

계류장치 연결 위치가 Spar Type 부유식 해상풍력 발전기의 동적 응답에 미치는 영향 해석

Analysis of Effects of Mooring Connection Position on the Dynamic Response of Spar type Floating Offshore Wind Turbine

조 양 옥* · 조 진 래** · 정 의 봉†
Yanguk Cho, Jinrae Cho and Weuibong Jeong

(Received January 22, 2013 ; Revised April 16, 2013 ; Accepted April 19, 2013)

Key Words : Mooring System(계류장치), Floating-type Offshore Wind Turbine(부유식 해상 풍력발전기), Mooring Tension(계류삭 장력), Wave Spectrum(파 스펙트럼), Dynamic Response(동적 응답)

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of dynamic characteristics of mooring system of floating-type offshore wind turbine. A spar-type floating structure which consists of a nacelle, a tower and the platform excepting blades, is used to model the floating wind turbine and connect three catenary cables to substructure. The motion of floating structure is simulated when the mooring system is attached using irregular wave Pierson-Moskowitz model. The mooring system is analyzed by changing cable position of floating structure. The dynamic behavior characteristics of mooring system are investigated comparing with cable tension and 6-dof motion of floating structure. These characteristics are much useful to initial design of floating-type structure. From the simulation results, the optimized design parameter that is cable position of connect point of mooring cable can be obtained.

1. 서 론

세계적인 환경문제와 유가급등으로 인해 신재생 에너지 개발 필요성이 대두되고 있으며 전 세계적으로 신재생 에너지 개발에 대한 투자가 많이 증가되는 추세이다. 신재생 에너지 사업 중 세계풍력발전 시장이 해상 및 대형화되고 있는 추세에 따라 각국의 풍력산업에 대한 투자와 관심이 고조된다.

풍력발전은 육상에서 보다 먼 바다로 나갈수록 바람의 질이 좋아 높은 발전효율을 기대할 수 있고

환경문제나 소음문제를 해소시킬 수 있기 때문에 현재 얕은 수심에서의 고정식 타입의 해상 풍력 발전기가 많이 설치되고 있으며 더 나은 양질의 바람을 찾아 더 깊은 심해에 부유식 풍력발전기가 설치 될 것이다. 이에 심해에 설치되는 부유식 해상 풍력발전기에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있다. Shin⁽¹⁾, Kim⁽²⁾ 등은 수치해석을 통해 부유식 해상 풍력 발전기의 운동 성능에 대해서 해석하였고, 부유식 해상 풍력발전기의 성능을 평가하는데 구조물의 파랑 및 바람중의 운동성능이 추가되어야 한다고 언급하였다. Jung⁽³⁾는 심해에 설치되는 부유식 구조

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University
E-mail : wbyeong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2337, Fax : +82-51-510-3805

* Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University
** Research and Development Institute, Midas IT Co. Ltd.

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

물 건설을 위한 핵심기술로 구조물 계류 시스템 등이 필요하다고 역설하고 있다.

일반적인 계류 시스템에 관한 동적 특성에 관한 연구는 수치해석 및 실험적 연구를 통하여 수행되어 왔다. 계류 라인의 비선형적 특성을 고려한 수치적 접근 방법에 대해 실행된 많은 연구 중에서 Ansari⁽⁴⁾는 정적 주파수 영역 접근 방법과 동적 시간 영역 접근 방법을 비교해 주파수 영역 해석은 선박과 계류 라인의 비선형 연성 문제를 정확히 다루지 못한다고 말하고 있고, Huse⁽⁵⁾는 항력에 대한 심해 계류 라인의 저 주파수 운동에 대해 많은 연구를 수행하였으며 많은 모형 테스트 및 완전 연성 시간 영역 해석을 통해 이 점을 증명하였다. 계류 라인의 실험적 해석 접근은 모형 구조의 수심의 제한으로 모형시험을 통한 검증은 많은 제약을 받게 되는데, Stansberg⁽⁶⁾는 모형시험을 수행하고 나서 수치계산을 통해 실제 수심까지 확대하는 방법을 제시 하였고, Cho⁽⁷⁾는 수심에 따라서 계류각이 수심에 대한 등가무게를 가지는 강제 동요 모형 시험을 통하여 계류각의 동적 특성을 파악 하였다. 현재까지 부유식 풍력발전기의 기본개념은 많이 제시되어 왔지만 핵심기술인 구조물의 계류 시스템의 운동 해석은 미진하다고 할 수 있다. Ko⁽⁸⁾는 OC3⁽⁹⁾모델에 대해 response amplitude operator(RAO)를 구해 운동능성이 뛰어난 부유식 해양 구조물 시스템을 구성하기 위한 방향을 제시 하였다.

