

하부구조를 포함한 5MW 급 천해용 해상 풍력발전기 구조진동해석 Structural Vibration Analyses of a 5 MW Offshore Wind Turbine with Substructure

김동환* · 김동현[†] · 김명환* · 김봉영**

Dong-Hwan Kim, Dong-Hyun Kim, Myung-Hwan Kim, and Bong-Yung Kim

Key Words : Offshore Wind Turbine(해상풍력발전기), Substructure(하부구조), Equivalent Modeling(등가 모델링), Structural Vibration(구조진동), FEM(유한요소법)

ABSTRACT

In this study, structural vibration analyses for a 5MW offshore wind turbine model have been performed for different substructure models. The efficient equivalent modeling method based on computational multi-body dynamics are applied to the finite element models of the present offshore wind turbines. Monopile and tri-pod substructure types of the typical offshore wind-turbine are considered herein. Detailed finite element modeling concepts and boundary conditions are described and the comparison results for previous analyses are presented in order to show the verification of the present numerical approach. Campbell diagrams are also present to investigate the rotational resonance characteristics of the offshore wind-turbines with different substructures.

1. 서 론

IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기표준회의)규정에 따르면 해상 풍력발전기는 크케 로터-나셀 조립체(rotor-nacelle assembly) 및 지지구조물(supporting-structure)의 2 개 부분으로 나누어지게 된다. 이 지지구조물은 타워(Tower), 하부구조(Sub structure)와 기초(Foundation)로 구분된다⁽¹⁾. 그 중 하부구조물과 기초의 시공 방식은 크게 monopile, gravity base, jacket, tripod, tri-pile, high rise pile cap 그리고 floating 방식으로 나눌 수 있다.

NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서는 표준 5MW 급 풍력발전 시스템의 개발을 위해 NREL FAST 및 NREL ADAMS 구조해석 프로그램을 사용하여 상호 검증하였다. 또한 천해용 풍력발전기 시스템 설계해석 및 비교를 위해 monopile 및 tripod

하부구조물 모델에 대해 FAST, FLEX5, Bladed 등 다양한 풍력발전기 전용해석 프로그램으로 해석한 결과들을 비교한 사례가 있다⁽²⁾. 본 연구에서는 전산다물체동역학 및 등가모델링 해석기법을 적용하여 하부구조를 포함한 5MW 급 천해용 해상용 풍력발전기 모델에 대한 구조진동 해석을 수행하였으며, 기존 해석결과와 비교하고 특성을 분석하였다.

2. 전산다물체동역학 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 5MW 블레이드의 3D 및 등가 강성 유한요소 모델링 형상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 전산 다물체 구조동역학 해석을 위해 SAMCEF 프로그램을 활용하였다. 임의의 구간을 나누어 각각의 질량 중심에 대하여 3차원 집중 질량 요소로 모델링 한 후, 탄성축에 대하여 질량이 없는 강체 빔 요소로 연결하였다. 강체 빔 요소는 굽힘 강성(EI) 및 비틀림 강성(GJ) 값들을 고려한다⁽³⁾. 적절히 분할된 각 날개부 구조의 질량은 NREL에서 제시한 5MW 급 풍력발전기 블레이드의 테이터를 계산하여 적용하였다. 또한 허브와 연결시 blade pitch actuator spring을 부여하여 블레이드의 회전효과를 고려하였으며 관련된 물성치는

[†] 교신저자; 정회원, 경상대학교 항공우주시스템공학과 및 그린에너지융합연구소

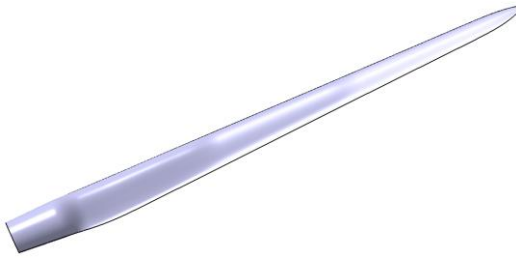
E-mail : dhk@gnu.ac.kr

Tel : 055-755-2083, Fax : 055-755-2081

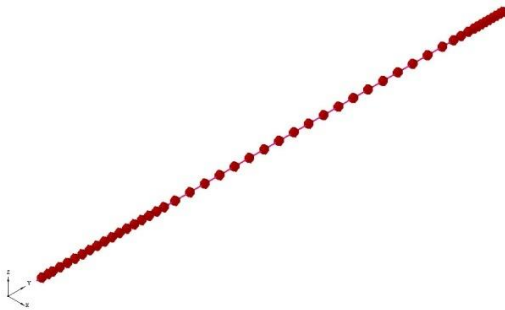
* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

** 씨에이코리아(주) 부설연구소

Table 1에 제시하였다.



