

## 지반조건 상호작용을 고려한 풍력발전타워의 공진회피 진동수 산정을 위한 고유진동수 해석 연구

김평화<sup>1</sup>, 강성용<sup>1</sup>, 이운우<sup>1</sup>, 강영종<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>고려대학교 건축사회환경공학과

### Study on the Natural Frequency of Wind Turbine Tower Based on Soil Pile interaction to Evaluate Resonant Avoidance Frequency

Pyoung-Hwa Kim<sup>1</sup>, Sung-Yong Kang<sup>1</sup>, Yun-Woo Lee<sup>1</sup>, Young-jong Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering

**요 약** 최근 21세기에 접어들어 무분별한 발전의 결과로 석탄, 석유 등의 화석연료가 고갈되고 있으며, 지구 온난화가 진행 중이다. 이미 유럽과 미국 등의 선진국에서는 신재생 에너지 분야에 관심을 갖고 있으며, 그 중에서도 풍력에너지가 많은 관심을 받고 있다. 풍력발전타워는 운용 중 주기적인 하중의 발생으로 만들어지는 주파수를 회피하여 설계를 해야 한다. 일반적으로 구조해석 과정 시 지반을 고정단 경계조건으로 해석한다. 하지만, 고정단 경계조건의 경우 지반 조건 상호작용을 고려하지 못하여 목표 진동수를 벗어나게 된다. 본 연구에서는 용량 별 지반경계 조건 및 기초의 근입깊이를 고려한 고유진동수 효과를 연구하였으며, 변수에 따른 차이를 확인하였다. 결과적으로 고정단 경계조건 모델은 지반조건과 근입깊이의 영향을 받지 않으며, Coupled Spring 경계조건 모델은 지반조건에는 영향을 받지만, 근입깊이에는 영향을 받지 않는다. Winkler Spring 경계조건의 경우에는 지반조건과 근입깊이에 모두 영향을 받는다. 하지만, 얇은 깊이의 지반에서는 지반조건의 영향을 받지 않으므로 Coupled Spring 경계조건 모델을 활용한 지반조건 별 해석을 수행하는 것이 효과적이다.

**Abstract** Global warming and the depletion of fossil fuels have been caused by decades of reckless development. Wind energy is one form of renewable energy and is considered a future energy source. The wind tower is designed with a fundamental frequency in the soft-stiff design between the 1P and 3P range to avoid resonance. Usually, to perform natural frequency analysis of a wind tower, the boundary condition is set to the Fixed-End, and soil-pile interaction is not considered. In this study, consideration of the effect of soil-pile interaction on the wind tower was included and the difference in the natural frequency was studied. The fixed boundary condition was not affected by the soil condition and depth of the pile and the coupled spring boundary condition was unaffected by the depth of pile but affected by the depth of the pile, and the Winkler spring boundary condition is affected by both the soil condition and the depth of the pile. Therefore, the coupled spring boundary condition should be used in shallow depth soil conditions because the soil condition does not take the shallow depth soil into consideration.

**Keywords** : Finite Element Analysis, Natural Frequency, Resonance, Soil-Pile Interaction, Wind Turbine Tower

### 1. Introduction

온난화 및 온실가스 배출 같은 자연 환경의 무분별한 파괴로 신재생에너지의 관심이 집중되고 있다. 그중에 풍력발전이 발전효율 측면에서 각광을 받고 있으며, 유한 석탄과 석유 등의 유한자원이 고갈되고 있으며, 지구 온난화가 진행되고 있다. 본 연구는 국토해양부 국토교통기술사업화지원의 연구비 지원 ('14TBIP-C074046-01-000000')에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-2-927-7715 email: yjkang@korea.ac.kr

Received February 17, 2016

Revised (1st March 9, 2016, 2nd March 16, 2016, 3rd March 29, 2016, 4th April

Accepted April 7, 2016

6, 2016)

Published April 30, 2016

한 에너지원을 대체할 수 있는 미래의 대체 에너지로 연구되고 있다. 풍력발전은 바람이 풍력발전터빈을 지나면서 전기에너지를 생산하며, 충분한 풍량이 확보된 지역에서 무한한 청정자원으로 활용될 수 있다. 최근에는 터빈 용량의 대형화를 통하여 전기에너지 생산을 극대화하고 있다. 상부의 터빈구조물의 질량증가로 타워가 지지해야할 무게가 증가하고 있으며 대단면 설계가 필수적이다. 풍력발전타워의 진동에 대한 설계는 일반구조물과 다르게 터빈 운용 중 주기적인 하중으로 인한 공진을 회피하여 설계해야 한다[1]. Fig. 1에서는 풍력터빈의 RPM (Revolutions per Minute)을 기준으로 로터가 한 바퀴 회전하는 진동수를 1P, 3개의 블레이드 통과진동수를 3P라 정의한다.

