 평균오차제곱합(Mean Square Error, MSE)

MSE란, 표본점에 대한 반응값(y)과 추정값(\hat{y})의 차이인 오차를 의미한다. 오차를 제곱한 값의 평균이라고 하며 MSE가 최소가 되는 것을 최량 추정량이라고 하고 이 경우를 만족하는 독립 변수의 조합을 선택하는 것이 중요하다[6].

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (1)$$

2.3.2 수정결정계수(R_{adj}^2)

결정계수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 전체 제곱합 중 모형이 설명하는 제곱합의 비율로 해석하며 0과 1사이의 값을 갖는다. 1에 가까울수록 모형의 적합도가 높으며 독립 변수가 추가됨에 따라 증가하는 단점이 있다.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

여기서 y 는 반응값을 나타내며 \hat{y} 은 추정값, \bar{y} 은 반응값의 평균을 의미한다.

이러한 단점을 보완한 것이 수정결정계수이며 식 (3)과 같이 계산된다[6].

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) (1 - R^2) \quad (3)$$

여기서 n 은 표본 집단의 개수이며 k 는 확률변수의 개수이다.

2.4 민감도 계산

PSA(Probabilistic Sensitivity Analysis) 기법 중 MPP-based sensitivity factor를 이용한 방법은 Fig. 8과 같이 표준정규분포 공간에서 정의된 MPP 좌표에 의해 결정된다. 원점에서 MPP 까지의 최단거리를 나타내는 신뢰도 지수(Reliability index, β)를 각 확률변수의 차원으로 투영하면 식 (4)와 같이 민감도 계수를 구할 수 있다[7].

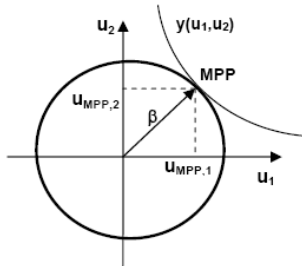


Fig. 8 Illustration of the MPP-based sensitivity measures.

$$S_i = \left| \frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \phi(u_i) \right)^2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \phi(u_j) \right)^2} \right|_{MPP} = \frac{(u_i^{MPP})^2}{\beta^2} \quad (4)$$

여기서 각 확률변수의 S 의 합은 1이어야 한다.

3. 수치해석 예제 및 결과

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 COMSOL과 MATLAB을 사용하였으며, 식 (5)와 같은 반응면 근사식을 사용하였다.

$$\hat{F} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

여기서 b 는 근사식의 계수를 나타내며, x 는 확률변수, n 은 확률변수의 개수를 의미한다.

HRSM의 성능을 검증하기 위해 신뢰성 해석 기법(MCS, AFOSM, SOSM)을 이용한 파괴확률 및 MPP 좌표, 신뢰도 지수, 적합도를 계산하여 분석하였다[8]. HRSM을 이용한 AFOSM과 SOSM 해석시, MPP를 추적하며 반복 계산을 통해 얻은 최종 반응면 근사식만을 이용한다. 그 이유는 원점으로부터 MPP 까지의 최단거리만을 가지고 파괴확률을 계산하기 때문이다. 한편 MCS 해석시에는 추출된 표본 집단은 각 표본점 구역에 해당 반응면 근사식을 사용하고, 그 외의 영역에 해당하는 표본이 있을 경우 초기에 생성된 근사식을 사용하도록 하였다.

3.1 수치해석 예제 1

식 (6)과 같이 확률변수가 x_1, x_2 인 Branin function을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다[9].

$$f(x_1, x_2) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2} x_1^2 + \frac{5}{\pi} x_1 - 6 \right)^2 + 10 \left(1 - \frac{1}{8\pi} \right) \cos(x_1) + 10 \quad (6)$$

이 식이 10보다 작으면 시스템이 파괴된다고 가정하고 파괴확률을 계산한다. 그러므로 한계상태식은 식 (7)과 같다.

$$g = f(x_1, x_2) - 10 \quad (7)$$

각 확률변수는 Table 1과 같이 표준정규분포로 가정하였으며, 임의의 구간에 대해 그려보면 Fig. 9와 같다.