이 연구에서는 자체적으로 개발하고 있는 spar type 부유식 해상 풍력발전기 모델에 대하여 hydrodynamics 해석 프로그램인 ANSYS AQWA를 사용하여 불규칙한 해상파에 대한 시간응답 해석을 수행하고자 한다. 그리고 계류장치 연결 위치에 따른 해상 풍력발전기의 6자유도 거동과 계류장치 케이블의 장력의 동적 특성에 대해서 조사하고자 한다.

2. 모델링

2.1 Wave 모델링

파도의 에너지 스펙트럼 밀도함수는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 사용하였으며 ANSYS AQWA에서 다음 식과 같이 표현된다⁽¹⁰⁾.

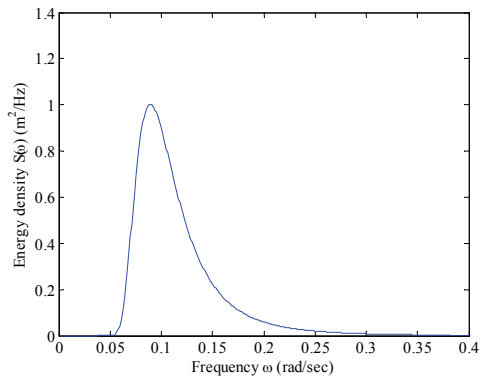
$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{H_s^2}{4\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^5 \exp\left(-\frac{1}{\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^4\right) \quad (1)$$

여기서 ω 는 파도의 주파수(rad/sec), H_s 는 유효파고(m), T_z 는 zero crossing 주기를 나타낸다. $H_s=1\text{ m}$, $T_z=50\text{ sec}$ 인 경우의 에너지 스펙트럼 밀도 함수의 예를 Fig. 1(a)에 나타내었다.

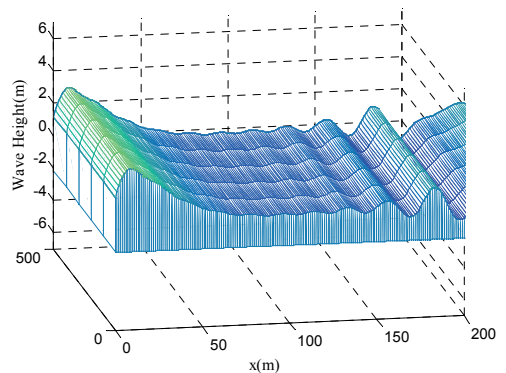
파도에 대한 스펙트럼이 주어지면, 불규칙 파형의 시간 이력은 스펙트럼으로부터 직접적으로 얻어지는 파고와 불규칙하게 선택되는 위상각(phase angle)들을 가지는 많은 주파수 성분들의 선형 중첩에 의해 생성된다. 그러면 불규칙한 파도의 높이 $\eta(x,t)$ 는 식 (2)와 같이 표현 된다⁽¹¹⁾.

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} A_n \cos(k_n x - 2\pi f_n t + \phi_n) \quad (2)$$

여기서 k_n 는 파수(wave number), A_n 는 파진폭(wave amplitude), 그리고 ϕ_n 은 임의적으로 선택되는 위상각(phase angle)이다. 파 성분 j 에 대한 파진폭 A_j 와 파 스펙트럼 $S(\omega)$ 의 관계식은 식 (3)과 같다.



