



## 강재 풍력 터빈 타워의 상부구조 모델링 방법에 따른 고유진동수 특성에 대한 고찰

이윤우<sup>1</sup> · 최준호<sup>2</sup> · 강성용<sup>3</sup> · 강영종<sup>4</sup>

고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정<sup>1</sup>, 고려대학교 건축사회환경공학과 연구교수<sup>2</sup>,  
 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정<sup>3</sup>, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수<sup>4</sup>

## A Study of Natural Frequency in Steel Wind Turbine Tower according to the RNA Model

Lee, Yun-Woo<sup>1</sup> · Choi, Jun-Ho<sup>2</sup> · Kang, Sung-Yong<sup>3</sup> · Kang, Young-Jong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Master's course, Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea  
<sup>2</sup>Research Professor, Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea  
<sup>3</sup>PhD. Candidate, Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea  
<sup>4</sup>Professor, Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Abstract:** Wind turbine tower has a very important role in wind turbine system as one of the renewable energy that has been attracting attention worldwide recently. Due to the growth of wind power market, advance and development of offshore wind system and getting huger capacity is inevitable. As a result, the vibration is generated at wind turbine tower by receiving constantly dynamic loads such as wind load and wave load. Among these dynamic loads, the mechanical load caused by the rotation of the blade is able to make relatively periodic load to the wind turbine tower. So natural frequency of the wind turbine tower should be designed to avoid the rotation frequency of the rotor according to the design criteria to avoid resonance. Currently research of the wind turbine tower, the precise research does not be carried out because of simplifying the structure of the other upper and lower. In this study, the effect of blade modeling differences are to be analyzed in natural frequency of wind turbine tower.

**Key Words:** wind turbine tower, resonance, blade, modeling, natural frequency

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 신재생 에너지의 역할이 증대되고 있으며, 그 중 한 분야인 풍력발전 또한 지속적으로 성장하고 있는 추세이다. 풍력발전시장이 증대됨에 따라 풍력발전의 경제성을 고려하여, 효율적인 발전을 위한 풍력터빈의 대용량화 및 이에 따른 해상풍력으로의 진출이 불가피한 실정이다. 이와 같이 대용량 해상풍력발전의 개발이 진행되면서 풍력터빈시스

템은 육상에서의 하중에 비해 더 큰 하중을 받을 뿐만 아니라 파랑하중과 같은 추가적인 하중 또한 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 이처럼 풍력터빈시스템에 작용하는 하중은 지속적으로 불규칙적인 작용을 하며 구조물에 진동을 일으키게 되는데 이러한 진동이 과해질 경우, 구조물의 파괴를 유발할 수 있다. 풍력터빈타워의 진동을 유발하는 하중 가운데 로터부의 회전으로 인해 발생하는 기계적 하중은 다른 불규칙적인 동적 하중에 비해 상대적으로 주기적인 하중으로 타워에 작용하게 된다. 풍력터빈타워는 이와 같은 주기적인 기계적 하중과의 공진을 회피하여 설계되어야

**주요어:** 풍력터빈타워, 공진, 블레이드, 모델링, 고유진동수

**Corresponding author:** Kang, Young-Jong

Department of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, 145 Anan-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea.

Tel: +82-2-3290-3317, Fax: +82-2-921-5166, E-mail: yjkang@korea.ac.kr

투고일: 2014년 8월 14일 / 수정일: 2014년 8월 28일 / 게재확정일: 2014년 9월 12일

하며 GL의 설계 가이드라인(GL Guideline, 2010)에서는 블레이드 회전 주파수를 고려하여 타워를 설계하도록 기준을 제시하고 있다. 블레이드 회전 주파수를 피해 풍력터빈타워를 설계하기 위하여 풍력터빈타워의 고유진동수에 대한 분석이 이루어져야 한다. 현재 풍력터빈시스템에 대한 연구는 크게 블레이드와 터빈을 포함한 상부구조물, 타워, 기초구조물 세 가지로 나누어 이뤄지고 있다. 이처럼 각각의 분야에 대한 연구를 진행하게 되면서 풍력터빈타워의 연구에서는 대부분 상부의 터빈구조물을 집중질량의 형태로 고려하며 하부의 기초구조물의 경우 Fixed 경계조건을 이용하여 연구가 진행되고 있는 실정이다(Choi et al., 2010; Han et al., 2013; Lee et al., 2012; Lee et al., 2013). 풍력터빈의 대용량화가 진행됨에 따라 Fig. 1과 같이 블레이드 회전주파수와와의 공진을 피할 수 있는 목표 주파수 대역이 점차 좁아지고 있으며, 블레이드의 회전으로 인한 하중과 타워 구조물 사이에 공진이 발생할 경우 풍력터빈타워 전체 시스템의 붕괴를 유발할 수 있으므로 고유진동수 분석에 대해 보다 정밀한 해석이 필요하다.

