

바지선을 이용한 해상풍력발전기 운반에 따른 안정성 평가

석준¹·백영수¹·박종찬^{2,†}·김성용³·차태형⁴·양영준⁵
중소조선연구원 그린선박·플랜트 연구팀¹
부산대학교 조선해양공학과²
DNVGL Approval Center Korea³
삼보씨엠씨(주) 기술연구소⁴
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터⁵

Stability Evaluation during Transportation of Offshore Wind Turbine by Barge

Jun Seok¹·Young-Soo Back¹·Jong-Chun Park^{2,†}·Sung-Yong Kim³·Tae-Hyung Cha⁴·Young-Jun Yang⁵
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Green Ship Research Department¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University²
Approval Center Korea, DNV-GL³
R&D Center, SAMBO C.M.C⁴
Global Core Research Center for Ships and Offshore Platform, Pusan National University⁵

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.

In general, the installation of offshore wind turbine have been carried out by a jack-up barge or wind turbine installation vessel. In case of using jack-up barge, an additional barge is required to transport offshore wind turbines. During the transportation, barge is affected by environmental conditions such as wave, wind etc. So, it is important to secure the static and dynamic stability of the barge. In this study, fundamental research was performed to evaluate the stability of barge due to use the guide frame. The analysis for static stability of barge was performed under the two loading conditions with or without wave and those results were evaluated according to the Ministry of Oceans and Fisheries rules. Also motion analysis was performed under the ITTC wave spectrum using buoy data and evaluated based on NORDFORSK guideline by using commercial software Maxsurf Motions.

Keywords : Barge(바지선), Offshore wind turbine(해상풍력발전기), Stability(안정성), Transportation(운반), Guide frame(가이드 프레임)

1. 서론

화석연료 사용으로 인한 지구 온난화 문제를 해결하기 위해 세계 각국에서는 기존의 화석연료 사용을 억제하고 비용대비 효율성이 높은 원자력발전의 비중을 확대해 왔지만 최근 일본 후쿠시마 원전 사고를 계기로 여러 국가에서 원자력 발전소 건설을 유보하거나 폐쇄 결정을 내리고 있다. 대표적으로 독일의 경우 자국 내 원자력발전소를 모두 폐쇄하기로 결정하였으며, 이를 대체하기 위한 방법으로 다양한 신재생 에너지 개발에 박차를 가하고 있다.

대표적인 신재생 에너지로는 태양광, 풍력 등이 있으며, 특히 풍력발전의 경우 유럽 선진국들을 중심으로 육상에 비해 상대적으로 풍자원이 풍부하며 소음문제를 해결할 수 있는 해상에 풍력발전 단지를 조성하는 방안이 주목받고 있다. 국내에서도 최근 정부의 신재생에너지 개발계획에 따라 서남해안 해상풍력 실증화 단지 개발을 위한 프로젝트로 해상풍력단지가 설치될 예정이다.

해상풍력단지를 조성하기 위해서는 Fig. 1과 같이 운반 및 설치가 모두 가능한 전용 풍력발전기설치선(wind turbine installation Vessel, WTIV)을 이용하거나 잭업(jack-up) 바지선 선단을 운용하는 방법 등이 있다 (World maritime news, 2011).

잭업 바지선 선단의 경우 해상풍력발전기를 설치하기 위한 잭업 바지선이 설치 지역에서 잭업 후 대기하며, 별도의 운반선이 해상풍력발전기를 운반하는 방법으로 전용 설치선에 비해 상대적으로 선가가 낮으며 수심이 얇은 곳에서 주로 이용된다.



Fig. 1 Wind turbine installation vessel

국내에는 대형 조선소를 위주로 전용 설치선을 건조한 경험은 있지만 설치 및 운반을 위한 선박은 보유하고 있지 않다, 하지만 최근 해상풍력단지 조성을 위해 잭업 바지선 선단을 운용하기 위한 5,500톤급 잭업 바지선이 건조되었다 (SAMBOCMC, 2016).