(a) Energy density spectrum($H_s=1\text{ m}$, $T_z=50\text{ sec}$)



(b) Wave profile

Fig. 1 Pierson-Moskowitz wave spectrum

$$\frac{A_j^2}{2} = s(\omega) \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{N} \tag{3}$$

Pierson-Moskowitz 스펙트럼에서 주파수의 최대값(ω_{\max})과 최소값(ω_{\min})을 결정하고 주파수를 N 개의 등 간격으로 나누고, 이 때 파의 시간이력은 총 16개($N=16$)의 조화 파들을 중첩하였다. 주파수 성분들의 선형 중첩에 의한 불규칙 파형의 프로파일을 Fig. 1(b)에 나타내었다.

2.2 계류선 장력

계류선은 균일한 질량을 가지는 현수선 형태의 케이블로 모델링되며 연결위치, 길이, 선밀도, 강성 등으로 정의된다. 계류선의 탄성을 고려한 운동방정식으로부터 연결위치에서의 계류선 장력 T 는 다음과 같이 구해진다⁽¹²⁾.

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} \tag{4}$$

단,

$$H = AE \sqrt{\left(\frac{T}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2wZ}{AE}} - AE \tag{5}$$

$$X = \frac{H}{w} \sinh^{-1}\left(\frac{wL}{H}\right) + \frac{HL}{AE} \tag{6}$$

$$V = wL \tag{7}$$

여기서 L 은 케이블 길이, w 은 수중 케이블의 단위 길이당 무게, AE 는 강성을 나타낸다. 그리고 X 와 Z 는 계류선 연결점과 해저면 연결점의 수평방향 및 수직방향 거리이다. H 와 V 는 케이블의 수평방향과 수직방향의 인장력이다. ANSYS AQWA에서는 식 (4)와 같이 계류선의 강성을 고려하여 계류선의 인장력을 계산한다⁽¹⁰⁾.

2.3 해석 모델

부유식 해상 풍력발전기는 Fig. 2와 같이 spar type으로 선정하였으며, 그 재원은 Table 1에 나타내었다. 상부 블레이드는 강체(rigid body)로 가정하여 ANSYS AQWA에서 PMAS(point mass and inertia) 기능을 이용하여 전체 질량을 부여하였다.

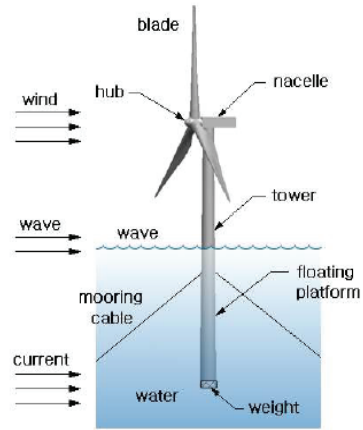


Fig. 2 Spar type offshore wind turbine

Table 1 Spar type wind turbine properties

Blade mass	30,600 kg
Nacelle height	3.2 m
Nacelle mass	146,000 kg
Tower height	65 m
Tower top diameter	3.5 m
Tower bottom diameter	4.5 m
Tower mass	170,000 kg
Platform height	65 m
Platform diameter	8 m
Platform mass	2,684,000 kg
Center of buoyancy (from water line)	32.5 m
Center of mass (from water line)	42.5 m

Table 2 Mooring system properties

Number of mooring lines	3
Angle between mooring lines	120°
Cross sectional area	0.05 m ²
Mass/unit length	77.7 kg/m
Stiffness, EA	3.84E+9 N
Longitudinal drag coefficient	0.025

Table 3 Hydrodynamic properties

Water depth	200 m
Water density	1205 kg/m ³
Water size X	500 m
Water size Y	500 m
Viscous drag coefficient	0.75

유한요소 해석을 위한 구조물의 절점 수는 10,438 개, 요소 수는 10,464개이다. 계류 라인은 120° 간격으로 3개의 라인으로 구성하였으며 주요 입력자료는 Table 2와 같다. 그리고 유체특성은 Table 3과 같다.

