



재료 불확실성을 고려한 풍력터빈용 복합재료 블레이드의 신뢰성 기반 최적설계

이승표^{1)*}

Reliability-based Design Optimization for Composite Wind Turbine Blades Considering Material Uncertainty

Seungpyo Lee^{1)*}

Received 4 July 2017 Revised 7 August 2017 Accepted 18 August 2017

ABSTRACT Wind energy has attracted increasing interest because of the need to develop alternative energy sources as a result of the depletion of fossil fuels and the need to develop clean, environmentally friendly energy sources by serious environmental problems such as CO₂. In this study, reliability-based design optimization considering the material uncertainty of composite wind turbine was investigated. For this purpose, structural analysis of the composite blade was performed. Deterministic design optimization was performed that was followed by reliability-based design optimization. From the structural analysis results, the maximum deflection and safety factor were calculated to evaluate the structural safety of the composite material. For optimization, the design variables were selected as the ply angles of the blade and the objective function was selected as the safety factor. The reliability-based design optimization takes into account the uncertainty of the material, i.e., physical properties and volume fraction of the fibers and matrix. Finally, the results of deterministic optimization and reliability based optimization were compared.

Key words Wind turbine blade(풍력터빈 블레이드), Optimization(최적설계), RBDO(신뢰성 기반 최적설계), Composite material(복합재료), Material uncertainty(재료 불확실성)

1. 서론

풍력터빈(wind turbine)은 바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치를 의미하며, 블레이드(blade), 주축(main shaft), 발전기(generator), 제어장치(controller), 허브(hub), 타워(tower) 등으로 구성된다. 최근 들어, 화석연료 고갈로 인한 대체에너지 개발의 필요성과 함께 CO₂ 등 심각한 환경문제로 인한 무공해 친환경 에너지 개발의 필요성으로 인하여 풍력에너지는 관심이 급증하고 있다.

풍력발전기는 풍차의 규모에 의하여 대형과 소형으로 분류된다. 소형 풍력발전기는 국제전기표준회의에 의해 수평면적이 200m² 미만 즉, 로터 직경 16m 미만, 출력 50kW 미만의 풍력발전기를 의미한다. 이러한 소형 풍력발전기는 분산원 전원 및 비상 방재용 전원 등 실용적인 용도로써 그 사용이 증가하고 있으며, 가정기기용 전원 등 적은 용량의 전기를 생산하거나 다양한 가정기반의 전기를 충당하는데 그 수요가 있다.^[1-4]

풍력터빈용 블레이드는 바람의 운동에너지를 기계에너지로 변환시키는 장치를 의미하며, Fig. 1에서 알 수 있듯이 스킨(skin), 스파(spar), 폼(foam) 등으로 구성된다.^[2] 예전에는 블레이드 재료로서 철강소재 등이 사용되었으며,

1) R&D Center, ILJIN Global

*Corresponding author: seungpyolee@gmail.com

Tel: +82-2-2192-9015 Fax: +82-2-565-8553

최근 블레이드 재료로는 비강도, 비강성 등이 우수한 복합재료가 주로 사용되고 있다. 복합재료에 사용되는 섬유(fiber)로는 유리섬유(glass fiber)가 주로 사용되고 있으며, 기지재(matrix)는 에폭시 등이 사용되고 있다.^[1,2,5,6] 블레이드는 바람에 의해 발생하는 다양한 하중 하에서 파손되지 않고 설계수명동안 운영될 수 있는지를 평가하며, 이를 위하여 복합재료 블레이드의 적층각도, 적층두께, 적층 수 등을 결정하여야 한다. 이는 일련의 반복설계과정을 의미하며, 최근에는 최적설계기법을 이용하기도 한다. 복합재료 섬유와 기지재는 제작공정의 특성상 어느 정도의 재료 불확실성을 포함하고 있으므로 이를 고려한 블레이드의 설계 및 평가가 필요하다.

풍력터빈용 블레이드에 관한 기존 연구의 대부분이 중대형 블레이드의 구조설계와 해석에 치중되어 있으며, 소형 블레이드의 설계 및 해석에 대한 연구는 거의 없다.^[4,7] 그러나 국내의 지형은 유럽 및 미국과 달라서 바람의 세기가 약하고 강도가 수시로 변하기 때문에 소형 블레이드의 적용이 적합하고 이에 대한 연구가 필요하다.^[1]

복합재료 블레이드에 대한 기존연구는 대부분 블레이드의 전체적인 반응을 고려한 구조설계와 해석에 집중되어 있으며, 복합재료 블레이드의 적층순서, 적층각도 등 최적화 연구는 거의 없는 실정이다.^[2,8,9] 또한 복합재료의 재료 불확실성을 고려한 연구 및 이를 고려한 최적화 연구는 전무한 실정이다.^[10] 풍력발전기는 그 특성상 한번 설치하면 장기간 운전되며 유지보수가 어렵기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. 그러나 풍력발전기에는 일반적으로 설계자가 의도하지 않은 재료의 설계공차, 물성산포, 제조산포 등이 포함되어 시스템에 대한 정확한 특성평가가 어렵다. 이를 고려하기 위하여 기존의 일반적인 확정론적 최적설계 기법(deterministic optimization technique)에서는 안전계수(safety factor)의 개념을 도입하여 사용하고 있다. 그

러나 안전계수를 사용하면 각각의 설계변수가 전체 시스템에 미치는 영향을 정확하게 고려하지 않고 일괄적으로 경험적 안전계수값을 곱하며 이로 인하여 과잉설계가 될 가능성이 많다. 반면 신뢰성 기반 최적설계 기법(reliability-based optimization technique)에서는 설계공차, 물성산포, 제조산포 등의 통계적 특성을 고려함으로써 시스템의 신뢰성을 상대적으로 정확하게 예측할 수 있다.