Table 1 Properties of random variables(Example 1)

	Mean	SD	Distribution
x_1	0	1	Normal
x_2	0	1	Normal

* SD : Standard Deviation

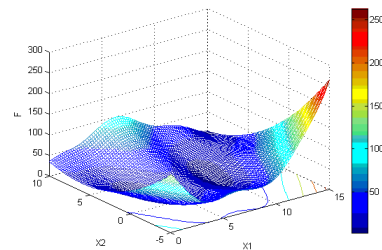


Fig. 9 Branin function(Example 1).

예제 1에서는 함수의 계산 결과가 10보다 작을 경우 파괴가 된다고 가정하였다. HRSM을 이용한 결과 Method 1은 3번, Method 2는 2번의 반복 계산을 하였으며, MCS 해석시 시뮬레이션 횟수는 100,000회로 하였다.

Branin function을 모사하기 위해 생성된 반응면 근사식의 각 계수는 Table 2와 같이 계산되었다. HRSM의 경우 반복 수행 후 최종 영역에 대한 근사식을 나타낸다.

Table 2 Coefficient of RS approx. equation(Example 1)

	RSM	HRSM(1)	HRSM(2)
b_0	45.60	53.24	59.34
b_1	-19.51	-31.29	-36.25
b_2	-12.17	-10.97	-10.33
b_{12}	3.18	2.07	1.85
b_{11}	-0.31	4.11	5.07
b_{22}	1	1	1

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

AFOSM을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하면 파괴확률, MPP 좌표, 신뢰도 지수가 각각 계산된다. 또 이때의 MPP 좌표를 이용하여 SOSM을 이용한 파괴확률을 계산할 수 있다. 이는 MPP에서의 정확도 향상을 명확히 판단할 수 있는 근거가 된다. 결과는 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Results using AFOSM and SOSM(Example 1)

	Probability of failure		MPP		β
	AFOSM	SOSM	u_1	u_2	
Full model	1.011 %	0.903 %	2.179	0.804	2.322
RSM	1.402 %	1.365 %	2.142	0.486	2.197
HRSM(1)	1.007 %	0.896 %	2.154	0.873	2.324
HRSM(2)	1.011 %	0.885 %	2.178	0.805	2.322

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

파괴확률 및 MPP 좌표, 신뢰도 지수 모두 HRSM의 결과가 Full model과 유사한 값을 나타내었다. 여기서 Full model이란 반응면 근사식으로 모사하고자 한 원래의 함수, 즉 식 (6)의 Branin function을 의미한다. 위 결과를 바탕으로 HRSM의 MPP에서의 정확도가 기존의 RSM에 비해 향상되었음을 알 수 있다. 또한 MPP 좌표의 근사정도로 보아 반응면 근사식을 이용한 MPP는 전역 최적점(Global optimum point)임을 알 수 있다.

MCS를 이용하여 계산한 결과, 파괴확률 및 적합도를 확인할 수 있다. 이 방법은 MPP에 국한되지 않고 확률변수의 분포 영역 전체에 대한 특성을 반영하므로 반응면 근사 모델의 정확도를 판단할 수 있다. 해석 결과는 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Results using MCS(Example 1)

	Probability of failure	MSE	R_{adj}^2
	MCS		
Full model	0.894 %	-	-
RSM	1.417 %	8.589	0.991
HRSM(1)	1.149 %	8.384	0.992
HRSM(2)	1.210 %	8.471	0.992

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

MCS를 이용한 결과에서도 마찬가지로 파괴확률, 적합도 모두 HRSM을 이용한 결과가 우수한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 수치해석 예제 2

Fig. 10과 같이 분포하중을 받는 항공기 날개 형태의 복합재 적층판에 대해서 신뢰성 해석을 수행하였다.