3. 수치해석

Spar type 부유식 해상 풍력 발전기의 6자유도 운동을 Fig. 3에 나타내었다. 파도의 방향이 0°일 때 구조물의 6자유도 운동 중에서 surge와 pitch의 응답 변화가 지배적으로 크게 나타나기 때문에, 이 연구에서는 surge와 pitch의 응답 변화만을 살펴보았다.

비회전성, 비압축성, 비점성인 이상유체로 가정하였고 표면장력은 무시하였으며 운동의 크기와 속도는 작다고 가정하였다. 그리고 ANSYS AQWA를 이용해 수치해석을 수행하여 계류 라인과 플랫폼의 연결 위치가 플랫폼의 동적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

계류장치 케이블의 길이는 300 m로 고정시키고 케이블의 연결 위치를 Fig. 4와 같이 변경하면서 해석하였다.

케이블의 연결위치는 해수면으로부터 22.5 m 되는 위치에서부터 2 m 간격으로 총 12가지 경우의 응답을 비교해 보았다. Fig. 5는 케이블의 연결위치가 해수면으로부터 32.5 m(부력 중심)일 때의 무게 중심(42.5 m)에서의 surge와 pitch의 응답을 나타내

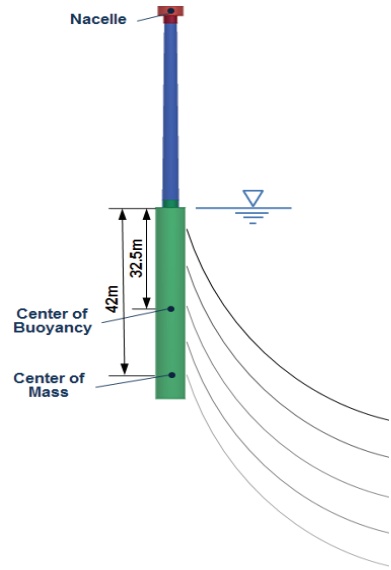
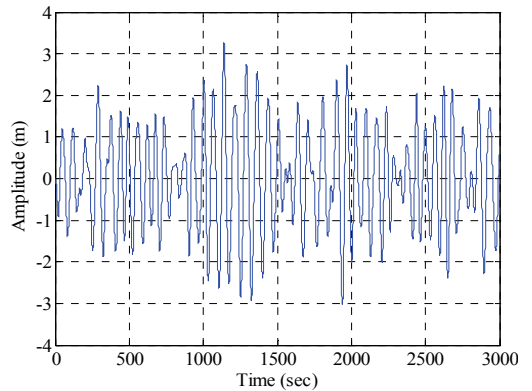
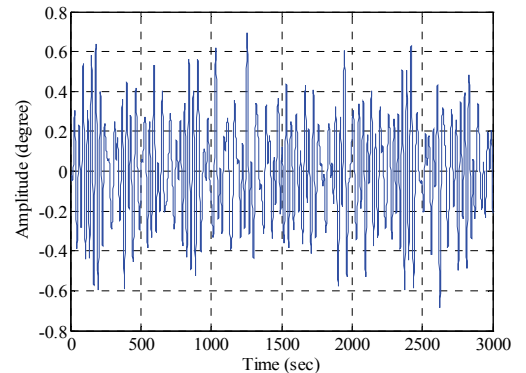


Fig. 4 Connection point of mooring cable



(a) Surge motion



(b) Pitch motion

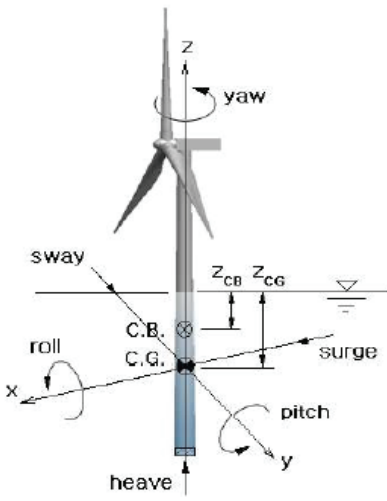


Fig. 3 6-DOF motion of spar type structure

Fig. 5 Time responses of spar-type floating platform at center of mass

있고 Fig. 6에 nacelle에서의 surge의 응답을 나타냈었다. 그리고 Fig. 5와 Fig. 6에 주어진 surge와 pitch의 시간응답을 푸리에(Fourier) 변환한 결과를 Fig. 7에