본 연구에서는 소형 풍력터빈용 복합재료 블레이드의 재료 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 최적설계에 대하여 고찰하였다. 이를 위하여 먼저 복합재료 블레이드의 구조해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 확정론적 최적설계를 수행하였고, 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다. 블레이드 구조해석은 상용 소프트웨어인 Abaqus^[11]를 사용하였고, 최적설계는 상용 소프트웨어인 Isight^[12]를 사용하였다. 구조해석 결과로부터 복합재료의 구조 안전성을 평가하기 위하여 최대 변형량과 안전계수를 계산하였다. 최적설계 시 설계변수는 블레이드의 적층각도로 선정하였고, 목적함수는 안전계수로 선정하였다. 신뢰성 기반 최적설계는 재료의 불확실성, 즉 섬유와 기지재의 물성 및 체적비(volume fraction)를 고려하였다.

2. 구조해석

풍력터빈용 복합재료 블레이드의 최적설계를 위하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 기존 연구^[1,2]와 동일한 제원에 대하여 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 사용되는 블레이드의 제원을 나타내며 Fig. 2는 설계된 블레이드의 형상을 나타낸다.^[1,2] 실제 블레이드는 허브에서 끝단으로 갈수록 두께가 얇아지므로 본 연구에서는 블레이드의

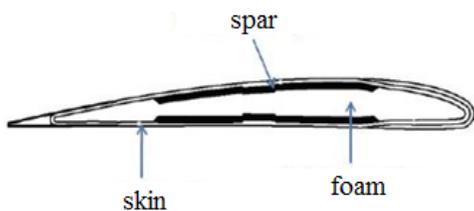


Fig. 1. Skin, spar, and foam of composite wind turbine blade

Table 1. Blade specification

Specification	Value
Rated power	2 kW
Rated wind speed	10 m/sec
Rated rotational speed	200 RPM
Number of blade	3
Blade length	1,74 m
Aerodynamic profile	NREL-S822

전체 길이를 10등분하고 각 부분에서 각각 7%의 비율로 두께가 얇아지도록 설계하였다. Fig. 2의 블레이드의 형상을 Abaqus^[1]를 이용하여 메쉬(mesh)를 생성하였다. 총 절점(node)의 개수는 6,840이며, 총 요소(element)의 개수는 7,085이다. 해석 시 사용된 요소는 S3와 S4R이다.^[1,2]

1장에서 언급한 바와 같이 블레이드는 스킨, 스파, 폼으로 구성된다. 본 연구에서는 스킨과 스파는 복합재료로 구성하고 폼은 등방성재료로 구성하였다. 해석의 편의성을 위하여 섬유와 기지재로 구성된 복합재료의 경우, 혼합법칙(Rule-Of-Mixture, ROM)을 이용하여 등가 물성치를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 스킨과 스파의 각각의 물

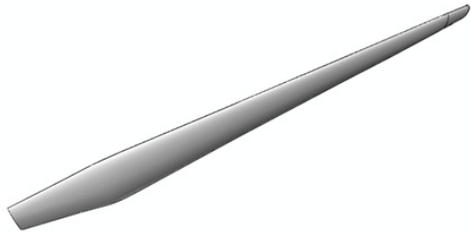


Fig. 2. Geometry of small wind turbine blade

Table 2. Material properties for fiber, matrix

	Fiber	Matrix
Name	advantex	HTS-665C Epoxy
Young's modulus	74.5 GPa	2.45 GPa
Poisson's ratio	0.22	0.35
Volume fraction	0.47	0.53

Table 3. Equivalent material properties for skin and spar

Material Property	Value
E_x	36.29 GPa
$E_y=E_z$	4.49 GPa
$G_{xy}=G_{xz}$	1.67 GPa
G_{yz}	1.76 GPa
$\nu_{xy}=\nu_{xz}$	0.29
ν_{yz}	0.27

Table 4. Material properties for foam

Material Property	Value
Young's modulus	0.7 GPa
Poisson's ratio	0.22

성치는 Table 2에 나타내었고, 혼합법칙으로 계산된 등가 물성치는 Table 3에 나타내었다. 그리고 폼의 물성치는 Table 4에 나타내었다.^[1,2] 구조해석을 위한 경계조건으로 허브의 모든 자유도를 구속하였다. 하중조건으로는 풍속 22.4m/sec 시 굽힘모멘트와 비틀림모멘트를 적용하였다.^[1,2]

