

# 10 kW급 수직축 풍력터빈에 대한 구조물 동적응답 계측 및 분석

## Dynamic Response Measurements and Analysis on a 10 kW Class Vertical Axis Wind Turbine

이진학<sup>†</sup> · 김원술<sup>\*</sup> · 한택희<sup>\*</sup> · 임승률<sup>\*\*</sup>  
Jin-Hak Yi, Wonsul Kim, Taek Hee Han and Sungyul Yim

(Received November 17, 2016 ; Revised December 7, 2016 ; Accepted December 27, 2016)

**Key Words :** Vertical Axis Wind Turbine(수직축 풍력터빈), Dynamic Response(동적응답), Measurement(계측), Dynamic Characteristics Estimation(동특성 추정)

### ABSTRACT

The dynamic characteristics including natural frequencies and excitation frequencies are evaluated for a small 10 kW vertical axis wind turbine. Acceleration responses were measured at 12 distributed locations for impact vibration tests, ambient vibration tests during non-operational and operational conditions, and braking tests during operational condition. The natural frequencies for the lowest 2 bending modes and the first torsional mode were estimated and also the excitation frequencies, i.e. 1P, 2P, 4P, were also estimated according to the rotational speed using the responses under operational conditions (i.e. power generation condition).

### 기 호 설 명

- $G_{xx}(\omega)$  : 입력하중의 자기스펙트럼
- $G_{yy}(\omega)$  : 응답의 자기스펙트럼
- $H(\omega)$  : 주파수 응답함수
- $\Sigma(\omega)$  : 특이치 분해로 구한 특이치 행렬
- $U(\omega)$  : 특이치 분해로 구한 단위행렬
- $\mu_i$  :  $i$ 번째 모드의 모드질량
- $\omega_i$  :  $i$ 번째 모드의 고유주파수
- $\zeta_i$  :  $i$ 번째 모드의 모드감쇠비

### 1. 서 론

최근 세계적인 유가하락 및 국내 전력공급 여건

개선 등으로 인하여 전력거래에 있어 기준이 되는 계통한계가격(SMP, system marginal price)이 지속적으로 낮아지고 있으며, 이에 대한 향후 전망 역시 매우 불투명한 상태에 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 기존 풍력발전사업을 비롯한 신재생에너지 관련 사업의 수익성이 악화되고 있으며, 원가회수에 소요되는 기간이 기존보다 몇 년 늘어난 상태이다. 이와 같이 국내 전력수급 상태 및 발전원가만을 고려한다면 풍력발전 등 신재생에너지 관련 연구개발 및 투자 여건이 좋은 상황이라 할 수 없다. 그러나 원자력발전 중심의 국내 전력공급체계에 따른 에너지 안보 문제 해결 및 COP21 이후 강화되고 있는 탄소배출 의무 저감 차원에서 본다면 신재생에너지에 대한 연구개발 및 투자는 여전히 필요한 상황이라 할 수 있다<sup>(2,3)</sup>.

최근 풍력발전과 관련된 연구개발 동향을 보면

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Korea Institute of Ocean Science and Technology  
E-mail: yijh@kiost.ac.kr  
<sup>\*</sup> Korea Institute of Ocean Science and Technology  
<sup>\*\*</sup> Anyteksys

<sup>#</sup> A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference  
<sup>‡</sup> Recommended by Editor Hyung Jo Jung  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

수 MW급 상용발전과 관련하여 해상풍력발전 기술 등에 대한 내용과 중소규모 수십~수백 kW급 풍력발전기술에 대한 내용으로 구분할 수 있다. 중소규모 풍력터빈은 도심지에 대한 적용성이 높고, 또한 최근 많은 관심과 투자가 이루어지고 있는 에너지 자립섬 사업과 같이 독립전력체계구축사업에서도 필요한 규모의 기술이라 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