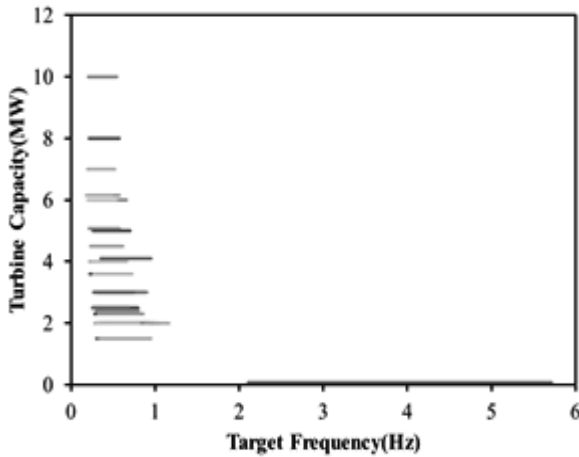


Fig. 1 Target Frequency according to Turbine Capacity

풍력터빈타워의 동적 거동을 살펴봄에 있어, 블레이드를 포함한 상부구조물을 상세 모델링 하여 해석을 수행할 경우 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있다 (Kim et al., 2014; Moon et al., 2013). 하지만 타워의 연구 분야에서 상부구조물에 대한 상세한 정보를 이용하기 어려운 실정이며, 상세 모델링 또한 큰 어려움이 따른다. 블레이드의 거동과 터빈의 제어 알고리즘, 타워의 거동을 모두 고려할 수 있는 해석 프로그램에는 풍력터빈구조물 해석 전용 프로그램인 GH-Bladed 등이 있지만, 그와 같은 프로그램을 사용하여 구조해석을 수행하기에는 상당한 제약이 따른다. 범용 해석 프로그램을 이용한 동적 거동 분석에서의 모델링의 영향을 알아보기 위해, 본 연구에서는 상부 터빈구조

물의 블레이드 모사방법에 따른 풍력터빈타워의 고유진동수 변화에 대해 분석하였다.

## 2. 고유진동수 분석

### 1. 기본 대상 모델 선정

풍력터빈타워 고유진동수 해석의 기준이 되는 대상 모델을 선정하기 위해 2MW급 강재타워 30가지에 대한 블레이드의 질량 및 상부구조물(RNA)과 타워의 질량비를 분석하였다.

