

## 신뢰성 기반 최적설계를 이용한 풍력 발전기 타워 최적 설계

박 옹 희\* · 박 현 철\*\*

\* 포항공과대학교 엔지니어링 대학원

### Optimal Design of Wind Turbine Tower Model Using Reliability-Based Design Optimization

Yong-hui Park\* and Hyun-Chul Park\*\*

\* Graduate School of Engineering Mastership, POSTECH

(Received January 22, 2014 ; Revised March 4, 2014 ; Accepted March 14, 2014)

**Key Words:** Structural Analysis(구조해석), Wind Turbine(풍력 발전기), Dynamics(동역학), Reliability Based Design Optimization(신뢰성 기반 최적설계), Tower(타워)

**초록:** 본 연구에서는 NREL 5MW 풍력발전기 타워 설계 모델을 다물체 동역학과 신뢰성 기반 최적 설계를 이용하여 최적화하는 연구를 수행하였다. 타워 모델은 티모셴코 빔 이론을 이용하여 얻은 동특성을 내포한 링크와 조인트로 이루어진 수학적 모델로 표현하였다. 최적화 문제에서는 높이가 일정한 타워에서 두께, 내·외곽 지름이 변할 때 나타나는 민감도 변화를 비교하여 결과를 도출하였으며, 비교 기준으로 굽힘 응력과 좌굴 안정성을 사용하였다. 일계 이차 모멘트법을 이용한 최적화 알고리즘에서 얻은 최종 모델은 유한요소법을 이용한 정하중 해석에서 최대 응력 분포를 이용한 안전성을 고려를 통해 유효성을 검증하였다. 본 연구 방법을 통해 동역학적 모델과 유한요소 모델간의 연계성을 확인하고, 낮은 타워 설치 비용으로 더 강건한 시스템을 구축할 수 있는 설계 방향을 제시하였다.

**Abstract:** In this study, the NREL 5 MW wind turbine tower model was optimized according to the multi-body dynamics and reliability-based design. The mathematical model was defined as a link-joint system including dynamic characteristics derived from Timoshenko's beam theory. For the optimization problem, the sensitivities to variations in the tower thicknesses and inner and outer diameters were acquired and arranged in terms of safety and efficiency according to bending stress and buckling standards. An optimal design was calculated with the advanced first-order second moment method and used to define a finite element model for validation. The finite element model was simulated by static analysis. The relationship between the multi-body dynamic and finite element method throughout the process was investigated, and the optimal model, which had high endurance despite its low mass, was determined.

- 기호설명 -

$k_{torsion}$  : 타워 비틀림 강성  
 $k_{extension}$  : 타워 인장 강성  
 $W_T$  : 티모셴코 빔의 굽힘 보존 에너지  
 $W_k$  : 등가 스프링 모델의 굽힘 보존 에너지  
 $Z$  : 한계 상태 함수

$T_{xi}$  : 오차  
 $U_i$  : 표준화된 설계 변수  
 $\beta$  : 신뢰성 지수  
 $D$  : 타워 외곽 지름  
 $T$  : 타워 두께  
 $E$  : 탄성계수  
 $F_y$  : 철의 항복 강도  
 $\alpha_i$  : 신뢰성 지수 방향 여현  
 $\phi_c, \phi_b, \phi_v, \phi_t$  : 압축, 굽힘, 전단, 비틀림에 대한 저항 계수

† Corresponding Author, [hcpark@postech.ac.kr](mailto:hcpark@postech.ac.kr)  
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $P_n, M_n, V_n, T_n$  : 압축, 굽힘, 전단, 비틀림에 대한  
공칭 강도  
 $P$  : 타워 최상단 하중  
 $g, Z$  : 제약조건, 한계 상태 함수  
 $C_g$  : 제약조건  $g_3$ 의 계수

## 1. 서 론

화석 연료의 고갈과 국제 금융 위기로 인한 신재생 에너지 산업은 저비용과 고효율을 동시에 꾀할 수 있는 시스템 최적화에 노력을 가하고 있다. 풍력 발전기의 경우 하중 특성상 동적 거동에 매우 민감하고 각 부품 간의 연계가 긴밀한 시스템이다. 이에 따라 다양한 연구 분야에서 설계 변수 변화에 대한 민감도를 조사하고 향상된 모델을 획득하는데 초점을 맞추고 있다.

본 연구에서는 다물체 동역학 이론을 이용한 타워의 수학적 모델을 신뢰성 기반 최적 설계 문제에 적용하였다. 이는 선행 연구에서 타워 설계 시 마려진 여러 한계 상태 함수의 조합으로 획득한 방법,<sup>(1)</sup> 유한 요소법을 이용한 수학적 모델에 설계 변화를 주어 진동 주파수를 확인한 방법,<sup>(2)</sup> 그리고 유전적 알고리즘을 통하여 무작위의 설계 변수를 이용하여 유도한 수학적 모델에 대입, 민감도를 분석한 방법<sup>(3)</sup>과 차이점을 나타내고 있다. 과거 풍력 발전기의 대다수 최적화 문제 연구는 시스템 설계에 드는 입력 비용과 출력 대비의 경제성에 많은 초점을 맞춰 연구를 수행하였다.<sup>(4,5)</sup> 이로 인해 풍력발전기 구조 해석이 다소 이뤄지지 않았으나, 현재의 최적 문제에서는 경제성과 구조적 특성을 연관시켜 제안한 연구들이 주를 이루고 있다. 특히 참고문헌<sup>(6,7)</sup>에서는 최적화 이론과 수치적 해법에 관한 내용을 상세히 포함하고 있는데, Takewaki 저자는 콘크리트 타워 구조물을 전체 무게 감소의 목적함수를 기준으로 최적의 굽힘 강성 분포를 찾는 연구<sup>(8)</sup>를 수행하였다. 이 연구는 유한 요소 해석과 선형화 방정식을 통해 타워 강성의 분포를 추측하는 내용을 담고 있다. 그 후 유한요소해석에서 벗어난 다양한 방향을 통한 최적화 문제가 제시되었다.<sup>(9-13)</sup>

대다수의 연구에서 유한 요소법을 이용한 근본적인 원인은 시스템의 형상과 재료 분포가 급격하게 변화하였을 때, 풍력 발전기 회전 운전 속도 영역과 중첩되는 주파수 모드를 가지게 되어 공진 현상이 발생할 확률이 있다. 하지만 본 연구에서는 타워가

가지는 높이에 따른 비율을 유지한 상태에서 형상에 변화를 주는 방법을 도입하여 동역학적 타워의 수학적 모델이 적합하다는 사실을 바탕으로 한다. 또한 단순 응력 분포가 아닌 좌굴에 대한 판별 기준을 적용하여 시스템의 급격한 변화를 야기하는 설계 변수를 제외하는 방법을 채택하였다. 최종적으로 획득한 최적 모델은 유한 요소법을 이용한 수학적 모델로 변환하여 정적 해석을 통해 기존의 타워 모델과 비교함으로써 그 효용성을 검토하였다.