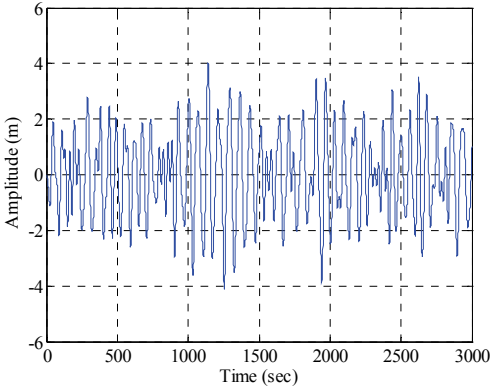
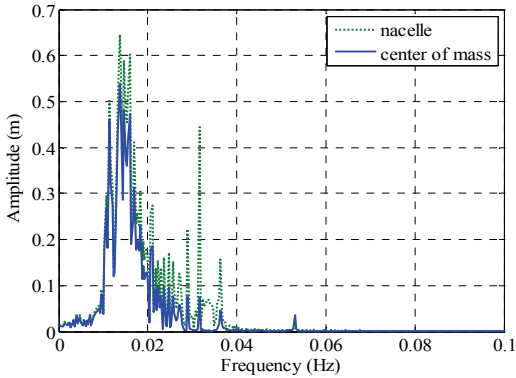
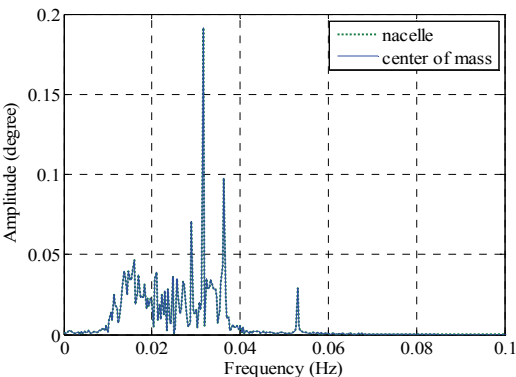


Fig. 6 Surge motion time responses of spar-type floating platform at nacelle



(a) Surge motion



(b) Pitch motion

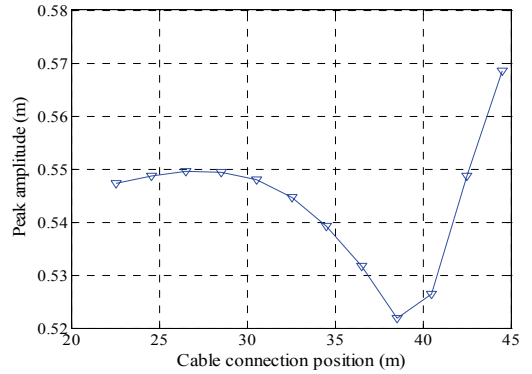
Fig. 7 Frequency response of spar-type floating platform

나타내었다.

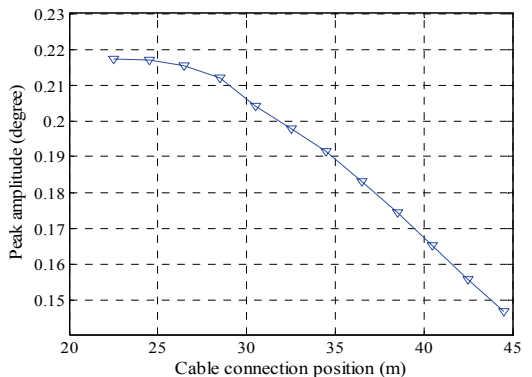
Fig. 7(a)는 surge 운동의 푸리에(Fourier) 스펙트럼이고 Fig. 7(b)는 pitch 운동의 푸리에(Fourier) 스펙트럼이다.