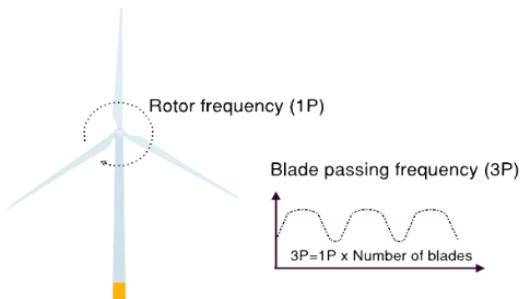


Fig. 1. Detail of Frequency (1P and 3P)

Fig. 2에서는 터빈진동수에 따른 안전율과 공진회피 진동수를 나타낸다[2]. 공진회피 진동수 범위를 벗어나 설계된 풍력발전타워는 블레이드 회전으로 발생하는 진동을 풍력발전시스템에서 공진으로 간주하여, 발전기를 비상정지 시킨 후 재가동해야하므로 발전효율을 감소시킨다.

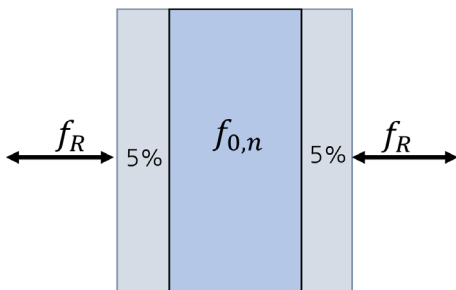


Fig. 2. Frequency Intervals for a Turbine System

풍력터빈이 대용량화 될수록 공진회피 진동수 범위가

Fig. 3와 같이 줄어들게 된다. 이때 기초구조물과 지반의 강성을 고려하지 않고 타워구조물을 설계할 경우에는 부적절한 설계를 유발할 수 있다.

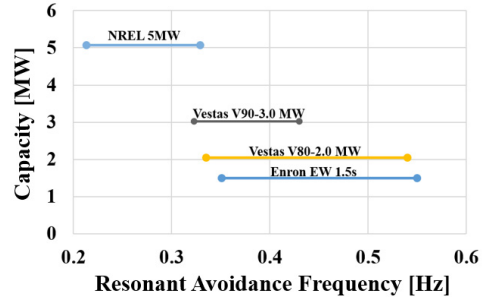


Fig. 3. Range of Resonant Avoidance Frequency

기존의 연구에서는 풍력발전타워의 지반 경계조건을 단순화하여 고정단 경계조건으로 구조해석을 수행하였다[3][4][5]. 단순화된 모델은 다양한 지반조건을 고려하지 못하며, 대상 구조물의 공진회피 진동수를 만족하지 못하게 된다.

따라서 적절한 공진회피 진동수 산정과 지반 경계조건을 고려한 고유진동해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 1.5MW, 5MW, 10MW 급 풍력발전타워를 대상으로 선정하였으며, 해석 수행 시 경계조건으로는 고정단 경계조건 모델, Coupled Spring 경계조건 모델, Winkler Spring 경계조건 모델을 적용하였다. 또한 풍력발전타워와 기초-지반 상호작용을 고려하여 지반 조건 및 모노파일 기초의 근입깊이에 따른 변수 별 고유진동해석을 수행하고 분석하였다.

## 2. Theoretical Background

본 연구에서는 풍력발전타워에 가장 대표적으로 사용되고 있는 모노파일(Mono-Pile)을 기초구조물로 선정하였으며, 타워 하단의 경계조건을 고정단 경계조건 모델과 지반 및 기초구조물을 6자유도 스프링으로 치환하는 Coupled Spring 경계조건 모델, 모노파일 모델의 각 절점에 대한 스프링 경계조건으로 지반을 구현하는 Winkler Spring 경계조건 모델을 이용하여 타워의 고유진동수 값을 비교 분석하였다.

### 2.1 Fixed Boundary Condition Model

고정단 경계조건 모델은 지반이 충분한 강성으로 지지되어 있다고 가정한다. 모델링과 해석이 비교적 간단하여 일반적인 구조물의 구조해석 모델링에 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 풍력발전타워는 기초 지반의 연성과 상호작용을 고려하지 않고 설계할 경우, 구조물의 고유진동수 값이 실제 거동과 차이를 보일 수 있다.

