

## 풍하중을 고려한 해상풍력발전기 운반용 가이드 프레임 배치

석 준<sup>1</sup> · 김성용<sup>2</sup> · 박종천<sup>†</sup> · 차태형<sup>3</sup>

(Received March 23, 2017 ; Revised April 19, 2017 ; Accepted June 19, 2017)

### Arrangement of guide frame for offshore wind turbine considering wind load

Jun Seok<sup>1</sup> · Sung-Yong Kim<sup>2</sup> · Jong-Chun Park<sup>†</sup> · Tae-Hyung Cha<sup>3</sup>

**요약:** 본 연구에서는 해상풍력발전기의 타워를 안전하게 운반하기 위해 고안된 가이드 프레임의 배치에 관한 연구를 수행하였다. 일반적으로 해상풍력발전기는 블레이드, 나셀, 허브 그리고 타워의 4부분으로 분리되어 바지선으로 운반되며, 이 때 타워는 상단, 중간, 하단으로 분리되어진다. 따라서 6개의 가이드 프레임을 이용하여 2개의 해상풍력발전기를 동시에 수송하는 조건을 가정하였다. 풍하중을 줄이기 위해 가이드 프레임은 2가지 배치(A, B)를 고려하였고, Star-CCM+를 사용한 수치 시뮬레이션을 통해 풍하중의 영향을 평가하였다.

**주제어:** 가이드 프레임, 배치, 수치 시뮬레이션, 풍하중, 해상풍력발전기

**Abstract:** In this study, the arrangement of a guide frame was performed to transport the tower of an offshore wind turbine. Normally, an offshore wind turbine is separated into four parts, namely the blade, nacelle, hub, and tower, and transported to the installation site by a barge. Additionally, the tower is divided into top, middle, and bottom parts. Therefore, it is assumed that two offshore wind turbines can be transported simultaneously using six guide frames. Two different arrangements(A,B) of guide frames were considered for reducing the wind loads ; the wind loads were evaluated through numerical simulation using the commercial software package S/W Star-CCM+ under the same simulation conditions.

**Keywords:** Guide frame, Arrangement, Numerical simulation, Wind load, Offshore wind turbine

## 1. 서론

지속적인 화석연료 사용으로 인한 지구 온난화 문제를 해결하기 위해 국내에서는 태양광과 풍력을 중심으로 에너지원을 구성할 예정이다.

특히 풍력발전의 경우 육상의 한정된 풍자원과 소음문제를 해결하기 위한 방안으로 해상에 대규모의 발전단지를 조성하는 해상 풍력발전 방안이 주목받고 있으며, 최근 정부의 해상풍력단지 실증화사업의 일환으로 서남해권 해상 풍력단지가 조성될 예정이다.

하지만 해상의 경우 육상에 비해 상대적으로 환경적 요소의 영향이 크기 때문에 작업성이 떨어지며, 이를 보완하기 위해 잭업(Jack-up) 장치를 보유한 선박 등을 이용하여 파도의 영향을 최소화하여 작업성을 확보한다. 바람의 영향을 최소화하는 방법으로는 화물 배치의 최적화 방법이 있으며, 이런 최적화를 평가하는 방법으로는 풍동(Wind Tunnel) 설비를 이용하는 실험적 방법, 경험식(Empirical

formula)을 이용하는 방법 그리고 수치 시뮬레이션을 이용하는 방법 등이 있다.

실험적 방법[1]-[3]을 통한 풍하중 계수의 산출 방법은 상대적으로 정확도는 높지만 경제적 단점이 있으며, 경험식을 이용한 방법[4][5]은 정형화된 형태의 일반 상선에 적용하기에 적합하지만 특수한 형상의 경우 적용에 어려움이 있다. 수치 시뮬레이션을 이용한 방법[6][7]은 최근 실험을 대체하기 위한 수단으로 다양한 분야에서 적용되고 있다.

본 연구에서는 화물 배치 시 풍하중 고려 여부의 필요성에 대한 연구로 서로 다른 2가지 배치 방법에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하여 풍하중 영향을 평가하였다.