## 2. 시스템 모델링 & 이론

### 2.1 다물체 동역학을 이용한 타워 모델링

타워는 형상과 재료의 분포에 따라 시스템의 특성이 달라진다. 경계조건 및 변형을 고려하면 타워는 한쪽이 고정된 외팔보와 같은 거동을 하게 된다. 일반적으로 외팔보 정의에 티모센코 빔 이론을 사용하여 그 특성을 정의하고 있다. 앞서 제시한 다물체 동역학 이론을 이용한 모델링의 타당성과 컴퓨터 계산의 효율성을 바탕으로 본 논문에서는 타워의 동특성을 가지는 동모델을 수립하였다.

Fig. 1과 같이 타워는 지반에 고정되어 있는 외팔보의 형태를 가진다. 본 논문에 사용된 타워 모델은 12개의 질점으로 나뉘며 각 질점의 경우 질량과 3×3 행렬의 관성 모멘트를 가진다. 또한 질점 간에는 조인트 개념의 연결고리를 가지며 각 조인트에는 타워의 고유특성을 나타내는 강성을 내포하고 있어 외력이 가해질 경우, 티모센코 빔과 같은 거동을 가지게 된다. 식 (1)-(2)는 단순 인장, 비틀림에 대한 강성을 나타낸다.

$$k_{torsion} = \frac{T}{\Delta\theta} = \frac{GI_p}{L} \quad (1)$$

$$k_{extension} = \frac{F_{ext}}{\Delta L} = \frac{EA_s}{L} \quad (2)$$

$G, I_p, L, E, A_s$  은 각각 재료의 전단 계수, 극관성 모멘트, 타워의 축방향 길이, 재료의 탄성 계수, 타워의 단면적을 의미한다.

굽힘 강성은 티모센코 빔 이론을 이용해 굽힘 변형이 발생할 때 빔의 보존 에너지와 등가 스프링 모델의 보존 에너지가 동일하다는 가정으로 획득할 수 있다.<sup>(14-16)</sup> 식 (3)-(4)는 각각 티모센코 빔, 등가 스프링 모델의 보존 에너지를 나타내며 두 식을 같다고 놓고 굽힘 강성  $k_x$ 를 구할 수 있게 된다. 전역 좌표계인  $x, y$ 에 대한 굽힘 강성은 원통의 2차 모멘

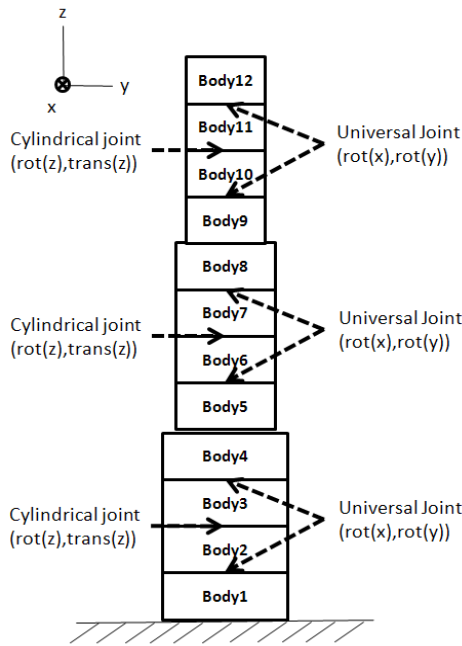


Fig. 1 A tower model

트에 의해 지름과 두께가 같은 구간별로 동일한 굽힘 강성 값을 사용한다.

$$W_T = \frac{1}{2EI_x} \int_0^L M^2(z) dz + \frac{1}{2GA_s} \int_0^L F_s^2(z) dz \quad (3)$$

$$= \frac{F^2 L^3}{6EI_y} + \frac{F^2 L}{2GA_s}$$

$$W_k = \frac{1}{2} k_x \left( (1-\delta) \frac{FL}{k_x} \right)^2 + \left( \delta \frac{FL}{k_x} \right)^2 \quad (4)$$

$$= \frac{F^2 L^2}{2k_x} [(1-\delta)^2 + (\delta)^2]$$

이 때 F, δ는 각각 외팔보 끝단에서 걸리는 수직력과 외팔보를 축방향으로 동일하게 나누는 비율이다.

최종적으로 운동 방정식은 조인트가 가지는 좌표인 일반 좌표에 따라 18개의 자유도를 가지게 된다. 본 수학적 모델은 MATLAB의 SIMMECHANIC를 이용하여 정의하였으며 시스템 구성에 필요한 질량, 관성모멘트, 위치 벡터, 강성, 초기조건 등과 같은 입력 자료를 계산하여 적용하였다.

### 2.2 개선된 일계 이차 모멘트법<sup>(17-21)</sup>

기계 시스템의 제작에서 발생될 수 있는 여러 가지 오차로 인해 설계 변수들은 평균값을 기준으로 확률적 분포를 가지게 된다. 이러한 확률적 분포는 시스템 거동에 반영되며 심각한 경우 안전한 영역을 벗어나 고유의 기능을 상실하는 원인으로 작용

한다. 최적 설계 문제에서 결정론적 설계 변수를 사용하게 되면 최적 모델은 다른 해에 비해 목적함수 측면에서 큰 이득을 줄 수 있다. 하지만 기계적 오차가 반영된 설계 변수 영역에서는 최적 모델이 실제로 최적이지 아닌 매우 위험한 영역에 포함될 수 있는 경우가 생긴다. 즉 최적 해에서 오히려 질이 떨어지는 경우가 발생한다. 이러한 위험성을 방지하기 위해 일계 이차 모멘트법은 확률적 분포와 안전성을 동시에 고려한다. 일계 이차 모멘트법은 신뢰도 해석기법의 하나로 확률변수의 평균과 표준편차를 이용하여 한계 상태 함수를 평균치 또는 설계점에서 근사화함으로써 궁극적으로 신뢰성 지수를 계산하는 근사적인 해법이다.