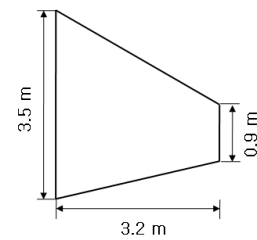


Fig. 10 Configuration of wing-shaped composite laminated plate (Example 2).

사용된 재료는 Graphite/Epoxy(T300/5208)이며 두께는 10mm로 가정하였다. 본 예제에서는 기계적 물성인 E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} 중 민감도가 큰 두 개를 확률변수로 선정하였다. 모든 변수의 표준편차는 평균의 10%로 설정하고 MPP에서의 민감도 계수를 이용하여 비교한 결과, Table 5와 같이 E_1 과 G_{12} 의 민감도가 크게 나타났다.

복합재 적층판 평면에 균일 분포하중을 적용하였고, 유한 요소해석시 특별 직교 이방성 적층판으로 가정하여 모델링하였다[10]. 최대 변위가 0.09m보다 클 경우 파괴가 일어난다고 가정하였으므로 한계상태식은 식 (8)과 같다.

$$g = 0.09 - \delta_{\max}(E_1, G_{12}) \quad (8)$$

Table 5 Sensitivity analysis

	Sensitivity
E_1	0.9859
E_2	4.17E-3
ν_{12}	3.81E-6
G_{12}	9.99E-3

각 확률변수의 평균 및 표준편차는 Table 6과 같이 가정하였다[11]. Fig. 11은 해석과정의 흐름도이다.

Table 6 Properties of random variables(Example 2)

	Mean	SD	Distribution
$E_1(GPa)$	132.0	13.2	Normal
$E_2(GPa)$	9.3	0	-
ν_{12}	0.3	0	-
$G_{12}(GPa)$	3.742	0.3742	Normal
$t_{ply}(mm)$		0.125	
Stacking sequence	[0/+45/-45/90] _{10S}		

* SD : Standard Deviation

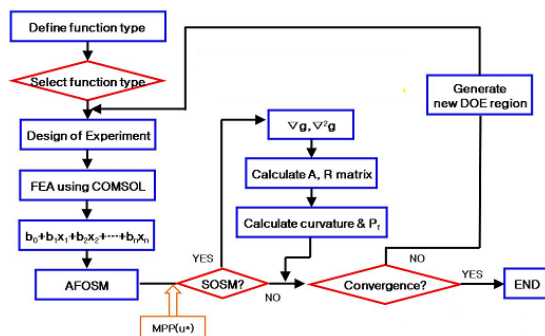


Fig. 11 Reliability analysis process flowchart.

Table 7과 Fig. 12는 복합재 적층판의 변위를 계산하기 위해 COMSOL에서 모델링 한 유한요소모델의 정보 및 형상을 나타낸다.

Table 7 Finite element model summary

FEA program	COMSOL 3.5a
Type of element	2-D triangular
No. of grids	294
No. of elements	537

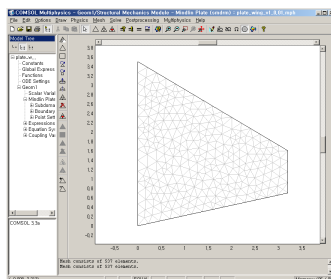


Fig. 12 Finite element model.

앞서 사용된 재료의 기계적 물성 중 민감도가 높은 두 변수를 확률변수로 선정하였다. 예제 2에서는 최대 변위가 0.09m보다 클 경우 파괴가 된다고 가정하였는데, 확률변수 선정에 따른 파괴확률 비교를 Table 8에 정리하였다.

Table 8 Probability of failure due to random variables(Example 2)

Random variables	Probability of failure	
	MCS	AFOSM
$E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$	3.13 %	3.08 %
E_1, G_{12}	3.12 %	3.04 %

그 결과, 민감도가 높은 두 개의 확률변수만을 고려하여도 해석 결과에 크게 영향을 미치지 않으며 효율적인 해석이 가능함을 알 수 있다.