후자에서 언급한 중소규모 풍력터빈의 경우 양력식 또는 항력식, 수평축 또는 수직축, 2엽, 3엽, 또는 4엽 등 다양한 형태의 제품이 개발되고 있으며 기본적인 설계는 KS C IEC 61400-2에 따라 이루어지고 있으나<sup>(5)</sup>, 개별 터빈의 전체적인 구조동특성 및 모니터링 등에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 3엽 수평축 풍력터빈의 경우, 국내외에서 다양한 연구가 이루어진 바 있으며 국내에서도 타워 구조물에 대한 진동계측을 통하여 모드 특성을 분석한 바 있다<sup>(6)</sup>. 이 연구에서는 이와 같은 중소규모 풍력터빈 중 10 kW급 양력식 2엽 수직축 풍력터빈을 대상으로 동적응답을 계측하여, 주요 진동특성을 분석하고 향후 진동 및 피로에 대한 성능 개선이 가능하도록 하는 연구를 수행하였다. 국내 A사에서 개발하여 현재 운영 중인 2엽 수직축 풍력터빈을 대상으로 하였으며, 정지 시와 발전 시에 대하여 각각 가속도 응답을 계측하고, 실험모드해석(experimental modal analysis)을 수행하여 구조물의 고유주파수 및 가진주파수 등을 분석하였다.

이러한 연구는 향후 운영 조건을 고려하여 타워를 설계하거나 전체 시스템의 공진여부를 검토할 때 중요한 기초자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 대상 터빈 및 현장실험 개요

### 2.1 대상터빈

이 연구에 사용된 10 kW급 수직축 풍력터빈은 Fig. 1과 같이 2엽 터빈이며, 양력식 터빈으로 블레이드의 끝이 안쪽으로 굽은 윙렛(winglet) 형식을 채택하여 소음을 감소시킬 수 있도록 하고 있다. 기초 콘크리트 블록에서부터 너셀까지의 타워 높이는 10 m이며, 블레이드의 직경, 즉 2엽 블레이드 중심축 사이의 거리는 6.0 m, 그리고 블레이드 길이는 7.0 m이다. 로터 및 발전기는 동일한 제원의 2단 강



Fig. 1 Example wind turbine

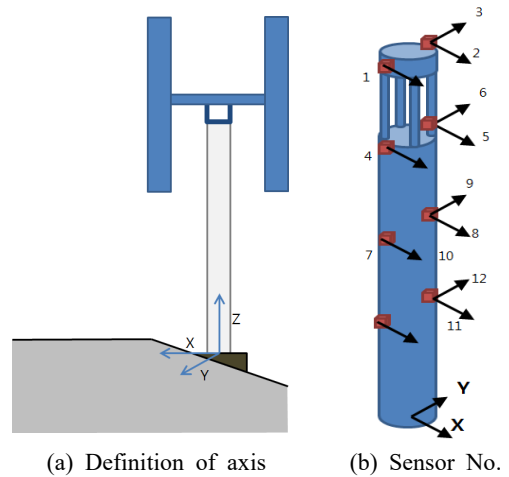
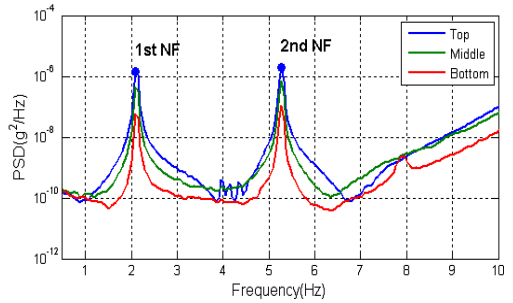
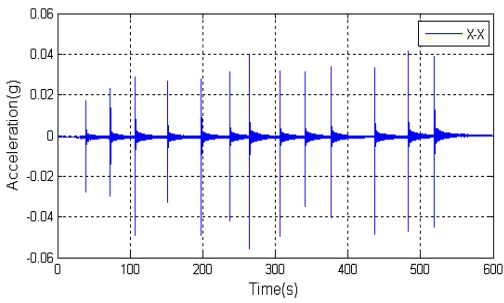


