



Original Article

동해 부유식 해상풍력 발전단지 조성 타당성 및 발전기 적합성에 관한 연구

최군환^{1,†} · 정노택² · 이병호³ · 신규보⁴

¹울산대학교 건설환경공학부, (현)울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부

²울산대학교 조선해양공학부

³울산대학교 건설환경공학부

⁴울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부

Research for Validity of Building Offshore Floating Wind Power Field at East Sea and Compatibility of Floating Wind Turbine Generator

Gun Hwan Choi^{1,†}, Rho-Taek Jung², Byung Ho Lee³, and Kyubo Shin⁴

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Ulsan University, Ulsan 44610, Korea (present) School of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, UNIST, Ulsan 44919, Korea

²School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan University, Ulsan 44610, Korea

³Department of Civil and Environmental Engineering, Ulsan University, Ulsan 44610, Korea

⁴School of Electrical and Computer Engineering, UNIST, Ulsan 44919, Korea

요 약

지구 온난화 가속으로 인한 화석연료 사용 저감이 지구촌 문제로 대두되고 친환경 에너지 생산이 절실히 요구되면서 해상풍력 발전 및 태양광 에너지 생산에 관한 기술력이 미래성장산업 및 CO₂ 저감의 결정적 요소로 부각되고 있다. 이와 함께 울산의 지역적 특성을 활용하여 연관 산업의 공통 문제를 해결하는 방안으로써의 연구가 요구되는데, 부유식 해상풍력 발전단지를 울산 앞바다에 조성하여 친환경 에너지를 생산함으로써 연관 산업의 CO₂ 저감을 극대화하여 울산을 부유식 해상풍력 발전의 메카로 부상시킬 수 있다. 또한 울산이 최근 개통한 울산대교, 울산-포항간 고속도로를 통해 구축된 해오름 동맹의 핵심도시로 자리매김할 수 있을 것으로 예측된다. 본 연구에서는 부유식 풍력발전기 기술, 해상풍력 발전단지의 입지선정, 총 발전용량, CO₂ 저감 총량, 경제적 효과 등을 분석한다.

Abstract – As the reduction of the fossil fuel consumption due to global warming becomes a huge problem and the production of eco-friendly energy is required, technology for offshore wind power, solar power generation is turning out to be a decisive factor for future growth industries and CO₂ reduction. In addition, research on methods to solve the common problems of industries in Ulsan by utilizing the local characteristics is required. By establishing an floating wind field on the offshore, it is one of a major option for maximizing the CO₂ reduction at the industries. It is also expected that Ulsan will become the core of Haeoleum Union, which was constructed through the recently opened Ulsan Daegyo Bridge and Ulsan-Pohang Highway. In this study, we analyze the technology of wind power generator, the location, the total capacity, the total CO₂ reduction, and the economic effect of offshore floating wind power field.

Keywords: Offshore floating wind power farm field(해양 부유식 풍력발전단지), Mooring System for floating wind power(부유식 풍력발전기 계류장치), Renewable Portfolio Standard(RPS)(신재생에너지 의무할당제), CAPEX, CO₂ Reduction(CO₂ 저감)

1. 서 론

교토의정서가 만료되는 2020년 이후의 기후변화 대응에 관한 파리 기후변화협정이 2016년 10월 비준되면서 지구 온난화 가속으로

인한 CO₂ 저감이 각국의 할당 목표를 기준으로 발효될 예정이다 (Hwang [2010]). 이에 따라 우리나라에서도 CO₂ 저감이 산업계 전반에 화두로 제기되면서 2030년까지 온실가스 배출을 37% 줄인다는 계획을 내어 놓았고 이를 위해 화석연료의 사용을 줄여야한다. 2014년 하반기 이후 저유가 상황에도 불구하고 세계 각국의 정책

[†]Corresponding author: kingsunchoi@unist.ac.kr

의지 및 기술 발달 등으로 신재생에너지 산업은 높은 성장세를 유지하고 있다. 이러한 세계 시장의 성장세에 발맞추어 국내 정부도 “2030년까지 신재생에너지 발전량 비중 20% 달성”을 목표로 ‘신재생 3020 이행계획’을 수립하였다. 신재생 3020 이행계획의 핵심 내용은 2030년까지 53GW의 신규 재생에너지 발전설비를 설치하고, 신규 설치량 중 풍력·태양광 비중을 80%로, 연 평균 설치량을 기존 1.7GW에서 3.7GW로 확대하는 것을 목표로 삼고 있다. 또한 최근에는 2030년까지 100조원 시장, 일자리 50만개 창출 및 온실가스 5,500만 톤 감축을 목표로 2030 에너지 신산업 확산 전략을 발표하고 추진 중이다.

울산의 경우, 신재생에너지 산업의 성장 동력 창출을 통한 내수 확대 및 국내 기업의 해외 신재생에너지 발전 프로젝트 수주를 위한 정부 정책에 호응하면서 울산에 위치한 중화학 공업단지와 인근 포항의 철강단지의 동반발전을 이루고 화석 연료 사용을 줄일 수 있는 신성장 동력 산업이 요구되는 시점이다. 이를 위해 울산 앞바다에 부유식 해상풍력 발전단지를 조성하는 방안에 대한 타당성을 연구함으로써 부유식 해상풍력 발전 산업이 철강 산업의 수요 감소를 흡수하고 조선 해양 산업의 불황을 해결하며 석유화학 공단, 화력 발전소에서 발생하는 CO₂를 저감하고, 원자력 발전을 대체할 수 있음을 확인하여야 한다.

부유식 해상풍력 발전기에 대한 적합성 평가도 필요한데, 이에 대한 기존 연구는 다음과 같다. Kim *et al.* [2013]은 블레이드와 타워를 유연체로 가정하여 주어진 공력하중 상태에서의 동역학해석을 수행하여 5MW급 해상풍력발전시스템의 상부구조물에 대해 동적 응답 해석을 수행하였다(Kvittem *et al.* [2012]; Park and Shin [2015]; Roddier *et al.* [2011])에서는 토크 해석을 위해 테프난 방정식을 적용하였으며, 피치베어링 마운트, 요베어링 마운트와 타워베이스에서 토크를 해석한 결과 피치베어링 및 요베어링 마운트의 토크는 강체의 토크와 유사한 반면, 타워베이스의 토크는 비교적 차이가 나타났다. 바람과 파도가 있을 때 운동특성이 비교적 검증되어 있는 계류된 반잠수식 해양구조물에 Wind float 개념(Roddier *et al.* [2011])을 도입하여 NREL 5MW 윈드터빈(Semi-submersible wind

turbine: SSWT) 구조물 전체의 운동을 시뮬레이션과 해양수조에서 모델실험을 수행한 연구도 있었다(Kvittem *et al.* [2012]; Park and Shin [2015]; Dubos *et al.* [2013]). 해양파 하중으로 인해 OC4 자켓 위에 NREL 5MW 윈드터빈이 있을 때 자켓 연결부의 형태 및 연결크기(superelement)에 따라서 구조피로가 개선될 수 있다(Dubois *et al.* [2013]; Kim *et al.* [2015]). 더욱이 해상풍력과 파력이 복합적으로 발전을 하는 개념도 제안되고 있다. Wind float의 기본 이론은 부유체와 블레이드의 운동이론의 조합으로 이루어진다. 따라서 이를 위한 운동역학적 이론 해석과 유체이론 해석뿐만 아니라 운송해석 또한 별도로 필요하게 되어 부유식 해상풍력 발전시스템은 3개의 각기 다른 소프트웨어를 사용하여 해석하는 방식을 채택하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에서는 1개의 소프트웨어만을 사용하여 오차범위 내의 결과 값을 찾아내었다.