### 2.2 Coupled Spring Boundary Condition Model

Coupled Spring 경계조건 모델은 기초구조물을 3개의 병진운동 성분과 3개의 회전운동 성분의 6×6 스프링으로 치환하여 총 6개의 자유도를 갖는다. 기존 연구에서는 Novak(1983)[6]이 지반조건과 기초구조물의 특성을 반영하여, Coupled Spring 경계조건 형태를 기초와 지반의 상호작용을 고려한 기초구조물의 강성 및 감쇠행렬 산정 방안을 제시하였다.

### 2.3 Winkler Spring Boundary Condition Model

Winkler Spring 경계조건 모델은 지층의 횡방향 강성을 기초구조물과 지반의 비선형 관계를 고려한 p-y 스프링으로 구현한다. 앞서 언급한 경계조건과는 다르게 지층의 깊이에 따른 비선형 관계를 고려할 수 있으므로, 지반의 강성 값이 실제와 유사하여 비교적 정확한 공진회피 진동수 범위를 구할 수 있다. 하지만 지반 특성에 따른 p-y 곡선을 산정하는 방법이 고정단과 Coupled Spring 경계조건 모델에 비해 복잡하기 때문에 기존의 연구자들은 다양한 지반 조건에 따른 p-y 곡선식을 제안하였다. 본 연구에서는 Winkler Spring 경계조건 모델을 활용한 고유진동해석을 수행하였으며, Fig. 4와 같이 Matlock(1970)[7]에 의해 제시된 연약점토의 p-y곡선을 채택하여 연약점토 지반의 강성 값을 계산하였고, API(American Petroleum Institute)[8]에서 Fig. 5와 Fig. 6를 활용하여 제시한 모래 p-y곡선을 채택하여 모래지반의 강성 값을 계산하였다.

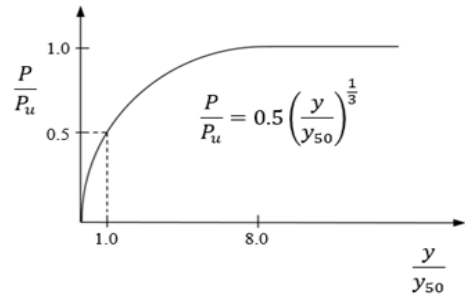


Fig. 4. Characteristic Shapes of p-y Curves for Soft Clay(static loading)(Matlock, 1970)

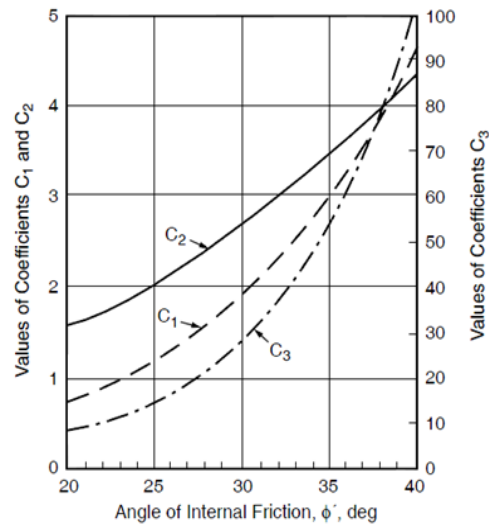


Fig. 5. Coefficients as Function of  $\phi'$ (API, 2002)

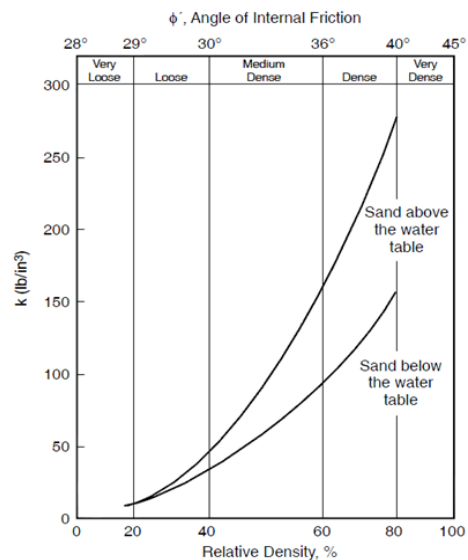


Fig. 6. Relative Density. % (API, 2002)

### 3. Finite Element Analysis

범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.13을 사용하여 기초구조물과 지반의 상호작용을 고려한 풍력발전타워의 모델링 및 고유진동수 해석을 수행하였다.