기존의 일계 이차 모멘트법에서는 비선형의 한계 상태 함수를 해결하는데 어려움이 있으나 1974년 Hasofer에 의해 개선된 일계 이차 모멘트법은 비선형의 한계 상태 함수를 평균점에서 선형 근사화하지 않고 파괴면 상에서 가장 확률이 높은 점인 최대 확률 파괴점(Most Likely Failure Point)에서 근사화하는 방법을 사용하여 이를 해결하였다. Fig. 2에서는 최대 확률 파괴점의 의미를 도식적으로 나타내었다. 본 제안법은 실제 설계에 발생할 수 있는 가공의 편차를 표준 분포 곡선으로 표현하여 표준화된 설계 변수 공간에서 각 한계 상태 함수의 범위를 복합적으로 고려할 수 있는 특징을 가진다. 이로 인해 설계 변수를 민감한 한계 상태 함수에 대해 고려하여 다른 한계 상태 함수의 위험 영역을 피할 수 있어 본 방법을 채택하였다.

개선된 일계 이차 모멘트법은 Fig. 3의 최적화 알고리즘에 포함되어 문제 해결에 사용된다. 즉 설계 변수가 변화할 때, 정규화된 설계변수의 평균값인 원점에서 한계 상태 함수에 가장 짧은 거리를 나타내는 신뢰성 지수를 얻게 되는데 이 신뢰성 지수의 크기가 충분히 클 경우 선택된 설계 변수는 위험영역에서 충분히 안전하다는 사실을 의미하게 된다.

최적화 이론을 바탕으로 본 연구에서는 타워의 외곽 지름과 두께를 설계 변수로 선택하였다. 초기 설계 변수 값은 NREL에서 제공한 5MW 풍력 발전기의 타워 모델의 하단, 상단 지름과 두께를 사용하였으며 설계 변수의 확률적 분포를 표현하기 위하여 기계오차와 분산 간의 관계를 나타내는 식 (5)를 사용하였다. 본 연구에서 기계공차는 타워를 제작하는데 사용되는 밀의 가공 오차 0.0061m를 사용하였다.

$$\sigma_{x_i}^2 = T_{x_i}^2 / 9 \quad (5)$$

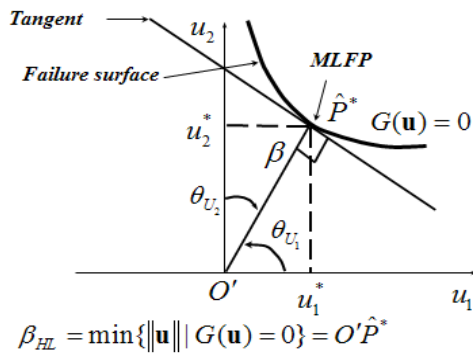


Fig. 2 Relationship between reliability index and limit state function

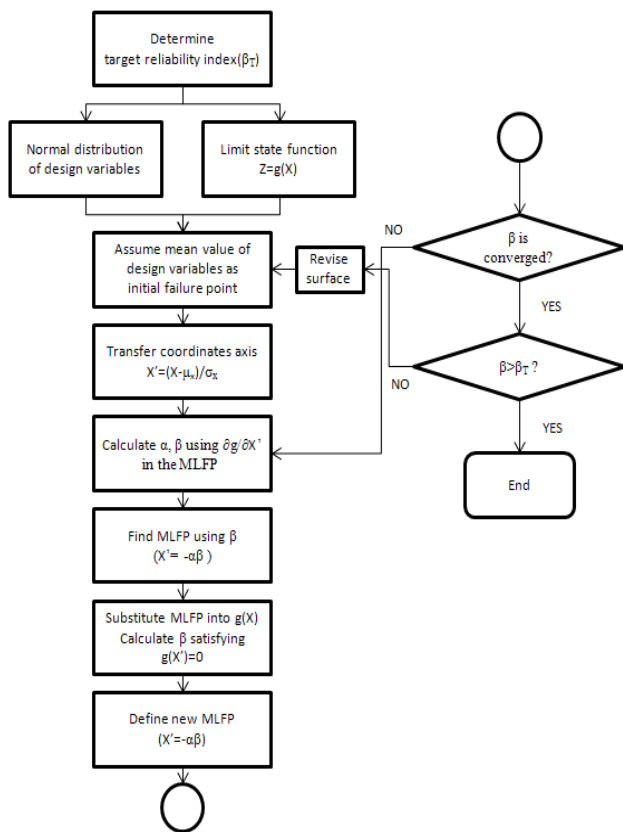


Fig. 3 Process of Advanced FORM

식 (5)에서  $\sigma_{xi}$ 와  $T_{xi}$ 는 타워 지름, 두께 길이의 표준 편차와 가공 오차를 의미한다.

2.3 좌굴 판별 방정식<sup>(22)</sup>

가느다란 기둥을 축 방향으로 누르거나 얇은 판을 판과 평행한 방향으로 압축하여 하중이 어느 크기에 도달하는 순간 갑자기 판이 횡 방향으로 과도하게 휘어지는 현상을 좌굴이라 한다. 중공축과 같이 내부가 비어있는 구조물에서는 좌굴 문제가 많

이 발생한다. 타워의 경우, 경제적 효과와 강성을 획득하기 위해 중공축 형태의 단면을 사용하고 있기 때문에 좌굴 문제를 면밀히 고려해야 한다. 좌굴은 축방향으로 길이가 긴 시스템 단면의 두께와 지름 비율을 통해 판별된다. 특히 특정 탄성계수와 항복 강도의 비율에 따라 그 명칭이 바뀌는데, 식 (6)을 만족할 때 비압축 형태(Non-compact), 식 (7)을 만족할 때 가는 형태(Slender)라고 불려진다.

$$D/t \leq 0.45E/F_y \tag{6}$$

$$D/t > 0.11E/F_y \tag{7}$$

식 (6)과 (7)에서의 E와  $F_y$ 는 각각 탄성계수와 철의 항복 강도를 의미한다. 일반적으로 타워의 경우 비압축 형태를 선호하며 제작에 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 단순 형상의 분류가 아닌 인장, 굽힘, 전단, 비틀림이 가해졌을 때 좌굴 발생을 판별하기 위한 방정식으로 식 (8)을 사용하였다.<sup>(23)</sup>

$$\left( \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} \right) + \left( \frac{V_u}{\phi_v V_n} + \frac{T_u}{\phi_t T_n} \right) \leq 1.0 \tag{8}$$

where  $P_u$ =required, factored-level axial force.