2. 동해 부유식 해상풍력 발전단지 입지 조건

부유식 해상풍력 발전단지의 입지 조건은 기본적으로 수심이 50~200 m의 대륙붕 해수면을 가진 지역, 풍속이 7 m/s 이상의 지역이 경제성이 있는 것으로 평가되었다(Son and Lee [2010]). 이에 따라 국내에서는 포항에서 제주도까지의 해안선으로부터 20 km 내외 거리의 지역이 수심 130~150 m, 연평균 풍속 7.5~8.5 m/s로 경제성이 충분한 것으로 파악되고 있다(Fig. 1). 또한 해저케이블 시공, 송전선로 확보 등 부가적인 조건을 검토하여야 하는데, 울산 앞바다는 765 kV의 원전 송전선로, 345 kV의 동서발전 울산화력 본부 계통 송전선로, 154 kV의 울산변전소 계통 송전선로가 있어 우리나라 어느 지역보다 송전계통의 설비를 획기적으로 줄일 수 있는 입지조건을 갖추고 있다. 이에 더하여 울산에는 중공업 선박블록 제작사가 140 여개 있어 부유식 풍력발전기를 생산할 인프라가 충분하고 최근 개통한 울산-포항 간 고속도로를 이용하여 포스코의 철강 제품 조달을 위한 물류비용을 절감할 수 있기 때문에 부유식 해상풍력 발전단지 구성에 대한 제작, 송전, 전기 판매 등 국내 어느 지역과도 비교될 수 없는 조건인 것이다. 부가적으로 해안선 20 km

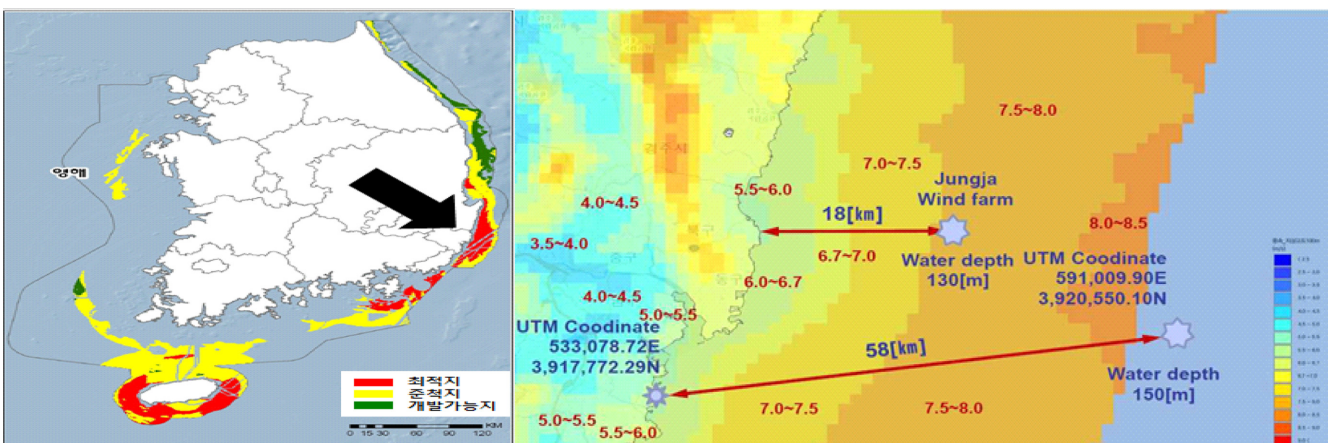


Fig. 1. Floating wind resource assessment of Ulsan offshore based on the wind resource map.

내외의 거리에 발전단지를 조성함으로써 민원 요소를 배제할 수 있다.

3. 부유식 풍력 발전기 적합성 평가를 위한 실험 및 결과

풍력 발전에 적용되는 공기역학적 이론은 항력(Drag), 양력(Lift), 실속(Stall)에 관한 정리이다. 항력은 물체가 유체 내를 움직일 때 움직임에 저항하는 힘이고 양력은 양면이 비대칭인 경우에만 존재하며 유체의 흐름 방향에 수직으로 작용하는 힘이다(Tavner *et al.* [2006]). 실속은 날개의 받음각을 지나치게 높였을 때 유동의 박리로 의하여 양력이 감소하고 항력이 급증하는 것을 뜻한다. 부유식 풍력 발전기는 바람과 파도의 운동에 의한 영향을 동시에 해석하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 현재까지의 이루어진 부분별 해석보다 일체식 구조물로서의 해석이 적합하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 중량과 무게중심(Center of gravity, COG), 평형수(Ballast water) 등 주요 특성을 파악 할 수 있는 결과를 도출하였다.

발전기의 적합성을 평가하기 위해 필요한 해석은 Patran(구조해석)과 MOSES(운송해석)을 이용하였으며 방법은 다음과 같다. 바람은 해당지역의 최악조건인 태풍 사라호(1959년, 최대 풍속 45 m/s), 콤포스(2016년, 최대 풍속 71 m/s)를 고려하기 위하여 바람은 9.5 m/s로 일정하게 분다고 설정한 상태로 Load case를 100에서 600까지 설계하였으며 Load case 100-500은 안전계수(Safety factor, S.F.)가 1.0-5.0이고 Load case 600은 Load case 500 조건에서 150 ton의 vertical load를 적용한 경우이다. 이 때, Load case 600은 실제로

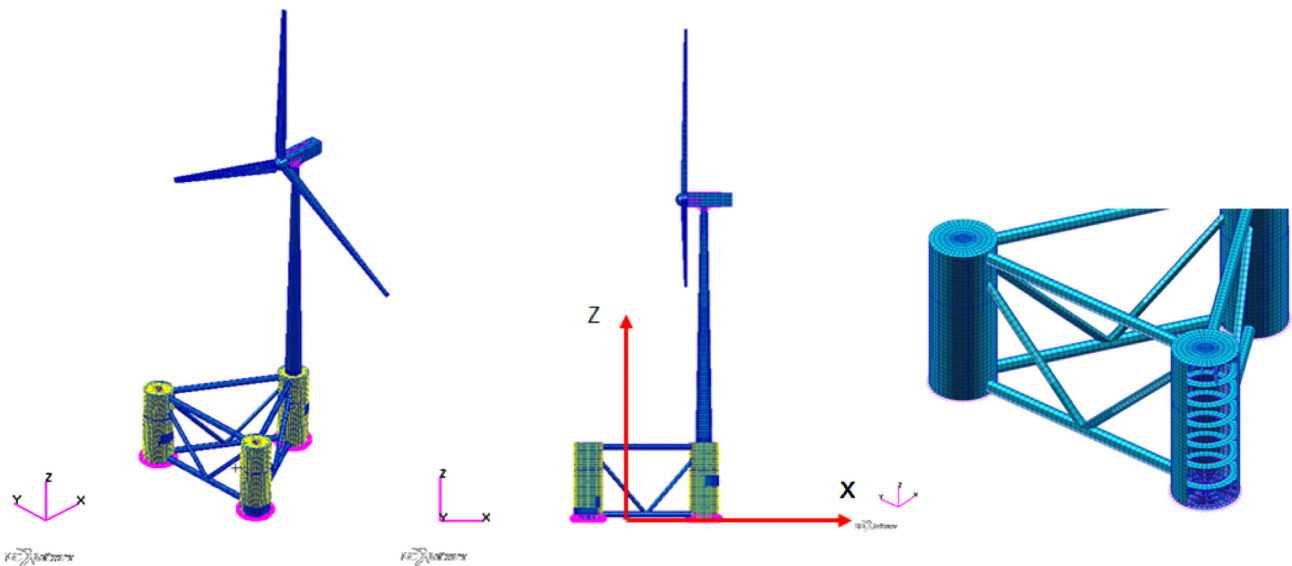
80 m/s의 바람이 부는 것과 같은 조건이 된다. 파도는 100년 주기에서 최악의 조건인 11초 동안 12 m 높이의 파도로 가정하였으며 이 때 응력(stress)은 0.79 (YP)이므로 충분함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 구조물 뿐만 아니라 장비, 기기 등에도 동일 조건의 바람, 파도를 적용하였다.