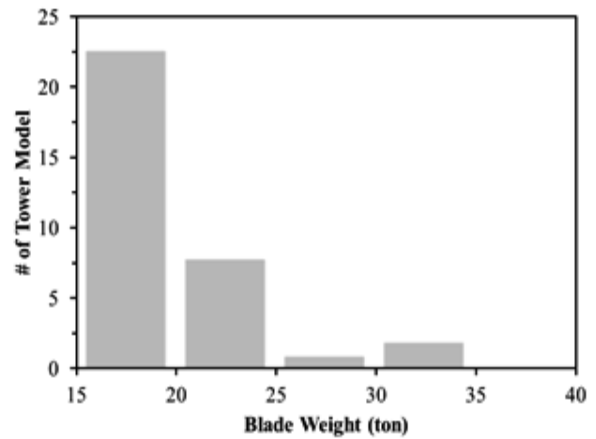


Fig. 2(a) Blade Weight of 2MW Wind Turbine

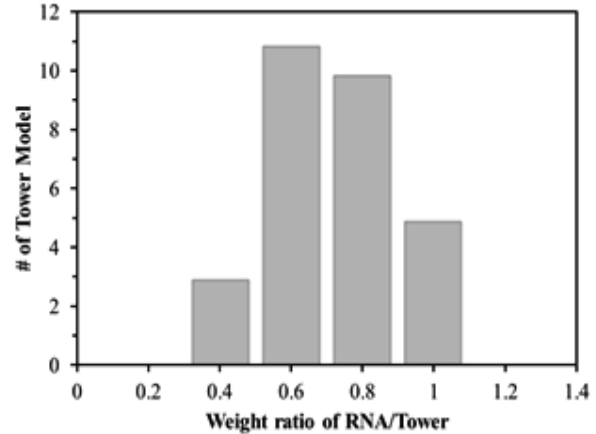


Fig. 2(b) RNA/Tower Weight ratio of 2MW Wind Turbine

2MW급 강재타워 30가지에 대해 분석한 결과, Fig. 2와 같이 Blade의 질량은 15ton에서 20ton사이에 가장 많이 분포하였으며, 상부구조물과 타워의 질량에 대한 비율은 0.6~0.8사이에 주로 분포하고 있음을 알 수 있었다. 분석을 바탕으로 선정한 해석 대상모델의 제원은 Table 1과 같이 Blade의 질량은 20ton, RNA와 타워의 질량비는 0.7이 되도록 선정하였다.

Table 1. Analyzed Tower model properties (2MW)

Properties	Dimension (m)	Weight (ton)
Rotor + Nacelle	4x4x10	120
Tower	80	200
Blade	45	20

2. 블레이드 모델링 차이에 따른 비교

블레이드 모델링의 차이가 고유진동수의 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 ABAQUS를 이용하여 아래 Table 2와 같은 세 가지 모델을 대상으로 RNA와 타워의 질량비(0.3~1.5)에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보았다.

Table 2. Comparison model of Blade existence

Model	RNA Model	RNA + Blade (Weight) Model	RNA + Blade (Shape) Model
Characteristic	블레이드를 전혀 고려하지 않음	블레이드의 질량을 RNA에 집중 질량으로 추가	길이 45m, 질량 20ton의 블레이드를 모델링
Total Mass	320ton	340ton	340ton

여기서, RNA Model은 블레이드에 대한 고려를 전혀 하지 않은 모델로써 RNA 질량 120ton, 타워의 질량은 200ton이며, 블레이드의 질량은 고려하지 않았다. RNA+Blade(Weight) Model은 RNA Model에 RNA의 질량만을 20ton 추가한 모델이며, RNA+Blade(Shape) Model은 RNA Model에 질량 20ton의 블레이드를 추가로 모델링한 모델이다. 상부 구조물과 타워의 질량비 0.3~1.5에 대한 변화에서 블레이드의 질량은 20ton으로 고정하였으며, RNA Model과 Tower Model의 질량만을 변화시켜 총 질량은 고정시킨 상태로 해석을 수행하였다.

Tower와 RNA 및 Blade의 구조해석모델은 모두 Beam모델을 이용하여 모델링 하였고, Tower의 Tapered Shape을 고려하기 위해 8개의 Beam모델을 이용하여 타워 형상을 모사하였다. 타워와 RNA, Blade가 일체 거동하여 진동형상을 나타내며 타워만의 고유진동수에 영향을 주는 현상을 방지하기 위하여 RNA와 Blade는 Rigid Constraint 옵션을 적용하였다.



Fig. 3(a) Beam Modeling (Beam profile Non applied Model)

Fig. 3(b) Beam Modeling (Beam profile Applied Model)

풍력터빈구조물의 모델은 Fig. 3과 같으며, 대상 모델을 바탕으로 한 고유진동수 해석 결과는 Fig. 4와 같다.

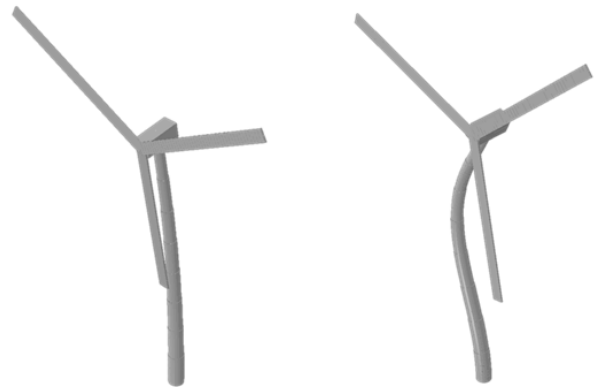


Fig. 4(a) 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Mode Shape of Tower Model