(a) Three-dimensional configuration



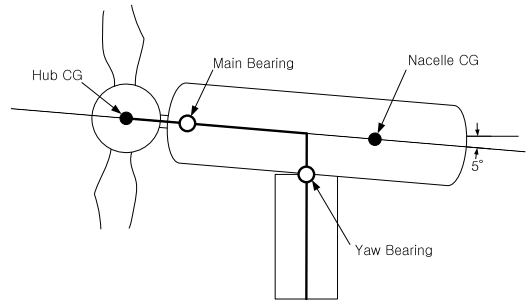
(b) Equivalent FE beam model

Fig. 1 5MW blade model for offshore wind-turbine.

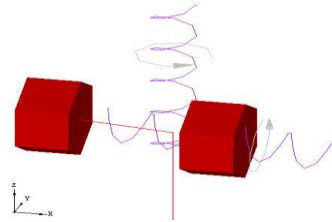
Table 1 Properties of the 5MW offshore blade model

Blade Length	61.5 m
Overall Mass	17,740 kg
Structural-Damping Ratio	0.477465 %
Blade Pitch Actuator Spring	971.35×10^6 (Nm/rad)

Fig. 2에서 나셀과 허브의 등가 모델링 기법의 컨셉과 경계조건을 보여주고 있다. 허브의 질량 중심에 허브 전체의 집중 질량을 허브의 질량 관성 모멘트를 고려하여 모델링 하였고, 마찬가지로 나셀의 질량 중심에 나셀의 전체 질량 및 파워트레인의 질량 및 질량 관성 모멘트를 고려하여 집중 질량으로 모델링 하였다. 또한 main bearing 부분에는 drivetrain torsional spring을 부여하여 LSS(Low Speed Shaft)의 회전 효과를 고려하였고, yaw bearing 부분에도 마찬가지로 yaw bearing spring을 부여하여 나셀의 회전 효과를 고려하였다. 나셀과 허브의 등가 모델링에 사용된 물성치는 Table 2와 같다.



(a) Rotor and nacelle modeling



(b) Equivalent FE model

Fig. 2 Equivalent beam and concentrate mass models for hub and nacelle parts.

Table 2 Properties of the 5MW offshore wind-turbine system

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blade
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-in, Rated, Cut-out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110,000 kg
Hub Mass	56,780 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Mass	347,460 kg
Yaw Bearing Spring Constant	9028.32E6 (Nm/rad)
Main Bearing Spring Constant (Drivetrain Torsional Spring)	867.637E6 (Nm/rad)

Table 3 Material properties of the tower

Young's Modulus	210 GPa
Density	8,500 kg/m ³
Poisson's Ratio	0.3

하부구조를 제외한 타워의 타워 높이는 87.6 m 이고, 기초 직경은 6 m, 두께 0.027 m 이고 타워 끝 직경은 3.87 m, 두께 0.019 m 로 위로 올라갈수

록 직경과 함께 두께 또한 얇아지는 구조를 가지고 있다. 타워의 재질은 steel 계열이며 관련 물성치를 Table 3에 제시하였다.

Fig. 3 은 NREL 에서 제시한 5MW 급 해상풍력 발전기 데이터를 기반으로 본 연구에서 CATIA 프로그램을 활용하여 직접 3 차원 모델링한 형상을 보여주고 있다. 본 논문에 제시하지는 않았지만 연구팀에서는 구축된 3 차원 형상에 대해 CFD 를 활용하여 바람의 난류효과(turbulent effect), 고도에 따른 수직방향 경계층효과(wind-shear) 및 바람방향에 대한 나셀의 yaw 오차에 대한 영향 등을 심도 있게 진행 중이다. 대형 풍력발전기의 구조진동 및 다물체 동역학 해석에서는 다양한 문제에 대한 효율적인 해석과 모델의 용이한 보정을 위해 본 연구에서와 같이 대부분 등가구조모델링 또는 등가모델링, 슈퍼 요소 및 3 차원 유한요소 모델링 기법을 혼합한 하이브리드 모델링 기법⁽⁴⁾이 활용된다.



