



풍력터빈용 복합재료 블레이드의 중량 최적설계

이승표^{1)*}

Weight Optimization for Composite Wind Turbine Blade

Seungpyo Lee^{1)*}

Received 9 April 2018 Revised 30 May 2018 Accepted 9 June 2018

ABSTRACT Due to the need to develop clean and environmentally friendly energy sources, there is a growing interest in wind energy. In this study, reliability-based weight optimization considering material uncertainty for composite wind turbine blade was investigated. Deterministic design optimization was performed. Reliability-based design optimization was performed and compared with their results. From the numerical analysis results, deflection, safety factor, and blade thickness were calculated to evaluate the total weight of the composite blade. For optimization, design variables were chosen as ply thickness of blade and the objective function was chosen as weight. The reliability-based design optimization takes into account the uncertainty of the matrix and fiber of composite material properties. From the deterministic and reliability-based optimization results, the effects of design variables on objective function were investigated.

Key words Weight optimization(중량 최적설계), Wind turbine blade(풍력터빈용 블레이드), Composite material(복합재료), Material uncertainty(재료 불확실성), Reliability-based design optimization(신뢰성 기반 최적설계)

1. 서론

최근 들어 석탄과 석유를 대체할 친환경 에너지의 필요성으로 인하여 풍력 발전에 대한 관심이 급증하고 있다. 풍력 발전기 중 가장 중요한 부품인 블레이드는 다양한 풍력 하중에 대하여 주어진 설계조건(design specification)을 만족해야 한다. 이는 주어진 조건하에서 설계변수를 결정하는 반복 설계 과정을 의미하며, 복합재료 블레이드의 적층두께와 적층 각도 등을 결정하는 최적설계 문제로 정식화 될 수 있다.^[1-5]

복합재료는 비강도, 비강성 등이 우수하여 그 사용범위가 증가하고 있으며, 풍력 발전기용 블레이드(wind turbine blade)에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 복합재료는 섬유(fiber)와 모재(matrix)로 구성되며, 섬유로는 유리섬유

와 탄소섬유가 주로 사용되고 모재로는 에폭시(epoxy) 등이 주로 사용되고 있다.^[1,2,6,7] 복합재료는 섬유와 모재를 혼합하여 제조하는 과정에서 재료의 산포가 발생한다. 복합재료 블레이드와 같이 유지보수가 용이하지 않고 파손 시 큰 손해를 발생시키는 구조물에서는 재료의 산포에도 불구하고 주어진 설계조건을 만족하는 것이 필요하다. 기존의 확정론적 최적설계(deterministic optimization)에서는 재료의 산포, 즉 재료 불확실성을 고려할 수 없었으나, 2000년대 들어서 이에 대한 다양한 연구가 진행되어 불확실성을 고려할 수 있는 신뢰성 기반 최적설계(reliability-based design optimization)기법이 개발되었다.^[1,4,5,8]

본 연구에서는 재료 불확실성을 고려한 복합재료 블레이드의 신뢰성 기반 중량 최적설계에 대하여 고찰하였다. 재료 불확실성의 영향을 평가하기 위하여 확정론적 최적설계와 신뢰성 기반 최적설계를 각각 수행하고 그 결과를 비교하였다. 재료 불확실성을 고려하기 위하여 섬유와 모재의

1) R&D Center, ILJIN Global

*Corresponding author: seungpyolee@gmail.com

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

탄성계수(Young's modulus)와 포아송 비(Poisson's ratio), 섬유의 체적비(fiber volume fraction)를 확률변수로 설정하였다. 최적설계 시 설계변수는 적층두께로 설정하였고, 목적함수는 블레이드의 중량으로 설정하였다. 제한조건은 최대 변형량, 최소 안전계수, 최소 적층두께로 설정하였다. 두 종류의 최적설계를 수행한 후 그 결과를 비교 분석하여 신뢰성을 고려할 경우 설계변수가 목적함수와 제한조건에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 확정론적 중량 최적설계