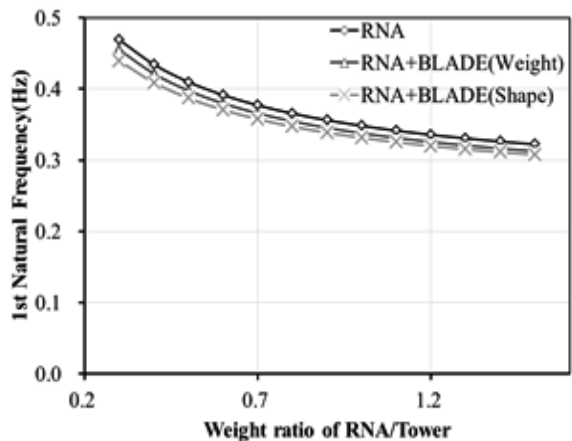


Fig. 4(b) 1<sup>st</sup> Natural Frequency According to the Existence of Blade Model

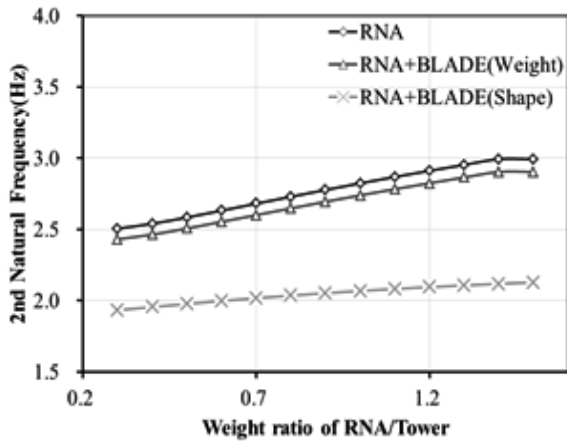


Fig. 4(c) 2<sup>nd</sup> Natural frequency according to the Existence of Blade Model

해석 모델에 대한 1, 2차 진동 모드는 Fig. 4(a)와 같다. 세 가지 종류의 모델을 통해 고유진동수를 분석한 결과, Fig. 4(b), (c)와 같이 타워와 블레이드를 포함한 상부구조물의 무게만을 고려한 모델을 기준으로, 블레이드의 무게조차 고려하지 않은 모델과는 1, 2차 고유진동수 모두 약 3%의 일정한 차이를 보였으며, 블레이드의 형상을 고려한 모델과는 1차 고유진동수에서 약 1.5~3.5%의 적은 차이를 보였지만 2차 고유진동수에서는 약 20~27%로 큰 차이를 나타내었다.

3. 블레이드 정지각에 따른 비교

풍력터빈의 발전 중 일정 이상의 풍속이 작용할 경우 터빈은 발전을 멈추고 정지하게 되는데, 이러한 정지 상태에서의 블레이드 정지각이 타워의 동적거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 0°~60°까지 10°간격으로 블레이드를 회전시켜 모델링 한 후, 각 모델들의 1~3차까지의 고유진동수를 살펴보았다. 해석대상모델은 앞선 RNA+Blade(Shape)모델에서 3개의 Blade의 정지각만을 변화시킨 모델이다.

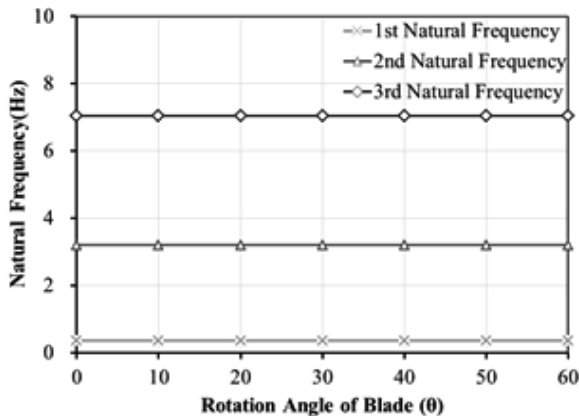


Fig. 5 Natural frequency according to the Angle

0°~60°까지 7가지 모델들의 블레이드의 정지각에 따른 고유진동수의 변화를 살펴본 결과, Fig. 5와 같이 블레이드의 정지각은 타워의 고유진동수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 블레이드 모델링 형상에 따른 비교

풍력터빈타워의 고유진동수에 블레이드의 모델이 미치는 영향을 분석한 결과, 블레이드를 직접적으로 모델링 한 것과 그렇지 않은 모델은 고유진동수 분석에 있어, 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있었다. 이러한 차이를 유발하는 블레이드 모델의 형상 가운데 어떠한 영향인자들이 타워의 고유진동수 차이를 유발하는가에 대해 분석하기 위해, Fig. 6과 같이 Nacelle축(z축)과 블레이드 날개 축(r축), 회전각(θ축)에 대한 변수들을 고려하여 각 축을 기준으로 하는 Cylindrical 좌표계에 대한 변수를 적용한 5가지 모델을 선정하였다.