## 2. 해상풍력발전기 배치

통상적으로 해상용 풍력발전기는 타워, 나셀, 허브 그리고 블레이드의 4부분으로 분리되어 설치지역까지 운반하며, 운반 후 해상에서 조립하고 있다. 이 때 타워의 경

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3168-2054>): Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea, E-mail: jcpark@pnu.edu, Tel: 051-510-2480

1 Division of Green-ship research, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, E-mail: jseok@rims.re.kr, Tel: 051-974-5561

2 Approval centre Korea, DNV-GL, E-mail: jnqt72@gmail.com, Tel: 051-610-7774

3 Research Institute, SAMBO C.M.C, E-mail: chataeda@daum.net, Tel: 051-717-0581

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

우 작업 방법에 따라 여러 부분으로 분리되어 운반된다. 따라서 바지선의 한정된 적재공간을 효율적으로 이용하며, 안정적으로 운반하기 위해서 별도의 고박 장치 등이 요구된다.

Figure 1은 해상풍력발전기의 타워를 고박하여 안정적, 효율적으로 운반하기 위해 고안된 고박장치의 일종인 가이드 프레임으로 유압 장치를 이용하여 타워를 고정하는 방식의 구조물이다. 이런 가이드 프레임은 운반용 바지선 선체와 용접으로 고정되기 때문에 위치를 변경하기가 어렵다. 따라서 초기 설치 시 작업성 및 편의성을 고려하여 최적의 위치를 선정하여 것이 필요하다.

본 연구에서는 Figure 2, Table 1과 같이 76m 바지선을 이용하여 한번에 2기의 해상풍력발전기를 동시에 운반하는 경우를 고려하였으며, 이 때 타워는 3부분으로 나누어 운반하는 것을 가정하였다. 따라서 바지선에는 총 가이드 프레임 6개, 타워 6개, 나셀 3개, 허브 3개 그리고 6개의 블레이드가 적재된다.

각각의 구조물의 배치는 작업성과 블레이드의 길이를 고려하여 블레이드를 바지선의 선수쪽으로 배치하여 나셀과 허브의 적재 공간을 고려하였으며, 가이드 프레임의 경우 Figure 3과 같이 바지선의 우현(Starboard)과 중앙에 배치하는 2가지 경우를 고려하였다. 이 때 각각의 풍압면적은 Table 2와 같다. Figure 3 (a)는 선하역 작업시 작업성을 고려하여 가이드 프레임을 우현에 배치한 경우이며, Figure 3 (b)는 가이드 프레임을 중앙에 배치한 경우이다.

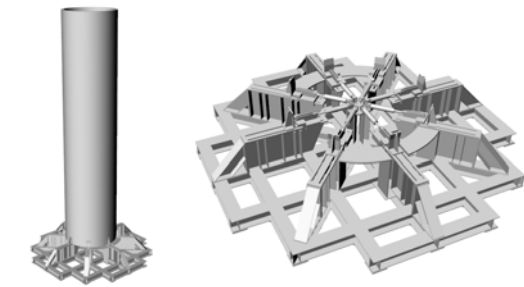


Figure 1: 3-D modeling of Guide frame

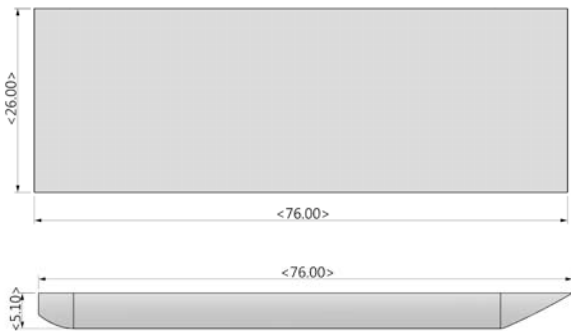


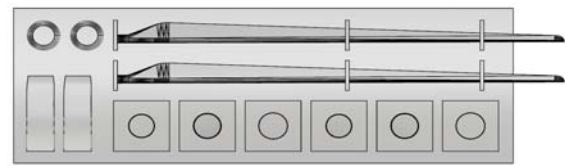
Figure 2: Geometry of 76m class barge

Table 1: Principal dimensions of 76m class barge

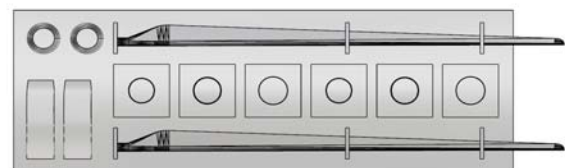
Item	Figures
Scale ratio	1:1
$L_{OA}$ (m)	76.0
Breadth (m)	26.0
Draft (m)	5.1