본 연구의 블레이드는 Fig. 1과 같이 스킨, 스파, 폼으로 구성되며, 이들은 기존 연구들과 동일한 제원을 가진다고 가정하였다.^[1-3] 블레이드의 적층은 총 7장이며, 각각 스킨 2장, 스파 4장, 폼 1장으로 구성된다. 스킨과 스파는 +45도, -45도와 같이 동일한 적층각도의 판(ply) 2장을 (+), (-) 대칭으로 적층하였다. 일반적으로 블레이드 설계 시 스킨은 비틀림 모멘트를 지지하고 스파는 굽힘 모멘트를 지지하며, 비틀림 모멘트보다 굽힘 모멘트가 더 가혹한 조건이라고 알려져 있다.^[1,2] 따라서 본 연구에서는 스킨보다 스파의 적층을 2배로 하여 굽힘 모멘트 하중을 충분히 지지할 수 있도록 구성하였다. 기존의 연구결과로부터 스킨의 적층각도는 ± 45도, 스파의 적층각도는 ± 15도로 설정하였다.^[1] 본 연구에서 사용된 섬유는 유리섬유의 일종인 Advantex이며, 모재는 에폭시의 일종인 HTS-665C를 사용하였다. 섬유와 모재로 구성된 스킨, 스파의 등가 물성치는 혼합법칙(Rule-Of-Mixture)을 이용하여 계산하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.^[1,2]

복합재료 블레이드의 확정론적 최적설계를 위하여 설계변수를 스킨과 스파의 적층두께로 설정하였다. 블레이드의 형상은 허브(hub)에서 가장자리로 갈수록 두께가 얇아진

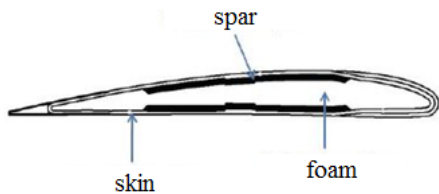


Fig. 1. Skin, spar, and foam of composite wind turbine blade^[1]

다. 이를 고려하기 위하여 블레이드를 10개의 부분으로 나누고 허브에서 가장자리로 갈수록 일정 비율로 두께가 얇아지도록 구성하여 설계변수인 스킨과 스파의 적층두께가 결정되면 블레이드 10개 부분의 두께가 모두 결정되도록 설계하였다. 또한 제작성을 고려하여 스킨과 스파의 두께는 연속변수가 아니라 이산변수로 가정하였다. 즉, 스킨의 두께는 0.15mm에서 1.00mm까지 0.05mm의 간격을 가지는 이산변수로 가정하였고, 스파의 두께는 0.15mm에서 0.50mm까지 0.05mm의 간격을 가지는 이산변수로 가정하였다.

확정론적 최적설계의 목적함수는 블레이드의 중량으로 설정하였다. 중량은 각각 스킨, 스파, 폼의 두께와 표면적, 그리고, 밀도로부터 계산할 수 있다. 제한조건은 블레이드의 최대 변형량, 최소 안전계수, 최소 적층두께가 각각 설계조건을 만족하는 것으로 설정하였다. 최대 변형량 조건은 블레이드가 주어진 하중에 의하여 변형할 때 최대 변형량이 타워와 간섭이 발생하지 않아야 한다는 조건으로부터 설정되었다. 안전계수는 복합재료와 같은 이방성 재료의 안정성을 평가하기 위한 값인 strength ratio로부터 계산할 수 있으며,^[9] 최소 안전계수 조건은 블레이드 전체의 안전계수 중 가장 작은 값이 주어진 설계조건을 만족해야 한다는 조건으로부터 설정되었다. 설계변수인 스킨과 스파의 적층두께가 결정되면 블레이드 10개 부분의 각 두께가 모두 결정이 된다. 최소 적층두께 조건은 10개 부분의 두께 중 가장 얇은 두께가 일정한 값 이상이어야 한다는 조건으로부터 설정되었다. 식 (1)은 확정론적 최적설계의 정식화이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } x_1, x_2 \\
 & \text{to Minimize Weight} \\
 & \text{subject to } G_1(x_1, x_2) \leq 150 \\
 & \quad G_2(x_1, x_2) \geq 3 \\
 & \quad G_3(x_1, x_2) \geq 0.1
 \end{aligned} \tag{1}$$

Table 1. Equivalent material properties for skin and spar^[2]

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

where, x_1 ; ply thickness of skin,

x_2 ; ply thickness of spar,

$G_1(x_1, x_2) = \max.$ deflection,

$G_2(x_1, x_2) = \min.$ safety factor,

$G_3(x_1, x_2) = \min.$ ply thickness

확정론적 최적설계를 위하여 Isight를 사용하였다.^[10] 최

적설계 시 사용된 기법은 Evolutional optimization이다.