두 가지 방법 모두 육상에 비해 상대적으로 외부 환경요인의 영향이 큰 해상에서 작업을 수행함에 따라 해상풍력발전기의 손상을 방지하기 위해 운반 및 설치에 대한 사전 안정성 검토는 필수적이라 할 수 있다. 해상 운반에 관한 연구로 Seok, et al. (2010; 2013)은 플로팅 독(dock)을 이용한 방파제용 케이슨의 운반 및 설치에 대한 안정성 검토를, Jo, et al. (2009)은 해양환경 조건에 따른 동적운동, 와이어장력, 혹은 로드 등의 검토를 통한 해상 운반 안정성 검토를 수행하였으며, Hong and Hong (2005)은 선형 포텐셜 이론을 이용하여 바지선의 손상침수 시 자세변화가 미치는 운동 특성 변화에 관한 연구를 수행하였다. 예인 시 발생할 수 있는 안정성 문제에 대한 연구로 Nam, et al. (2013; 2014)은 실험과 수치해석적 방법을 통해 운송 바지선의 예인 안정성 검토를, Heo and Park (2016)은 방파제용 케이슨의 예인방법에 따라 발생하는 갑판 침수 현상에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 3MW급 해상풍력발전기의 안전한 운반을 위해 고안한 가이드 프레임의 적용에 관한 연구로 76 m급 바지선의 정적 복원성 및 운동성능 평가를 통해 안정성을 평가해 보았다.

2. 해상풍력발전기 운반에 따른 안정성 검토

2.1 정적 복원성 및 운동성능

선박의 안정성을 확인하는 방법은 정적 복원성의 만족 여부를 판단하는 것이 일반적이며, 이 때 선박의 복원성 기준이 되는 G_0M 은 Fig. 2와 같이 선박의 무게 중심에서 경심(metacenter)까지의 거리로 식 (1)~(3)으로 계산된다.

$$GM = KB + BM - KG \tag{1}$$

$$BM = \frac{I_{XX}}{V} \tag{2}$$

$$G_0M = GM - GG_0 \tag{3}$$

여기서, KB 는 부력중심까지 거리, BM 은 부력중심에서 경심까지 거리로 2차모멘트(I_{XX})와 선박의 배수용적(V)로 계산되며, KG 는 무게중심까지 거리, GM 은 무게중심에서 경심까지 거리, GG_0 는 자유수 효과 등으로 인한 무게 중심의 이동거리이다.

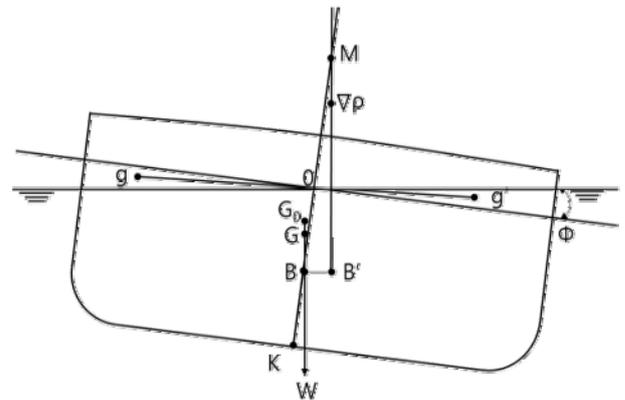


Fig. 2 Schematic of metacenter

복원성의 기준은 선박의 종류 및 적용되는 규정에 따라 차이가 있으며, 본 연구에서는 Table 1과 같이 해양수산부에서 고시한 바지선의 복원성 규정을 적용하였다 (Ministry of Oceans and Fisheries, 2016). 이 규정은 경하상태(ballast)와 만재상태(full loaded)에서 G_0M 을 기준으로 하고 있으며, 이 때 B 는 배 폭을 의미한다.

Table 1 Criteria of barge

Criteria	Ballast	Full loaded
G_0M	$G_0M \geq 0.164B$	$G_0M \geq 0.095B$

운동성능 검증을 위한 해상 환경조건은 서남해안 해상풍력 실증단지가 조성될 지역과 가장 가까이에 위치한 영광 파고부이 자료를 이용하였으며, Table 2는 영광 파고부이에서 2014~2015년 동안 계속된 결과로 월별 평균 유의파고와 주기를 나타낸다 (National Climate Data Service System, 2016).