Fig. 2 Installed sensors

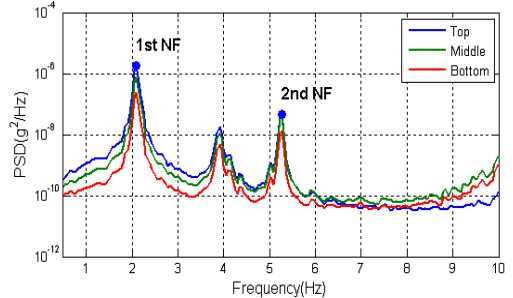
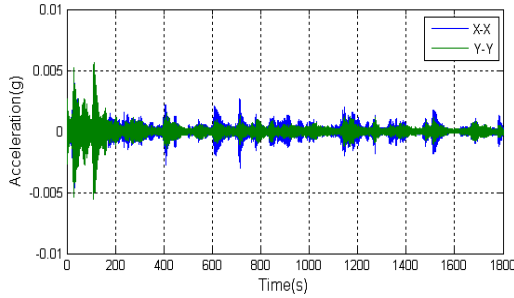
재타워로 지지되고 있으며, 타워의 직경 및 두께는 각각 800 mm, 25 mm이다.

### 2.2 현장실험

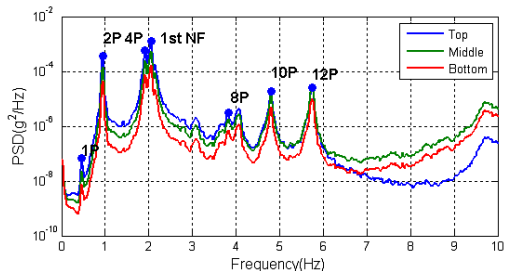
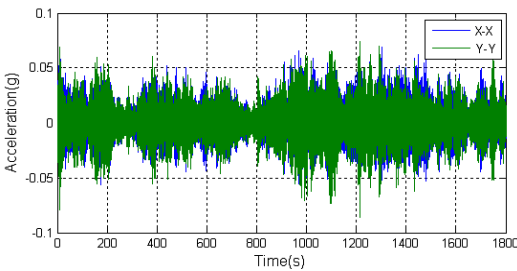
풍력터빈이 설치되어 있는 현장을 방문하여 가속도 응답을 계측하기 위하여 기초로부터 4 m, 7 m, 10 m, 12 m 높이에서 Fig. 2(a)에 제시되어 있는 바와 같이 X, Y, Z축을 정의할 때, X방향으로 2개 지점, 그리고 Y방향으로 1개 지점 등 총 12개 지점에 대하여 가속도계를 설치하였다.



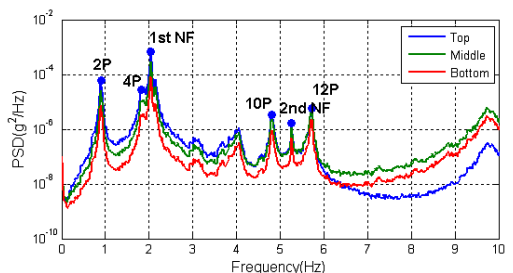
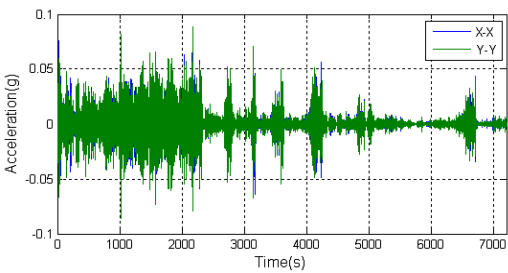
(a) Impact vibration tests



(b) Ambient vibration tests during non-operational condition



(c) Ambient vibration tests during operational condition



(d) Braking vibration tests during operational condition

**Fig. 3** Acceleration time history data and their PSD functions (NF and P denote the natural frequency and proportional, respectively)

이들 동안 진행된 실험에서 풍속 3 m/s 이하로 바람이 거의 불지 않은 첫째 날에는 터빈 정지 시 충격진동시험(IVT, impact vibration tests) 및 상시진동시험(AVT, ambient vibration tests)을 수행하였고,

풍속 7 m/s ~ 10 m/s로 풍황조건이 비교적 양호하였던 둘째 날 오전에는 발전 시 상시진동시험 및 정지 시험(BT, braking test)을 수행하였다.