설계변수의 초기 값인 스킨의 적층두께는 1.00mm, 스파의

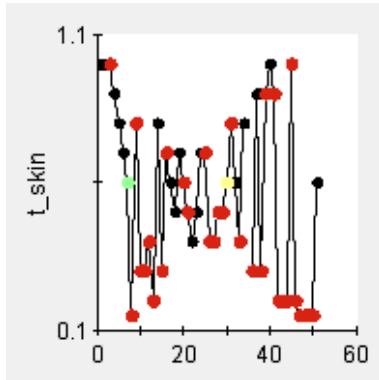
적층두께는 0.50mm로 설정하였다. Fig. 2는 각각 설계변

수, 목적함수, 제한조건에 대한 최적화 추이를 나타낸다. x

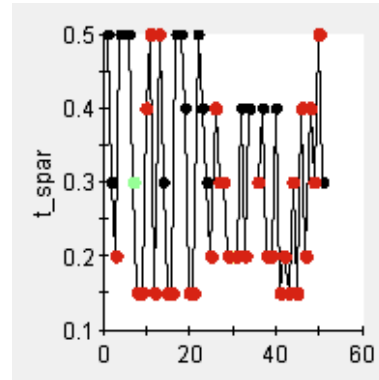
축은 설계변수, 목적함수, 제한조건을 계산하기 위한 유한

요소 해석의 회수를 의미하며, y축은 설계변수, 목적함수,

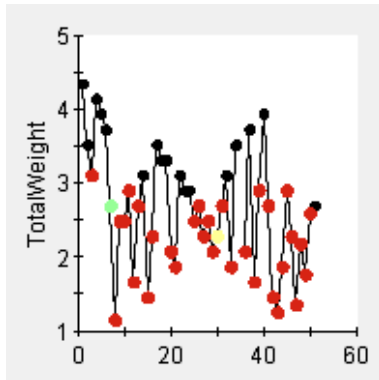
제한조건의 변화 추이를 나타낸다. Fig. 2에서 알 수 있듯



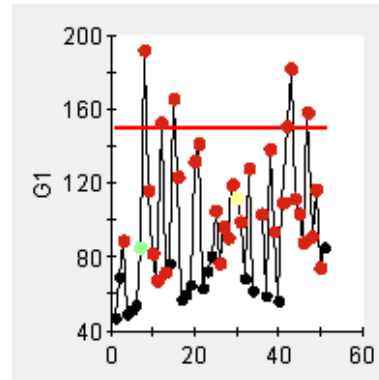
(a) Design variable 1, ply thickness of skin



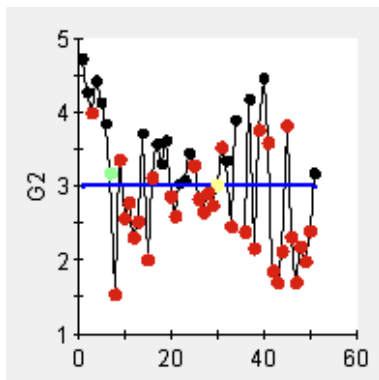
(b) Design variable 2, ply thickness of spar



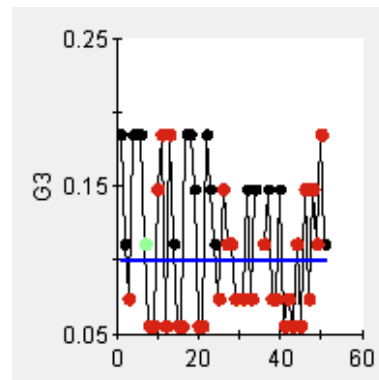
(c) Objective function, weight



(d) Constraint, G_1



(e) Constraint, G_2



(f) Constraint, G_3

Fig. 2. History plots for deterministic optimization

이 설계변수가 변화함에 따라서 목적함수와 제한조건이 변화되며, 제한조건을 모두 만족하면서 목적함수의 변화가 거의 없는 경우 최적화 과정은 종료가 된다. 검정색 점은 설계 가능(feasible design) 값을, 빨간색 점은 설계 불가

능(infeasible design) 값을, 초록색 점은 최적 값을 의미한다. 빨간색 선은 제한조건의 상한치를 나타내며, 파란색 선은 제한조건의 하한치를 나타낸다.