Table 2 Wave data of wave buoy at Yeonggwang

Month	Average significant wave height(m)	Average wave period (sec)
1	1.189	5.4
2	0.954	4.9
3	0.800	4.8
4	0.460	4.2
5	0.452	4.0
6	0.308	3.8
7	0.406	4.4
8	0.392	4.8
9	0.466	4.4
10	0.739	4.5
11	0.907	4.7
12	1.412	5.5

2.2 해상풍력발전기 운반 방법

통상적으로 해상풍력발전기는 육상에서 타워, 나셀, 블레이드 등으로 분리하여 운반 후 해상에서 조립한다. 특히 타워의 경우 운반 시 안정성 확보를 위해 하부, 중간, 상부로 분리하여 운반하게 된다. 하지만 최근에는 Fig. 3과 같이 해상 크레인이나 별도의 특수선을 이용하여 육상에서 조립이 완료된 해상풍력발전기를 운반 하는 등의 다양한 방법이 시도되고 있다.



Fig. 3 Transportation method of wind turbine

본 연구에서는 해상풍력발전기의 타워를 안전하게 운반하기 위한 방법으로 Fig. 4와 같이 타워를 수직으로 운반할 수 있는 고박 장치의 일종인 가이드 프레임에 바지선에 적용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 위한 안정성 검토를 수행하였다. 운반 검토를 위한 바지선은 76 m급 바지선으로 제원은 Table 3과 같으며, Fig. 5와 같이 선수미에 총 8개의 밸러스트 탱크(ballast tank)를 가지고 있다. 안정성 검토에 이용될 해상풍력발전기는 2 종류의 3 MW급 해상풍력발전기로 각각의 제원은 Table 4에 명시된 바와 같다.

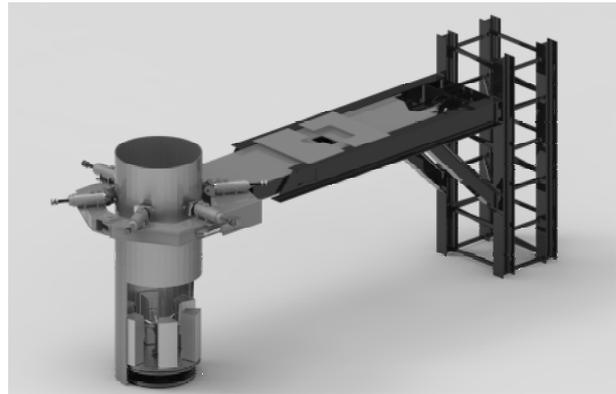


Fig. 4 Concept design of guide frame for tower

Table 3 Main particulars of barge

Item	Figures
L x B x D (m)	76.0 x 26.0 x 5.1
Lightweight (Ton)	1,410
LCG (m)	37.6
TCG (m)	0.0
VCG (m)	3.6

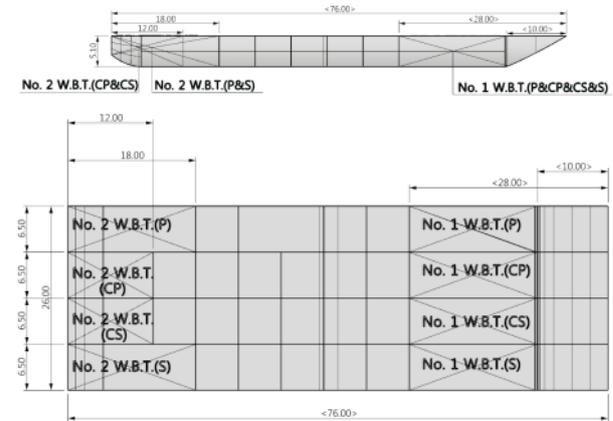


Fig. 5 Geometry of 76m class barge for transportation

Table 4 Main particulars of wind turbine

Item	Type-1		Type-2	
	Weight (Ton)	Size (W×H×L, m)	Weight (Ton)	Size (W×H×L, m)
Nacelle	130	4.8×5.6×13.3	120	4.8×5.6×13.3
Hub	30	Φ5.1×4.3	30	Φ5.1×4.3
Blade	11	4.2×4.2×48.0	14	4.2×4.2×65.0
Tower-1 (BTM)	65	4.5×4.5×15.0	80	4.5×4.5×18.0
Tower-2 (MID)	52	4.4×4.5×25.0	67	4.4×4.5×32.0
Tower-3 (TOP)	40	3.8×3.8×25.0	40	3.8×3.8×25.0