HRSM을 이용한 결과 Method 1과 2, 모두 3번의 반복 계산을 하였으며, MCS 해석시 시뮬레이션 횟수는 10,000회로 하였다.

적층판의 변형 형상을 모사하기 위해 생성된 반응면 근사식의 각 계수는 Table 9와 같이 계산되었다. 역시 HRSM의 경우 반복 수행 후 최종 영역에 대한 근사식을 나타낸다.

Table 9 Coefficient of RS approx. equation(Example 2)

	RSM	HRSM(1)	HRSM(2)
b_0	0	0	0
b_1	7.67e-13	1.02e-12	1.12e-12
b_2	3.24e-11	4.03e-11	3.57e-11
b_{12}	-7.24e-23	-1.20e-22	2.59e-25
b_{11}	-3.78e-24	-5.79e-24	-7.90e-24
b_{22}	-3.18e-21	-3.85e-21	-5.24e-21

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

AFOSM과 SOSM 방법을 이용한 해석 결과를 Table 10에 정리하였다.

Table 10 Results using AFOSM and SOSM(Example 2)

	Probability of failure		MPP		β
	AFOSM	SOSM	u_1	u_2	
Full model	3.040 %	-	-1.871	-0.111	1.874
RSM	0.193 %	0.138 %	-2.869	0.340	2.889
HRSM(1)	4.498 %	4.128 %	-1.693	-0.095	1.696
HRSM(2)	3.106 %	2.660 %	-1.850	-0.236	1.865

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

앞선 예제와 같이 파괴확률 및 MPP 좌표, 신뢰도 지수 모두 HRSM의 결과가 Full model에 가까운 것을 확인할 수 있었다. 여기서 Full model이란 반응면 근사식으로 묘사하고자 한 원래의 적층판의 변형 형상, 즉 COMSOL을 이용한 해석 결과를 의미한다. 또한 MPP 좌표의 근사정도로 보아 근사식을 이용한 MPP는 전역 최적점임을 알 수 있다.

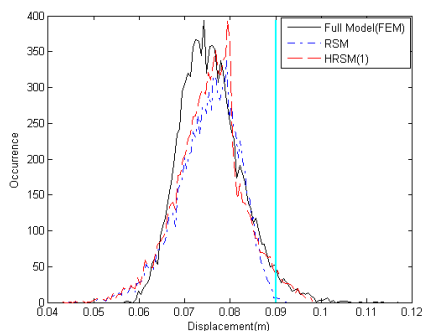
MCS를 이용한 해석 결과는 Table 11에 정리하였다.

Table 11 Results using MCS(Example 2)

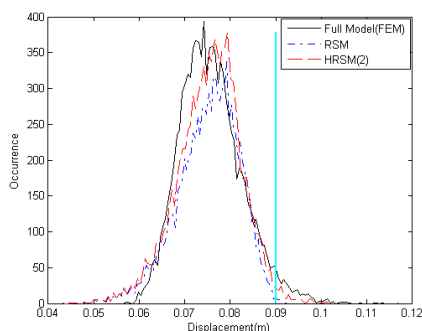
	Probability of failure	MSE	R_{adj}^2
	MCS		
Full model	3.120 %	-	-
RSM	0.170 %	4.371E-6	0.912
HRSM(1)	2.970 %	3.602E-6	0.927
HRSM(2)	1.290 %	3.835E-6	0.922

* (1) : Method 1
(2) : Method 2

MCS 결과 역시 HRSM의 성능이 우수한 것을 확인 하였으며, Fig. 13은 한계상태식의 분포 형태를 나타내고 있다. 앞서 최대 변위를 파괴 판단의 기준으로 정의 했으므로 전체 면적에 대해 0.09의 기준선을 넘는 상대 면적이 파괴확률이 된다.



(a) Method 1



(b) Method 2

Fig. 13 Distribution form of limit state equation(Example 2).