3.1 5.5~6.0 MW 발전설비 적합성 판단을 위한 연구 설계 조건

부유식 해상풍력 발전기는 부유체를 포함하는 하부구조물과 발전기를 비롯한 상부 구조물의 운동이 불일치하기 때문에 이를 버틸 수 있는 구조물의 안전성 확보가 핵심이고 이를 확인하기 위해서는 발전기를 일체식 구조물로 가정하여 하중, 배수량, 무게중심, 평형수 등을 구조해석으로 알아내는 것이 가장 효과적이다(Lee [2005]). 해상구조물인 것을 고려하여 구조해석은 Patran을 사용하였으며 운송해석은 MOSES를 사용하였고 그 결과는 Fig. 5~9와 같이 그래프로 도식화하였다. 설계조건은 하중의 변화, 배수량의 변화, 구조물의 두께 등을 포함하도록 하였다. 특히 하중조건(Load case, LC100~600)변화에 따라 안전계수를 달리하여 하중에 따른 모든 변화를 추정할 수 있는 도식으로 표현함으로써 추후 중량 조건이 다른 기종에 대한 예측도 가능하도록 하였다(Bae and Kim [2013, 2014]; Utsunomiya *et al.* [2013]; Ribrant and Bertling [2007]; Roald *et al.* [2013]).

3.2 5.5~6.0 MW 발전설비 제작을 위한 연구 설계 구조물 구조해석

Fig. 2는 Fig. 2 내 표의 입력값을 바탕으로 부유식 해상풍력 발



Constants	Components	3 Blades	Turbine nacelle	Post	Hull	Total
Specific gravity of steel : 7.85	Weight [ton]	3	6	150	1585.3	1744.3
Gravitational acceleration: 9810 (mm/s ²)	Remark	Provided	Provided	Provided	FE model	
Young's modulus of steel: 2.06 · 10 ⁵ (N/mm ²)	COG [mm]	X: 2,626 / Y: 0.0 / Z: 18,778				

Fig. 2. Example of structural analysis of floating wind turbine generator.

Components	안전계수	Weight [Ton] (1)	Weight [Ton] (2)	Remarks
3 Blades	1.00	3	3	
	1.15	3.45	3.45	
	2.00	6	6	
	2.50	7.5	7.5	
	5.00	15	15	
Turbine nacelle	1.00	6	6	
	1.15	6.9	6.9	
	2.00	12	12	
	2.50	15	15	
	5.00	15	30	
Post	1.00	150	150	
	1.15	172.5	172.5	
	2.00	300	300	
	2.50	375	375	
	5.00	375	750	
Hull	1.00	1585.3	1717	
	1.15	1823.095	1974.55	
	2.00	3170.6	3434	
	2.50	3963.25	4292.5	
	5.00	3963.25	8585	
Total		15967.845	21855.4	

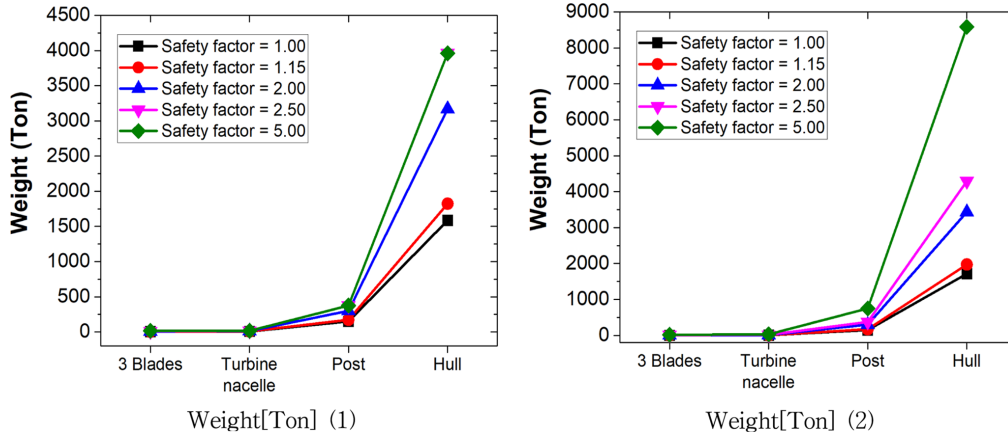


Fig. 3. Comparison of weight of floating wind turbine generator analyzed by two different methods.

	COG[mm] (1)			COG[mm] (2)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Wind Float	1.00	2626	0	18,778	2442	0	18,435
	1.15	3019.9	0	21,595	2808.3	0	21,200
	2.00	5252	0	37,556	4884	0	36,870
	2.50	6565	0	46,945	6105	0	46,088
	5.00	13130	0	93,890	12210	0	92,175

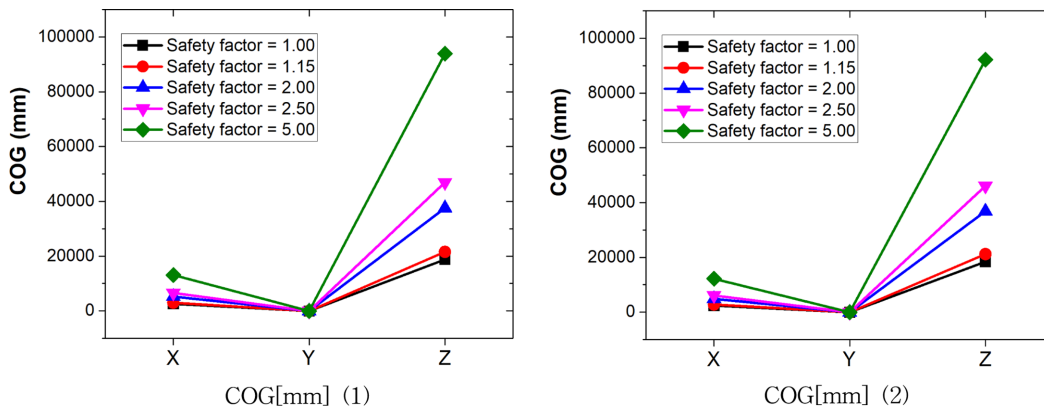


Fig. 4. Comparison of COG of floating wind turbine generator analyzed by two different methods.

전기를 Patran을 이용하여 일체식 구조물로 모델링하여 해석한 예시를 나타내었다. Fig. 3은 안전계수에 대해 각 구조 요소 별 이루어진 중량 해석이 발전기를 일체형 구조물로 해석했을 때 (weight[Ton] (1))와 상부구조물과 하부구조물을 각각 구조해석과 운송해석(MOSES)으로 해석했을 때(weight[Ton] (2))의 결과를 나타낸 것이다. 이를 살펴보면 나누어 해석한 결과가 일체형 구조물 해석의 10% 범위를 넘지 않음을 확인 할 수 있다. S.F.가 5.00인 환경은 실제로 일어날 확률이 매우 희박하며 50년 주기라는 설계 조건에 해당하지 않기 때문에 해당 조건에서 일어나는 오차는 무시하였다. 이 결과를 그래프를 통하여 나타내었고 기중별 중량적 요소를 추정함에 있어 복수의 프로그램이 필요 없음을 확인 하였다. 구조물의 중량은 구조물의 안전성을 포함한 대부분의 요소에

영향을 미치기 때문에 매우 중요한 요소이므로 확인절차에 이용되었다.

Fig. 4의 COG[mm] (1)와 COG[mm] (2)는 각각 1개, 2개의 해석 프로그램을 이용하여 얻은 COG이다. COG는 부유식 구조물의 평형수량을 조절하여 수평을 유지하는데 이용되는 요소로써 발전량에 상당한 영향을 미치게 되므로 매우 중요한 의미를 갖는다. 구조해석과 운송해석의 결과는 일반적으로 차이가 있지만 본 연구에서는 가장 근접한 해석 값을 도출하여 오차 범위 10%에 근접하는 결과를 구하였다. 따라서 추후 예측된 그래프에 의하여 COG를 추정할 수 있는 구조 해석적 기본의 논리가 구성되었음이 확인되었다.