Table 5 Loading conditions

Item	Type-1					Type-2				
	Total mass (ton)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	Total FSM (ton·m)	Total mass (ton)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	Total FSM (ton·m)
Lightship	1410	37.635	0	3.600	0	1410	37.635	0	3.600	0
Deadweight	700	29.675	0	11.706	0	758	30.347	0	12.504	0
Guide frame_1	35	20.300	0	8.100	0	35	20.300	0	8.100	0
Guide frame_2	35	28.300	0	8.100	0	35	28.300	0	8.100	0
Guide frame_3	35	36.300	0	8.100	0	35	36.300	0	8.100	0
Guide frame_4	35	44.300	0	8.100	0	35	44.300	0	8.100	0
Guide frame_5	35	52.300	0	8.100	0	35	52.300	0	8.100	0
Guide frame_6	35	60.300	0	8.100	0	35	60.300	0	8.100	0
Margin	91	37.500	0	5.100	0	91	37.500	0	5.100	0
No.1 W.B.T.(P)	0	56.804	-9.750	0	0	0	56.804	-9.750	0	0
No.1 W.B.T.(CP)	0	56.804	-3.250	0	0	0	56.804	-3.250	0	0
No.1 W.B.T.(CS)	0	56.804	3.250	0	0	0	56.804	3.250	0	0
No.1 W.B.T.(S)	0	56.804	9.750	0	0	0	56.804	9.750	0	0
No.2 W.B.T.(P)	0	10.492	-9.750	0	0	0	10.492	-9.750	0	0
No.2 W.B.T.(CP)	29.280	7.647	-3.250	0.264	281.479	55.344	7.355	-3.250	0.473	281.479
No.2 W.B.T.(CS)	29.280	7.647	3.250	0.264	281.479	55.363	7.355	3.250	0.473	281.479
No.2 W.B.T.(S)	0	10.492	9.750	0	0	0	10.492	9.750	0	0
Total loadcase	2470	34.889	0	6.256	562.958	2580	34.890	0	6.656	562.958
GG ₀				0.228					0.218	
KG ₀				6.484					6.884	

해상풍력발전기의 운반을 설치 시 소요되는 작업 및 대기 시간을 고려하여 한번에 2기를 운반하는 것을 목표로 하였으며, 각각의 해상풍력발전기를 적재한 모습은 Fig. 6과 같다. 해상풍력발전기의 적재 시 작업자의 이동 및 설치 작업을 고려하여 여유 간격을 확보하였으며, 타워의 경우 설치 순서를 고려하여 선수에서 선미방향으로 작업이 가능하도록 배치하였다. 복원성 계산 시 검토된 적재 조건은 Table 5와 같으며, 이 때 선박은 선수미에 위치한 밸러스트 탱크를 이용하여 경사가 없는 조건을 고려하였으며 이로 인해 발생하는 자유수 효과는 복원성 계산 시 고려되었다.

3. 안정성 검토 결과

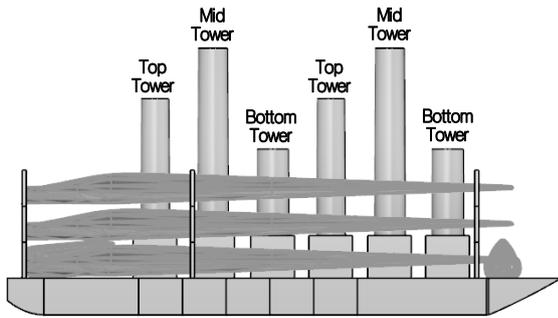
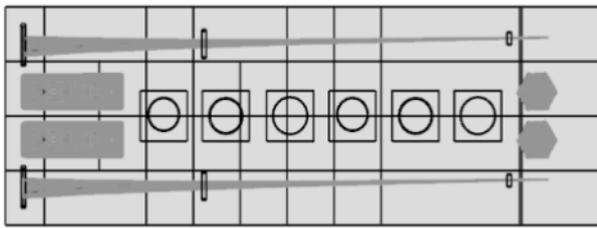
3.1 정적 복원성