#### 3.1 Parameter

1.5MW, 5MW, 10MW 급 타워를 대상으로 해석하였으며, Table 1에서 1.5MW, 5MW, 10MW 급 풍력발전타워의 직경, 직경에 따른 두께, 모노파일의 두께, 타워의 높이, 타워 상부 구조물과 타워의 질량을 나타내었다. 타워의 용량이 증가할수록 상부 구조물의 질량이 커지며, 타워의 직경, 두께 그리고 높이가 증가하는 것을 Table 1에서 확인할 수 있다. 본 연구의 대상 기초구조물인 모노파일의 경우 타워의 최하단부 직경과 동일하게 모델링 하였으며, API[8]기준을 따라 아래의 식(1)과 같이 좌굴 방지를 위한 최소 두께를 산정하였다.

$$t(mm) = 6.35 + \frac{D}{100} \quad (1)$$

Table 1. Wind Turbine Tower Properties

Capacity		1.5MW	5MW	10MW	
Topside (Rotor/Nacelle)	Mass (kg)	84,838	350,000	676,703	
	Diameter (m)				
Tower	Top	2.82	3.84	5.50	
		Bottom	5.66	5.96	8.30
	Thickness (mm)	Top	12	25	20
		Bottom	18	35	38
	Height (m)	82	88	116	
Mass (kg)	130,990	347,460	628,442		
Pile	Thickness (m)	0.063	0.066	0.089	

지반모델의 경우에는 Fig. 7에서와 같이 연약점토 지반(Soft clay) 30m, 모래 지반(Sand) 30m, 점토와 모래를 혼합한 혼합 지반(Multi Layer) 30m 로 구분하였으며, 30m 이상의 깊이에서는 단단한 암반층으로 가정하였다. 본 연구에서 변수로 선정한 지반조건 모델의 고유진동해석 결과를 비교하기 위하여, 실제의 복잡한 지반조건을 Table 2와 같이 간소화하였다[9].

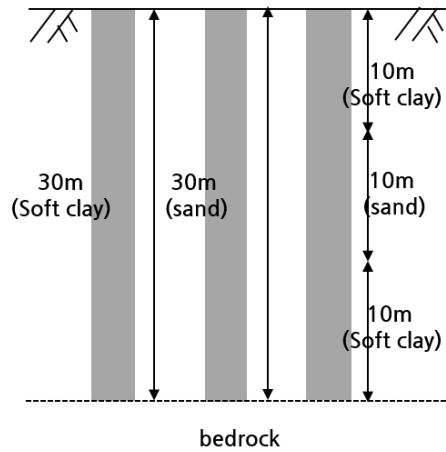


Fig. 7. Soil Conditions

Table 2. Soil Properties

Foundation	Clay		Sand
Length (m)	40		40
Shear wave velocity (m/s)	110		300
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	16.5		10.2
Shear elastic modulus (MPa)	22.0		345
Undrained Shear Strength (kPa)	0	26.25	0.35
	~20m	50	
	~30m	75	
Angle of internal friction of sand (°)	-		36
Poisson's ratio	0.3		0.35

앞서 언급한 해석 변수를 적용하여, 용량에 따른 1.5MW, 5MW, 10MW급 풍력발전타워 모델에 점토 지반, 모래 지반, 혼합 지반을 고려한 고정단 경계조건, Coupled Spring 경계조건, Winkler Spring 경계조건의 고유진동해석을 수행하였다. 추가적으로 근입깊이를 고려한 해석을 포함하여 총 81개의 변수 해석을 수행하였다.

#### 3.2 Material Properties

해석에 사용된 강재는 일반적인 풍력발전타워에 가장 많이 사용되는 S355이다. Table 3는 타워와 모노파일

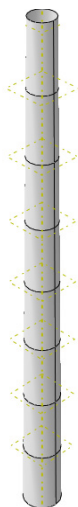
적용된 물성치를 나타내며, 탄성계수( $E$ ) 210GPa, 프아송비( $\nu$ ) 0.3을 사용하였다. 이 때, 일반적인 강재의 단위중량으로 사용되는 7,850kg/m<sup>3</sup>을 적용하게 되면, 타워의 볼트, 용접부, 플렌지의 두께를 고려하지 못하므로 NREL(National Renewable Energy Laboratory ; USA)에서 제공하는 8,500kg/m<sup>3</sup>의 단위중량을 사용하였다 [10].