Fig. 5은 전체 구조물을 해석하기 위해 Load case (L100~L600) 별로 안전계수를 변화시키면서 배수량(Displacement)의 중량, 무게

Load Case	Condition	Weight [Ton]	COG [mm]		
			X	Y	Z
LC100	Dead Load x 1.00	1744.30	2626	0.0	18,778
	Dead Load x 1.15 + No4	2005.95	3019.9	0.0	21,595
	Dead Load x 2.00 + No4	3488.60	5252	0.0	37,556
	Dead Load x 2.50 + No4	4360.75	6565	0.0	46,945
	Dead Load x 5.00 + No5	8721.50	13130	0.0	93,890
LC200	Dead Load x 1.00	7266.15	725	0.0	-
	Dead Load x 1.15 + No4	8356.07	833.75	0.0	-
	Dead Load x 2.00 + No4	14532.30	1450	0.0	-
	Dead Load x 2.50 + No4	18165.38	1812.5	0.0	-
	Dead Load x 5.00 + No5	36330.75	3625	0.0	-
LC300	Dead Load x 1.00	8748.80	1047	0.0	-
	Dead Load x 1.15 + No4	10061.12	1204.05	0.0	-
	Dead Load x 2.00 + No4	17497.60	2094	0.0	-
	Dead Load x 2.50 + No4	21872.00	2617.5	0.0	-
	Dead Load x 5.00 + No5	43744.00	5235	0.0	-
LC400	Dead Load x 1.00	9620.95	1190	0.0	-
	Dead Load x 1.15 + No4	11064.09	1368.5	0.0	-
	Dead Load x 2.00 + No4	19241.90	2380	0.0	-
	Dead Load x 2.50 + No4	24052.38	2975	0.0	-
	Dead Load x 5.00 + No5	48104.75	5950	0.0	-
LC500	Dead Load x 1.00	13981.70	1638	0.0	-
	Dead Load x 1.15 + No4	16078.96	1883.7	0.0	-
	Dead Load x 2.00 + No4	27963.40	3276	0.0	-
	Dead Load x 2.50 + No4	34954.25	4095	0.0	-
	Dead Load x 5.00 + No5	69908.50	8190	0.0	-
LC600	Dead Load x 1.00	12378.30	-1890	0.0	-
	Dead Load x 1.15 + No4	14235.05	-2173.5	0.0	-
	Dead Load x 2.00 + No4	24756.60	-3780	0.0	-
	Dead Load x 2.50 + No4	30945.75	-4725	0.0	-
	Dead Load x 5.00 + No5	61891.50	-9450	0.0	-

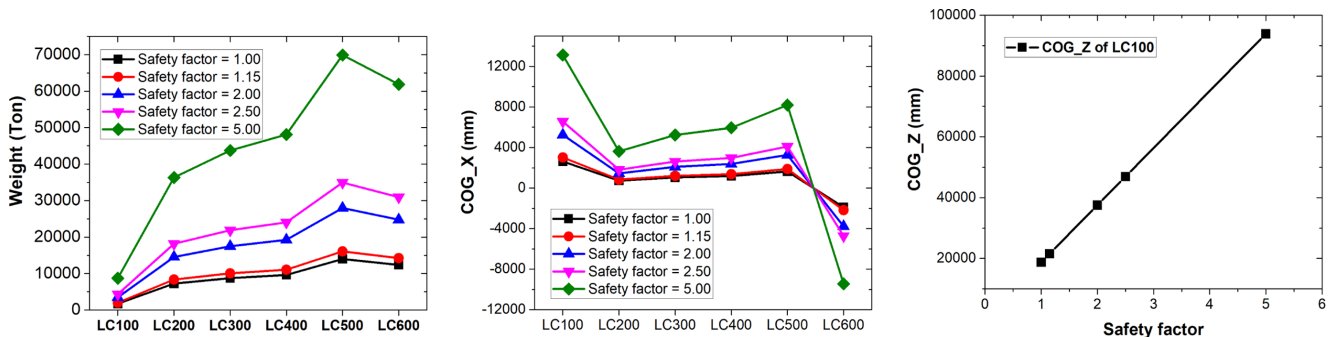


Fig. 5. Analysis on the weight of displacement and the COG for varying load.

LC	Condition	Weight [Ton]	Draft [m]	Roll [deg]	Pitch [deg]	Remarks
-	Maximum Buoyancy	1.00	9355.28	28.0	-	Height = 28.0 m
		1.15	10758.57	32.2	-	Height = 32.2 m
		2.00	18710.56	56.0	-	Height = 56 m
		2.50	23388.20	70.0	-	Height = 70 m
		5.00	46776.40	140.0	-	Height = 140 m
LC100	Dead Load x 1.00	1.00	1744.30	4.40	0.00	2.69
		1.15	2005.95	5.06	0.00	3.0935
		2.00	3488.60	8.80	0.00	5.38
		2.50	4360.75	11.00	0.00	6.725
		5.00	8721.50	22.00	0.00	13.45
LC200	Dead Load x 1.15 + No4	1.00	7266.15	22.33	0.00	0.75
		1.15	8356.07	25.6795	0.00	0.8625
		2.00	14532.30	44.66	0.00	1.5
		2.50	18165.38	55.825	0.00	1.875
		5.00	36330.75	111.65	0.00	3.75
LC300	Dead Load x 2.00 + No4	1.00	8748.80	26.77	0.00	1.27
		1.15	10061.12	30.7855	0.00	1.4605
		2.00	17497.60	53.54	0.00	2.54
		2.50	21872.00	66.925	0.00	3.175
		5.00	43744.00	133.85	0.00	6.35
LC400	Dead Load x 2.50 + No4	1.00	9620.95	>Maximum Buoyancy		
		1.15	11064.09	>Maximum Buoyancy		
		2.00	19241.90	>Maximum Buoyancy		
		2.50	24052.38	>Maximum Buoyancy		
		5.00	48104.75	>Maximum Buoyancy		
LC500	Dead Load x 5.00 + No4	1.00	13981.70	>Maximum Buoyancy		
		1.15	16078.96	>Maximum Buoyancy		
		2.00	27963.40	>Maximum Buoyancy		
		2.50	34954.25	>Maximum Buoyancy		
		5.00	69908.50	>Maximum Buoyancy		
LC600	Dead Load x 5.00 + No5	1.00	12378.30	>Maximum Buoyancy		
		1.15	14235.05	>Maximum Buoyancy		
		2.00	24756.60	>Maximum Buoyancy		
		2.50	30945.75	>Maximum Buoyancy		
		5.00	61891.50	>Maximum Buoyancy		

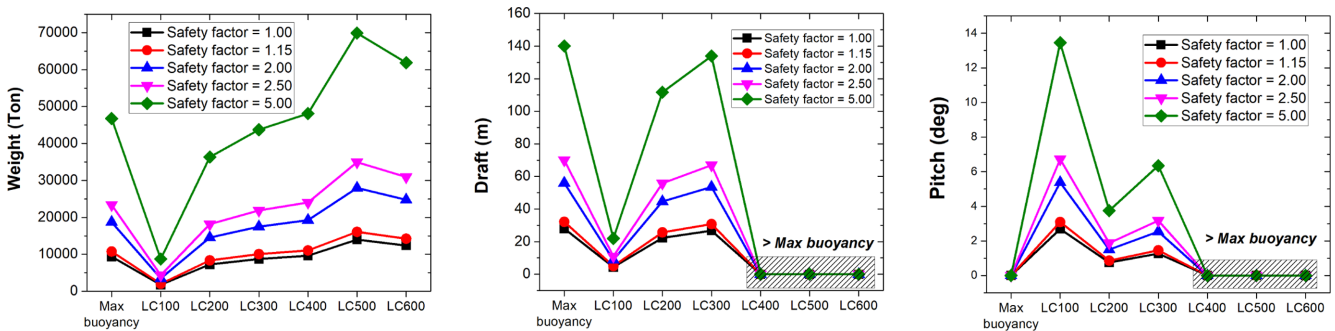


Fig. 6. Analysis on the weight of displacement, draft level, roll and pitch for varying load.