$M_u$ =required, factored-level bending moment.

$V_u$ =required, factored-level shear force.

$T_u$ =required, factored-level torsional moment.

2.4 최대 응력 분포

본 연구에서 제시한 다물체 동역학 모델과 최적 문제를 통해 얻은 설계 변수를 검증하기 위하여 유한요소법을 적용한 모델을 만들어 정적하중을 가하는 해석을 수행하였다. 정적 상태에서의 해석은 응력이 분포하는 부분에 불연속점이 발생하지 않고 예상했던 부분에 최대 응력이 발생하는지에 대한 확인 작업을 할 수 있어 모델의 유효성을 확인할 수 있다.

객관적 비교를 위하여 NREL에서 제시한 모델과 본 연구에서 제시한 모델에 동일한 하중을 가하여 나타나는 응력 분포와 질량 등을 비교하였다. 또한 항복 응력을 적용하여 항복, 파단의 발생여부와 최대 변형률을 확인하였다.

3. 해석

3.1 초기 설계 변수

최적화 문제에서는 초기 설계 변수의 크기에 따라 그 결과가 상이하게 나타난다. 본 내용에서는 효

과적인 최적화 문제를 수행하기 위하여 두 가지 경우의 초기 설계 변수를 정의하였다. 첫 번째 설계 변수는 NREL에서 제공한 5MW의 풍력 발전기 타워 모델, 두 번째 설계 변수는 결정론적 설계변수 가정에 의한 최적 설계 문제에서 획득한 지름, 두께를 사용하였다. 두 경우 마찬가지로 전체 타워 단면이 가지는 평균 지름과 두께를 의미하며 Table 1과 같이 다른 값을 나타내고 있다.

두 번째 설계 변수 조합을 획득하기 위하여 정의한 최적 문제의 경우 목적함수로 타워의 질량을 제약 조건으로 굽힘 강성, 지름과 두께간의 비율, 응력, 좌굴 제약을 사용하였으며 설계 변수인 지름과 두께는 최소값, 최대값을 가지는 범위 내에서 선정하였다.

3.2 타워 모델 & 환경 조건

설계 변수에 대한 시스템이 나타내는 응답의 민감도를 제공해주는 수학적 모델은 MATLAB의 SIMMECHANICS를 이용하여 타워 모델을 정의하였다.<sup>(24-27)</sup> SIMMECHANICS는 시스템을 구성하는 요소들의 물리량을 알고 있으면 몸체와 조인트 간의 연결로 쉽게 동모델을 구성하는 장점을 가지고 있다. 2.1절에서 제시한 12개의 질점을 가지는 링크-조인트 시스템을 구축하였으며 최적화 문제 알고리즘에서 적용될 조인트의 반력을 설계 변수에 즉각적으로 계산하기 위해 출력 변수로 지정, 도출하는 코드를 구성하였다.

환경 조건의 경우 실질적인 타워 설계에 바탕이 되는 최대 변형 조건을 반영하였다. 즉, 단순히 질점에 공기역학적 외력을 작용하는 것이 아니라 굽힘력에 의해 타워의 최상단이 가질 수 있는 x, y 방향 최대 변위가 타워높이의 1/4% 내로 유지되어야 하는 사실을 이용하여 상응하는 조인트 변위를 동일하게 초기 조건으로 제공하였을 때 나타나는 최대 반력을 계산하였다. 이는 풍력발전기 기준 자료의 타워 상단에 걸리는 최대 하중, 모멘트 값에서 굽힘 모멘트가 다른 비틀림, 인장력보다 상당히 큰 비중을 차지한다는 사실과 일맥상통하며 굽힘 변형에 대해 최적 문제의 초점을 맞추는 것이 타당함을 나타낸다.

획득된 조인트 반력의 경우 식 (9)의 한계 상태 함수 Z에서 하중을 의미하는 L에 대입되며 설계 변수에 의해 결정되는 저항 R과의 차이를 통해 시스템의 안정, 불안정 영역을 나뉘는 기준으로 사용된다.

$$Z = g(X) = R - L \tag{9}$$

Table 1 The size of initial tower configurations

|                      | 1st model<br>(NREL) | 2nd model<br>(Optimum) |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| Average diameter(m)  | 6.7055              | 6.8595                 |
| Average thickness(m) | 0.0294              | 0.0274                 |
| Material             | Steel               | Steel                  |
| Height               | 100                 | 100                    |

Table 2 Definition of optimization problem

|                    |   |
|--------------------|---|
| Objective function | $m = \rho\pi L\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - t\right)^2\right)$   |
| Design variables   | $4.572\text{ m} < d < 8.839\text{ m}$<br>$0.0222\text{ m} < t < 0.0365\text{ m}$  |
| Constraints        | $g(1) = 1 - \frac{k}{k_{ref}}$<br>$g(2) = \frac{d}{250t} - 1$<br>$g(3) = \frac{P}{\sigma_y A_s} - 1$<br>$g(4) = 1 - \frac{\pi^2 E \left(\pi t \left(\frac{d-t}{2}\right)^3\right)}{4L^2 P}$ |

3.3 신뢰성 기반 최적 설계를 이용한 신뢰성 계산

본 내용에서는 3.1절에서 정의한 최적 문제와 달리 확률 분포를 가지는 설계 변수 개념을 도입한 신뢰성 기반 최적 설계 문제로 정의하여 최적 모델을 도출하였다. 작성된 MATLAB 코드는 신뢰성 지수 β를 반복적으로 계산하며, 식 (10)-(12)와 같은 한계 상태 함수로 구성하였다.

$$g_1 = \sigma_{allow} \times \frac{2\pi(d^4 - (d-2t)^4)}{64d} - Joint\ force \tag{10}$$

$$g_2 = \frac{d}{t} - 0.11 \frac{E}{\sigma_{allow}} \tag{11}$$

$$g_3 = 0.45 \frac{E}{\sigma_{allow}} - \frac{d}{t} = C_g \frac{E}{\sigma_{allow}} - \frac{d}{t} \tag{12}$$