**Table 3.** Material Properties(S355)

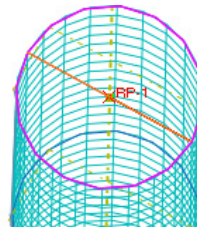
Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
210	0.3	8,500

**3.3 Structure Modeling**

4절점 쉘요소(S4R)를 이용한 3차원 고유진동해석을 수행하였다. Fig 8에서는 풍력타워의 형상을 보여주고 있으며, 풍력타워의 형상은 NREL[10]에서 제공하는 강재 풍력터빈타워모델을 활용하여 하단부터 상단까지 점차 직경이 줄어드는 Taper 형태의 타워로 모델링하였다. 블레이드의 형상이 타워의 고유진동수에 직접적인 영향을 미치지 않으므로 타워 상단에 집중질량의 형태로 치환하였으며[11]. Fig. 9에서와 같이 ABAQUS 6.13 CAE에서 제공하는 MPC(Multi Point Constraint)기능을 사용하여 단일 Node의 참조점(Reference Point)에 하중 및 경계조건을 구현하였다.

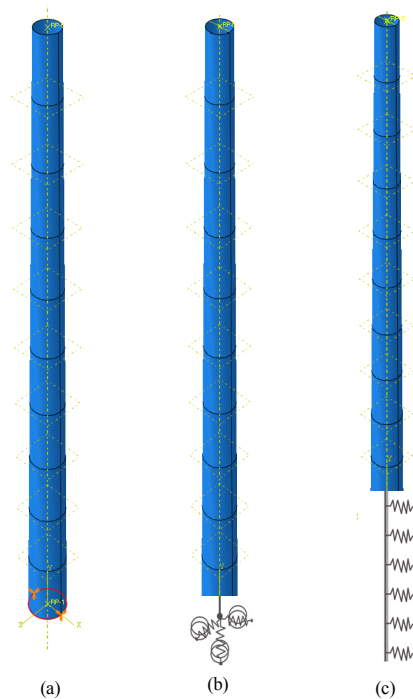


**Fig 8.** Taper Type Tower Geometry



**Fig 9.** Applied Reference Point

고정단 경계조건 모델의 경우는 3방향의 병진운동과 3방향의 회전운동을 모두 구속하였다. Coupled Spring 경계조건 모델의 경우는 수평방향과 회전방향을 스프링으로 치환하였고, 수직방향의 영향성은 작다고 판단하여 고정하였다[12]. 스프링은 타워의 하단부에 Coupling 조건으로 구속시킨다. Winkler Spring 경계조건 모델의 경우는 모노파일을 모델링한 후 깊이에 따라 수평방향으로 스프링을 적용하고, 스프링과 모노파일을 Coupling 조건으로 구속시킨다. Fig. 10에서는 타워의 경계조건 별 형상을 나타내고 있다[13][14][15].



**Fig. 10.** Boundary Condition  
 (a) Fixed Model  
 (b) Coupled Spring Model  
 (c) Winkler Spring Model

### 3.3 Analysis Result

용량 별 타워 모델을 대상으로 연약점토 지반, 모래 지반, 혼합 지반의 지반조건 및 근입깊이를 고려한 경계조건 별 고유진동해석을 총 81개의 변수로 수행하였다. 고유진동해석의 결과로 모드 형상 및 고유진동수를 분석하였다. 공진회피 진동수의 경우 1차 고유진동수가 지배적이므로, 1차 고유진동수를 기준으로 용량 별, 경계조건 별, 지반조건 별, 근입깊이 별 해석을 진행하였다. 용량에 따른 경향을 보기 위해서 경계조건과 지반조건을 무시할 수 있는 고정단 경계조건으로 분석을 진행하였다. Fig 11에서는 풍력발전타워의 발전용량이 대용량화 될수록 1차 고유진동수가 감소하는 것을 보여주고 있으며, 1.5MW 급 타워와 5MW 급 타워는 23.5%의 감소를 보였으며, 5MW 급 타워와 10MW 급 타워는 20.4%의 감소를 보였다.

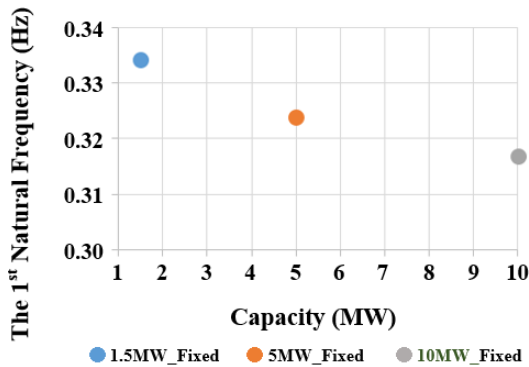


Fig 11. Comparisons of the 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Capacity with Fixed Boundary Condition

Fig 12에서는 경계조건을 기준으로 나타내었으며, 1.5MW, 5MW, 10MW 급 타워에 경계조건을 고려한 해석을 수행하였다. 모든 용량의 타워에서 Winkler Spring 경계조건 모델, Coupled Spring 경계조건 모델, 고정단 경계조건 모델 순서로 고유진동수 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 적용되는 경계조건의 종류에 따라 지반에서 고려되어야 하는 강성 값이 달라지며, 고유진동수 값이 민감하게 작용하는 것을 볼 수 있다. 지반의 강성이 충분히 고려될 수 있는 경계조건 모델을 적용한 고유진동해석을 수행하여 정확한 공진회피 진동수를 확보해야 한다.