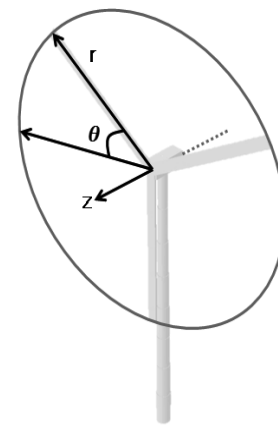


Fig. 6 Cylindrical Coordinate System of Turbine

Table 3. Comparison Model of Blade Shape

Basic Model	Concentrated Model	Disk Model	Shorter Model	Thicker Model
기본적인 블레이드 모델	집중질량 모델	Disk형 블레이드 모델	블레이드 길이 변화모델	블레이드 두께 변화모델
-	$r, \theta, z$	$\theta$	$r$	$z$
총 질량 340ton				

Table 3의 5가지 모델들 가운데 Basic Model과 Concentrated Model은 앞선 해석에 사용된 모델과 동일하며 각 모델에서의 블레이드 질량은 20ton으로 동일하다. Disk Model은 Blade의  $\theta$ 축에 대한 변수를 알아보기 위한 모델로, 블레이드의 날개 수, 또는 블레이드의 너비에 대한 영향을 살펴보기 위한 모델이다. Shorter Model은  $r$ 축에 대한 변수를 알아보기 위한 모델로, 블레이드의 길이에 대한 영향을 살펴보기 위해 블레이드의 길이를 1/2로 줄인 모델이다. 마지막으로, Thicker Model은  $z$ 축에 대한 변수를 알아보기 위한 모델로, 블레이드의 두께에 대한 영향을 살펴보기 위해 블레이드의 두께를 3배로 증가시킨 모델이다. 선정된 5가지의 모델은 블레이드를 디테일하게 모델링 하여 타워의 진동특성을 살펴보기에 어려움이 따르므로, 풍력터빈타워의 블레이드를 고려한 모델을 이용하여 동적 해석을 수행함에 있어서 얼마나 블레이드를 간략화 시켜 모델링 하며 보다 정해에 근접한 결과를 얻을 수 있는가에 대해 살펴보기 위한 모델이다.

Cylindrical 좌표계를 바탕으로 하여, 5가지 서로 다른 블레이드 모델을 활용한 타워모델의 고유진동수를 분석한 결과, Fig. 7과 같이 기본적인 블레이드모델을 이용한 Basic Model 대비 Concentrated Model과 블레이드의 길이에 대한 축인  $r$ 축에 대한 변수를 적용한 Shorter Model은 1차 고유진동수에서 약 1.5~3.5%로 약간의 차이를 보였으며, 2차 고유진동수에서 약 15~30%로 큰 차이를 나타내었다. 반면,  $\theta$ 축에 대한 변수를 적용한 Disk Model의 경우 1차 고유진동수에서는 약 0.1~2%로 미미한 차이를 나타내었지만, 2차 고유진동수에서는 약 9~10%로 Concentrated Model과 Shorter Model에 비해 적지만 무시할 수 없는 차이를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, 너셀의 축방향인  $z$ 축에 대한 변수를 적용한 Thicker Model의 경우 Basic Model과 동일한 결과를 보이며 블레이드 모델링 시 너셀 축에 대한 변수는 고유진동수의 차이에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