Table 2: Main particulars of modeling

Model	A	B
Scale ratio	1:50.6	
$L_{OA}$ (m)	1.5	
Breadth (m)	0.512	
Draft (m)	0.071	
Projected area of lateral( $A_l$ ) (m <sup>2</sup> )	0.320	
Projected area of frontal( $A_f$ ) (m <sup>2</sup> )	0.09	



(a) Arrangement A



(b) Arrangement B

Figure 3: Arrangement of Guide frame

### 3. 수치 시뮬레이션 방법 및 조건

#### 3.1 수치 시뮬레이션 방법

수치 시뮬레이션의 지배방정식은 식 (1), 식 (2)와 같이 연속 방정식과 RANS(Reynold-Averaged Navier-Stokes) 방정식으로 비압축성 및 점성 유동을 가정하였다. 여기서  $U$ 는 평균속도벡터,  $x$ 는 좌표계,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성계수,  $B$ 는 체적력 그리고  $\overline{\rho u_i u_j}$ 는 난류전단응력으로 난류모델에 의해 결정되며 본 연구에서는  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial (U_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + B \quad (2)$$

#### 3.2 수치 시뮬레이션 조건

수치 시뮬레이션을 위한 계산영역은 Figure 4 (a)와 같이 길이 방향  $3.5L$ , 폭 방향  $3.0L$  그리고 높이 방향  $2.5L$ 로 설정하였으며, 이 때  $L$ 은 바지선의 전장( $L_{OA}$ )으로 무차원화된 길이이다. 각 영역의 경계조건은 Figure 4 (b)와 같이 속도유입조건인 Velocity inlet 조건, 유출조건인 Pressure outlet 조건과 벽 경계조건인 Wall (No-slip)과 Wall (Free-slip) 그리고 대칭 조건인 Symmetry 조건이 각각 이용되었다.

속도 유입 조건의 경우 레이놀즈 수 (Reynolds number) 변화에 대한 영향을 평가하기 위해 속도 조건 (30m/s~80m/s)에 따른 수치 시뮬레이션을 별도로 수행하여 조건을 결정하였다.

격자계는 Star-CCM+에서 이용가능한 자동격자생성 방법(Surface Remesher, Prism Layer, Trimmer)을 이용하여 약 300만개의 격자를 생성하였으며, Figure 5와 같이 선체 및 상부 구조물의 해석 정확도 향상을 위해 표면의 법선방향으로 5개의 layer를 생성하였다. 이 때 y+는 150 이하로 설정하였으며 이는 표면 마찰저항보다 압력저항의 영향이 상대적으로 크기 때문에 y+에 대한 의존성이 크지 않기 때문이다[8]. 또한 각도별 해석의 경우 계산 영역을 회전시키는 방법을 적용하여 해석대상과 입출구부의 거리를 유지하였다.