3. 확정론적 최적설계

풍력터빈용 복합재료 블레이드의 확정론적 최적설계를 위하여 설계변수를 스킨의 적층각도와 스파의 적층각도, 두 개로 선정하였다. 스킨과 스파의 적층은 (+), (-) 대칭으로 적층된다고 가정하였다. 블레이드에 가해지는 하중은 굽힘모멘트가 비틀림모멘트에 비하여 큰 값이 작용하므로 굽힘모멘트를 주로 지지하는 스파의 두께를 비틀림모멘트를 주로 지지하는 스킨의 두께보다 두껍도록 스파를 2회 반복 적층하였다. 스킨과 스파의 적층각도는 0°에서 90°까지 연속적인 값을 가지나, 제작성을 고려하여 15° 간격으로 설계변수를 선정하였다. 또한, 블레이드 제작방법의 특성 상 적층각도 0°로 제작하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 설계변수는 스킨과 스파의 적층각도, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°의 이산변수로 선정하였다. 목적함수는 안전계수로 선정하였다. 안전계수는 복합재료의 구조 안전성을 평가하기 위한 값인 strength ratio의 역수로 계산할 수 있다. Strength ratio는 복합재료와 같은 이방성 재질에 대한 응력 기반 안정성 평가를 위하여 많이 사용되는 방법이며 본 연구에서는 Tsai-Wu 파손조건을 적용하였다. Tsai-Wu 파손조건에서 F_{xy}^* 를 -1/2로 가정하여 등방성 재질에 대한 generalized von Mises 항복조건식과 동일하도록 설정하였다.^[1,2,13] 블레이드 운전 시 블레이드와 타워와의 간섭이 발생하지 않아야 하며, 이로부터 최적설계 제한조건을 선정하였다. 식 (1)은 확정론적 최적설계의 정식화이다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } x_1, x_2 \\
 &\text{to maximize Safety factor} \\
 &\text{subject to } G_1(x_1, x_2) \leq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

where, x_1 ; ply angle of skin,
 x_2 ; ply angle of spar,
 $G_1(x_1, x_2) = \max. \text{deflection} - 150$

최적설계는 상용 소프트웨어인 Isight^[12]를 사용하였다. 사용한 최적설계 기법은 Evolutional optimization 기법이다. 이 기법은 gradient 기반의 계산을 수행하지 않으며, 이산설계변수에 대하여 수렴성이 좋은 기법으로 알려져 있다. 설계변수의 초기 값은 스킨의 적층각도, 스파의 적층각도 모두 15°로 설정하였다. 최적설계는 총 17회 수행되었고, 그중에서 16개가 설계가능(feasible design) 값이었다. Fig. 3은 각각 스킨의 적층각도, 스파의 적층각도, 안전계수, 제한조건에 대한 최적화 추이를 나타낸다. 여기

서, 분홍색 선은 최적 값을 나타내며, 빨간색 선은 제한조건을 의미한다. 총 17회 해석 중 5번째 값이 최적 값이었고, 그때의 스킨과 스파의 적층각도는 각각 (45°, 15°) 이었다. 안전계수는 4.7281이고, 최대변형량(maximum deflection)은 46.432mm이었다. Fig. 4는 각각 최적 값에 대한 변형량과 strength ratio를 도시하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 블레이드의 최대변형은 블레이드 끝단에서 발생하며, strength ratio 최대값은 경계조건 구속지점인 허브에서 발생한다.

Fig. 5는 각각 설계변수에 대한 안전계수, 제한조건 등의 등고선도(contour plot)를 나타낸다. Fig. 5의 오른쪽 위 끝부분에 점선으로 표시된 부분은 설계 가능 영역과 설계 불가능 영역(infeasible design region)의 경계를 나타낸