매 계산마다 각 한계 상태 함수에 해당하는 신뢰성 지수 3개가 반복적으로 구해지는데 그 중 최소 값을 대표로 선정하여 이에 상응하는 타워 각 부분의 지름과 두께를 계산, 다음 단계의 계산에 활용된다. 신뢰성 지수의 선정에 따라 설계 변수가 2개의 한계 상태 함수를 충족하나 나머지 1개의 한계

Table 3 Definition of RBDO formulation

|  |
|--|
| Min : $m = \rho\pi L\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - t\right)^2\right)$    |
| $4.572m < d < 8.839m$  |
| $0.0222m < t < 0.0365m$  |
| $\sigma_{x_i}^2 = T_{x_i}^2/9, T_{x_i}=0.0061m$  |
| subject to :   |
| $g_1 = \sigma_{allow} \times \frac{2\pi(d^4 - (d-2t)^4)}{64d} - Joint\ force$                    |
| $g_2 = \frac{d}{t} - 0.11 \frac{E}{\sigma_{allow}}$  |
| $g_3 = 0.45 \frac{E}{\sigma_{allow}} - \frac{d}{t} = C_g \frac{E}{\sigma_{allow}} - \frac{d}{t}$ |
| Criterion of loop :  |
| $\epsilon_i = \frac{\beta_i - \beta_{i-1}}{\beta_{i-1}} < 0.0001$                                |
| (i=2,3,4...n)  |
| (n : number of iteration)  |
| Safe reliability index :   |
| $\beta_j > 5$ (j=1,2,3...N)  |
| (N : Number of simulation case)  |

상태 함수를 충족시키지는 않아 고장 영역에 존재하는 등의 문제가 발생할 수 있다. 하지만 표준화된 설계 변수 공간의 원점에서 한계 상태 함수까지의 최단 거리는 하나로 3개의 최단 거리 중 하나를 선택하여 원을 그려도 다른 2개의 한계 상태 함수와 중첩되지 않아 안전한 설계 변수 설정이 가능하다.

신뢰성 지수가 획득된 후, 신뢰성 지수에 따른 수정된 지름과 두께 설계 변수가 설정되며 새로운 타워 모델을 구성하여 새로운 계산을 반복하게 된다. 하지만 반복 계산은 두 구간의 신뢰성 지수의 차이 비율이 0.0001 이하로 만족하게 되면 현 설계 변수가 최종 모델로 도출하는 방식을 채택하고 있다.

최종적으로 얻어지는 최적해 후보는 앞서 언급한 신뢰성 지수를 비롯한 좌굴 판별 기준과 최대 응력 분포 판별 기준에 대입하여 그 적합성을 검증받게 되며, 3개의 항목 중 하나의 조건을 만족하지 못하면 최적 해 후보에서 제외된다. 특히 신뢰성 지수가 높은 것은 동역학 모델을 통해 얻은 한계 상태 함수를 만족할 뿐 다른 요건에 대한 검증을 주지 못하므로 다각적인 해석이 필요하다.

### 3.4 타워 모델의 검증

본 최적화를 통해 획득된 최적 모델 후보의 경우 한계 상태 함수를 만족하나 앞서 정의한 최대 응력 분포와 좌굴 문제에 대한 만족을 내포하고 있지 않다. 이에 따라 최적 모델 후보들을 좌굴 판단 기준에 대입, 정리하여 만족하는 후보 변수들을 추출하고 유한 요소 모델로 변환시켜 질량과 응력 분포, 최대 변형률에 관해 검토해보는 과정을 수행하였다. 이 때 질량과 응력 분포의 경우 각각 시스템의 경제성과 안정성을 나타낸다.

유한 요소 모델의 타워는 NREL 기준의 타워 형상과 같이 설계 변수들을 다항식 함수 형태로 지나가는 매끄러운 형상으로 구성하였으며 다물체 동역학 모델에서 적용한 타워 최상단의 허용 변위와 달리 EWM 50의 극한 하중 환경 조건을 대입하여 물리적 현상을 관찰하였다. Extreme Wind Model(EWM 50)은 풍속이 59.35m/s 3s gust 라는 특정한 상황과 상응하는 하중 조건을 의미, 극심한 하중으로 분류되어 최대 응력 분포를 관찰하는데 유효하다. 이 때 각 요소들의 주응력 S11, S22, S33을 철의 항복 응력과 비교함으로써 안정성을 판단하였다.

## 4. 결 과

### 4.1 NREL 타워 초기 모델을 이용한 최적 모델

해석에 앞서 NREL에서 제시한 타워 모델의 좌굴과 최대 주응력에 관해 계산해 본 결과, 좌굴 판별 수치는 0.2219로 1보다 작고, 최대 주응력이  $-1.376 \times 10^7$ ,  $-9.294 \times 10^7$ ,  $-1.245 \times 10^7$  Pa로 철의 항복응력보다 낮은 결과가 나타났다. 압축 응력을 사용한 이유는 타워 구조물에서 인장 응력보다 크게 나타날 뿐 아니라 좌굴과 연관되어 만족 기준치가 높기 때문이다. 마지막으로 타워 최상단의 변형을 살펴보면  $6.83 \times 10^{-2}$  m의 변위를 나타낸다. 획득한 좌굴 판별 수치와 최대 주응력을 살펴보면 타워의 초기 설계 변수가 최적화 될 가능성을 내포한다.

3.3절에서 제시한 식 (11)과 (12)는 지름과 두께의 비율 구간으로 식 (12)가 0에 가까운 비율은 가는 형태의 타워 모델을 의미한다. 이는 시스템이 불안정 영역에 포함될 수 있는 확률을 가지므로 식 (12)를 구성하는 계수  $C_g$ 를 0.11에서 시작하여 0.45까지 구간으로 나누어 고려할 필요가 있다.