Fig. 3은 각각의 실험을 통하여 계측된 가속도계

응답 신호와 이들의 PSD 함수를 정리한 것으로 로터가 회전하지 않는 조건에서 실시한 충격시험과 상시진동시험, 그리고 로터가 회전하는 발전 시 상시진동시험 및 정지시험의 특성을 살펴볼 수 있다. 가속도 시계열을 보면, 충격시험과 정지시험을 통하여 자유진동신호(free vibration response)를 얻을 수 있음을 알 수 있고, 크기만 비교할 때 동일한 상시진동시험이라 하더라도 발전 시, 즉 로터가 회전하고 있을 때 상시진동 응답 크기가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 주파수 영역 결과를 볼 때, 로터가 회전하지 않는 경우에는 로터 회전에 따른 가진력의 주파수 성분이 배제된 구조물의 모드에 따른 주파수 성분을 PSD 함수로부터 구할 수 있으며, 로터가 회전하는 경우에는 구조물 모드에 해당하는 고유주파수 외에 가진력의 주파수 성분을 동시에 구할 수 있음을 알 수 있다.

**2.3 실험모드해석**

이 연구에서는 여러 실험모드해석 방법 중 최소자승법(LSM, least-square method)과 주파수영역분해(FDD, frequency domain decomposition) 방법<sup>(7)</sup>을 기반으로 제안된 LS-FDD 방법<sup>(8)</sup>을 이용하여 풍력터빈의 모드를 분석하였다. FDD 방법은 구조물에 작용하는 하중이 비교적 넓은 주파수 영역에서 일정한 주파수 성분을 가지고 있을 때 식 (1)과 같이 구조물 응답의 PSD(power spectral density) 함수 ( $G_{yy}(\omega)$ )를 특이치 분해(SVD, singular value decomposition)함으로써, 근사적으로 주파수 응답함수(FRF, frequency response function)를 구할 수 있고, 이로부터 모드형상이나 고유주파수 등을 구할 수 있다는 사실에서 출발하고 있다. 여기서 고유주파수는 대각행렬인 특이치 행렬( $\Sigma(\omega)$ )의 첫 번째 특이치( $\sigma_1$ )의 정점(peak)을 읽음으로써 구할 수 있는데, 이는 첫 번째 특이치의 형태가 고유주파수를 중심으로 단자유도 시스템의 주파수 응답함수와 근사적으로 일치하기 때문이다<sup>(7)</sup>.

$$G_{yy}(\omega) = H(\omega)G_{xx}(\omega)H^*(\omega) = U(\omega)\Sigma(\omega)U^*(\omega) \tag{1}$$

LS-FDD에서는 FDD 방법을 이용하여 구한  $i$  번째 모드를 고유주파수로 갖는 단자유도 시스템의 FRF로부터 최소자승법을 이용하여 식 (2)의 FRF에

포함되어 있는  $\mu_i$ ,  $\omega_i$  및  $\zeta_i$ 를 구하게 된다.

$$H_i(\omega) = \frac{q_i}{f_i} = \frac{1/\mu_i}{-\omega^2 + i(2\zeta_i\omega_i)\omega + \omega_i^2} \tag{2}$$

**2.4 실험모드해석 결과**

로터가 회전하지 않는 조건에서의 충격시험 및 상시진동시험을 통하여 추정된 고유주파수 등을 Tables 1, 2에 정리하였다. Fig. 3에서 제시한 바와 같이 로터가 정지한 상태에서의 충격시험과 상시진동시험에서는 특정한 가진력의 주파수 성분(excitation frequency component)은 찾을 수 없고, 구조물의 동특성인 1차 및 2차 모드의 고유주파수를 찾을 수 있다. 2차 모드의 경우 추정되지 않은 경우가 있었지만 충격시험과 상시진동시험 결과는 거의 유사함을 알 수 있다. 한편, X-X 방향의 1차 주파수와 Y-Y 방향의 1차 주파수가 각각 2.1 Hz, 2.2 Hz로 5% 정도 상대적인 차이가 있는데, 이는 Fig. 3(a)에서 제시한 바와 같이 X-X 방향과 Y-Y 방향으로의 기초 콘크리트 블록이 지반에 묻힌 상