중심의 위치를 해석한 결과이다. L100인 경우는 구조물 자체의 무게를 기준으로, L200인 경우는 구조물의 최대 안전하중을 기준으로, L300~L600은 진동, 운동, 구조물의 응력(Stress) 한계범위를 검토할 수 있도록 해석하였다. 따라서 본 결과는 구조물의 중량을 결정 짓는 두께, 형상 등의 요소가 예측 가능한 범위일 때의 결과를 보여준다.

Fig. 6은 Fig. 5의 해석에서와 같은 Load case, 안전계수 조건 하에서 흘수(Draft level)와 롤, 피치를 해석한 것이다. 먼저 각 안전계수 조건 별로 최대 부력에서의 배수량과 그 때의 침수 깊이를 계

산한 후 해석을 진행하였다. 안전계수가 2.00 이상인 경우는 환경은 실제로 일어날 확률이 매우 희박하고 그 때의 깊이가 56m가 되므로 침몰하는 경우는 일어나지 않는다고 해석할 수 있다.

3.3 5.5~6.0 MW 발전설비 제작을 위한 연구 설계 구조물 운송 해석

부유식 해상풍력 발전기의 컬럼(Column)은 부유체이기 때문에 운송해석이 필요하다. 이 부유체의 유동에 대한 해석을 통하여 자중(Self weight), 평형수 하중(Ballast water weight)에 의한 COG변

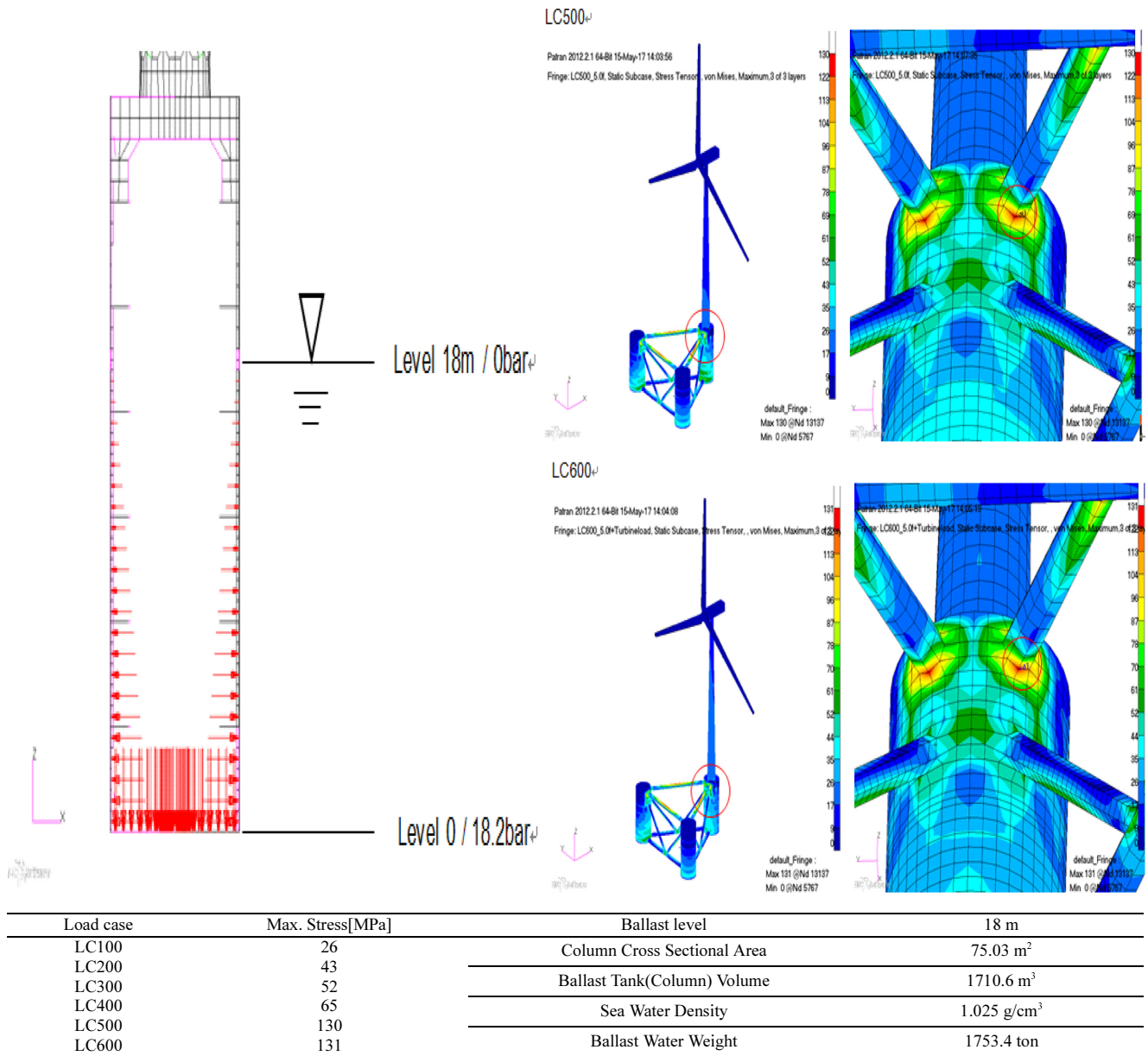


Fig. 7. Analysis on the maximum stress for varying load and ballast water weight.

화를 예측할 수 있으며 이는 부유체의 흘수(Draft level)를 예측할 수 있으므로 이를 근거로 일체식 해석의 입력자료(Constant)를 얻을 수 있다.

Fig. 7은 Load case 별로 최대 응력을 해석하는 과정과 결과를 나타낸 것이다. 부유체를 제작할 때 이 결과값을 고려하여 일정 이상의 강도를 가진 재료로 구성해야한다는 것을 알 수 있다. 평형수 높이와 컬럼의 단면적을 이용하여 컬럼 내 평형수의 부피를 구한 후 최종적으로 평형수의 무게를 구한 결과도 같이 나타내었다. Fig. 8은 구조물과 평형수의 중량을 고려했을 때 각 컬럼에서 필요한 평형수량을 해석하는 과정을 나타낸 것이다. LC600일 때는 발전기의 무게 150ton 때문에 발전기에 직접적으로 연결된 컬럼 #3에는 평형수가 필요 없음을 알 수 있다.

Fig. 9은 일체식 구조 해석에서 취득한 자료에 근거하여 운송 해석을 수행하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 앞서 구조해석과 운송해석에 의하여 취득한 그래프와 대조한 결과 운송해석은 10% 범위 내에 존재함을 확인할 수 있었고 구조해석 또한 제한 범위 3% 내에 있음을 확인할 수 있었다(Barthelmie and Jensen[2010]). 또한 개별적 해석의 합과 전체를 구조물로 가정하여 해석 결과는 제한 범위 내의 차이를 보이므로 일체식 구조해석을 통해 모델링의 오차 범위를 줄일 수 있을 뿐 아니라 부유식 구조물의 중량을 포함한 전반적인 핵심 자료를 구할 수 있음이 확인 되었다. 또한 일체식 구조해석을 이용하면 구조해석과 운송해석을 따로 했을 때 생기는 단점들을 해결하는데 사용될 수 있다(Ahlstrom[2002]).