즉, 기존의 최적화 문제에서 식 (12)의 한계 상태 함수가 변화하여 적용되며 최종적으로 35개의 최적

모델 후보가 얻어진다. 이를 통해 최적 모델이 설정된 구간의 크기에 따라 달라지고 계수의 크기별로 정리되어 기존의 설계 기준보다 정확한 설계 기준을 확립할 수 있다.

$$g_3(x) = C_g \frac{E}{\sigma_{allow}} - \frac{d}{t} \quad (13)$$

$(C_g = 0.11 : 0.01 : 0.45)$

Fig. 4에서는 식 (13)과 같이  $C_g$ 가 변수로 지정된 경우 각 신뢰성 지수와 좌굴 판별 수치를 나타낸 것이다. 신뢰성 지수의 경우 대략 0.26 이후에 급격히 낮아지고, 좌굴 판별 기준과 비교한 결과 0.19 이하에서 모든 기준을 충족하는 최적 모델이 도출됨을 확인할 수 있다.  $C_g$ 가 0.19일 때 링크 조인트 구성 모델의 지름과 두께는 [5.1820, 6.7288, 8.3383]m, [0.0043, 0.0296, 0.0351]m로 구성된다. 이를 바탕으로 유한요소 모델링을 통한 응력 분포를 확인해본 결과 타워의 최상단에서 최대 응력 분포가 나타났으며, 최대 주응력이  $-5.715 \times 10^7$ ,  $-2.237 \times 10^8$ ,  $-5.383 \times 10^7$  Pa로 나타났다. 철의 항복응력에 비하면 낮은 값을 가지나 항복응력의 2/3보다 큰 값으로 실제 설계에 사용하는데 어려움이 있다. 따라서 0.19보다 낮은 범위에서 최적 모델을 선정하는 작업이 필요하다. 해당되는 범위의 설계변수들을 종합하여 유한요소 모델링을 통해 최대 주응력 분포를 확인한 결과, 철의 항복응력보다 낮은 값을 가져 응력 분포 기준을 만족하였다. 하지만 해당 범위 전체의 설계 변수들이 초기 지름, 두께보다 더 큰 값을 가져 질량 최소화 목표에 도달하지 못했다. 이를 통해 최적화 문제 설정에서 올바른 초기 설계 변수 크기와 범위를 선정하는 작업과 다양한 한계 상태 함수에 따른 고장 영역의 다각적 분석이 필요하다.

4.2 최적 모델 후보와 경향

본 내용에서는 3.1 절에서 선정한 최적 모델을 초기 설계변수로 지정하고 4.1 절과 동일한 방식으로 후보 최적 모델을 계산하는 과정을 수행하였다. Fig. 5에서는 신뢰성 지수와 좌굴 기준을 정리한 결과로 대략 0.27에서 신뢰성 지수가 음수로 바뀔 수 있다. 즉, 계수가 0.27보다 낮은 경우인 상대적으로 두꺼운 타워 형상일 때, 높은 신뢰성 지수를 가지게 된다.

또한 위 후보 최적 모델들을 좌굴 기준에 맞춘 결과 최종적으로 계수가 0.21보다 작거나 같은 11개의 후보 모델을 얻을 수 있다.

이처럼 본 논문에서 사용한 최적화 문제는 각각 변화된 한계 상태 함수를 적용한 35개의 시뮬레이션을 수행하였을 경우, 주어진 설계 변수 분포를 만족하는 최적의 설계 변수인 지름, 두께를 도출하

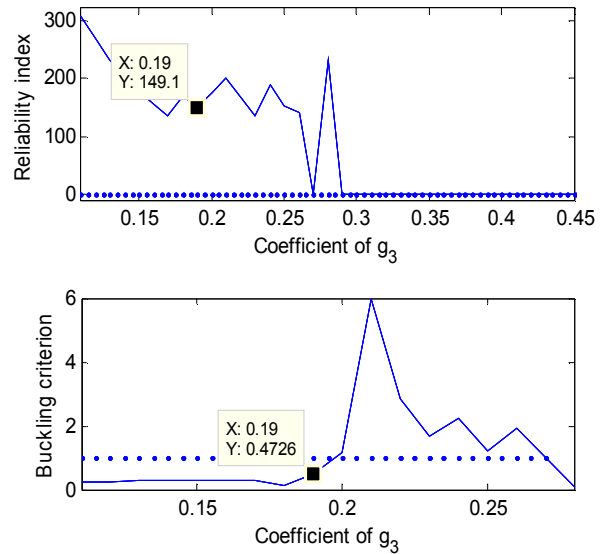


Fig. 4 Distribution of reliability and buckling criterion according coefficient of  $g_3$

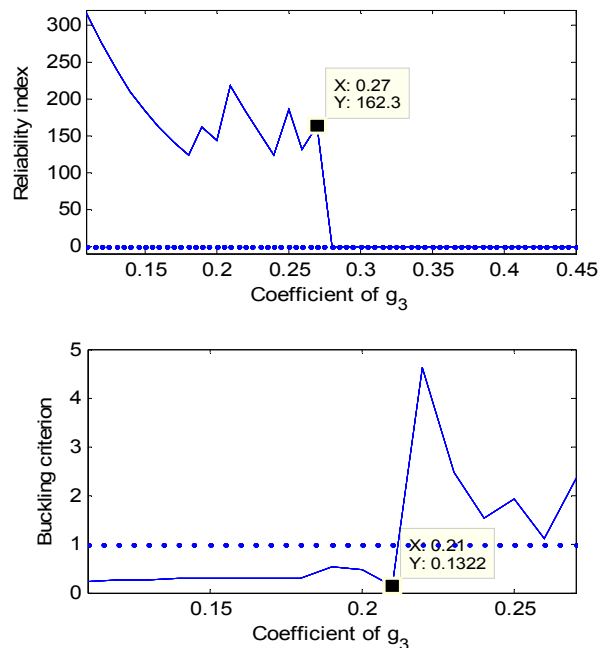


Fig. 5 Distribution of reliability and buckling criterion according coefficient of  $g_3$

는 방식을 채택하고 있다. 특히 각 시뮬레이션에 적용된 신뢰성 계산 루프의 변화율이 0.0001보다 작을 경우 최적 설계로 도출되기 때문에 매 시뮬레이션마다 계산된 루프의 횟수는 다르다.