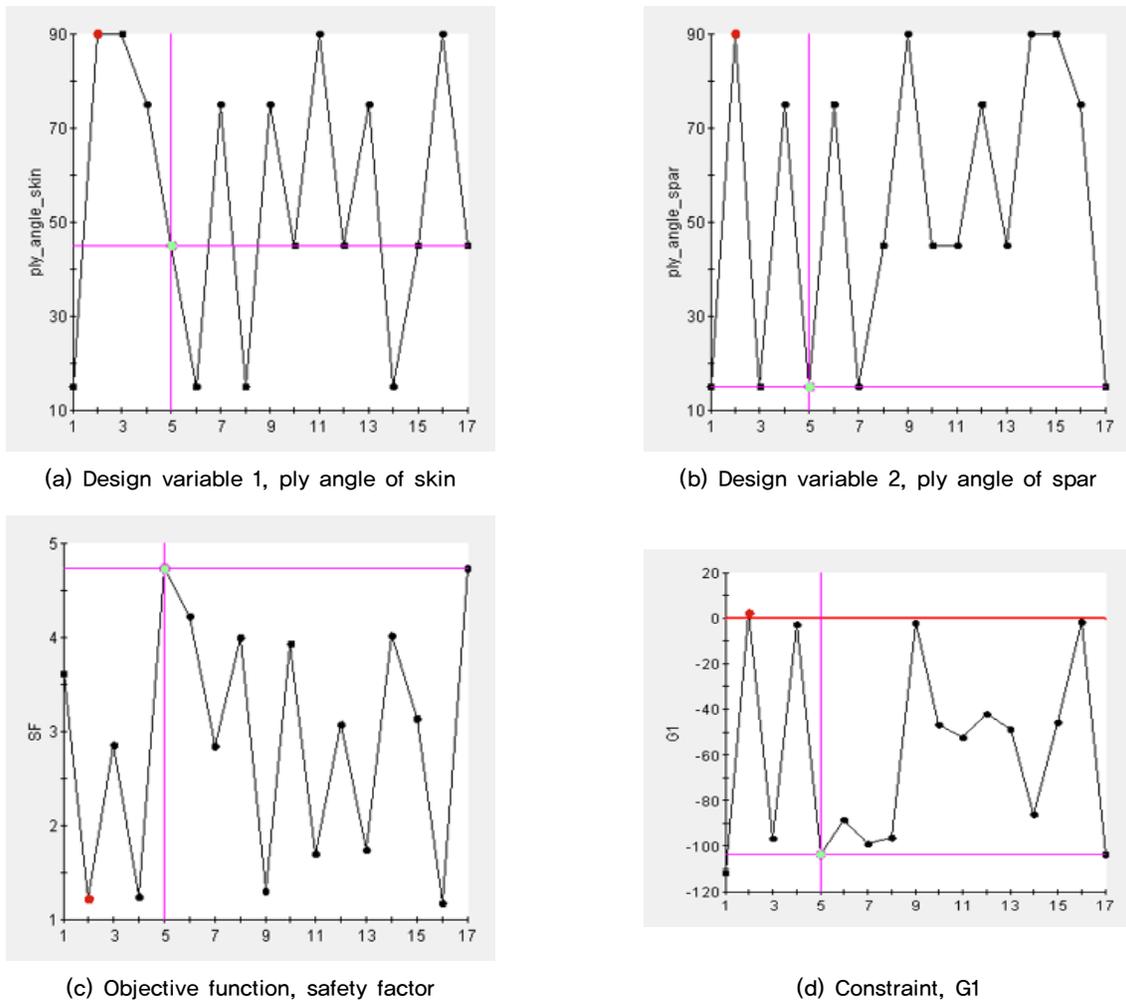


Fig. 3. History plots for deterministic optimization

다. 즉 점선의 왼쪽 부분은 설계 가능 영역을, 오른쪽 부분은 설계 불가능 영역을 의미한다. Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 스킨과 스파의 적층각도에 대한 안전계수는 상대적으로 큰 비선형성을 보인다. 설계변수에 대한 안전계수의 최적 값은 빨간색으로 표시된 스킨의 적층두께, 스파의 적층각도가 (45°, 15°) 일 때 안전계수 4.7이다. 또한 최악의 값은 파란색으로 표시된 스킨과 스파의 적층각도가 (90°, 90°) 일 때 안전계수 1.2이다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 제한 조건인 최대변형량은 스킨과 스파의 적층각도가 각각 (15°, 15°)에서 가장 적은 값을 보이며, 서서히 증가하여 (90°, 90°)에서 가장 큰 값을 보인다. Fig. 5(a), Fig. 5(b)로부터 알 수 있듯이 설계변수에 대한 안전계수가 매우 큰 비선형성을 보이는데 비하여 제한조건은 상대적으로 적은 비선형성을 보인다.

4. 신뢰성 기반 최적설계

3장의 내용을 바탕으로 풍력터빈용 복합재료 블레이드의 재료 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 신뢰성 기반 최적설계는 신뢰도 95% 수준에서 목적함수를 최대화하면서 제한조건을 만족하는 설계변수를 선정하는 것이다.^[14-15] 신뢰성 기반 최적설계의 정식화는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } x_1, x_2 \\
 &\text{to maximize Safety factor} \\
 &\text{subject to } P_r(G_1(x_1, x_2) \leq 0) \geq R^{\text{target}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