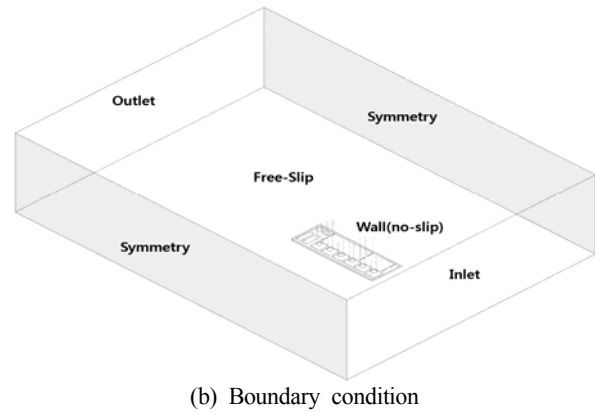
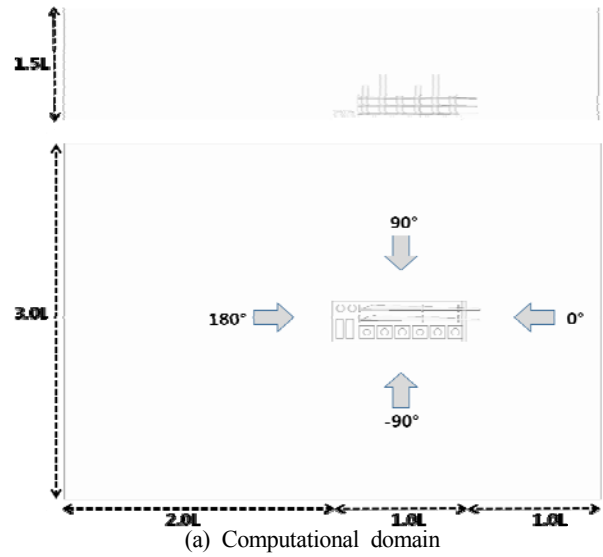


Figure 4: Computational domain and boundary condition

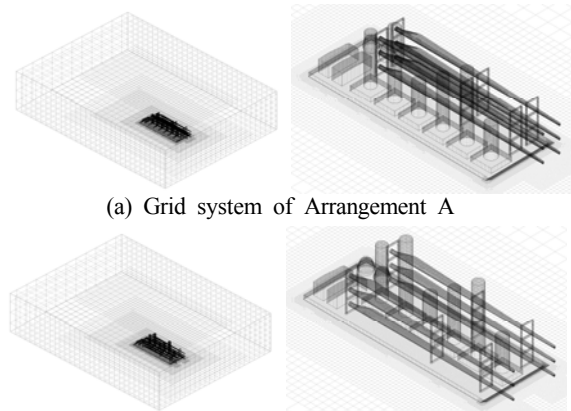


Figure 5: Grid system

### 4. 수치 시뮬레이션 결과

#### 4.1 수치 시뮬레이션 속도 조건 평가

3.2절에서 전술한 바와 같이 레이놀드 수에 따른 영향을 평가하기 위해 30m/s~80m/s까지 총 6가지 속도 조건에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 식 (3)을 이용하여 풍하중계수( $C_x$ )로 무차원화하여 비교하였다.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V_x^2 A_f} \quad (3)$$

이 때,  $F_x$ 는 힘,  $A_f$ 는 전면 투영면적  $V_x$ 는 속도이다.

수치 시뮬레이션 결과 Figure 6, Table 3과 같이 속도가 증가할수록 풍하중계수가 증가하고 있지만, 70m/s부터 증가량이 감소하며 수렴하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 추후 수행되는 수치 시뮬레이션에는 70m/s 조건을 적용하였다.

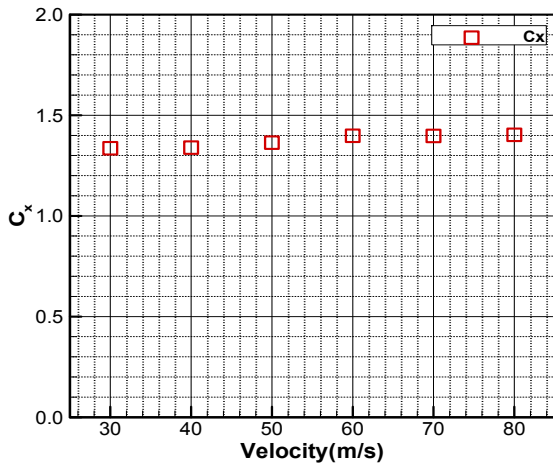


Figure 6: Wind load coefficient ( $C_x$ ) for various wind speeds

Table 3: Quantitative results for various reynolds number

Velocity (m/s)	Reynolds number	$C_x$	Increasing rate(%)
30	2.754E+7	1.336	-
40	3.672E+7	1.339	0.2%
50	4.590E+7	1.364	1.8%
60	5.508E+7	1.398	2.5%
70	6.426E+7	1.397	0.1%
80	7.344E+7	1.403	0.4%

#### 4.2 가이드 프레임 배치에 따른 수치 시뮬레이션

4.1절에서 결정된 70m/s 조건을 이용하여 2가지 배치 방법에 대해 각도별로 수치 시뮬레이션을 수행한 결과는 Figure 7, Table 4와 같다.