주파수 응답을 보면 surge의 주파수는 0.01367 Hz로 무게중심에서와 nacelle에서의 주파수가 동일하였고, pitch의 주파수도 마찬가지로 0.03167 Hz로 무게중심과 nacelle에서의 주파수가 동일하였다. nacelle에서의 surge의 주파수 응답이 무게중심에서의 응답보다 크게 나타나는 것을 Fig. 7(a)에서 확인 할 수 있다.

계류장치 케이블의 연결 위치에 따라 peak값을 비교해 Fig. 8에 나타내었다. Surge의 응답을 보면 케이블을 플랫폼의 아래 부분에 연결할수록 응답이 작아지다가 38.5 m 보다 아래쪽에 연결할 경우 응답이 다시 증가하는 경향을 볼 수 있다. Surge의 응답을 줄이기 위해서는 케이블을 38.5 m 부근에 연결하는



(a) Surge response



(b) Pitch response

Fig. 8 Variation of the peak amplitude in frequency response to cable connection position

것이 유리함을 알 수 있다. Pitch의 응답을 보면 케이블을 플랫폼의 아래쪽에 연결할수록 pitch의 응답이 작아지는 경향을 볼 수 있다. Pitch의 응답을 줄이기 위해서는 케이블의 연결 위치는 플랫폼의 아래쪽에 연결하는 것이 유리함을 알 수 있다.

다음으로 케이블 연결 위치 별로 케이블 장력을 peak값과 RMS(root mean square)값으로 비교해 보

았다. 3개의 케이블의 장력 변화가 유사하므로 가장 큰 장력이 걸리는 케이블의 장력을 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9(a)는 계류장치 케이블 연결 위치에 따라 케이블 장력의 peak값을 나타낸 그래프이고, Fig. 9(b)는 케이블 장력의 RMS값을 나타낸 그래프이다. 케이블의 장력은 케이블의 연결 위치가 플랫폼의 아래쪽에 있을수록 장력이 줄어드는 경향을 볼 수 있으며, 장력의 최대값과 최소값을 Table 4에 나타내었다.

4. 결 론

부유식 해상 풍력 발전기의 계류장치 연결 위치에 따른 계류 라인의 동적 특성을 해석하기 위해서 부유식 해상 풍력 발전기를 3개의 계류선을 갖는 spar type으로 모델링 하여 구조물의 surge와 pitch의 운동과 케이블의 장력을 계류선 연결 위치에 따라 해석해 비교해 보았다.

Surge 응답의 경우에 계류선 연결 위치가 플랫폼의 아래쪽에 위치할수록 응답이 작아지다가 다시 증가하는 경향을 보였으며 38.5 m 근처에서 응답이 최소가 되었다. Pitch 응답을 줄이기 위해서는 계류장치를 플랫폼의 아래쪽에 연결할수록 유리함을 확인하였다.

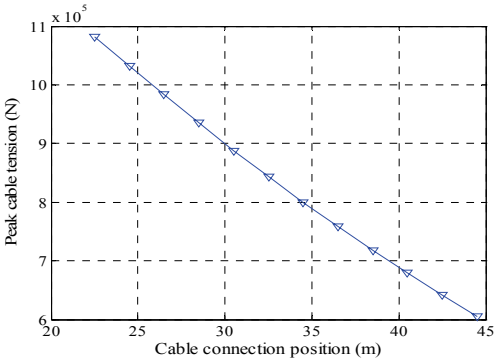
계류장치 케이블의 장력을 비교해보면 계류장치의 연결 위치가 플랫폼의 아래쪽에 있을수록 장력이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 논문에서 제시한 부유식 해상 풍력 발전기의 응답을 줄이기 위한 계류장치의 동적 특성을 활용하여 이후 계류장치 초기 설계에 유용한 자료가 될 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 해석 결과를 실험으로 검증할 필요가 있다고 판단된다.