전술한 조건을 이용하여 바지선의 정적 복원성을 검토한 결과

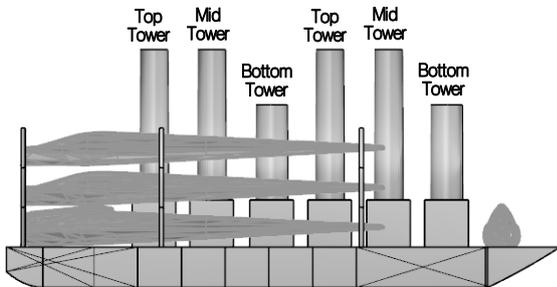
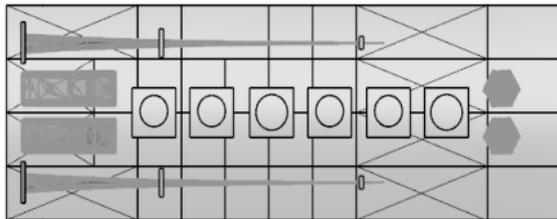
는 Table 6과 같이 해상풍력발전기 Type-1, 2 모두 정적 복원성 기준을 크게 웃돌며 만족하고 있다. 이는 큰 부피를 가지는 해상풍력발전기의 특성상 부피에 맞는 바지선을 선택함에 따라 바지선의 운반 능력에 비해 화물의 중량이 작아서 생기는 여유로 생각된다.

Table 6 Results of stability analysis

Item	Condition	Full loaded (Type-1)	Full loaded (Type-2)
Displacement (ton)		2470	2580
Draft at midship (m)		1.418	1.478
KG ₀ (m)		6.484	6.884
BM (m)		41.546	39.892
G ₀ M (m)		35.062	33.008
Result		Satisfied (> 0.095B)	Satisfied (> 0.095B)



(a) Wind turbine type-1



(b) Wind turbine type-2

Fig. 6 Loading conditions of wind turbine

일반적인 파(wave)가 없는 상태에서 정적 복원성 검토에 이어 정현파(sinusoidal wave)를 고려한 복원성 검토를 수행하였다. 정현파의 파고 및 주기는 Table 2에 명시된 1년 동안의 파고 중 가장 큰 12월의 수치를 이용하였다. 파장은 해상풍력발전기가 설치될 지역의 수심(10~30 m)을 고려하여 심해영역($h/\lambda > 0.5$)의 파속과 파장을 나타내는 식 (4)~(5)를 통해 계산된다. 또한 파의 위상에 따라 바지선의 배수용적과 2차모멘트가 변하며, 이로 인해 복원성이 감소하기 때문에 본 연구에서는 배수용적과 2차모멘트가 가장 작을 것으로 예상되는 파정이 바지선의 길이방향 중앙에 위치할 경우에 대한 검토를 수행하였다.

$$C = \frac{g}{2\pi} T \tag{4}$$

$$C = \frac{\lambda}{T} \tag{5}$$

이 때, C는 파속, g는 중력가속도, λ는 파장 그리고 T는 파주기로 5.5s 이다.

복원성 검토 결과 Table 7과 같이 파의 영향에 의해 복원성의 기준이 되는 G_0M 변화를 확인할 수 있지만 감소량은 1% 이내로 크지 않으며, 2가지 경우 모두 복원성 기준을 만족하고 있다. 이는 파장이 선박의 길이에 비해 상대적으로 짧으며, 파고가 낮아 바지선의 배수용적 변화가 크지 않았기 때문이다.

Table 7 Results of stability analysis with sinusoidal wave

Item \ Condition	Full loaded (Type-1)	Full loaded (Type-2)
Displacement (ton)	2470	2580
Draft at midship (m)	1.509	1.242
KG_0 (m)	6.552	6.877
BM (m)	41.328	39.705
G_0M (m)	34.776	32.828
Result	Satisfied (> 0.095B)	Satisfied (> 0.095B)