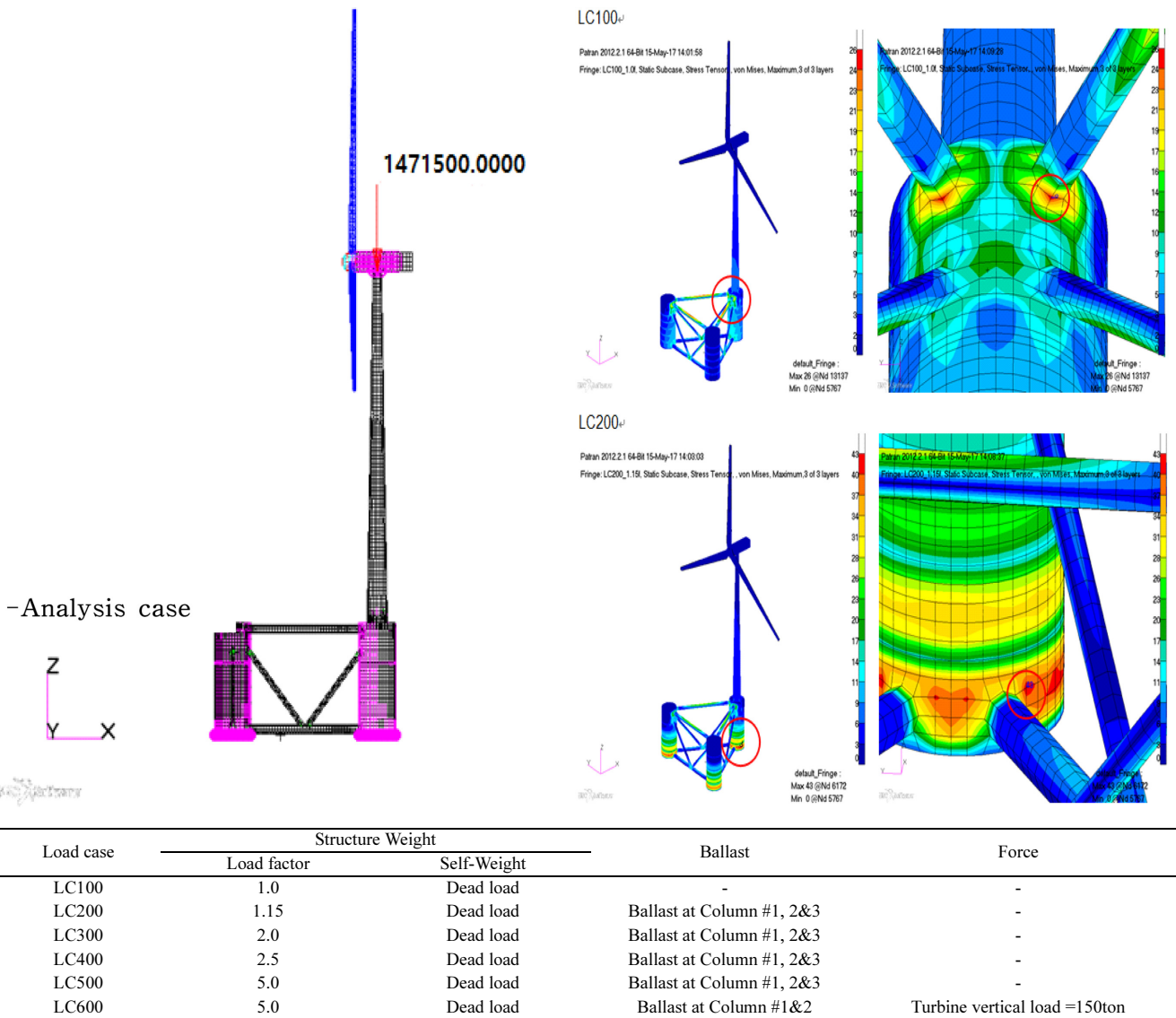


Fig. 8. Analysis on the maximum stress for varying load and ballast water weight (continue from Fig. 7).

4. 부유식 해상풍력 발전단지 조성 결과 예측

해상풍력 발전단지의 건설에는 강재의 수급, 기술적 가성비를 포함한 경제성, 효율성, 규모 적정성을 고려한 설계가 필요하다. 따라서 설계적 측면과 부품 적정 단가, 건설비 회수를 통한 각종 비용, 수익성을 기준으로 500MW급 단지를 유효적정기준이자 최소 운영단위급으로 정하였으며 이에 따른 비용, 효율을 기준으로 수익을 산정하였다(Musial *et al.* [2004]; CORBON TRUST Floating Offshore Wind[2015]). Fig. 10은 각 발전방식 별 시간에 따른 비용으로 해상풍력발전은 설치 초기에만 비용이 많이 필요하고 추후에는 낮은 비용을 유지하는 것으로 볼 수 있다.

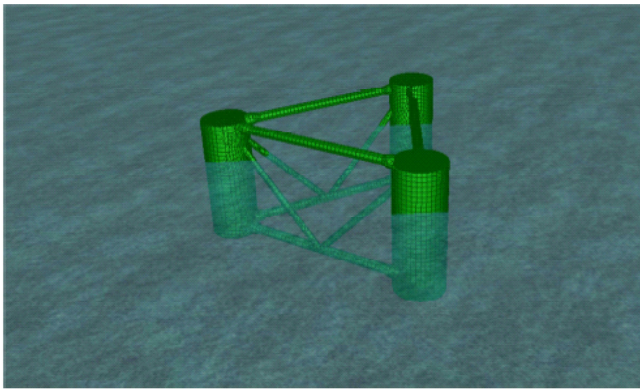
Table 1은 부유식 해상 풍력 발전 시 온실가스(GHG) 배출 저감량을 정량적으로 평가한 것이다. 2030년까지 감축 예측치를 제시함으로써 해양 에너지에 대한 활용 범위를 제시한 자료이며 풍력

발전기 및 에너지자원의 활용가치에 대한 객관적 미래예측을 보여준다.

Table 2는 본 연구 설계를 통하여 우리나라 부유식 해상 풍력 발전기의 경쟁력을 비교한 자료이며, 이것은 설계가 완료된 모델의 관련 부품 단가 비교를 통해 구하였다(Tong[1988]).

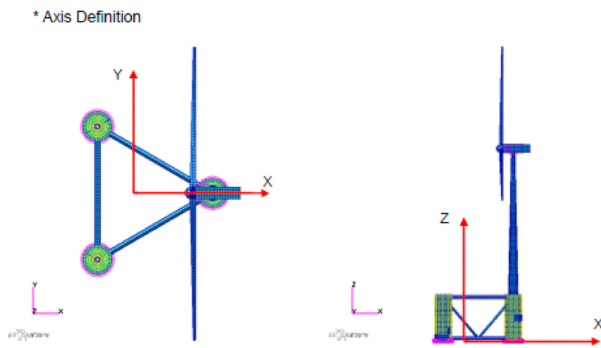
5. 결 론

정부와 한국전력은 울산광역시, 부산광역시 일원의 전력공급이 우리나라 전체의 25%를 점하고 있는 상태에서 한수원의 원자력 신고리 5, 6호기 건설 허가를 결정하였었다. 이는 원자력 발전과 화력 발전의 비중이 세계 어느 곳보다 큰 곳일 만큼 에너지 소비가 많다는 뜻이며 이 지역의 에너지 사용 증가 추이를 흡수할 수 있는 친환경 에너지 발전이 시급하다는 뜻이기도 하다. 부유식 해상풍력



No	Components	Weight [Ton]
1	WindFloat	1744.3
2	Ballasted at 1 Column	1753.4
3	Ballasted at Column #1&2	3506.8
4	Ballasted at Column #1,2&3	5260.2