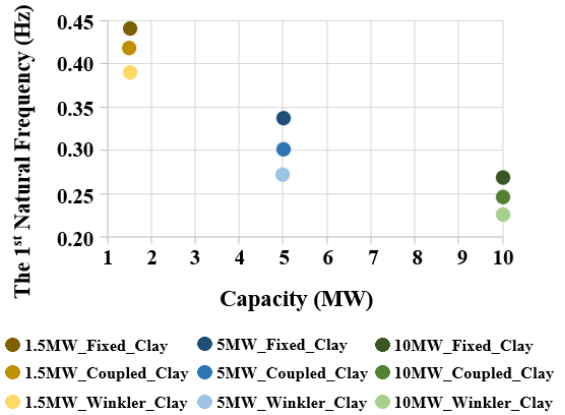


Fig 12. Comparisons of the 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Boundary Condition

Fig 13에서는 지반조건을 고려한 해석으로 나타내었으며, 5MW 급 풍력발전타워를 기준모델로 선정하였고, 1.5MW, 10MW 급 풍력발전타워는 비교 모델로 설정하였다. 지반의 조건에 따른 강성변화로 고유진동수 값에 영향을 확인하였다. Coupled Spring 경계조건 모델의 경우 혼합 지반에서 가장 영향을 많이 받고 있으며, 연약점토 지반, 모래 지반 순서로 영향성을 보였다. 반면, Winkler Spring 경계조건 모델의 경우 연약점토 지반에서 가장 영향을 많이 받으며, 혼합 지반, 모래 지반 순서로 영향성을 보였다. Coupled Spring 경계조건 모델은 지반강성의 깊이에 따른 평균으로 적용을 하며, Winkler Spring 경계조건은 깊이에 따라 지반강성을 적용하였기 때문에 고유진동수에 차이를 보인다고 판단한다.

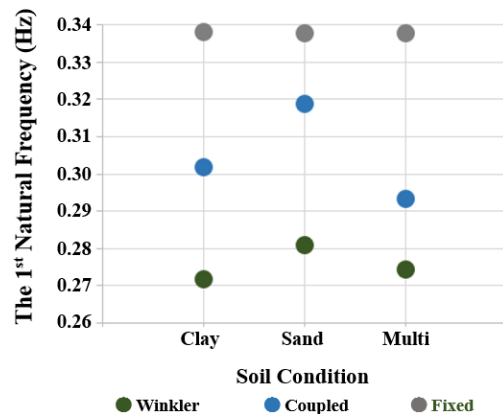


Fig. 13. Comparisons of the 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Soil Condition with 5MW

Table 4에서는 용량 별 풍력발전타워의 지반조건을 고려한 경계조건 해석으로 얻은 1차 고유진동수 값을 나타낸다.

Table 4. The 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Soil Condition

	Boundary Condition	Soft Clay	Sand	Multi Layer
1.5MW	Fixed	0.442	0.442	0.442
	Coupled	0.418	0.430	0.412
	Winkler	0.391	0.400	0.393
5MW	Fixed	0.338	0.338	0.338
	Coupled	0.302	0.319	0.294
	Winkler	0.272	0.281	0.274
10MW	Fixed	0.269	0.269	0.269
	Coupled	0.246	0.258	0.240
	Winkler	0.226	0.240	0.238

1.5MW 급 타워의 1차 고유진동수는 연약점토 지반에서 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 5.7%의 차이를 보였으며, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 13%의 차이를 보였다. 모래 지반에서는 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 2.8%의 차이를 보였으며, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 10.5%의 차이를 보였다. 혼합 지반에서는 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 7.3%의 차이를 보였으며, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 12.5%의 차이를 보였다.

5MW 급 타워의 1차 고유진동수를 확인한 결과, 연약점토 지반에서 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 11.9%의 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 24.3%의 차이를 보여주고 있다. 모래 지반은 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 6%의 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 20.3%의 차이를 보였다. 혼합 지반에서는 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 15%의 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 23.4%의 차이를 보여주고 있다.