Fig. 3 Three-dimensional configuration of the present 5MW offshore wind-turbine without substructures.

3. 해석결과 및 검토

3.1 Phase I Model (Monopile with Rigid Foundation)

Fig. 4는 천해용 풍력발전기의 기본이 되는 Phase I 유한요소 모델을 보여주고 있다. MSL(Mean-Sea level)에서 10 m 위에서부터 타워가 시작되고, 하부 구조물은 MSL에서 20 m 아래 지반까지 monopile로

이어져있다. monopile의 끝 지점에서 6 자유도 모두 구속하여 지지하였고, 블레이드, 나셀, 타워를 연결하는 node 들은 각각의 변위와 모멘트를 전달하는 요소로 연결하였다. 이러한 경계조건 개념은 이후의 모델에서 모두 유사하게 적용 되었다.

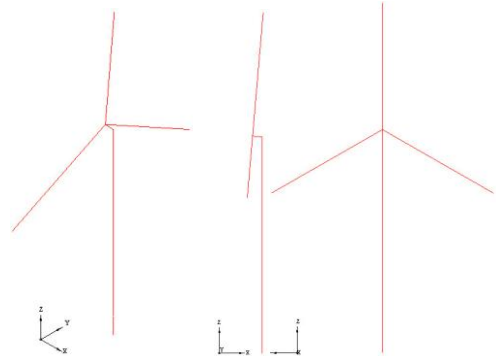


Fig. 4 Finite element equivalent beam model for the 5MW offshore wind-turbine (Phase I Model).

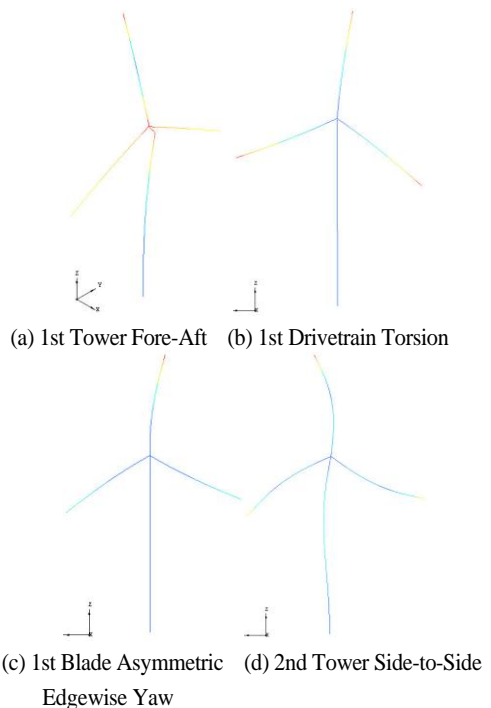


Fig. 5 Natural mode shapes of Phase I Model.

Monopile 하부구조를 가지는 5MW급 해상용 풍력 발전기 모델의 기본진동 및 회전공진특성을 파악해 보기 위해 Fig. 5에는 대표적인 고유진동 모드를 나타내었으며, 회전 속도에 따른 Campbell 선도를 Fig.

6에 제시하였다. Fig. 5에서 (a)~(d) 순서대로 타워의 앞뒤방향 진동, drivetrain 진동, 블레이드의 진동 및 타워의 2차 모드 형상을 보여주고 있다. 다물체동역학 해석은 회전관성 효과를 고려한 정적해석을 수행한 후 고유진동해석을 연속하여 수행하는 방식으로 진행되었다. 결과를 보면 타워설계에서 물리적으로 공진 불안정 진동이 가장 큰 1/rev 가진 성분에 대해서 약 16~17 rpm 정도까지 공진안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 그 외 2/rev 및 3/rev 가진 성분에 대해서는 비교적 저회전 RPM에서 바이패스 하는 개념으로 설계되었음을 볼 수 있다.