where, x_1 ; ply angle of skin,

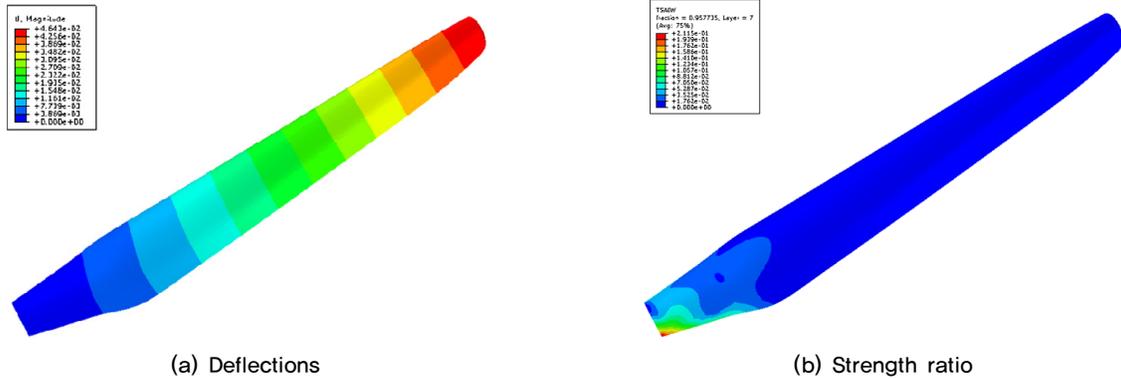


Fig. 4. Optimal design results

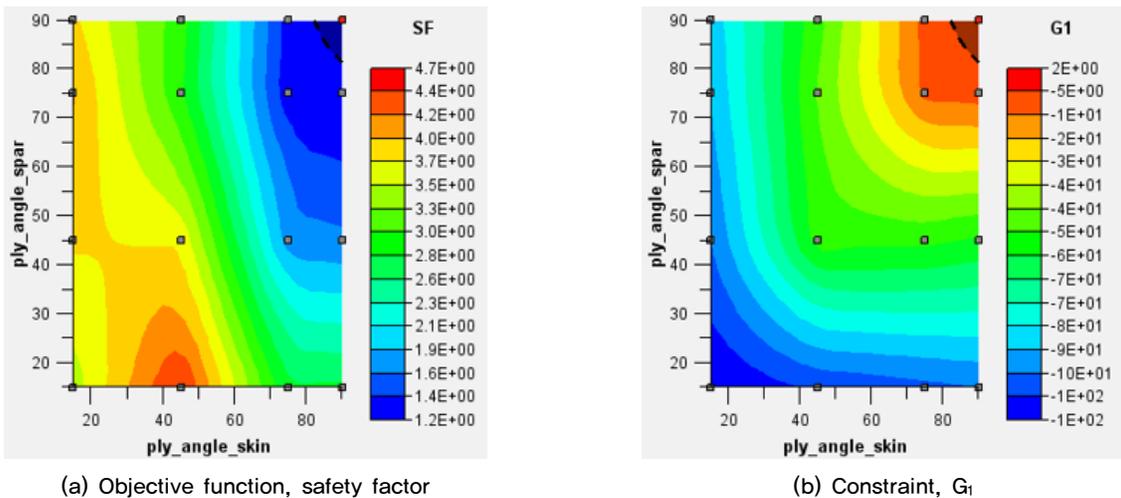


Fig. 5. Contour plots according to design variables for deterministic optimization

$$x_2; \text{ply angle of spar,}$$

$$G_1(x_1, x_2) = \max. \text{ deflection} - 150,$$

$$R^{\text{target}} = 0.95$$

확정론적 최적설계와 마찬가지로 신뢰성 기반 최적설계를 위하여 상용 소프트웨어인 Isight^[12]를 사용하였다. 최적설계 기법도 동일하게 Evolutional optimization을 사

용하였다. 재료 불확실성을 고려하기 위하여 섬유와 기지재의 탄성계수(Young's modulus)와 포아송 비(Poisson's ratio), 체적비를 Table 5와 같이 확률변수로 정의하였다. 신뢰성 기반 해석기법은 몬테카를로 샘플링 기법(Monte Carlo sampling technique)을 사용하였다. 샘플링 방법은 descriptive 샘플링을 사용하였고 샘플링 회수는 100회이다.^[12] 설계변수의 초기 값은 스킨의 적층각도, 스파의