신뢰성 지수로 표기된 값은 타워의 상단, 중간, 하단의 대표 신뢰성 지수 중 최소값을 선정하였다. 경우에 따라 신뢰성 지수가 100을 넘는 값을 나타나 최적 설계안에 혼동을 줄 수 있다. 실제로 Table. 4에서와 같이 U.S. Army Corps of Engineers (1999)에서는 신뢰성 지수와 파괴확률을 산정하여 설계에 사용하고 있다. 이처럼 높은 신뢰성 지수가 획득된 현상의 발생 원인은 계산과정에서 신뢰도 지수를 특정값으로 수렴시키는 것이 아닌 신뢰성 지수의 변화량을 기준으로 사용한 결과로 나타난다. 하지만 신뢰성 지수를 특정값으로 수렴시킬 경우, 신뢰성 계산 전후의 신뢰성 지수 간의 큰 차이가 발생하게 되어 안정된 해로 판별하기 어렵기 때문에 본 해석과 같은 기준을 사용하였다.

이로 인해 본 문제에서 사용한 표준편차의 크기가 매우 작다는 사실에 의거하여 단면의 지름과 두께는 매우 작은 값으로 변화하게 되며, 상단, 중간, 하단의 설계 변수가 밀접하게 연관되어 균형을 유지할 경우, 3가지 신뢰성 지수가 안전 영역에 존재함을 확인하였다. 하지만 높은 신뢰성 지수와 달리 최적 설계변수를 좌굴 안정성 해석과 최대 응력 분포 기준에 적용시킬 경우 상이한 결과가 도출됨을 통해 특정 신뢰성 지수로 수렴한 결과의 안정성을 보장하기 어렵다.

4.3 최종 모델

Table 5에서 나타난 11개의 후보 최적 모델에서 연구 목적과 부합하는 질량 구성비가 낮은 최적 모델을 선정하기 위하여 설계 변수를 이용한 유한 요소 모델링을 통하여 정적 해석을 수행하였다. 앞서 언급한 식 (12)의 계수  $C_g$ 가 높을수록 가는 형상의 모델이 이루어지는데 0.21에 해당하는 설계변수를 시작으로 점차 낮은 계수에 해당하는 설계변수를 대입하여 정리하였다. 그 결과 링크 조인트 구성 모델의 지름과 두께가 [5.1644, 6.8161, 8.3873]m, [0.0237, 0.0288, 0.0347]m로 구성될 때 최적 모델로 선정되었다.

이 때 신뢰성 지수와 좌굴 판별 값은 각각 122.74, 0.2942로 모든 판별식을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

추가적으로 응력 및 변형 분포를 확인하면 주응력이  $-1.054 \times 10^7$ ,  $-7.024 \times 10^7$ ,  $-9.560 \times 10^6$  Pa으로 NREL 5MW 초기 타워 모델 결과와 비교하여 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이 사실은 타워의 질량이  $4.90710 \times 10^5$ kg에서  $4.85791 \times 10^5$ kg으로 낮아졌음에도 응력 분포가 낮아져 내구성이 높아짐을 알 수 있다. Fig. 6에서는 가장 높은 S22방향의 주응력 분포를 나타내고 있다. 이 때 타워 최상단의 변위는  $6.22 \times 10^{-2}$ m를 나타내고 있다.

Table 4 Probability of failures according reliability index

| Reliability index( $\beta$ ) | Probability of failure( $P_f$ ) |
|------------------------------|---------------------------------|
| 5.0                          | 0.0000003                       |
| 4.0                          | 0.00003                         |
| 3.0                          | 0.001                           |
| 2.5                          | 0.006                           |
| 2.0                          | 0.023                           |
| 1.5                          | 0.07                            |
| 1.0                          | 0.016                           |

Table 5 Candidates of optimal design variables

|                      | 0.11   | 0.12   | 0.13   | 0.14   |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Average Diameter(m)  | 6.928  | 6.890  | 6.861  | 6.839  |
| Average thickness(m) | 0.0322 | 0.0312 | 0.0305 | 0.0300 |
| Reliability index    | 315.7  | 274.4  | 239.1  | 208.9  |
| Buckling criterion   | 0.2357 | 0.2527 | 0.2654 | 0.2749 |
|                      | 0.15   | 0.16   | 0.17   | 0.18   |
| Average Diameter(m)  | 6.822  | 6.808  | 6.797  | 6.789  |
| Average thickness(m) | 0.0296 | 0.0294 | 0.0292 | 0.0291 |
| Reliability index    | 182.8  | 160.1  | 140.2  | 122.7  |
| Buckling criterion   | 0.2819 | 0.2872 | 0.2912 | 0.2942 |
|                      | 0.19   | 0.2    | 0.21   |        |
| Average Diameter(m)  | 6.789  | 6.786  | 6.791  |        |
| Average thickness(m) | 0.0218 | 0.0227 | 0.0436 |        |
| Reliability index    | 160.7  | 142.0  | 217.8  |        |
| Buckling criterion   | 0.5226 | 0.4820 | 0.1322 |        |



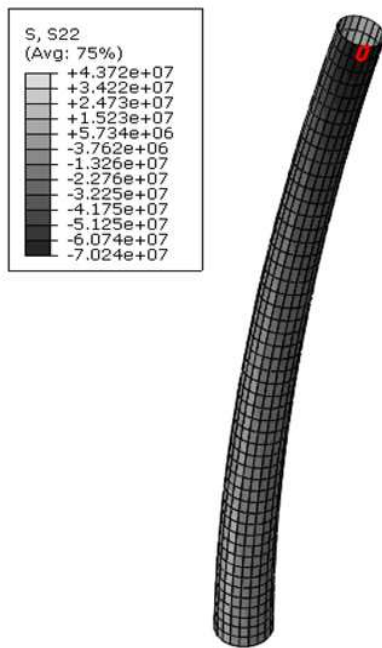


Fig. 6 Principal stress S22 and maximum section

## 5. 결 론

본 연구에서는 효율적인 풍력 발전기 타워 설계를 위해 다물체 동역학을 기반으로 한 시스템 모델링과 신뢰성 기반 최적 설계를 도입하여 최적 타워 설계 변수를 제시하였다. 기존의 NREL 풍력 발전기의 형상을 유지한 상태에서 타워의 높이에 따른 단면적 변화를 유도하여 낮은 질량 구성비와 높은 내구성을 구축함으로써 그 효율성을 나타냈다. 획득된 최적 설계 모델은 유한 요소 모델링을 통한 최대 응력 분포 분석과 좌굴 판별 기준을 통해 적합성을 검토하였으며 각각 EWM 50 극한 하중 모델, AISC 360-05의 좌굴 판별 기준을 기반으로 구성되었다.