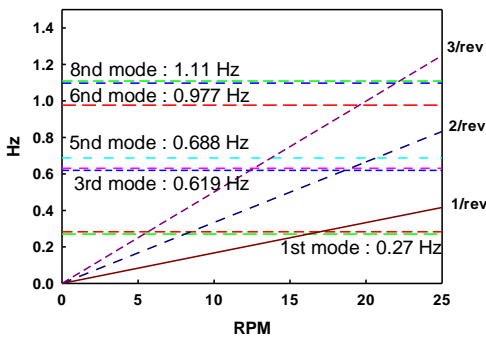


Fig. 6 Campbell chart of 5MW Phase I model.

Phase I 모델의 진동해석 및 비교결과로 고유진동 모드 형상에 따른 고유진동수 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 본 연구에서의 해석결과에서 총 13개의 모드 중 특히 타워와 허브 및 나셀 부분의 고유진동수 및 모드 형상은 정확히 일치하고 있음을 볼 수 있다.

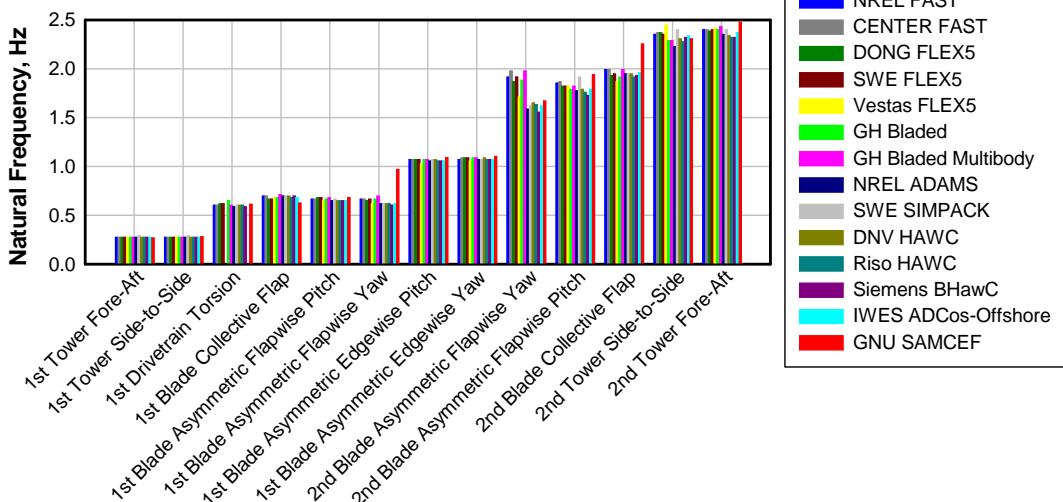


Fig. 7 Comparison of natural frequencies for 5MW offshore wind-turbine (Phase I Model).

블레이드와 관련된 고유진동수 중 일부는 기존의 해석결과에 비해 다소 높은 고유진동수를 보이고 있는데 이는 추가적인 검토를 수행하고 있다.

3.2 Phase II Model (Monopile with flexible foundation)

Fig. 8은 연성기초에 세워지는 Phase 2 모델의 유한요소 모델링 형상을 보여주고 있다. 연성 기초에 적용되는 등가 빔 모델은 총 세가지로 나누어진다. Fig. 9의 개념도처럼, 첫 번째 지반에 묻힌 타워의 끝단을 고정하여 모델링 하는 방법, 두 번째 타워가 지반과 만나는 지점에서 등가 스프링 요소를 이용하여 진흥의 감쇠를 고려하는 방법, 세 번째 진흥의 성질에 따른 pile부의 천공 깊이에 따라 스프링 요소의 강성을 달리하여 모델링 하는 방법이 있다. 하지만 기존의 선행연구 결과를 검토해 보면 위에서 언급한 연성 기초에 대한 효과는 본 모델의 경우 고유진동수 수준으로 최대 0.3 Hz 정도 차이를 유발하고 있다(Fig. 10). 이는 풍력발전기의 거시적인 진동 특성 관점에서는 큰 영향이 없는 것으로 고려할 수 있으므로 본 연구에서는 Fig. 9의 경계조건에서 첫 번째 기법을 적용하여 Phase II 모델에 대한 진동해석을 수행하였다⁽⁴⁾.