후 기

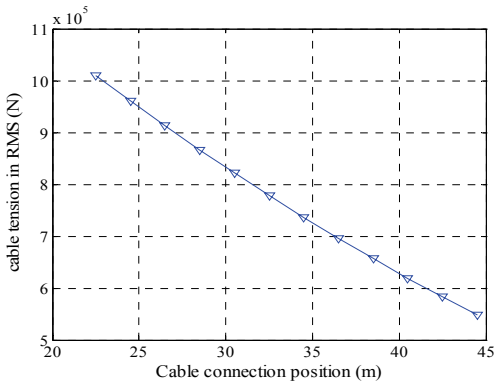
이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20114010213080).

참 고 문 헌

(1) Shin, H. K. and Kim, K. M., 2011, Motion



(a) Peak cable tension



(b) RMS cable tension

Fig. 9 Mooring cable tension analysis according to cable connection position

Table 4 Cable tension in Max/Min(unit=10⁵)

	Min(N)	Max(N)		Min(N)	Max(N)
22.5 m	9.387	10.81	34.5 m	6.714	7.992
24.5 m	8.881	10.33	36.5 m	6.318	7.585
26.5 m	8.401	9.843	38.5 m	5.936	7.178
28.5 m	7.950	9.359	40.5 m	5.574	6.791
30.5 m	7.525	8.880	42.5 m	5.230	6.419
32.5 m	7.117	8.429	44.5 m	4.903	6.049

Analysis of 5MW Floating Offshore Wind Turbine, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 64~68.

(2) Kim, M. H., Kim, D. H., Kim, D. H. and Kim, B. Y., 2011, Structural Dynamics Analyses of a 5MW Floating Offshore Wind-turbine Using Equivalent Modeling Technique, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 614~622.

(3) Jung, D. H., Nam, B. W., Shin, S. H., Kim H. J. and Lee, H. S., 2012, Investigation of Safety and Design of Mooring Lines for Floating Wave Energy Conversion, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 26, No. 4, pp. 77~85.

(4) Ansari, K. A. and Khar, N. U., 1986, The Effect of Cable Dynamics on the Station-keeping Response of a Moored Offshore Vessel, Transactions of the ASME, Vol. 108, No. 1, pp. 52~58.

(5) Huse, E., 1986, Influence of Mooring Line Damping Upon Rig Motions, 18th Offshore Technology conf., PaperNo. 5204.

(6) Stansberg, C. T. and Oritsland, O., 2000, Verideep: Reliable Methods for Laboratory Verification of Mooring and Station Keeping in Deep Water, Ocean Technology Conference, Paper 12087.

(7) Cho, S. K., Hong, S. Y., Hong, S. and Kim, H. J., 2005, A Research on Dynamic Tension Response of Model Mooring Chain by Forced Oscillation Test, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 39~46.

(8) Go, J. Y. and Lee, S. K., 2011, Time Domain Analysis of the Spar-type Floating Offshore Platform for Various Platform Geometries and Mooring Points, KWEA.

(9) Jonkman, J., 2010, Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, NREL/TP-500-47535.

(10) TSNE 2011, ANSYS AQWA Training(Basic course), ANSYS Inc.

(11) Kim, M. Y., Paik, I. Y. and Ko, J. S., 2001, Dynamic Analysis of Steel Jackets Under Wave and Earthquake Loadings I: Linear and Non-linear F.E. Formulation, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 5, No. 5, pp. 1~11.

(12) Barltrop, N. D. P., 1998, Floating Structures : a Guide for Design and Analysis Vol. 2, CMPT, England.



Yanguk Cho received BS from Pusan National University in 2011 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in dynamic characteristics of mooring cable.



Weuibong Jeong received BS and MS degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his PhD degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.



Jinrae Cho received a BS in Aeronautical Engineering from Seoul National University, Korea, in 1983. He then received his MS and PhD degrees from The University of Texas at Austin in 1993 and 1995, respectively. He is currently a vice director of the Research and Development Institute of MidasIT, a worldwide FEM software developing and engineering company. His current research interests include finite element method, natural element method, offshore wind turbine, fluid-structure interaction, functionally graded composites, computational tire mechanics, metal forming, and nonlinear structural analysis, design and evaluation.