10MW 급 타워의 1차 고유진동수를 확인한 결과 연약점토 지반에서 고정단 경계조건 모델과 Coupled

Spring 경계조건 모델이 9.4%의 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 19%의 차이를 보여주고 있다. 모래 지반에서는 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 4.3%의 차이를 나타내고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 12.1%의 차이를 보였다. 혼합 지반에서는 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델이 12.1%의 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델이 13%의 차이를 보였다. 1.5MW, 5MW, 10MW 급 타워의 1차 고유진동수를 분석한 결과, 고정단 경계조건 모델과 Coupled Spring 경계조건 모델은 혼합 지반에서 가장 큰 차이를 보여주고 있고, 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델은 연약 점토 지반에서 가장 큰 차이를 나타낸다.

Table 5는 근입깊이에 따른 고유진동해석 결과를 나타낸다. 10m, 20m, 30m 깊이 별 연구에서는 Winkler Spring 경계조건 모델이 짧아질수록 각 층에 대한 강성을 반영하지 못하여, Coupled Spring 경계조건 모델과 유사한 결과를 나타낸다.

Table 5. The 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Pile Depth

	Soft Clay	1.5MW	5MW	10MW
Fixed		0.442	0.338	0.269
Coupled		0.418	0.302	0.246
Winkler	10m	0.427	0.316	0.259
	20m	0.410	0.294	0.248
	30m	0.391	0.272	0.226

Fig 14에서는 지반조건에 관계없이 10m와 20m에서 각각 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 20m 이하의 지반은 깊이에 대한 영향을 받고 있지만, 지반조건에 영향을 받지 못하고 있으므로, 지반의 깊이가 20m 초과일 경우에 Winkler Spring 경계조건 모델을 사용하여 해석하고, 지반의 깊이가 20m 이하일 경우에는 Coupled Spring 경계조건 모델을 사용하여 해석하는 것이 효율적이라고 판단된다.



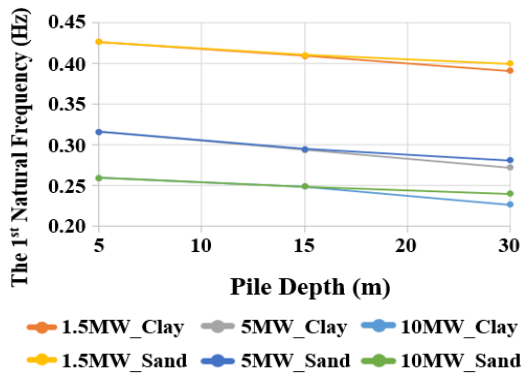


Fig. 14. Comparisons of the 1<sup>st</sup> Natural Frequency based on Pile Depth

근입깊이를 고려한 지반 경계조건 별 해석을 수행한 결과, 고정단 경계조건 모델은 지반의 영향을 받지 않으며 고유진동수가 일정하고, Coupled Spring 경계조건 모델은 지반 조건에는 영향을 받지만 지반의 깊이에 영향을 받지 않으며, Winkler Spring 경계조건 모델은 지반 조건과 깊이 모두 영향을 받는다. 풍력발전타워가 대용량화되면서 상부질량이 증가하게 되고 부차적으로 단면이 커지게 된다. 증가된 단면의 풍력발전타워를 지지하기 위해 기초의 근입깊이가 깊어진다. 따라서 다양한 지반조건을 고려해야하며, 적절한 지반 경계조건을 적용하여 정확한 공진회피 진동수를 계산해야한다.

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 용량 별 풍력발전타워가 지반 경계조건 및 모노파일 기초의 근입깊이를 고려했을 경우 고유진동수 해석결과에 미치는 영향을 확인하였다. 1.5MW, 5MW, 10MW의 용량 별로 고정단, Coupled Spring, Winkler Spring 경계조건 모델을 적용하였으며, 지반조건은 연약점토, 모래, 혼합으로 분류하여 지반과의 상호작용을 고려하였다. 또한 지반의 조건에 따라 10m, 20m, 30m의 근입깊이를 고려한 고유진동수 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1.5MW, 5MW, 10MW 급 타워의 1차 고유진동수를 비교한 결과, 대용량화 될수록 진동수가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.
- 고정단 경계조건 모델은 지반조건 및 근입깊이에

영향을 받지 않고, Coupled Spring 경계조건 모델은 지반조건에 영향을 받지만 근입깊이에 영향을 받지 않는다. 하지만, Winkler Spring 경계조건인 경우 지반조건과 근입깊이의 영향이 뚜렷하다.