Fig. 2로부터 알 수 있듯이 최적설계는 총 51회 수행되

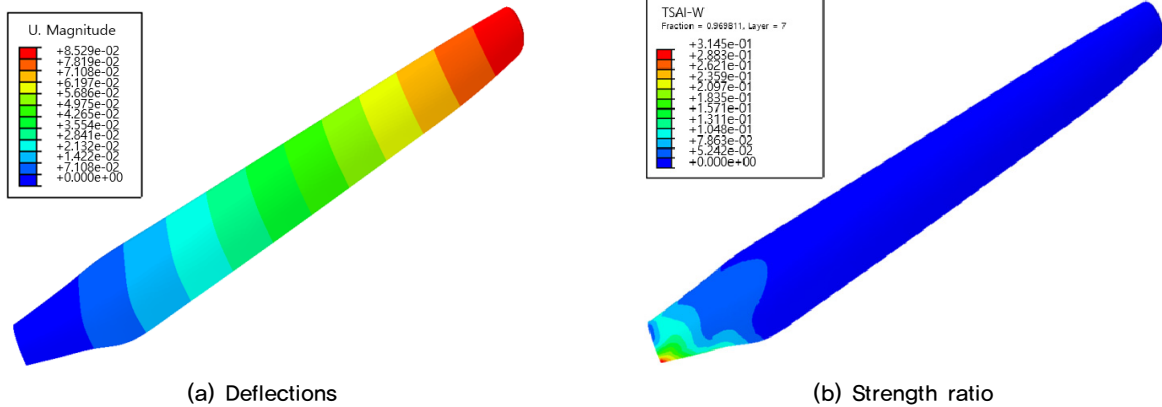


Fig. 3. Optimal design results

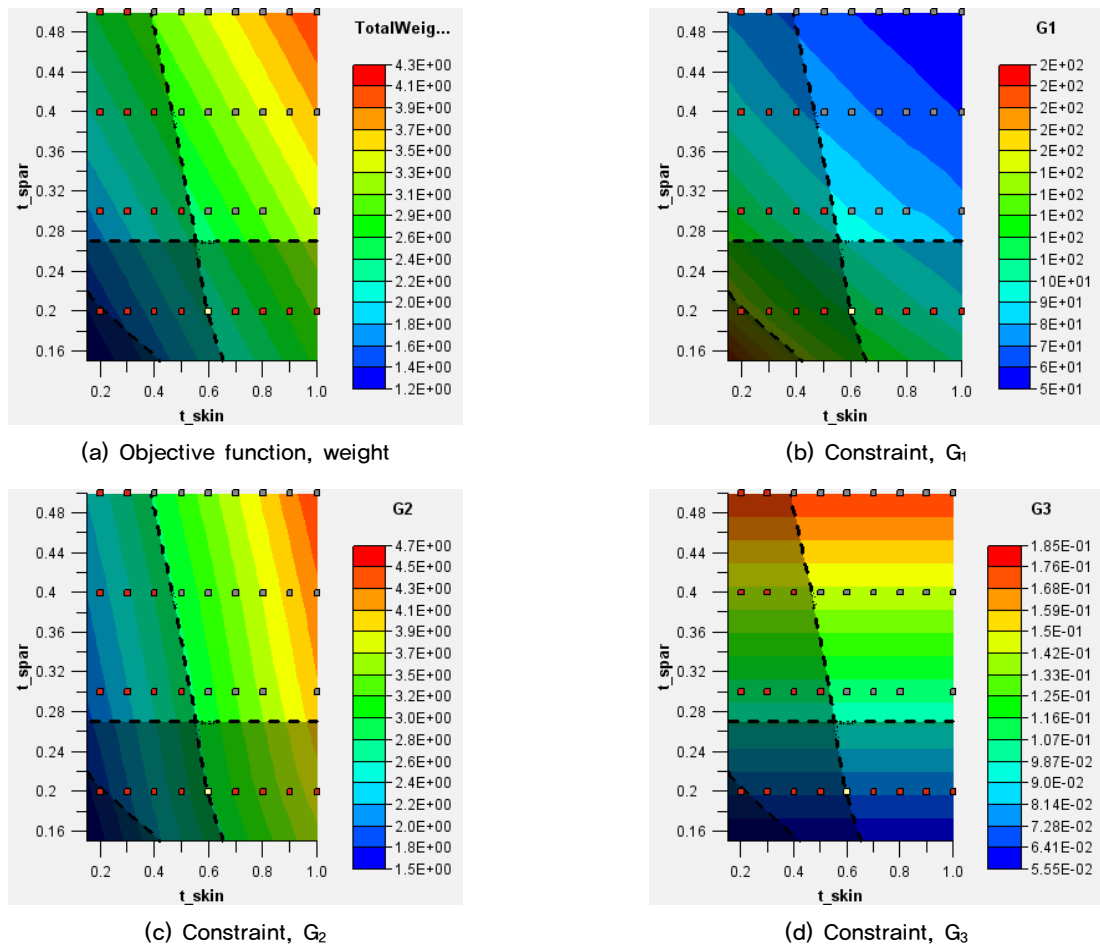


Fig. 4. Contour plots according to design variables for deterministic optimization

있고, 그 중 18개가 주어진 제한조건을 만족하는 설계 가능 값이었다. 18개의 설계 가능 값 중에서 7번째 값이 제한조건을 모두 만족하면서 무게가 최소가 되는 최적 값이었다. 최적 값은 스킨의 적층두께가 0.60mm, 스파의 적층두께가 0.30mm이었다. 이때 목적함수인 중량은 2.697kg이었고, 제한조건인 최대 변형량은 85.293mm, 최소 안전계수는 3.180, 최소 적층두께는 0.111mm이었다. Fig. 3은 최적값에 대한 변형량과 안전계수를 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 변형량은 블레이드의 허브에서 가장자리로 갈수록 변형이 커지며, 안전계수는 블레이드 허브에서 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는 각각 설계변수에 대한 목적함수와 제한조건들의 설계 영역을 나타낸다. 여기서, 점선은 설계 가능 영역과 설계 불가능 영역의 경계를 표시한다. 즉, Fig. 4의 오른쪽 위 부분이 설계 가능 영역이고 나머지 부분은 설계 불가능 영역이다. Fig. 4에서 사각형 점들은 해석을 수행했던 설계 변수의 위치를 나타내며, 회색 점들은 설계변수가 설계 가능 영역에 존재하고 있음을 의미하고, 빨간색 점들은 설계변수가 설계 불가능 영역에 존재하고 있음을 의미한다. 