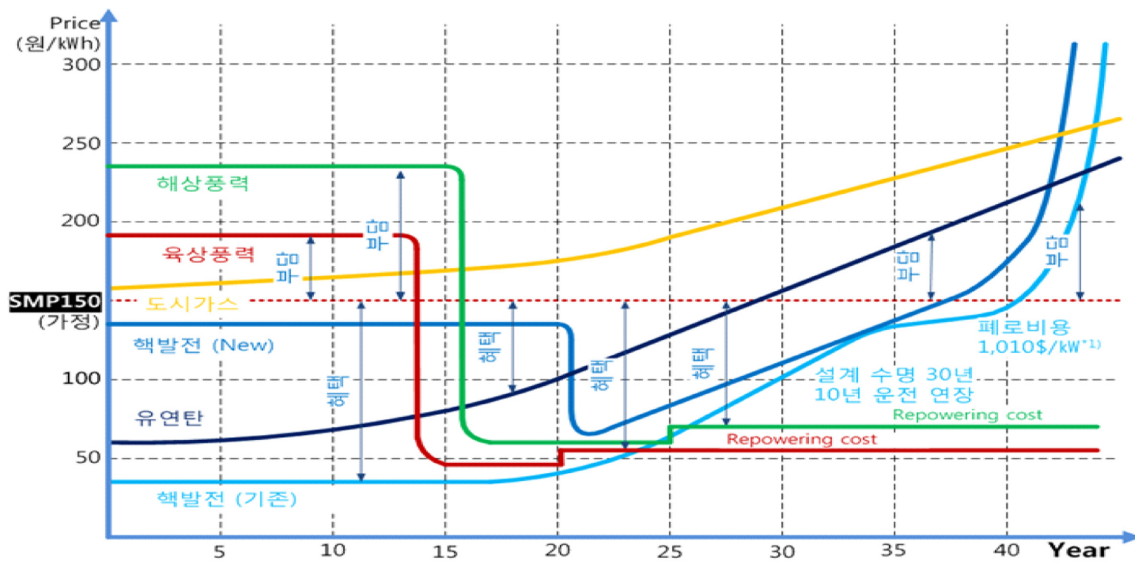
Model Weight & COG



Load case	Condition	Weight [Ton]	COG [mm]		
			X	Y	Z
LC100	Dead Load x 1.00	1744.30	2626	0.0	18,778
LC200	Dead Load x 1.15 + No4	7266.15	725	0.0	-
LC300	Dead Load x 2.00 + No4	8748.80	1047	0.0	-
LC400	Dead Load x 2.50 + No4	9620.95	1190	0.0	-
LC500	Dead Load x 5.00 + No4	13981.70	1638	0.0	-
LC600	Dead Load x 5.00 + No5	12378.30	-1890	0.0	-

Load case	Condition	Weight [Ton]	Draft [m]	Roll [deg]	Pitch [deg]	Remarks
-	Maximum Buoyancy	9355.28	28.0	-	-	Height = 28.0 m
LC100	Dead Load x 1.00	1744.30	4.40	0.00	2.69	
LC200	Dead Load x 1.15 + No4	7266.15	22.33	0.00	0.75	
LC300	Dead Load x 2.00 + No4	8748.80	26.77	0.00	1.27	
LC400	Dead Load x 2.50 + No4	9620.95	>Maximum Buoyancy			
LC500	Dead Load x 5.00 + No4	13981.70	>Maximum Buoyancy			
LC600	Dead Load x 5.00 + No5	12378.30	>Maximum Buoyancy			

Fig. 9. Transportation analysis on floating wind turbine generator.



Notes:
 *1) 1999년 IEA 자료 : 고리1호기 원자력 (587MW) 기준 폐로 비용 = \$592,870,000USD 환율(1,195.8원) 및 물가상승률(39.1%)로 2011년 추산 폐로 비용 = 9,860억원

Fig. 10. Expected cost by generation types.

Table 1. Predicted reduction of GHG emission by offshore floating wind power generation

Classification	Results	Notes
Ⓐ 2030 Total GHG Emission[ton]	850,600,000 [ton]	-
Ⓑ 2030 reduction target[ton]	314,722,000 [ton]	Ⓐ × 0.37
Ⓒ 18.3% reduction[ton]	155,659,800 [ton]	Ⓐ × (0.113+0.07)
Ⓓ 18.3% of wind power capacity	259,433,000 [MWh]	Ⓒ /0.6[ton/kWh] ← GHG reduction per 1MWh of wind power
Ⓔ Wind power installation requirement	84,249 [MW]	Ⓓ/(8,760Hr×0.35) ← Annual time and utilization
Ⓕ 5.5[MW]WTG + Float Price [KRW 100 million]	190 [KRW 100 million]	WTG 110[KRW 100 million], Float 80[KRW 100 million]' Except for installation fee for more than 20 sets
Ⓖ Wind power Market Size [Set]	15,369[Set]	Ⓔ/5.5[MW]
Ⓗ Wind power Market Size [KRW 100 million]	2,920,102 [KRW 100 million]	Ⓖ × Ⓕ

Table 2. Unit price comparison between Korean offshore wind turbine generator (WTG) and foreign WTG

Sub-module (Unit: 1M KRW)	6[MW] FLOW BASE based on Oregon project						5.5[MW] FLOW BASE					
	1[MW]		6[MW]		30[MW]		1[MW]		5.5[MW]		500.5[MW]	
	Price	%	Price	%	Price	%	Price	%	Price	%	Price	%
WTG	2,640	27.2	15,840	27.2	79,200	27.2	2,000	45.2	11,000	45.3	1,001,000	45.4
Ⓐ Float Total	1,426	14.7	8,554	14.7	42,768	14.7	1,527	34.5	8,399	34.6	764,291	34.7
Ⓑ BOP Total	5,654	58.1	33,927	58.1	169,635	58.1	894	20.1	4,885	20.1	438,156	19.8
Ⓒ Develop Wind Farm Subtotal	769	7.9	4,615	7.9	23,075	7.9	93	2.1	484	2.0	44,033	2.0
Ⓓ Electric Subtotal	2,076	21.4	12,453	21.4	62,267	21.4	554	12.5	3,048	12.6	271,000	12.3
Ⓔ Transportation	198	2.0	1,188	2.0	5,940	2.0	19	0.4	105	0.4	9,510	0.4
Ⓕ Installation @sea	145	1.5	869	1.5	4,345	1.5	13	0.3	72	0.3	6,507	0.3
Ⓖ Control safety & CMS	24	0.2	145	0.2	723	0.2	24	0.5	132	0.5	12,012	0.5
Ⓗ Contingency	2,443	25.1	14,657	25.1	73,285	25.1	190	4.3	1,045	4.3	95,095	4.3
Grand total with Electric (Grid)	9,720	100.0	58,321	100	291,603	100	4,421	100	24,284	112.6	2,203,447	100
Grand total without Electric (Grid)	7,645	78.6	45,867	78.6	229,336	78.6	3,867	87.5	21,236	87.4	1,932,447	87.7

· Oregon WFP Project CAPEX 97[억 원/MW]@30[MW]
 · Korea FOWT CAPEX 45[억 원/MW]@500[MW]
 · Exchange rate: 1,1000 ₩/\$