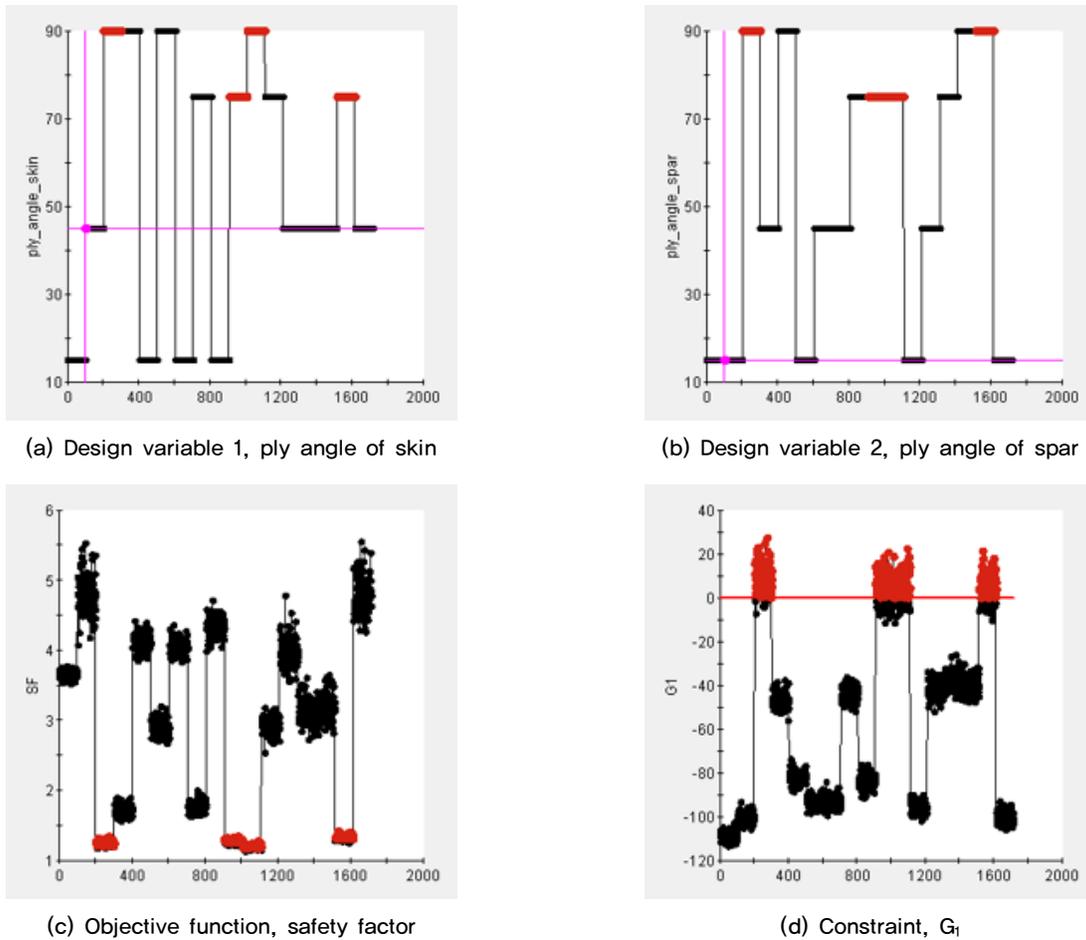


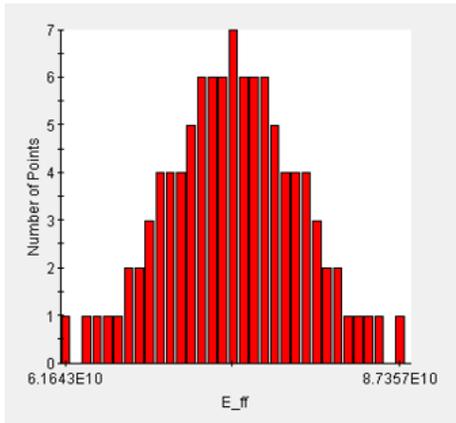
Fig. 6. History plots for RBDO

Table 5. Random variables for reliability-based design optimization

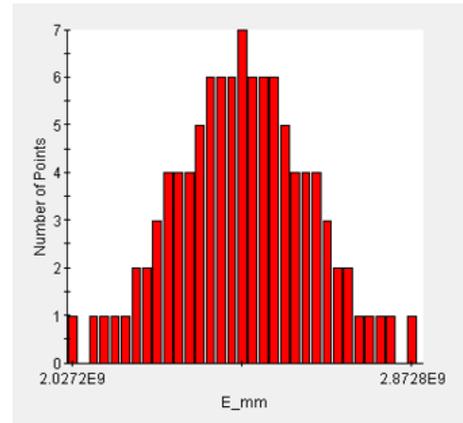
	Young's modulus, fiber E_f	Young's modulus, matrix, E_m	Poisson's ratio, fiber, ν_f	Poisson's ratio, matrix, ν_m	volume fraction, V_m
Distribution	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Mean value	7.45E+10	2.45E+9	0.22	0.35	0.53
Min. value	6.17E+10	2.21E+9	0.20	0.32	0.48
Max. value	8.20E+10	2.70E+9	0.24	0.39	0.58
Standard deviation	4.97E+9	1.63E+8	0.01	0.02	0.04

적층각도 모두 15°로 설정하였다. 최적설계는 총 17회 수행되었으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 포함하면 총 1,714회 수행되었다. Fig. 6은 각각 신뢰성 기반 최적설계 시 스킨의 적층각도, 스파의 적층각도, 안전계수, 제한조건에 대한

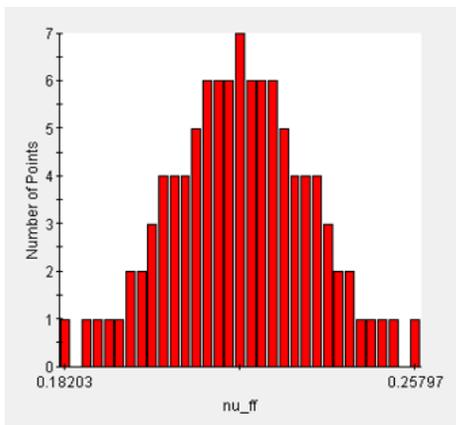
최적화 추이를 나타낸다. 3장의 결과와 비교해 볼 때, 각 단계에서 재료 불확실성 평가를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션이 반복 수행된 것을 알 수 있다. 설계가능 회수는 13회이었고, 총 17회 해석 중 2번째 값이 최적 값이었다. 최