설계 가능 영역과 설계 불가능 영역을 검토해 보면, 최적 값은 설계 가능 영역 중 가장 설계 불가능 영역에 가까운 값, 즉 세 개의 점선에 가장 가까운 값을 알 수 있다. Fig. 4에서 이에 해당하는 값은 스킨의 적층두께가 0.60mm, 스파의 적층두께가 0.30mm이며, 이 값으로부터 멀어질수록 최적 값에서 멀어짐을 알 수 있다. Fig. 4로부터 목적함수와 제한조건들은 모두 설계변수와 선형의 관계를 가짐을 알 수 있다. 따라서 스킨과 스파의 적층두께는 블레이드 중량, 변형량, 안전계수에 선형적으로 비례함을 예측할 수 있다.

3. 신뢰성 기반 중량 최적설계

2장의 내용을 바탕으로 재료 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 중량 최적설계를 수행하였다. 신뢰도 수준은 기존 연구와 동일한 조건인 95%로 설정하였다.^[1] 신뢰성 기반 중량 최적설계의 정식화는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } x_1, x_2 \\
 & \text{to Minimize Weight} \\
 & \text{subject to } P_r[G_1(x_1, x_2) \leq 150] \geq R^{\text{target}} \\
 & \quad P_r[G_2(x_1, x_2) \geq 3] \geq R^{\text{target}} \quad (2) \\
 & \quad P_r[G_3(x_1, x_2) \geq 0.1] \geq R^{\text{target}}
 \end{aligned}$$

where, x_1 : ply thickness of skin,
 x_2 : ply thickness of spar,
 $G_1(x_1, x_2) = \max.$ deflection,
 $G_2(x_1, x_2) = \min.$ safety factor,
 $G_3(x_1, x_2) = \min.$ ply thickness
 $R^{\text{target}} = 0.95$