**Table 1** Natural frequencies by IVT

	X-X direction		Y-Y direction	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
1st IVT	2.109	5.277	2.181	5.255
2nd IVT	2.096	-	2.193	-
3rd IVT	2.092	5.297	2.199	5.299
Average	2.099	5.287	2.191	5.277
COV*	0.414	0.269	0.409	0.594

\* COV denotes the coefficient of variation

**Table 2** Natural frequencies by AVT

	X-X direction		Y-Y direction	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
1st AVT	2.086	5.245	2.187	5.290
2nd AVT	2.096	5.269	2.195	5.294
3rd AVT	2.108	-	2.200	5.302
4th AVT	2.105	-	2.189	5.296
5th AVT	2.101	-	2.199	5.300
Average	2.099	5.257	2.194	5.296
COV*	0.405	0.316	0.257	0.090

\* COV denotes the coefficient of variation

태가 동일하지 않기 때문에 발생하는 차이라고 할 수 있다. 경계조건에 의한 영향이 1차 모드에 비하여 상대적으로 작은 2차 모드의 경우, X-X 방향과 Y-Y 방향의 고유주파수가 거의 동일함을 알 수 있다.

한편, 블레이드가 회전할 때 계측한 상시진동시험과 급정지 시험을 통하여 계측한 신호에서는 Fig. 3(c), (d) 및 Table 3과 4에서 제시한 것과 같이 로터 회전에 따른 가진주파수(excitation frequency)를 분석할 수 있다. 3엽 터빈의 경우 1P, 3P, 6P의 주기 성분(harmonic frequency component)이 발생하는데 비하여<sup>(9)</sup>, 2엽 터빈의 경우 Fig. 2(c)(d)에서와 같이 1P, 2P, 4P 등의 주기 성분이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 실험을 수행한 풍속조건에서 로터의 회전수는 27 r/min ~ 29 r/min이었으며, 이러한 로터 회전수에서의 4P 성분의 경우 구조물의 1차 고유주파수와 매우 근접한 1.80 Hz ~ 1.93 Hz로 회전수가 증가할 경우 1차 모드와의 공진이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 한편 정지시험 시의 계측응답을 이용하여 분석한 1P, 2P, 4P 등 가진주파수 성분은 상시진동시험의 값보다 작는데 이는 급정지 시험을 수행할 때 풍속이 감소하였고 이에 따라 로터의 회전수도 약간 감소하였기 때문이다. 한편 급정지 시험을 통하여 자유진동응답(free vibration responses)을 얻을 수 있는데, 특히 타워의 중심축을 축으로 회전하는 로터를 정지시켰기 때문에 타워의 비틀림 응답이 지배적으로 발생한다. Fig. 4는 동일 높이에서의 가속도 차를 센서 간 거리(0.8 m)로 나눈 각가속도의 PSD로 이를 통하여 첫 번째 비틀림 모드가 21.1 Hz에 있음을 추정할 수 있다.