3.2 운동 성능 검토

바지선의 운동 성능 검토는 Bentley사의 범용 소프트웨어인 Maxsurf Motions을 이용하여 계산을 수행하였다 (Bentley Systems, 2013). Fig. 7은 계산에 이용된 바지선의 패널(panel)을 나타내며, 이 때 사용된 패널수는 1992개이며 비정렬 격자의 형태이다. 해상조건은 영광 파고부이에서 계측된 12월의 유의파고와 주기를 이용하여 Fig. 8과 같이 ITTC 스펙트럼을 적용하였으며, 무게 중심 및 관성반경은 Table 8과 같다. 파향은 선수(0°)부터 선미(180°)까지 30°간격으로 총 6개의 파향에 대한 해석을 수행하였으며, 선속은 고려되지 않았다. 이는 검토 대상이 무동력 바지선이며, 작업 바지선이 대기하고 있는 설치 지역에서의 작업성을 검토하기 위해서이다.

운동 성능 해석 결과는 Fig. 9와 같다. 상하동요(heave)의 경우 모든 파향에 대해서 0.2m 이내로 나타나고 있어 파의 진폭(amplitude)과 갑판(deck)의 높이를 고려할 경우 갑판이 침수되는 상황은 발생하지 않을 것으로 예상된다. 횡동요(roll)의 경우 최대값이 나타나는 측면파(beam sea) 상황에서 약 2.7°의 동요

량을 보이지만 이를 좌우측면의 흡수차이로 계산 시 1.2 m로 갑판의 높이를 고려할 때 안정성에는 문제가 없을 것이다. 종동요 (pitch)의 경우 파향이 30°일 때 약 0.7°의 최대값을 보이며, 전반적으로 동요량은 크지 않다.