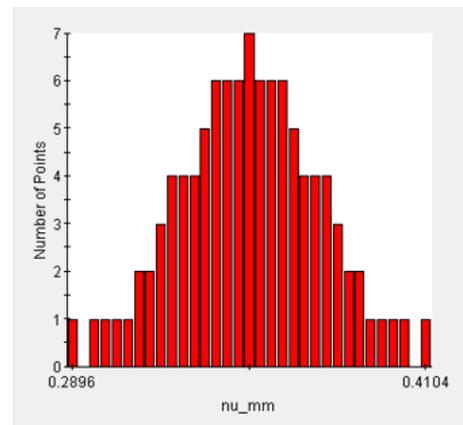
(a) Young's modulus for fiber, E_f



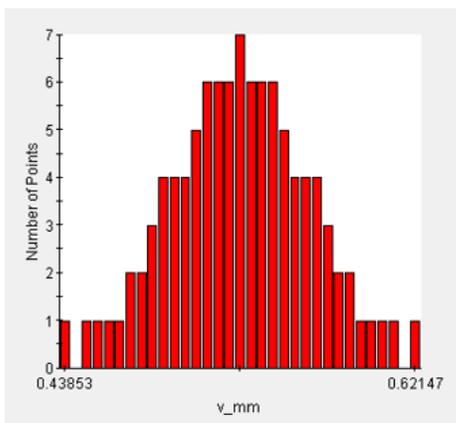
(b) Young's modulus for matrix, E_m



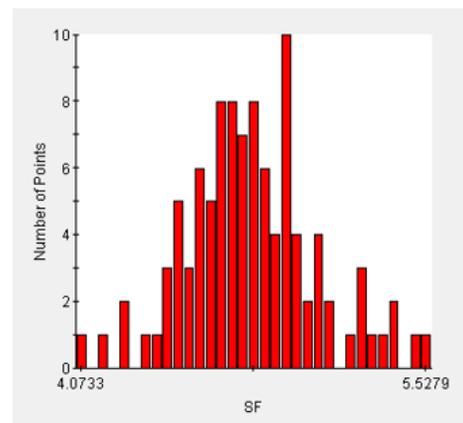
(c) Poisson's ratio for fiber, ν_f



(d) Poisson's ratio for matrix, ν_m



(e) Volume fraction for matrix, V_m

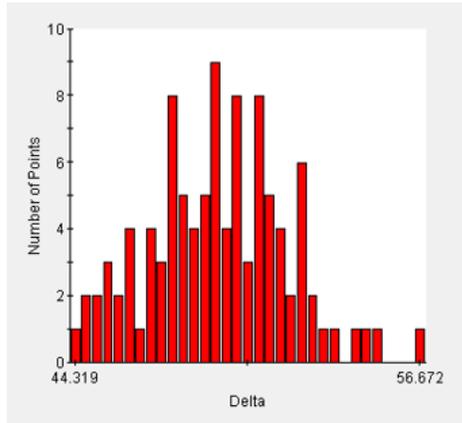


(f) Objective function, safety factor

Fig. 7. Probability distribution plots for RBDO (Continued)

Table 6. Reliability-based design optimization results for optimum point

	Mean value	Min. value	Max. value	Standard Deviation
Objective function, safety factor	4.791	4.073	5.528	0.270
Constraint, max. deflection	49.469	44.319	56.672	2.430

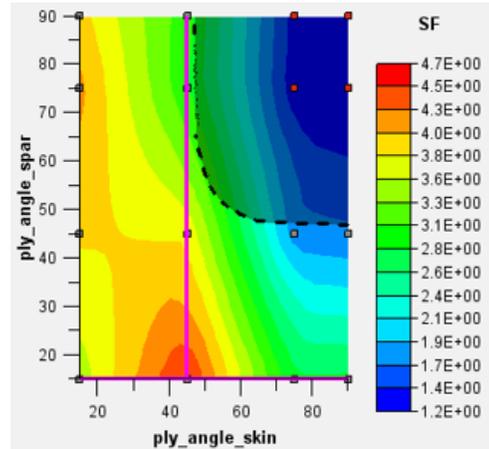


(g) Constraint, G_1

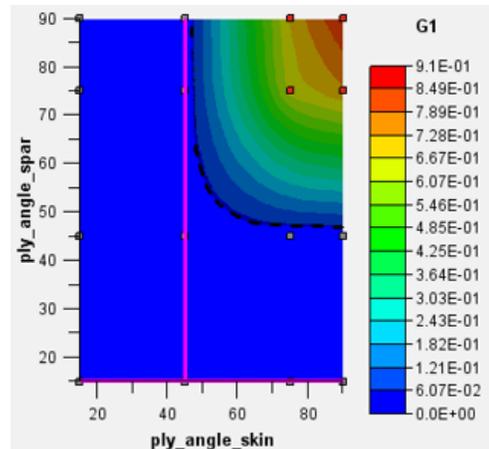
Fig. 7. Probability distribution plots for RBDO

적설계 시 확률변수 값과 목적함수, 제한조건에 대한 몬테 카를로 시뮬레이션에 의한 확률분포는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 확률변수들은 정규분포를 보이고 있으며, 목적함수와 제한조건도 정규분포를 보임을 알 수 있다. 스킨과 스파의 적층각도 최적 값은 확률론적 최적 설계와 동일하게 각각 (45°, 15°) 이었다. 안전계수의 평균 값은 4.791이고, 표준편차는 0.271이었다. 또한 최대변형량의 평균값은 49.469mm이고, 표준편차는 2.430이었다. 안전계수와 최대변형량에 대한 신뢰성 기반 최적설계 결과는 Table 6에 나타내었다. 확정론적 최적설계 결과와 신뢰성 기반 최적설계 결과를 비교해보면, 확정론적 최적설계의 목적함수가 4.7281인데 비하여 신뢰성 기반 최적설계의 목적함수는 평균 4.791이며 분포가 4.0733~5.5279이다. 또한 확정론적 최적설계의 최대변형량이 46.432mm인데 비하여 신뢰성 기반 최적설계의 최대변형량은 평균 49.469 mm이며 분포가 44.319~56.672mm이다.