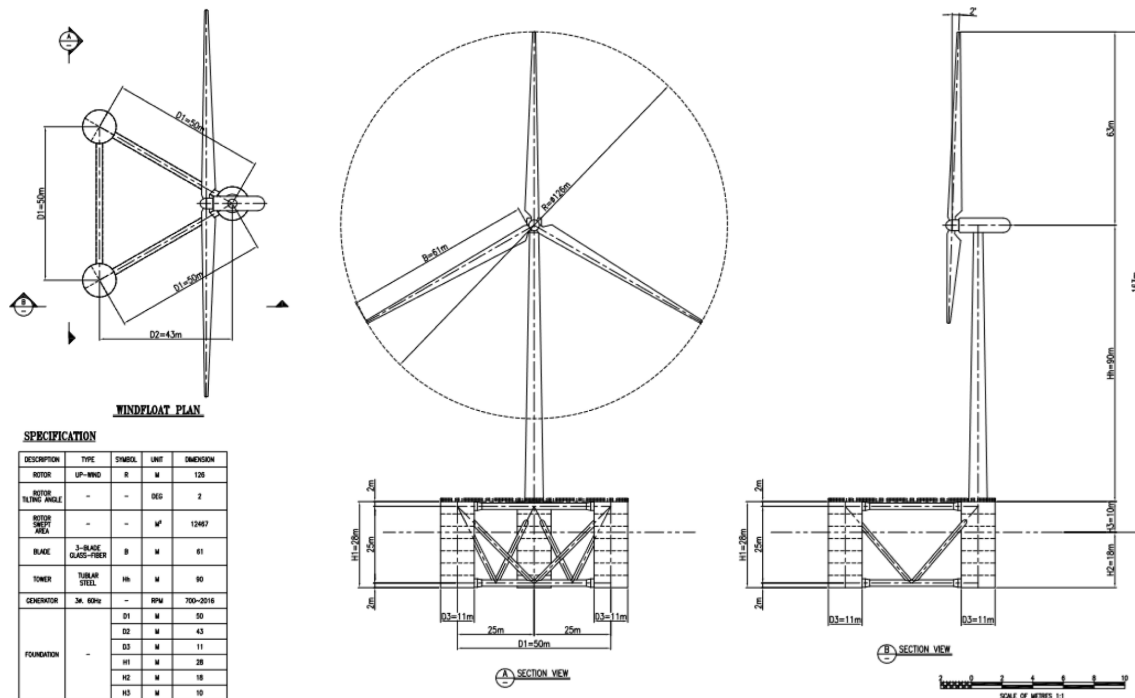


Fig. 11. Design of floating wind power generator.

Table 3. Expected construction cost and profit

개발현황	발전용량 (MW)	설치 기수	중량 (ton)	발전방식	건설비용(억)	수입 (연간/억)
1세대(100%)/상상업운전중	5.5~6.0	50	2,500~3,000	기계식	15,000	2,500
2세대(85%)	8.0~10.0	100	3,500~3,800	기계식+AOM+IT	30,000	8,000
3세대(25%)	10.0~12.0	250	3,800~4,200	초전도+ AOM+IT	87,500	25,000

발전은 기존 발전 방식에 대한 의존을 감소하는 유력한 대안이라 할 수 있다. 부유식 해상풍력 발전은 앞으로 새로운 기술이 지속적으로 나올 수 있는 분야이므로 원천 기술 확보라는 측면에서 보아도 많은 잠재력이 있는 것으로 보인다. 또한, 울산 앞바다에 부유식 해상풍력 발전단지가 생길 경우, 친환경 에너지의 생산은 물론이고 조선해양 산업의 경기 민감도를 완화시키고, 포항의 철강제품의 새로운 수요 창출을 이끌어낼 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 울산 앞바다가 위에서 언급한 조건뿐만 아니라 수심, 풍속 등의 자연환경이 부유식 해상풍력 발전단지를 조성하기 매우 적합한 곳임을 확인하였다. 또한, 발전기의 구조해석 시 상부 구조물과 하부구조물을 별개로 모델링하는 대신 일체식 구조물로 모델링하여도 큰 오차가 없다는 것을 확인한 뒤, 예제 구조물에 대해 Load case와 안전계수에 따른 배수량, 무게중심, 흘수, 롤, 피치 등의 변화를 고려하는 방식을 보여줌으로서 발전기의 적합성을 평가하는 방법을 제시하였다.

Fig. 11은 본 연구에서 제시한 구조해석 방법을 통해 안전성을 확인한 부유식 해상 풍력 발전기의 설계도이다. 울산 앞바다의 환경조건이 고려되었고 추후 비용과 수익을 고려한 모델이다. 이는 현재 제작 가능한 수준의 도면으로 구성이 완료되어 즉시 적용이 가능한 상태이다.

Table 3은 Fig. 11에서 나타낸 설계의 부유식 해상풍력 발전기를 통해 해상풍력 발전단지에 적용하였을 때, 세대별 추진계획을 제시한 자료이며 비용과 수익을 비교하고 있다. 이것을 기준으로 본 연구의 유용성을 최종 확인할 수 있다.

후 기

본 논문은 울산에 친환경에너지 발전단지를 형성함으로써 탄소 배출을 줄이고 조선해양산업, 철강산업의 불황을 타개할 수 있음을 연구한 박사논문에서 발췌하여 게재하는 논문입니다. 협조해주신 (주) 포스코, 울산광역시, 동서발전, SK이노베이션에 감사드립니다.

References

- [1] Ahlstrom, A., 2002, Simulation Dynamical Behaviour of Wind Power Structures, Licentiate Thesis,, Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics.
- [2] Barthelmie, R.J. and Jensen, L.E., 2010, Evaluation of wind farm efficiency and wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm, 2010, Wind Energy, 13, 573-586.
- [3] Bae, Y.H. and Kim, M.H., 2013, Rotor-floater-tether coupled dynamics including second-order frequency wave loads for a mono-column-TLP-type FOWT (floating offshore wind turbine), Ocean Eng., 61, 109-122.
- [4] Bae, Y.H. and Kim, M.H., 2014. Coupled Dynamic Analysis of Multiple Wind Turbines on a Large Single Floater, Ocean Eng., 92, 175-187.
- [5] CARBON TRUST Floating Offshore Wind, 2015, Market and Technology Review, pp. 149-166, Prepared for the Scottish Government.
- [6] Dubois, J., Muskulus, M., Schaumann, P., 2013, Advanced representation of tubular joints in jacket models for offshore wind turbine simulation, Energy Procedia 35, 234-243.
- [7] Hwang, B., 2010, Understanding Wind Turbines, Book publishing Azin, 540-544. Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring, 1st ed., API.
- [8] Kim, K.H., Lee, K., Sohn, J.M., Park, S., Choi, J.-S., Hong, K., 2015, Conceptual design of large semi-submersible platform for wave-offshore wind hybrid power generation, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 18(3), 223-232.
- [9] Kim, T., Hansen, A.M., Branner, K., 2013, Development of an anisotropic beam finite element for composite wind turbine blades in multibody system, Renewable Energy, 59, 172-183
- [10] Kvitting, M.I., Bachynski, E.E. and Moan, T., 2012, Effects of hydrodynamic modeling in fully coupled simulations of a semi-submersible wind turbine, Energy Procedia, 24, 351-362.
- [11] Lee, K. H., 2005, Responses of Floating Wind Turbines to Wind and Wave Excitation, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [12] Musial, W.D., Butterfield, C.P. and Boone, A., 2004, Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines, NREL/CP-500-34874, in 23rd ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Reno, Nevada, January.
- [13] Park, J.H., Shin, H., 2015, A Study on the Optimal Shape Design of a Floating Offshore Wind Turbine, J. of the Soc. of Naval Archi. of Korea, 52(3), 171-179.
- [14] Ribrant, J. and Bertling, L.M., 2007, Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005, IEEE Trans Energy Conversion, EC22(1), 167-173.
- [15] Roald, L., Jonkman, J., Robertson, A. and Chokani, N., 2013, The effect of second-order hydrodynamics on floating offshore wind turbine, Energy Procedia, 35, 253-264.
- [16] Roddier, D., Peiffer, A., Aubault, A., Weinstein, J., 2011, A

- generic 5MW WindFloat for numerical tool validation and comparison against a generic spar, in: Proceedings OMAE 2011, No. OMAE 2011-50278.
- [17] Son, C., Lee, K.S., 2010, Offshore wind power, Book publishing Azin, 5-18.
- [18] Tavner, P.J., Edwards, C., Brinkman, A. and Spinato, F., 2006, Influence of wind speed on wind turbine reliability, *Wind Eng.*, 30(1), 55-72.
- [19] Tong, K.C., 1988, Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 86, 442-450.
- [20] Utsunomiya, T., Matsukuma, H., Minoura, S., Ko, K., 2013, At Sea Experiment of a Hybrid Spar for Floating Offshore Wind Turbine Using 1/10-Scale Model, *J. of Offshore Mechanics and Arctic Eng.*, 135, 1-8.

Received 28 December 2017

1st Revised 18 January 2018, 2nd Revised 3 May 2018,

3rd Revised 21 May 2018

Accepted 23 May 2018