풍력터빈타워는 상부에 질량이 집중되어 있는 구조물이기 때문에 상부구조물의 모델링 방법에 따라 고유진동수에 차이가 발생할 수 있다. 고유진동수는 강성과 질량에 의해 결정되며, 본 연구에서는 상부구조물의 강성이 타워구조물의 고유진동수에 영향을 미치지 않도록 Rigid Constraint 옵션을 적용하였다. 블레이드의 모델링 방법에 따른 풍력터빈타워의 고유진동수 변화에 대해 분석한 결과, 블레이드의 형상을 직접 모델링 하는 것과 상부구조물을 집중질량으로 치환하여 해석하는 것은 타워의 고유진동수 분석에 있어서 무시할 수 없는 차이를 나타내며, 그러한 차이는 고차모드로 갈수록 더욱 크게 나타났다. 블레이드의 형상 가운데 타워의 동적 거동에 영향을 미치는 인자를 살펴보기 위한 5가지의 모델 가운데 블레이드의 길이방향 변수를 적용한 모델이 가장 큰 차이를 나타내는 것으로 미루어 보아, 블레이드의 길이에 따른 질량분포가 타워의 동적 거동에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 따라서 풍력터빈타워의 동적 거동을 확인함에 있어서 불가피한 경우 상부구조물을 집중질량형태로 간주하여 해석에 이용할 수 있지만 그렇지 않은 경우 블레이드의 길이에 대한 변수를 간략하게나마 모델링 할 수 있다면 타워의 동적 거동에 대해 보다 정확한 결과를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

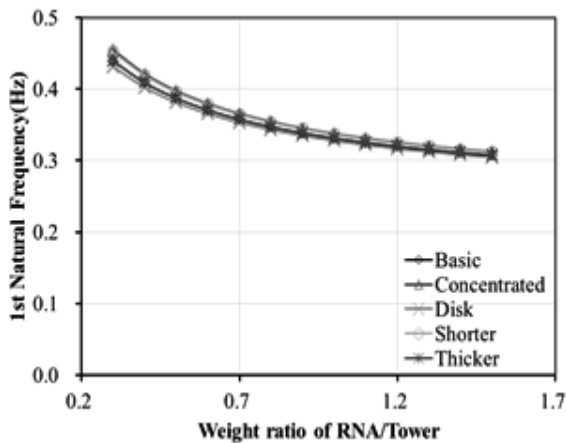


Fig. 7(a) 1<sup>st</sup> Natural frequency according to the Difference of Blade shape

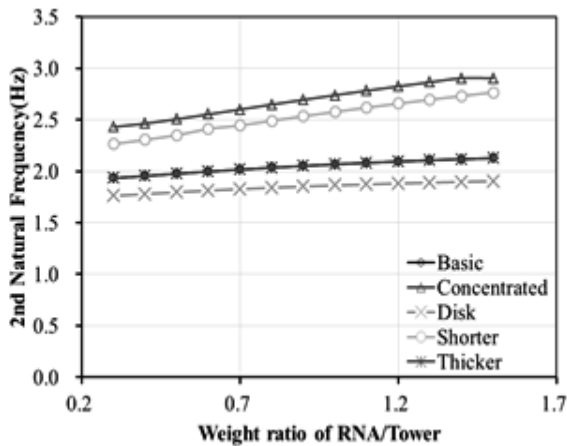


Fig. 7(b) 2<sup>nd</sup> Natural frequency according to the Difference of Blade shape

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국전력기술주식회사 중소기업 협력연구 기술개발 사업 ‘신기술을 이용한 해상풍력 구조물 내진용 Fastening 솔루션 및 응용 신기술 개발’의 연구비지원에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

## References

- Choi, H. C., Kim, D. H., Kim, D. M., Park, K. K. (2010), “Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads,” *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 23, No. 2, pp. 209-215.
- GL Guideline (2010), “Guideline for the Certification of Wind Turbines”
- Han, T. H., Yoo, S. R., Won, D. H., Lee, S. H. (2013), “Resonance Safety Analysis of DSCT Wind Power Tower by Diameter Variation,” *Korean Recycled Construction Resource Institute Fall conference*, pp. 202-205.
- Kim, S. Y., Kim, S. H. (2014), “Development of fault diagnostic system for mass unbalance and aerodynamic asymmetry of wind turbine system by using GH-Bladed” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 96-101.
- Lee, J. H., Bae, K. T., Jin, B. M., Kim, J. K. (2013), “Earthquake Response Analysis of an Offshore Wind Turbine Considering Effects of Geometric Nonlinearity of a Structure and Drag Force of Sea Water” *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 6, pp. 257-269.
- Lee, J. H., Lee, S. B., Kim, J. K. (2012), “Earthquake Response Analysis of an Offshore Wind Turbine Considering Fluid-Structure-Soil Interaction” *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-12.
- Moon, D. S., Kim, S. H. (2013), “Characteristic analysis on the mass unbalance and aerodynamic asymmetry of wind turbine system by using GH-Bladed” *The Korean Society of Mechanical Engineers Spring conference*, pp. 7-11.