기존의 결정론적 변수를 이용한 최적 설계 문제와 달리 확률적 분포를 내포한 변수 설정을 통해 실제 제작에 발생하는 기계 오차가 존재하여도 높은 신뢰성 지수를 가지게 되어 제시된 모델이 위험 영역에서 벗어남을 확인할 수 있다.

획득한 최적 모델의 경우 NREL 5MW 참고 설계 모델에 비해 대략 5000kg의 낮은 질량 구성비를 획득할 수 있었으며 동일한 하중이 작용하여도 더 낮은 최대 응력 분포가 나타남을 확인할 수 있다.

이러한 기본 설계를 바탕으로 향후 풍력 발전기 전체 모델을 유도하고 각 블레이드, 나셀, 타워,

하부 구조물의 복합적 설계 조건 및 제한 조건을 수학적으로 표현한 최적화 문제를 해결하는 과정이 수행되어야 한다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부가 주관하는 2013년 엔지니어링 전문인력 양성사업(과제번호: H2001-13-1001)을 지원받아 발표하는 논문입니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Nicholson, J. C., 2011, "Design of Wind Turbine Tower and Foundation Systems : Optimization Approach," Master's Thesis, University of IOWA.
- (2) Uysa, P. E., Farkasb, J., Jármab, K. and van Tondera, F., 2007, "Optimisation of a Steel Tower for a Wind Turbine Structure," *Engineering Structures*, Vol. 29, Issue. 7, pp. 1337~1342.
- (3) Yıldırım, S. and ÖzkolKi, İ., 2010, "Wind Turbine Tower Optimization Under Various Requirements by Using Genetic Algorithm," *Engineering*, Vol.2, No.8, pp. 641~647.
- (4) Bae, H. M. and Devine, M. D., 1978, "Optimization Models for the Economic Design of Wind Power Systems," *Journal of Solar Energy*, Vol. 20, pp. 469~481.
- (5) Cromack, D. E. and Oscar, D., 1984, Design Optimization of Small Wind Turbines for Low Wind Regimes, *Journal for Solar Energy Engineering* 106, pp. 347~450.
- (6) Levy, R. and Lev, O., 1987, "Recent Developments in Structural Optimization," *J. Struct. Eng.*, Vol. 113, No. 9, pp. 1939~1962.
- (7) Grandhi, R. V. and Venkayya, V. B., 1988 "Structural Optimization with Frequency Constraints," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 7, pp. 858~866.
- (8) Takewaki, I., 1996, "Optimal Frequency Design of Tower Structures via an Approximation Concept," *Computers & Structures*, Vol. 58, No. 3, pp. 445~452.
- (9) Negm, H. M. and Maalawi, K. Y., 2000, "Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers," *Comput. Struct.*, Vol. 74, pp. 649~666.

- (10) Lavassas. I., Nikolaidis. G. and Zervas. P., 2003, "Analysis and Design of The Prototype of a Steel 1-MW Wind Turbine Tower," *Eng. Struct.*, Vol. 25, pp. 1097~1106.
- (11) Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G. D., Hondros, I. D., Karamaneas, H., Karabalis, D. L. and Beskos D. E., 2002, "Static, Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower," *Eng. Struct.*, Vol. 24, pp. 1015~1025.
- (12) Uys, P. E., Farkas, J., Jármai, K. and van Tonder, F., 2007, "Optimisation of a Steel Tower for a Wind Turbine Structure," *Eng. Struct.*, Vol. 29, pp. 1337~1342.
- (13) Silva, M. A., Brasil, R. M., Arora, J. S., 2008, "Formulations for the Optimal Design of RC Wind Turbine Towers," *In Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization*, Rio de Janeiro, Brazil, 1-5 June.
- (14) Jiang, S. and Duan, S., 2001, "A Four-Rigid-Body Element Model and Computer Simulation for Flexible Components of Wind Turbines," *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Denver, Vol. 7 Part B, pp. 935~942.
- (15) Kim, H.-w. and Yoo, W.-s., 2007, "Selection of Damping Model In Vibration Of Flexible Beams," *KSME Autumn conference*, pp. 3538~3543.
- (16) Craig R. R. Jr. and Kurdila, A. J., 2006, Second Edition, "Fundamentals of Structural Dynamics," John Wiley & Sons, Hoboken NJ.
- (17) Hasofer, A. M. and Lind, N. C., 1974, "An Exact and Invariant First Order Reliability Format," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 100(EM-1), pp.111~121.
- (18) Jeung, G., Kim, D.-W., Sung, Y. H., Kim, H. G. and Kim, D.-H., 2012, "Reliability-Based Design Optimization of a Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) Utilizing Reliability Index Approach," *Journal of Magnetics*, Vol. 17, No.1, pp.46~50.
- (19) Choi, B.-L., Choi, J.-H. and Choi, D.-H., 2005, "Reliability-Based Design Optimization of an Automotive Suspension System for Enhancing Kinematic and Compliance Characteristics," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 235~242.
- (20) Yoon, S.-J. and Choi, D.-H., 2004, "Reliability-Based Design Optimization of Slider Air Bearings," *Journals of Mechanical Science and Technology*, Vol. 18, No. 10, pp. 1722~1729.
- (21) Oh, S., Oh, S., Kang, J., Lee, I. and Lyu, S. K., 2013, "A Study on Modeling and Optimization of Tooth Micro-geometry for a Helical Gear Park," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 3, pp. 423~427.
- (22) Juvinall, R. C. and Marshek, K. M., 2002, "Fundamentals of Machine Component Design," Third Edition, John Willey & Sons, Inc, New York pp. 173~234.
- (23) Beedle, L. S., 2005, "Specification for Structural Steel Buildings," *American Institute Of Steel Construction*, Inc. Chicago, Illinois.
- (24) Shabana, A., 2010, "Computational Dynamics," Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York
- (25) Chopra, A. K., 1995, "Dynamics of Structures," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- (26) Kang, B.Y., Han, J. Y., Hong, C. H. and Moon, B. Y., 2012, "Dynamic Analysis of Hybrid Wind Power Composite Blades According to Stacking Properties Method," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 7, pp. 1161~1166.
- (27) Shi, W., Park, H. C., Baek, J. H., Kim, C. W., Kim, Y. C. and Shin, H. K., 2012, "Study on the Marine Growth Effect on the Dynamic Response of Offshore Wind Turbine," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 7, pp. 1167~1176.