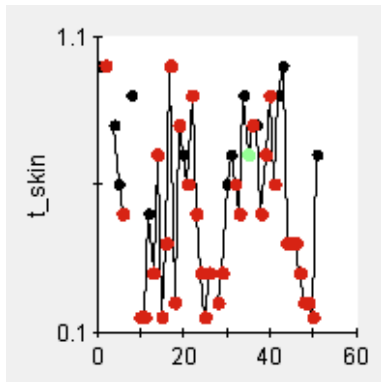
신뢰성 기법은 실험계획법(Design Of Experiments) 중 Latin Hypercube 방법을 사용하였다. 재료 불확실성을 고려하기 위하여 섬유와 모재의 탄성계수와 포아송 비, 섬유의 체적비를 Table 2와 같이 정규분포를 갖는 확률변수로 정의하였다. 설계변수의 초기 값은 2장과 동일하게 스킨의 적층두께는 1.00mm, 스파의 적층두께는 0.50mm로 설정하였다. Fig. 5는 신뢰성 기반 최적설계의 최적화 추이를 나타낸다. 최적설계는 총 51회 수행되었고, 이 중에서 설계 가능 값은 14개이었다. 설계 가능 중 제한조건을 만족하고 무게가 가장 최소가 되는 최적 값은 35번째 값이고, 이때 스킨의 적층두께는 0.70mm, 스파의 적층두께는 0.30mm,

Table 2. Random variables for RBDO^[1]

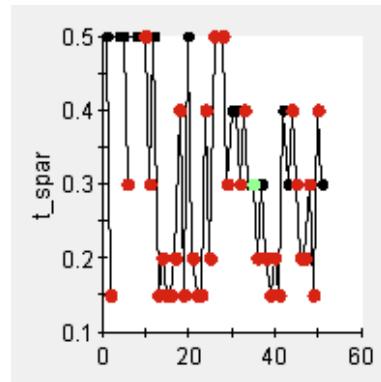
	Young's modulus of fiber, Pa	Young's modulus of matrix, Pa	Poisson's ratio of fiber	Poisson's ration of matrix	Fiber volume fraction, V_f
Distribution	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Mean value	74.5E+9	2.45E+9	0.22	0.35	0.47
Min. value	67.1E+9	2.21E+9	0.20	0.32	0.42
Max. value	82.0E+9	2.70E+9	0.24	0.39	0.52

목적함수인 블레이드의 중량은 2.903kg, 제한조건인 최대 변형량은 65.994~95.784mm, 최소 안전계수는 3.003~3.903, 최소 적층두께는 0.111mm이었다. 신뢰성 기반 최적설계의 특성상 목적함수와 제한조건은 구간으로 나타나는 것이 원칙이나, 중량과 최소 적층두께는 이와 관련된 변수들이 확률변수가 아니므로 구간이 아닌 하나의 값으로 계산되었다.

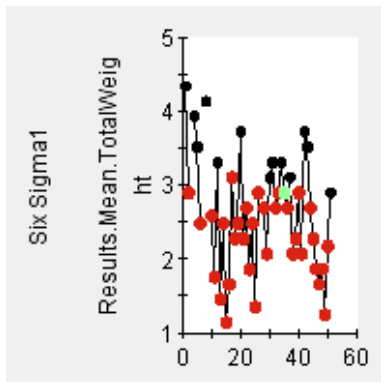
Fig. 6은 각각 설계변수에 대한 목적함수와 제한조건들의 설계 영역을 나타낸다. Fig. 4와 마찬가지로 오른쪽 위 부분이 설계 가능 영역이고 나머지 부분은 설계 불가능 영역이다. Fig. 4의 확정론적 최적설계 결과와 비교해 볼 때 경향은 유사하나 제한조건을 나타내는 점선이 직선에서 곡선으로 바뀌었음을 알 수 있다. 특히, Fig. 6의 왼쪽 아래 제한조건은 직선에서 두 개의 곡선으로 바뀌었음을 알 수



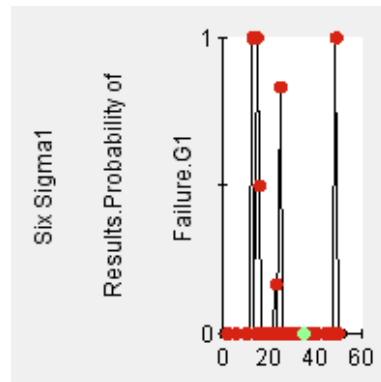
(a) Design variable 1, ply thickness of skin