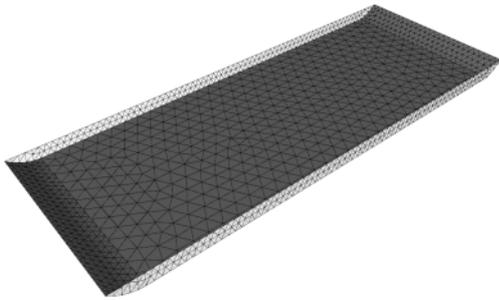


Fig. 7 Panel for numerical simulation

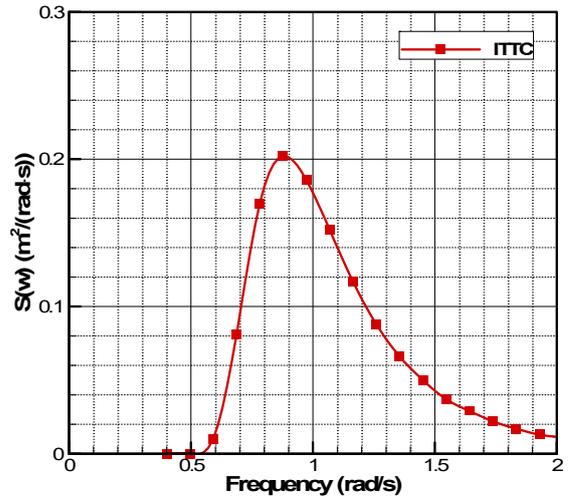


Fig. 8 ITTC wave spectrum

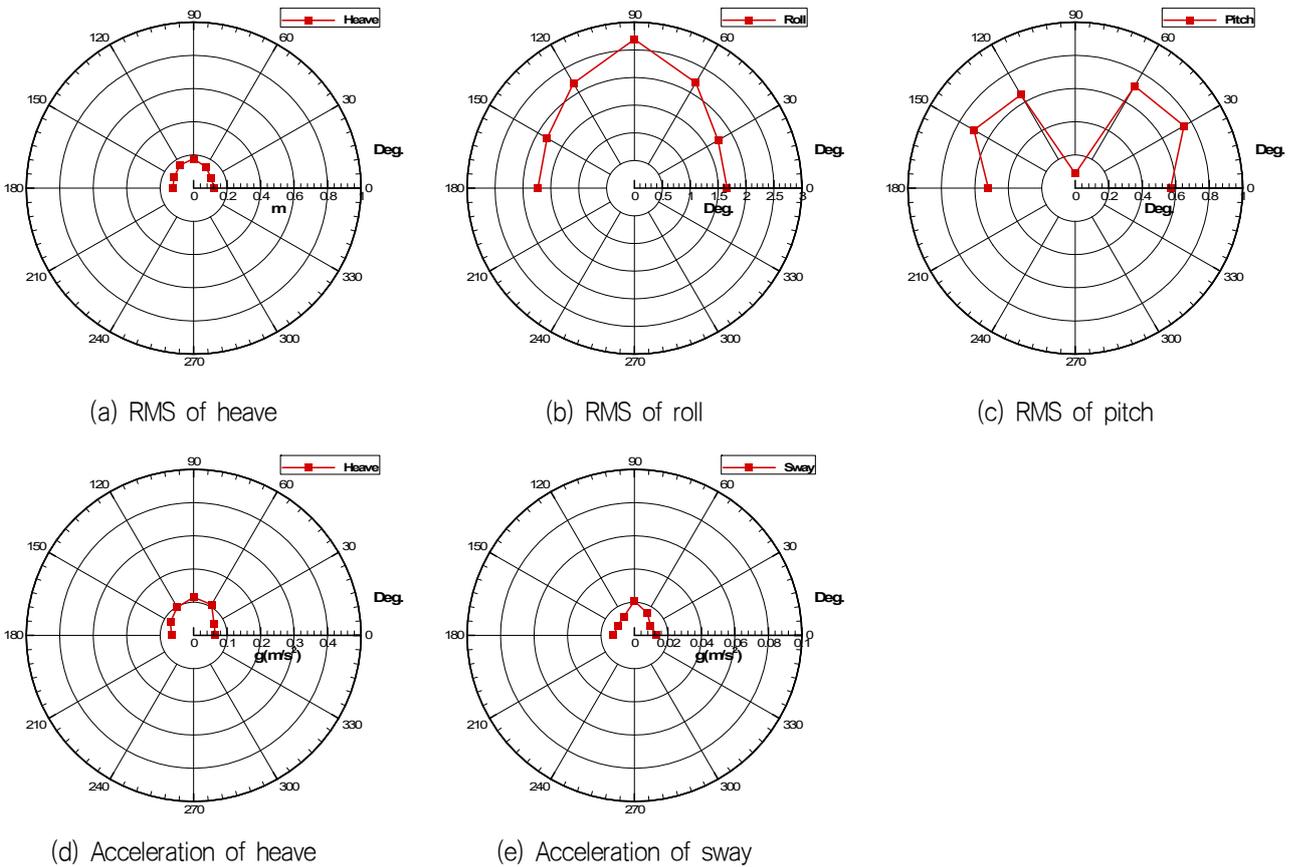


Fig. 9 Results of motion analysis

산출된 운동 성능 해석 결과를 바탕으로 Table 9와 같이 수직 가속도, 수평 가속도 그리고 횡동요에 관한 NORDFORSK (1987)의 기준을 적용하여 바지선의 작업성을 판단해 보았다. 수직 가속도를 나타내는 상하동요의 가속도는 파향이 60°와 90°에서 지적 작업(intellectual work)이 가능한 수준인 0.10g를 만족하지 못하지

만 중량물 작업(heavy manual work) 기준은 만족하고 있다. 수평 가속도와 횡동요는 모든 파향에서 각각 지적 작업 기준인 0.05 g와 3.0°를 만족하고 있다. 따라서 종합해볼 때 모든 파향에서 중량물 작업(heavy manual work)이 가능하며, 파향이 60°와 90°를 제외한 상태에서는 지적 작업(intellectual work)이 가능한 수준이다.

Table 8 Parameters for motion analysis

Item	Figures
Draft (m)	1.5
Trim (m)	0.0
VCG (m)	6.9
Gyration of roll (m)	10.4
Gyration of pitch (m)	19.0
Gyration of yaw (m)	19.0

Table 9 Criteria for accelerations and roll motion

	RMS vertical acceleration	RMS lateral acceleration	RMS roll motion
Light manual work	0.20g	0.10g	6.0°
Heavy manual work	0.15g	0.07g	4.0°
Intellectual work	0.10g	0.05g	3.0°

4. 결론

본 연구에서는 해상풍력발전기를 안전하게 운반하기 위한 가이드 프레임의 적용에 관한 연구로 적재 조건에 따른 76m급 바지선의 정적 복원성 및 운동성능 검토를 수행하였다.