가이드 프레임이 우현에 배치된 A와 가이드 프레임이 중앙으로 배치된 B는 측면에서 바람이 불어오는 조건( $\pm 90^\circ$ )을 제외하면 전반적으로 약 2~8% 차이를 보이고 있으며, 배치안 A는 풍향이  $\pm 45^\circ, \pm 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$  조건에서, 배치안 B는 풍향이  $0^\circ, -135^\circ$  조건에서 각각 풍하중계수가 상대적으로 작다.

측면에서 바람이 불어오는 조건( $\pm 90^\circ$ )의 경우 풍하중계수가 다른 경우들에 비해 상대적으로 작지만 2가지 배치안의 차이는 각각 약 60%와 90%의 차이를 보인다. 측후방에서 바람이 불어오는 조건인  $-135^\circ$  조건의 경우  $\pm 90^\circ$  조건을 제외할 경우 배치안 A와 B의 차이가 약 8%로 가장 크다. 이는 Figure 8의 유선(Streamline)에서 볼 수 있듯이 배치안 A의 경우 적재된 해상풍력발전기 부품(타워, 나셀, 블레이드) 중 상대적으로 면적이 가장 큰 타워에 직접적으로 풍하중이 작용하는 반면 배치안 B는 블레이드를 통과하면서 감속된 풍속과 블레이드로 인한 타워의 풍압면적 감소의 영향으로 인해 나타나는 차이로 사료된다.

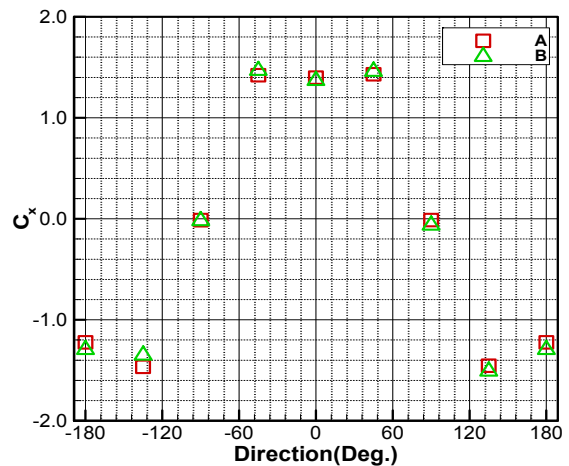


Figure 7: Comparison of  $C_x$  between Arrangement A and B

Table 4: Quantitative results of  $C_x$  for various wind direction

Degree	$C_x$		Increasing rate(%) (( B - A )/ B )
	A	B	
0	1.398	1.368	-2.20
45	1.431	1.460	2.01
90	0.006	0.048	87.50
135	1.454	1.509	3.66
$\pm 180$	1.223	1.294	5.48
-45	1.421	1.468	3.21
-90	0.014	0.038	63.16
-135	1.465	1.350	-8.49