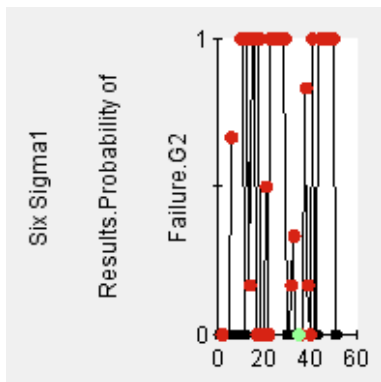
(b) Design variable 2, ply thickness of spar



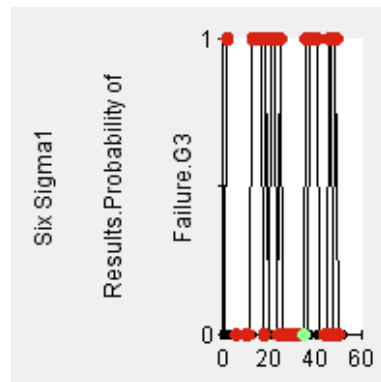
(c) Objective function, weight



(d) Constraint, G_1



(e) Constraint, G_2



(f) Constraint, G_3

Fig. 5. History plots for reliability-based design optimization

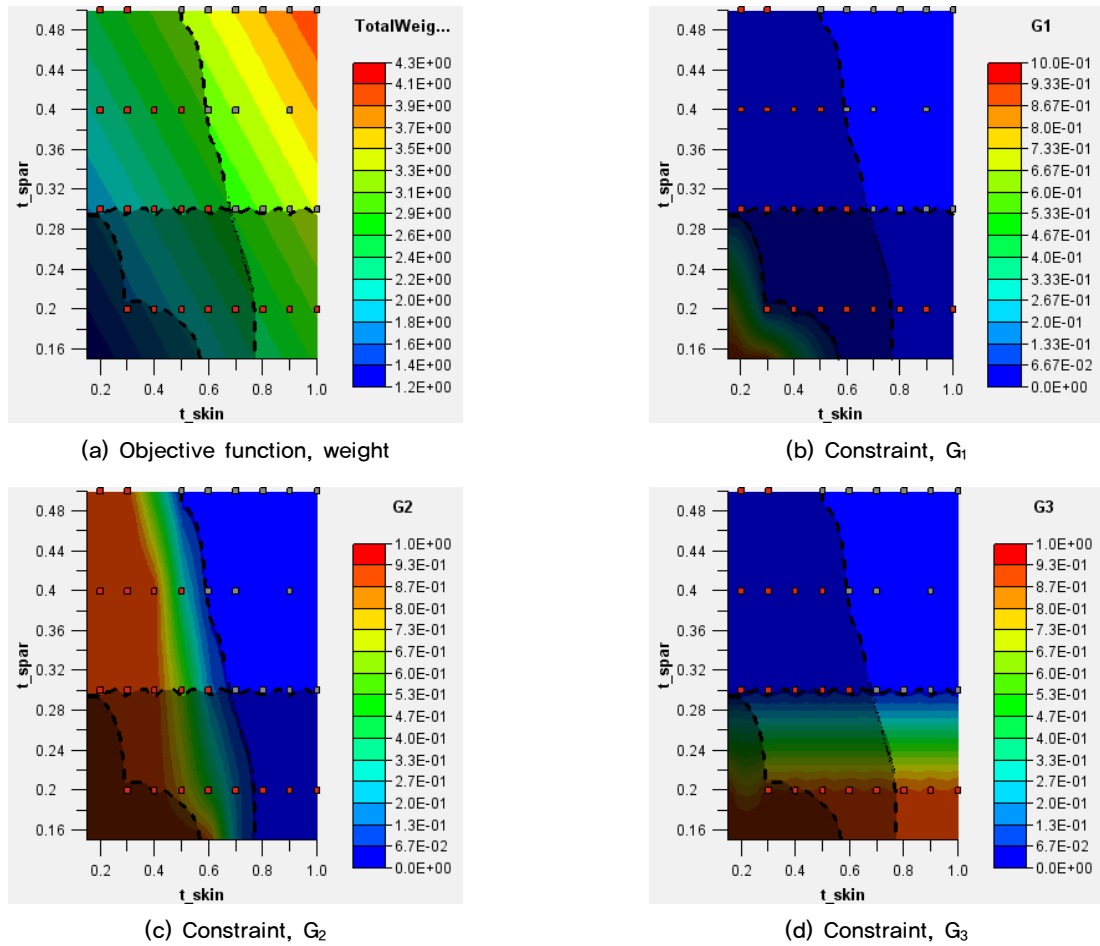


Fig. 6. Contour plots according to design variables for reliability-based design optimization