한편 1차 모드의 고유주파수를 보면, 로터가 회전하지 않는 조건에서의 충격시험 및 상시진동시험에

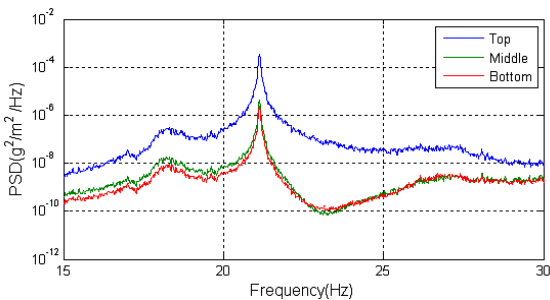


Fig. 4 PSD of angular acceleration response

의한 X-X 방향의 경우, 2.099 Hz로 추정된 반면, 로터가 회전하는 조건에서의 상시진동시험 및 급정지시험의 경우 2.039 Hz ~ 2.051 Hz로 추정됨을 알 수 있다. 즉 로터가 회전하지 않을 때보다 2.3% ~ 2.9% 감소됨을 알 수 있다. 이는 풍속이 낮아 로터가 회전하지 않는 경우에 비하여, 상대적으로 풍속이 높아 로터가 회전하고 또한 발전하는 경우 하중이 증가하고, 이에 따라 변위가 증가하여 시스템의 강성이 감소하는 효과로 판단할 수 있다. 이러한 하중 증가 등의 효과는 가속도 응답의 크기로도 간접적으로 확인할 수 있다. 즉, 1차 모드가 발생하는 주파수를 중심으로 분석할 때, 로터가 회전하지 않는, 즉 풍속이 낮은 조건에서의 PSD값이 대략  $10^{-6} \text{g}^2/\text{Hz}$  수준인 반면, 로터가 회전하는, 즉 풍속이 높은 조건에서의 PSD값은 대략  $10^{-4} \text{g}^2/\text{Hz}$  수준임을 알 수 있다. 한편 이러한 비선형성은 기초 콘크리트 블록과 지반 사이의 상호작용에서 비롯된다고 사료된다. 특히 강제 정지시험을 수행할 때의 감소량이 더 큰 것은 강제 정지 시 더 큰 하중이 발생하였음을 의미한다.

Table 3 Natural frequencies and excitation frequencies estimated by AVTs during operational condition

Modes	X-X direction		Y-Y direction	
	Freq.(Hz)	Freq./Freq.(1P)	Freq.(Hz)	Freq./Freq.(1P)
1P	0.4639	1.0000	0.4639	1.0000
2P	0.9521	2.0526	0.9521	2.0526
4P	1.9043	4.1053	1.9043	4.1053
1st mode	2.0508	-	2.1484	-

Table 4 Natural frequencies and excitation frequencies estimated by braking tests

Modes	Operational test	Braking test
	Freq.(Hz)	Freq.(Hz)
1P	0.4639	N/A
2P	0.9521	0.9033
4P	1.9043	1.8311
1st bending mode	2.0508	2.0386
2nd bending mode	N/A	5.2612
1st torsional mode	N/A	21.1182

### 3. 결 론

충격진동실험과 상시진동실험, 급정지실험 등을 통하여 10 kW급 소형 수직축 풍력터빈 구조물의 주요 저차 모드 고유주파수를 추정하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 굽힘모드의 경우 모든 실험을 통하여 주요 저차 모드의 고유주파수를 추정할 수 있었으며, 비틀림 모드의 경우 비틀림 응답을 크게 발생시킬 수 있는 급정지실험을 통하여 추정할 수 있었다.

(2) X-X 방향으로의 고유주파수와 Y-Y 방향으로의 고유주파수가 4.5 % 차이가 있는 것으로 분석되었으며, 이는 기초 콘크리트 블록이 지반에 묻힌 조건이 서로 동일하지 않기 때문이며, Y-Y 방향으로의 지반 강성이 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

(3) 실험 당시 로터는 27 r/min ~ 29 r/min으로 회전하였으며, 로터의 회전주파수에 해당하는 1P 성분을 비롯하여 2P, 4P 가진주파수 성분을 확인할 수 있었다. 이러한 가진주파수를 구조물의 고유주파수와 비교할 때, 구조물의 X-X 방향 1차 모드의 고유주파수와 4P 가진주파수가 각각 2.1 Hz와 1.9 Hz로 매우 근접하여, 4P 성분의 영향이 풍력터빈 구조물의 전체적인 동적 안정성에 매우 중요한 가진성분임을 확인하였다.