정적 복원성의 경우 파의 유무에 따라 검토를 수행하였으며, 이 때 파는 해상풍력 실증단지가 조성될 것으로 예상되는 지역에서 가장 가까이에 위치하고 있는 영광 파고부이 계측 결과를 바탕으로 정현파를 고려하여 해석을 수행하였다. 안정성 검토 결과 파의 유무에 따라 해양수산부에서 고시한 부선 복원성 기준을 모두 만족하였으며, 파를 고려할 경우 선박의 침수부피의 변화로 인해 복원력이 감소하였다. 하지만 상대적으로 파장이 짧으며, 파고가 약 1.4 m로 상대적으로 낮아 복원성 감소량은 크지 않았다.

운동성능 해석의 경우 상용 프로그램을 이용하여 패널법을 적용하였으며, 정적 복원성(정현파)에서 이용한 파고와 파장을 이용하여 ITTC 스펙트럼을 고려하였다. 검토 결과 상하동요, 종동요 그리고 횡동요 모두 동요량이 크지 않음을 확인할 수 있었고, 바지선의 작업성의 경우 NORDFORSK (1987)의 작업성 기준과 비교하여 판단할 때 모든 파향에서 중량물 작업이 가능하며, 파향이 60°와 90°를 제외할 경우 지적 작업이 가능한 수준으로 확인되었다. 또한 바지선의 특성상 작업 시 바지선의 자세 제어를 위해 예인선이 바지선에 붙어 있을 것으로 예상되며, 이로 인해 바지선의 동요량은 감소될 것으로 사료된다. 하지만 운반 시 안정성 확보를 위해 화물이 움직이지 않도록 고박 등에 유의하여야 될 것이며, 상대적으로 풍압면적이 큰 화물의 특성상 바람에 대한 주의가 요구된다.

후 기

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

References

Bentley Systems, 2013. *Maxsurf motions user manual v.19*. Available at: <http://www.www.bentley.com>.

Heo, J.K. & Park, C.W., 2016. Time domain analysis on deck wetness of a caisson wet-towed in irregular waves. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(1), pp.27-33.

Hong, D.C. & Hong, S.Y., 2005. Waveload analysis for heeled barges with flooded compartments. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp.379-387.

Jo, C.H. Kim, S.J. & Cheong, H., 2009. Dynamic stability during transportation of bridge caisson. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(1), pp.104-108.

Ministry of Oceans and Fisheries, 2016. *Criteria for structure and equipment of barge*. Available at: <http://www.mof.go.kr/> [Accessed 5 July 2016].

Nam, B.W. Hong, S.Y. Kim, J.H. Choi, S.K. & Kim, J.W., 2014. Experimental and numerical study on towing stability of transportation barge. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(2), pp.102-110.

Nam, B.W. Park, J.Y. Hong, S.Y. Sung H.G. & Kim, J.W., 2013. Numerical simulation of towing stability of barges in calm water. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(1), pp.67-73.

National Climate data Service System, 2016. *Climate data*. Available at: <http://sts.kma.go.kr/> [Accessed 1 July 2016].

NORDFORSK, 1987. *The nordic cooperative project, seakeeping performance of ships, assessment of a ship performance in a seaway*. Trondheim, Norway: MARINTEK.

SAMBOCMC, 2016. *Maritime equipment*. Available at: http://www.sambocmc.com/02_pro/?mcode=0402040100 [Accessed 2 July 2016].

Seok, J. Park, J.C. Heo, J.K. Kang, H.Y. Bae, Y.H. Kim, M.H. & Kang, Y.K., 2010. Stability evaluation during transportation of caisson for

breakwater. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(4), pp.13–22.

Seok, J. Park, J.C. Jeong, S.M. Kim, S.Y. Kang, H.Y. Kim, M.H. & Kang, Y.K., 2013. Stability evaluation of floating dock during construction and launching of caisson for breakwater. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(6), pp.43–55.

World Maritime News, 2011. *UK: New turbine installation vessel to arrive at sheringham shoal offshore wind farm*. Available at: <http://worldmaritimenews.com/archives/41101/uk-new-turbine-installation-vessel-to-arrive-at-sheringham-shoal-offshore-wind-farm/> [Accessed 7 July 2016].



석준



백영수



박종천



김성용



차태형



양영준