Fig. 8은 각각 신뢰성 기반 최적설계 시 설계변수에 대한 안전계수, 제한조건의 등고선도를 나타낸다. Fig. 8(a)로부터 알 수 있듯이 설계변수에 대한 안전계수의 최적 값은 스킨의 적층두께, 스파의 적층두께 (45°, 15°)일 때 안전계수 4.7이다. 이는 확정론적 최적설계값과 동일하다. 제



(a) Objective function, safety factor



(b) Constraint, G_1

Fig. 8. Contour plot according to design variables for RBDO

한조건인 최대변형량은 Fig. 8(b)에 나타내었다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 신뢰성 기반 최적설계의 최대변형량은 확정론적 결과와 유사하게 스킨과 스파의 적층각도가 각각 (15°, 15°)에서 가장 적은 값을 보이며, 적층각도가 증가함에 따라서 서서히 증가하여 (90°, 90°)에서 가장 큰 최대변형량 값을 보인다. Fig. 5(b)와 Fig. 8(b)에서 점선으로 표시된 설계가능 영역을 비교해 보면, 확정론적 최적설계의 설계 불가능 영역이 스킨과 스파의 적층각도가 각각 (90°, 90°) 임에 비하여 신뢰성 기반 최적설계의 설계 불가능 영

역은 (75°, 75°), (75° 90°), (90°, 75°), (90°, 90°)로서 그 영역이 증가하였다. 그 원인으로는 신뢰성 기반 최적설계의 경우 신뢰도 95% 수준에서 제한조건을 만족하는 설계 변수를 선정하여야 하므로 그 설계 불가능 영역이 더 증가하게 되었다고 예상된다.

5. 결론

- 1) 본 연구에서는 소형 풍력터빈용 복합재료 블레이드의 확정론적 최적설계를 수행하였다. 설계변수는 스킨과 스파의 적층각도로 설정하였고, 목적함수는 블레이드의 구조 안전성을 평가하기 위한 값인 안전계수로 설정하였다. 제한조건은 블레이드의 최대변형량으로 설정하였다. 최적설계 결과, 스킨과 스파의 적층각도의 최적 값은 각각 (45°, 15°)이었으며, 목적함수는 4.7281, 최대변형량은 46.432 mm이었다.
- 2) 복합재료 블레이드의 신뢰성 기반 최적설계를 수행한 결과, 설계변수의 최적 값은 각각 (45°, 15°)이었으며, 목적함수의 평균값은 4.791이고, 표준편차는 0.271이었다. 또한 최대변형량의 평균값은 49.469 mm이고, 표준편차는 2.430이었다.
- 3) 확정론적 최적설계 결과와 신뢰성 기반 최적설계 결과를 비교해 보면, 설계변수는 동일하며, 목적함수와 제한조건은 유사한 값을 보인다. 확정론적 최적설계 결과가 하나의 값으로 표시됨에 비하여 신뢰성 기반 최적설계 결과는 범위로 표시된다. 확정론적 최적설계의 설계 불가능 영역이 (90°, 90°) 임에 비하여 신뢰성 기반 최적설계의 설계 불가능 영역은 (75°, 75°), (75° 90°), (90°, 75°), (90°, 90°)로서 그 영역이 증가함을 확인하였다.

References

- [1] Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2010, "Structural Design and Analysis for Small Wind Turbine Blade", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 19(2), 288-294.
- [2] Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2011, "Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20(1), 28-33.
- [3] Dong, K. M., Chung, S. N., and Shin, C., 2001, "Performance Prediction and Structural Analysis of Counter-Rotating Turbine Blades", Preceeding of Society of Korean Aeronautical and Space Science, 708-711.
- [4] Kong, C. D., Chung, J. C., Kang, M. H., Chung, S. H., and Kim, K. M., 1999, "A Study on Improvement Design by Structural Test for 750kW Horizontal Axis Wind Turbine Composite Blade", Proceeding of Korean Aeronautical and Space Science, 264-271.
- [5] Kang, S. C., Kim, D. M., and Jun, W. J., 1992, "Structural Design of FRP Wind Turbine Blade", Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers, 16(1), 162-174.
- [6] Park, S. H. and Han, K. S., 2008, "Structural Analysis and Proof Test of Composite Rotor Blades for Wind Turbine", The Korean Society For New And Renewable Energy, 4(3), 45-50.
- [7] Lee, C. H., Park, J. M., Kim, T. W., and Park, J. S., 2002, "Structural Design and Analysis of a Composite Wind Turbine Blade", Joint Symposium of the Korean Society of Mechanical Engineers, 558-562.
- [8] Choi, C. W., Jin, J. W., and Kang, K. W., 2013, "Structural Optimization for Small Scale Vertical-Axis Wind Turbine Blade using Response Surface Method", The KSFM Journal of Fluid Machinery, 16(4), 22-27.
- [9] Lee, K. H., Hong, S. W., Jeong, J. H., Kim, K. H., Lee, D. H., and Lee, K. T., 2007, "Three-Dimensional Offshore Wind Turbine Blade Design by using Efficient Two Step Optimization", The Korean Society For New And Renewable Energy, 3(3), 63-71.
- [10] Lee, S. P., Jin, J. W., and Kang, K. W., 2014, "Pro-

- probabilistic analysis for mechanical properties of glass/epoxy composites using homogenization method and Monte Carlo simulation”, *Renewable Energy*, 65, 219-226.
- [11] Abaqus Version 6.6-1, 2007, Dassault Systemes Simulia.
- [12] Isight Version 2016, 2016, Dassault Systemes Simulia.
- [13] Tsai, S. W. and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic, USA.
- [14] Park, D. W., 2011, “The Reliability-based Design Optimization for the Military Communication Equipment considering the Dimension Uncertainty”, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 21(11), 1051-1058.
- [15] Jang, J. Y., Na, J. H., Lim, W. C., Park, S. H., Choi, S. S., Kim, J. H., Kim, Y. S., and Lee, T. H., 2014, “Reliability-based Design Optimization for Lower Control Arm using Limited Discrete Information”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 22(2), 100-106.