위 두 예제에서 공통적으로 AFOSM과 SOSM 방법을 이용한 해석에서는 Method 2의 정확도가 높고, MCS 방법을 이용한 해석은 Method 1의 정확도가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 MPP 근처의 국부적인 정확도는 Method 2가 우수하며, 확률변수의 분포 영역에 대한 한계상태식의 특성을 반영하는 면에서는 Method 1이 우수한 것을 의미한다.

4. 결 론

신뢰성 해석에 기반한 확률론적 접근 방법은 기존의 안전 계수 방법에 비해 효율적인 방법으로 대두되고 있다. 그러나 실제 항공우주 구조물의 거동은 수치적으로 묘사하기 어렵고 많은 불확실한 인자들을 내포하고 있어 많은 해석 비용을 요구하게 된다. 이를 해결하기 위해 반응면 기법의 도입은 해석시 효율을 높이는데 도움이 된다는 것을 선행 연구를 통해 검증한 바 있다[12]. 그러나 비선형성이 큰 모델을 대표적인 하나의 반응면 근사 모델로 대체하는 것은 한계가 있으므로, 본 논문에서는 MPP를 이용한 HRSM을 제안하고 수치예제를 통하여 성능을 검증하였다.

결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) AFOSM과 SOSM 같은 신뢰성 해석 기법을 이용한 파괴확률 계산시에는 MPP의 좌표를 정확히 알아내는 것이 중요하며, 두 예제 모두 HRSM을 이용하여 구한 MPP 좌표가 실제 모델의 MPP 좌표에 근접한 것을 확인하였다.
- 2) MCS를 이용한 신뢰성 해석 결과, HRSM을 이용한 결과가 실제 모델의 파괴확률에 더 가까운 것을 확인하였고, 적합도 계산 결과도 개선되었다.
- 3) MPP 근처의 정확도는 상대적으로 Method 2가 우수하였고, 한계상태식의 전 영역에 대한 정확도는 Method 1이 우수하였다.
- 4) 향후 통계적으로 검증된 확률변수의 특성 및 파괴 조건을 적용하고, 재료의 기계적 물성 뿐 아니라 돌풍과 같은 외부하중의 변동성을 고려한다면 신뢰성 있는 구조설계에 이용할 수 있으리라 생각된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD070041AD)과 충남대학교 2007년도 교원연구력 강화사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 양영순 외, 구조신뢰성 공학, 서울대학교 출판부, 1999.

- 2) Long, M. W. and Narciso, J. D., *Probabilistic Design Methodology for Composite Aircraft Structures*, DOT/FAA/AR-99/2, 1999.
- 3) Shin, Y. and Wu, Y-T., "Progressive Importance Sampling Approach for Reliability Analysis," 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conference, 2006.
- 4) Fujita, K. and Kounoe Y., "High-Order Polynomial Response Surface with Optimal Selection of Interaction Terms," 11th AIAA/ISSMO Conference, 2006.
- 5) Myers, R. H. and Montgomery, D. C., *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons Inc., 2002.
- 6) 김철 외, *공학도를 위한 수치해석*, McGraw -Hill, 2004.
- 7) Liu, H. and Chen, W., "Probabilistic Sensitivity Analysis Methods for Design under Uncertainty," 10th AIAA/ISSMO Conference, 2004.
- 8) Haldar, A. and Mahadevan, S., *Reliability Assessment using Stochastic Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- 9) Sekishiro, M., Venter, G., and Balabanov, V., "Combined Kriging and Gradient- Based Optimization Method," AIAA, 2006.
- 10) Swanson, S. R., *Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials*, Prentice-Hall International Inc., 1997.
- 11) Park, C., Park, B., Joo, Y., and Kim, I., "Monitoring of Impact Forces on an Aircraft Composite Wing," Proceeding of International Joint Conference of INABIO/SMEBA 2006, Daejeon, Korea, Sept., 2006, pp. 101.
- 12) 이석제, 김인걸, 장문호, "다양한 설계 요구조건을 고려한 복합재 평판의 신뢰성 해석," 한국복합재료학회지, 제 20권 제 4호, 2007, pp. 25-30.