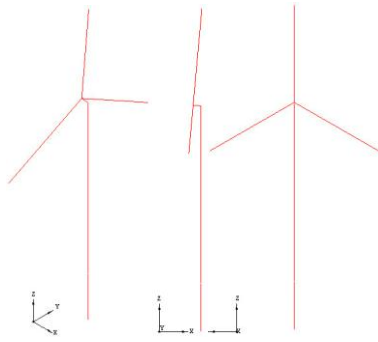


Fig. 8 Finite element equivalent beam model for the 5MW offshore wind-turbine (Phase II Model).

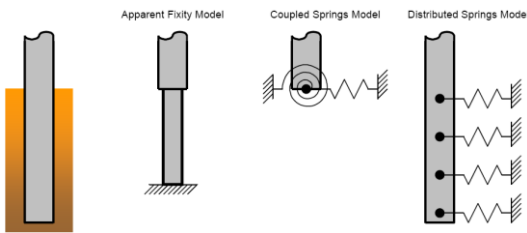


Fig. 9 Structural boundary conditions for the monopile substructure with flexible foundation.

Phase II 모델의 경우 타워는 MSL에서 10 m인 지점에서 시작하며, MSL에서 mudline까지 20 m, mudline에서 36 m 깊이까지 monopile이 박혀있는 구조이고 끝단에서 6 자유도 모두 구속하였다. 정리된 결과값은 Fig. 11에 도시하였고, 전 영역에서 고유진동수 값이 일치함을 확인하였다. Phase II 모델의

진동해석 결과 대표적인 고유진동모드에 대해 Fig. 12에서 (a)~(d) 순서대로 타워의 앞뒤방향 진동, drivetrain 진동, 블레이드의 진동 및 타워의 2차 모드 형상을 보여주고 있다.

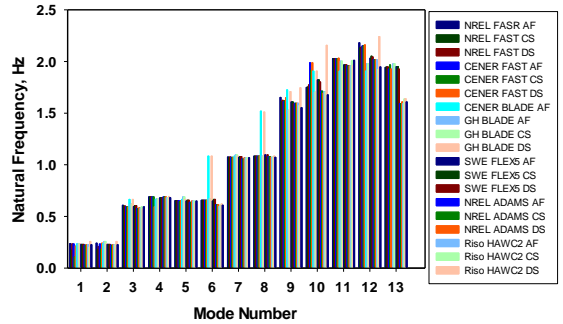
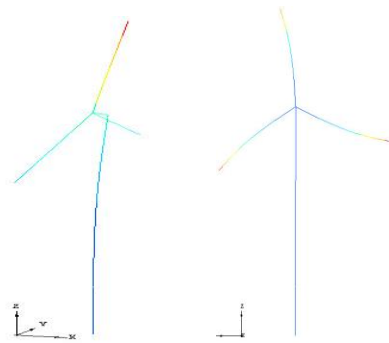


Fig. 10 Full-system natural frequencies from Phase II model.



(a) 1st Tower Fore-Aft (b) 1st Drivetrain Torsion
Fig. 12 Natural mode shapes of Phase II Model.

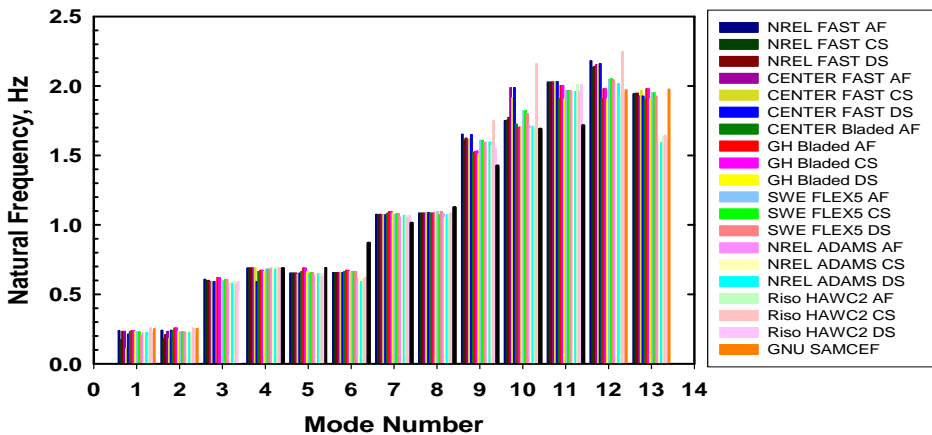


Fig. 11 Comparison of natural frequencies for 5MW offshore wind-turbine (Phase II Model).