- 고정단 경계조건 모델과 Winkler Spring 경계조건 모델을 비교하였을 때 5MW 급 풍력발전타워에서 최대 24.3%의 차이를 보이며, 1.5MW 급 풍력발전타워에서 최소 10.5%의 차이를 보인다. 고유진동수 값을 분석한 결과 지반 경계조건을 고려하지 않은 해석은 공진회피 진동수를 만족할 수 없게 되어 과도한 설계를 초래한다.
  - 근입깊이에 따른 해석을 통해 Winkler Spring 경계조건 모델은 근입깊이에 영향을 받지만, 깊이가 20m이하인 경우 지반조건이 고려되지 않는다. 따라서 지반조건이 고려되지 않는 20m 이하 지반에서는 복잡한 Winkler Spring 경계조건 모델 보다 간편한 Coupled Spring 경계조건 모델을 활용하여 구조해석 시 효율성을 높일 수 있다.
- 본 연구의 결과로 용량에 따른 경계조건과 지반조건, 근입깊이를 고려한 공진회피 진동수 산정을 위한 구조해석 방법을 제시하였다. 후속연구로는 상부 구조물과 타워, 기초의 상호작용을 고려하여, 전체 풍력발전시스템의 상호작용을 연구하고자 한다.

#### References

- [1] GL Guideline, "Guideline for the Certification of Wind Turbines", 2010.
- [2] P. Brian, P. Marty, C. Benjamin, G. David, D. Dwight, S. Charles, G. Benjamin, "Evaluate the Effect of Turbine Period of Vibration Requirements on Structural Design Parameters: Technical Report of Findings", Applied Physical Sciences/M10PC00066-8, 2010.
- [3] K. S. Lee, J. T. Lee, C. Y. Son, "A Study of Natural Frequency on Offshore Wind Turbine Structural Change", Proceeding of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp. 1008-1016, 2007.
- [4] C. Chantharasanawong, P. Jongpradist, S. Laoharatchapruerk, "Preliminary design of 1.5-MW Modular Wind Turbine Tower", The 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2011.
- [5] H. S. Jang, H. S. Kim, Y. M. Kwak, J. H. Park, "Analysis of Lateral Behavior of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation in Sandy Soil", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.25, No.4, pp.421-430, 2013.



DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2013.25.4.421>

- [6] M. Novak, "Dynamic Stiffness and Damping of Piles", Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, 1974.
- [7] H. Matlock, "Correlation for Design of Laterally Loaded Piles in soft Clays", Proceeding of the 2nd Annual OTC Dallas, Texas, 1970.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4043/1204-ms>
- [8] API, "Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design", Vol. 21 edition, API RP2A-WSD, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2002.
- [9] C. H. Choi, J. T. Han, S. D. Cho, Y. E. Jang, "The Effect of Flexibility for the Offshore Wind Turbine System", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, No. 4, pp. 59-66, 2013.
- [10] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.
- [11] J. B. Won, N. E. Kim, H. J. Eum, B. S. Kim, "A Study on Vibration Characteristics of 1.5 MW Wind Turbine under Earthquake", Journal of Korea Wind Energy Association, 2008.
- [12] S. M. Juung, S. R. Kim, J. H. Lee, C. H. Le, "Effect of Foundation Flexibility of Offshore Wind Turbine on Force and Movement at Monopile Head", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 13, No. 4, pp. 21-3, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.12814/jkgs.2014.13.4.021>
- [13] N. Stromblad, "Modeling of Soil and Structure Interaction Subsea", Chalmers University of Computational Mechanics, Master's thesis in Applied Mechanics, 2014.
- [14] R. Rubak, J. T. Petersen, "Monopile as Part of Aeroelastic Wind Turbine Simulation Code", Copenhagen Offshore Wind 2005 Conference and Expedition Proceedings, 2005.
- [15] DNV, "Wellhead Fatigue Analysis Method", Report no/DNV Reg No.: 2011-0063/ 12Q5071-26, 2011.

**김 평 화(Pyoung-Hwa Kim) [정회원]**



- 2014년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학부(공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과(석박사 통합과정)

<관심분야>  
구조공학, 구조해석

**강 성 용(Sung-Yong Kang) [정회원]**



- 2011년 8월 : 상명대학교 건설시 스태공학과(공학사)
- 2013년 8월 : 상명대학교 일반대 학원 시설공학과(공학석사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과(박사과정)

<관심분야>  
구조공학, 구조해석

**이 윤 우(Yun-Woo Lee) [정회원]**



- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학부(공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과(석박사통합과 정)

<관심분야>  
구조공학, 구조해석

**강 영 종(Young-Jong Kang) [정회원]**



- 1979년 3월 : 고려대학교 토목환 경공학과(공학사)
- 1983년 3월 : 고려대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1987년 9월 : Auburn univ(공학박 사)
- 1983년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경 정교수

<관심분야>  
비선형해석, 구조물건전도모니터링, 구조공학