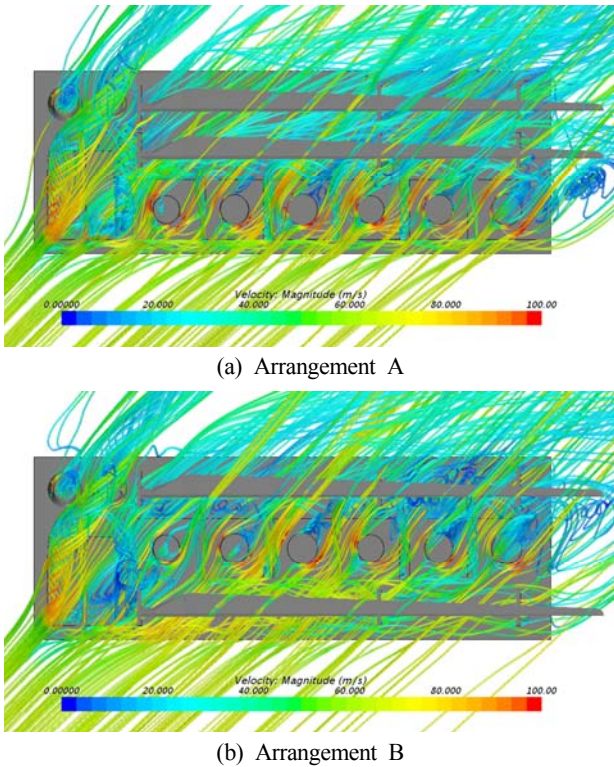


Figure 8: Streamline of numerical simulation at  $-135^\circ$

### 5. 결론

본 연구에서는 해상풍력발전기의 타워를 안전하고 효율적으로 운반하기 위해 개발된 가이드 프레임의 배치에 관한 연구로 수치 시뮬레이션 방법을 이용하여 풍하중의 영향을 평가해 보았다.

해상풍력발전기는 블레이드, 나셀, 허브 그리고 타워로 분리되어 76m급 바지선에 한번에 2기가 동시에 운반되는 경우를 고려하였으며, 이 때 타워는 3부분으로 분리되어 운반하는 것으로 가정하였다. 그리고 가이드 프레임의 배치는 가이드 프레임을 우현(A)과 중앙(B)에 배치한 서로 다른 2가지 배치 방법을 고려하였다.

수치 시뮬레이션 결과 2가지 배치안이 풍향에 따라 차이를 보이고 있으며, 배치안 A는  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  조건에서, 배치안 B는  $0^\circ$ ,  $-135^\circ$  조건에서 좋은 결과를 보이고 있다.

이처럼 풍향조건에 따라 각각의 배치안이 서로 다른 결과를 보이고 있으며, 풍하중 영향을 줄이기 위해 해상 풍력발전기를 운반 시 다양한 배치안에 대한 검토가 필요할 것이다. 또한 해상풍력발전기가 운반 및 설치될 지역의 환경조건을 고려하여 가이드 프레임의 위치를 결정하는 합당할 것으로 사료되며, 해상풍력발전기설치 작업 시 바람의 영향을 최소화하는 방향으로 바지선을 배치하는 등의 노력이 필요할 것이다.

### 후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20153030024010)

### References

- [1] J. H. Lee, T. W. Kim, I. G. Jang, and S. H. Han, "Wind force coefficients computation of gantry crane by wind tunnel experiment and structural analysis of the crane," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 48, no. 2, pp. 165-170, 2011 (in Korean).
- [2] Y. S. Kim, K. S. Kim, S. W. Jeong, S. G. Jeong, S. H. Van, and J. Kim, "Design and performance evaluation of superstructure modification for air drag reduction of a container ship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 52, no. 1, pp. 8-18, 2015 (in Korean).
- [3] Y. I. Jung, and K. J. Kwon, "Wind load and flow field change with respect to various configurations of a drillship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 52, no. 3, pp. 255-264, 2015 (in Korean).
- [4] ISO 15016, Ships and Marine Technology-Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data, ISO, 2016
- [5] W. Blendermann, "Wind loading of ships: Collected data from wind tunnel tests in uniform flow," Hamburg:Inst. für Schiffbau, 1996.
- [6] N. J. Choi, S. H. Nam, J. H. Jeong, and K. C. Kim, "CFD study on aerodynamic power output of 6 MW offshore wind farm according to the wind turbine separation distance," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 8, pp.1063-1069, 2011 (in Korean).
- [7] B. W. Nam, Y. M. Choi, and S. Y. Hong, "A study on towing characteristics of barge considering wind force," Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 29, no. 4, pp. 283-290, 2015 (in Korean).