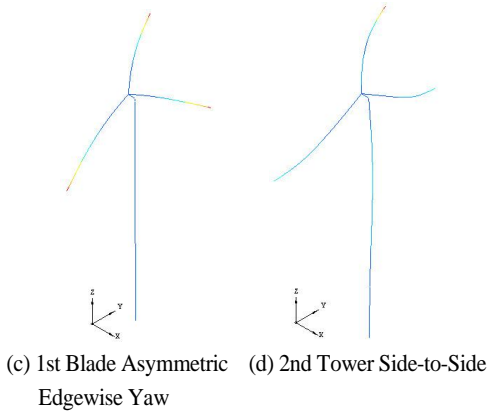


Fig. 12 Continued.

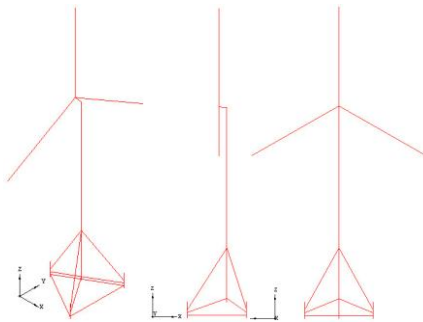


Fig. 13 FEM equivalent beam model of 5MW wind turbine Phase III.

3.3 Phase III Model (Tripod Support)

Fig. 13은 OC3 Phase 3의 경우로 수심 45 m의 강성기초에 세워진 5MW 해상풍력발전기 유한요소 등가 빔 구조모델을 보여주고 있다. Monopile 3개가

지반에 박혀있고, 하부 tripod 구조가 monopile과 연결되어 있는 구조로 수심이 깊은 곳에 설치 가능한 친환경 풍력발전기이다. 각각의 monopile 끝단에 대해 6 자유도 모두 구속하였고, 진동해석 및 비교 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 일부 모드를 제외하고는 대체적으로 기존의 해석결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 15에는 저차 고유모드 형상을 나타내었는데 (a)~(d) 순서대로 타워의 앞뒤방향 진동, drivetrain 진동, 블레이드의 진동 및 타워의 2차 모드 형상을 보여주고 있다. Phase III 모델 역시 회전관성을 고려한 고유진동 해석을 수행하여 Fig. 16과 같은 결과를 도출하였다. 결과를 보면 1/rev 가진 성분에 대해서 약 17~18 rpm 정도까지 공진안정성을 확보하고 있고, 그 외 2~4/rev의 가진 성분들에 대해서는 저회전 구간에서 바이패스 하는 개념으로 설계 되었다.

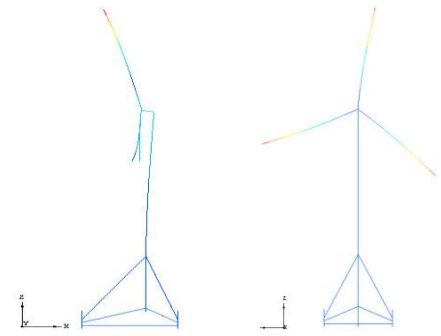


Fig. 15 Natural mode shapes of Phase III Model.