(4) 구조물의 공진회피설계와 관련하여 기존 3엽 수평축 풍력터빈의 경우, 구조물의 고유주파수가 1P와 3P 가진주파수를 회피하도록 설계하는데 비하여, 이 연구에서 다루고 있는 2엽 수직축 풍력터빈의 경우 4P 가진주파수를 회피할 수 있도록 하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

(5) 풍속이 높아져 로터가 회전하고 외력이 증가하는 경우, 풍력터빈 구조물의 1차 고유주파수가 2.3% ~ 2.9% 정도 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이는 기초 콘크리트 블록과 지반 사이의 비선형 지반-구조물 상호작용의 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이, 이 연구에서의 대상 풍력터빈의 경우 로터의 회전수가 30 r/min ~ 32 r/min인 구간에서 구조물의 1차 고유주파수인 2.1 Hz와 일치하

여 공진을 일으킬 수 있는 가능성이 높음을 이번 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서 이와 같이 공진 발생 가능성이 있는 경우, 구조물의 강성 또는 질량에 대한 설계 변경을 통한 고유주파수 변경 또는 공진회피를 위한 제어기법 도입<sup>(10)</sup> 등이 필요할 것으로 사료된다.

### 후 기

이 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호 12기술혁신E09) 및 한국해양과학기술원 주요사업(PE9944D)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### References

- (1) E2News Article, (<http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=94179>)
- (2) Jang, Y.-C., Bang, K.-Y., Lee, K.-Y. and Kim, K.-N., 2014, Analysis of Energy Security by the Diversity Indices: A Case Study of South Korea, Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 93~101.
- (3) Articles in Special Theme, Green Energy Technology Insight, Vol. 7, No. 1, pp. 20~37.
- (4) Jeong, M.-S., Moon, C.-J., Chang, Y.-H., Park, T.-S., Kim, Y.-G. and Son, C.-G., 2015, A Study on Wind Turbine Power Generation Predictions Applies to Energy Independence Island, Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, p. 92.
- (5) KS C IEC 61400-2, Wind turbines-Part 2: Small Wind Turbines.
- (6) Kim, S., Nam, Y. S. and Eun, S., 2005, Vibration Characteristics of the Tower Structure of a 750 kW Wind Turbine Generator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 219~224.
- (7) Brinker, R., Zhang, L. and Andersen, P., 2000, Modal Identification from Ambient Response Using Frequency Domain Decomposition, Proceedings of 16th International Modal Analysis Conference, San Antonio, Texas, USA, pp. 625~630.
- (8) Yi, J.-H., Park, J.-S., Han, S.-H. and Lee, K.-S.,

2013, Modal Identification of a Jacket-type Offshore Structure Using Dynamic Tilt Responses and Investigation of Tidal Effects on Modal Properties, *Engineering Structures*, Vol. 49, pp. 767~781.

(9) Osgood, R. M., 2001, Dynamic Characterization Testing of Wind Turbines, NREL/TP-500-30070.

(10) Licari, J., Ekanayake, J. and Jenkins, N., 2003, Investigation of a Speed Exclusion Zone to Prevent Tower Resonance in Variable-speed Wind Turbines, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 977~984.



**Jin-Hak Yi** received a Ph.D. degree in Dept. of Civil Engineering from KAIST in 2001. He is currently working in Korea Institute of Ocean Science and Technology as a principal research scientist.

His research areas are the structural health monitoring, damage assessment and reliability analysis for civil infrastructures, and the development of ocean renewable energy systems.



**Wonsul Kim** received a Ph.D. degree in Dept. of Architectural Engineering from Tokyo Polytechnic University, Japan in 2010. He is working in Korea Institute of Ocean Science and Technology as a post doctoral scientist from 2015.

His research areas are the wind resistant design of tall buildings, the structural health monitoring and damage assessment of infrastructures.



**Taek Hee Han** received a Ph.D. degree in Dept. of Civil and Environmental Engineering from Korea University in 2006. He is currently working in Korea Institute of Ocean Science and Technology as a principal research

scientist. His research areas are the composite columns, underwater structures, buckling analysis of coastal structures, and the development of supporting structures for ocean renewable energy systems.



**Sungyul Yim** received a Ph.D. degree in Global School of Media from Soongsil University in 2011. He was working in Kaywon University of Art and Design as an assistant professor between 2013 and 2014, and he is currently working in Anyteksys Ltd. as a director.

He is developing small and medium scale wind turbines for urban area applications.