있다. 이는 제한조건의 영역이 선형에서 비선형으로 변형됨을 의미한다. Fig. 6에서 설계 가능 영역 중 가장 설계 불가능 영역에 가까운 값은 스킨의 적층두께가 0.70mm, 스파의 적층두께가 0.30mm이다. Fig. 3의 확정론적 최적설계값과 Fig. 6의 신뢰성 기반 최적설계값을 Table 3에 비교하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 95% 신뢰성을 고려하면 스파의 적층두께는 변함이 없으나, 스킨의 적층두께는 0.60mm에서 0.70mm로 증가함을 알 수 있다. 스킨의 적층두께가 증가함에 따라서 목적함수인 중량도 2.697kg에서 2.903kg으로 증가한다. 이와 같이 스킨의 적층두께가 증가한 이유는 두 번째 제한조건인 최소 안전계수 때문이다. 즉, 하나의 값으로 표현되는 확정론적 최적설계에서는 스킨의 적층두께가 0.60mm일 때 최소 안전계수 값이 3.180으로 설계조건인 3 이상일 것을 만족했으나, 구간으로 표현되는 신뢰성 기반 최적설계에서는 스킨의 적층두께가

Table 3. Results for both deterministic optimization and reliability-based design optimization

	Deterministic optimization	Reliability-based design optimization
Design variable 1, thickness of skin	0.60 mm	0.70 mm
Design variable 2, thickness of spar	0.30 mm	0.30 mm
Objective, weight	2,697 kg	2,903 kg
Constraint 1, max, deflection	85,293 mm	65,994~95,784 mm
Constraint 2, min, safety factor	3,180	3,003~3,903
Constraint 3, min, thickness	0,111 mm	0,111 mm

0.70mm일 때 최소 안전계수 값이 3,003~3,903으로 설계조건을 만족할 수 있었다.

5. 결론

- 1) 풍력 터빈용 복합재료 블레이드의 중량 최적설계를 위하여 확정론적 최적설계를 수행하였다. 또한, 섬유와 모재의 물성치를 확률변수로 하여 재료 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 중량 최적설계를 수행하였다.
- 2) 확정론적 최적설계 결과, 스킨의 적층두께는 0.60mm, 스파의 적층두께는 0.30mm이었으며, 목적함수인 중량은 2.697kg, 제한조건인 최대 변형량은 85.293mm, 최소 안전계수는 3.180, 최소 적층두께는 0.111mm로 모든 설계조건을 만족하였다.
- 3) 95%의 신뢰도를 고려한 신뢰성 기반 최적설계 결과, 스킨의 적층두께는 0.70mm, 스파의 적층두께는 0.30mm이었으며, 중량은 2.903kg, 최대 변형량은 65.994~95.784mm, 최소 안전계수는 3.003~3.9003, 최소 적층두께는 0.111mm로 모든 설계조건을 만족하였다.
- 4) 확정론적 최적설계 결과와 신뢰성 기반 최적설계 결과를 비교해 보면, 신뢰성 기반 최적설계 시 주어진 제한조건을 만족하기 위하여 스킨의 두께가 0.60mm에서 0.70mm로 증가하였고 이로 인하여 중량도 2.697kg에서 2.903kg으로 증가하였다. 확정론적 최적설계에 비하여 신뢰성 기반 최적설계는 불확실성을 고려할 수 있다는 장점이 있으므로 블레이드 개발 시 유용할 것으로 예상할 수 있다.

References

- [1] Lee, S. P., 2017, "Reliability-based Design Optimization for Composite Wind Turbine Blades Considering Material Uncertainty", *New & Renewable Energy*, 13(3), 41-50.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Lee, S. P., Jin, J. W., and Kang, K. W., 2014, "Probabilistic analysis for mechanical properties of glass/epoxy composites using homogenization method and Monte Carlo simulation", *Renewable Energy*, 65, 219-226.
- [9] Tsai, S. W., and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic, USA.
- [10] Isight Version 2016, 2016, Dassault Systemes Simulia.