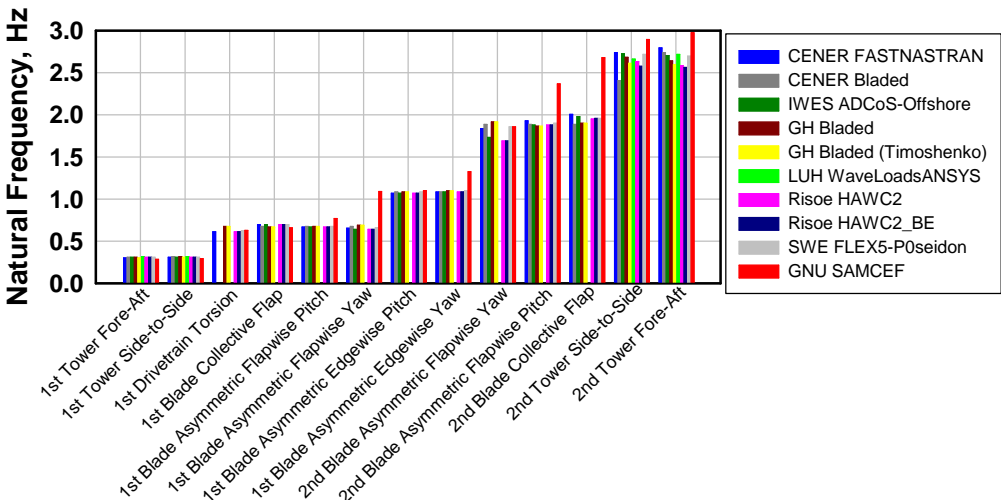


Fig. 14 Comparison of natural frequencies for 5MW offshore wind-turbine (Phase III Model).

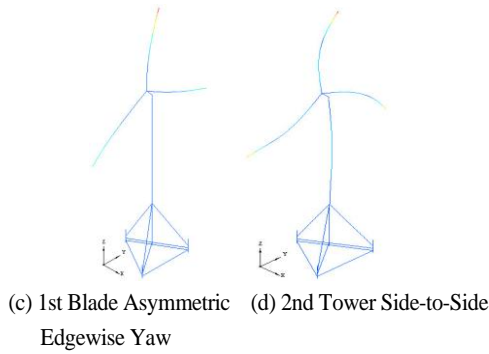


Fig. 15 Continued.

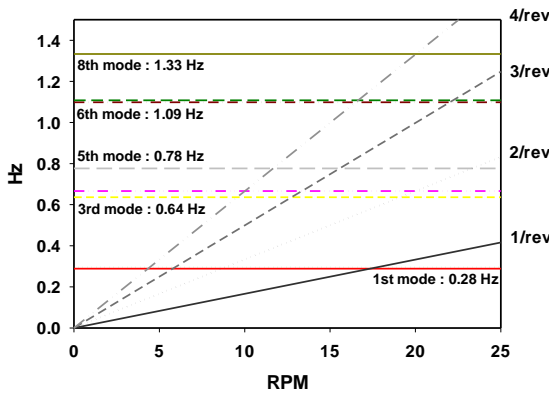


Fig. 16 Campbell chart of 5MW Phase III model.

4. 결론

본 연구에서는 하부구조를 포함한 천해용 5MW 급 해상풍력발전기 모델에 유한요소기법과 효율적인 등가모델링 기법을 활용한 전산다물체동역학 모델을 구축 및 검증하였다. 천해용 해상풍력발전기의 대표적인 하부구조인 monopile 및 tripod 형상이 성공적으로 고려되었다. 본 연구의 결과로 진동특성을 검토해본 결과 상대적으로 견고한 하부구조인 Phase III의 tripod 모델이 monopile 구조에 비해 동일한 풍력발전기 시스템의 고유진동수 수준을 평균적으로 10~15 % 정도 높게 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 해상용 풍력발전기

의 독자개발 및 구조/진동/공탄성 정밀해석 관련 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원의 일환으로 수행된 연구결과 일부이며 지원에 감사를 표하는 바입니다. (No. 20114010203070)

참 고 문 헌

- (1) Kim, K. D., Choi, D. H., Sim, J. S., Kim, K. C., 2011, Development and Design of Offshore Wind Turbine Support Structures, Transactions of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 59, No. 5, pp. 28-37.
- (2) J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, 2009, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report of National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-38060.
- (3) Kim, D. H., Park, H. K., Kim, D. M., 2008, Improved Equivalent Beam Element Modeling Technique for Large Scale Wind-Turbine Composite Blade”, Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 4, pp. 32-37.
- (4) Park, H. K., Kim, D. H., Kim, D. M., Kim, Y. S., Kim, M. K., Chen, S. B., 2007, Three-Dimensional Rotordynamic Analysis Considering Bearing Support Effects, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 105-113.
- (5) J. Jonkman and W. Musial, 2010, Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment, Technical Report of National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5000-48191.