



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

스파형 부유식 해상풍력발전시스템의
복원성 평가

The stability assessment of spar type for
floating offshore wind turbine

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
김민지

스파형 부유식 해상풍력발전시스템의
복원성 평가

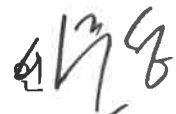


지도교수 신현경

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2021년 02월

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
김민지

김민지의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원	이	주	성	
심사위원	신	현	경	
심사위원	정	노	택	

울산대학교 대학원

2021년 02월

스파형 부유식 해상풍력발전시스템의 복원성 평가

김 민지

울산대학교 대학원 조선 및 해양공학과

국문 요약

부유식 해양구조물의 복원성은 국제해사기구(IMO)에서 2008년 하나의 항목으로 구분하여 나타낸 Resolution MSC.267(85)로 2008 IS CODE라고 하는 비손상 복원성 규정이 기본이 된다. 정의된 선박을 기준으로 각각의 비손상 복원성 기준이 나타나 있으며, 그 중 해양 구조물 역시 구분되어 있다.

부유식 해상풍력 시스템 역시 해양 구조물로서의 복원성 평가의 필요성에 따라 설계 단계에서 검토가 이루어져야 한다. 국제전기기술위원회(IEC)에서 제정한 부유식 해상풍력 시스템 설계 기준서인 IEC61400-3-2의 Clause15에서 부유체 복원성에 대해 다루고 있으나, 비손상 복원성 평가 기준에 대해서는 2008 IS CODE를 참조하도록 되어있으며, 손상 복원성 평가 기준은 그 내용이 나타나있지 않다.

이러한 내용에 따라 복원성 평가에 대한 기준 및 복원성 계산 내용에 있어서는 부유식 해상풍력발전시스템에 적합하게 작성되어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 5-MW급 스파형 부유식 해상풍력발전시스템 모델을 예제로 기존 복원성 규정에 따른 복원성 평가를 수행하였다. 이후 ABS, DNVGL, BV 선급에서 다루고 있는 부유식 해상풍력발전시스템의 부유체 복원성 평가 규정에 대한 비교를 통해 어떤 차이를 두는지에 대해 다루어보았다.

부유식 해상풍력발전시스템에 적용할 수 있는 복원성 평가에 대해 새롭게 정의해 보았다. 첫 번째로 부유체 적재조건의 구분을 통해 실제 발생할 수 있는 다양한 경우에 대해 정의하였으며, 두 번째로 외부 환경하중조건은 정의된 적재조건에 맞게 적용할 수 있는 환경하중조건을 지정하였다. 세 번째로는 적재조건, 환경하중조건을 통해 구해진 정복원모멘트, 전복모멘트를 통해 복원성을 평가할 수 있는 비손상 및 손상 복원성 평가기준에 대해 정의를 하였다. 정의된 세 가지 내용을 바탕으로 5-MW급 스파형 모델을 복원성 평가를 수행한 후 그 결과에 대해 작성하였다.

목차

제1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적과 연구 범위	5
제2장 이전 연구	6
제3장 이론	7
3.1 정복원 모멘트	7
3.2 외력에 의한 경사 모멘트	8
3.3 손상 후 정적 평형상태	8
제4장 현 복원성 기준	9
4.1 예제 모델 제원	9
4.1.1 적재 상태	11
4.1.2 정복원 모멘트	12
4.1.3 풍하중에 의한 경사 모멘트	14
4.1.4 복원성 평가	15
4.2 선급별 FOWT 복원성 규정 비교	17
4.2.1 비손상 복원성 규정 비교	17
4.2.2 손상 복원성 규정 비교	18
제5장 적재 상태	22
5.1 서론	22
5.2 적재 상태의 구분 및 정의	22
5.3 초기 중량 정보	23
5.4 비손상시 정복원 모멘트 결과	24
5.4.1 유체 정역학적 특성 및 정복원 모멘트 결과	24
5.5 손상 후 정복원 모멘트 결과	29
5.5.1 손상 시 침수중량 정보	29
5.5.2 유체 정역학적 특성 및 정복원 모멘트 결과	30

제6장 외력 조건	34
6.1 서론	34
6.2 외력 조건의 구분 및 정의	34
6.2.1 풍하중 계산	35
6.2.2 해류하중 계산	36
6.3 전복 모멘트	38
6.3.1 비손상 및 손상 시 전복 모멘트 결과	38
제7장 복원성 평가	41
7.1 서론	41
7.2 비손상 복원성 평가	41
7.2.1 비손상 복원성 평가 기준	41
7.2.2 비손상 복원성 평가 결과	42
7.3 손상 복원성 평가	44
7.3.1 손상 복원성 평가 기준	44
7.3.2 손상 복원성 평가 결과	45
제8장 결론	48

그림 목차

Fig. 1.1. CO2 emissions and Wind electricity generation, World 1990–2018	1
Fig. 1.2. “Renewable Energy 3020” implementation plan	2
Fig. 1.3. Tamla wind farm in Jeju(Offshore, fixed)	3
Fig. 1.4. West–south wind farm(Offshore, fixed)	3
Fig. 1.5. Overturned accident due to loss of stability	4
Fig. 3.1. The forces and moment of the external force acting on the inclination of the floater	7
Fig. 3.2. Equilibrium condition of floater according to GZ	7
Fig. 4.1. General arrangement of FOWT for 5–MW spar type	9
Fig. 4.2. Loading conditions	12
Fig. 4.3. Righting moment curve by inclination angle	13
Fig. 4.4. Overturning moment curve by wind load	15
Fig. 4.5. Results curves by current regulations	16
Fig. 4.6. Righting moment and Overturning moment curves	19
Fig. 5.1. Example of loading conditions before/after damage	30
Fig. 5.2. Comparison of righting moment curves before/after damage	31
Fig. 6.1. Curve of thrust coefficient	36
Fig. 6.2. Curve of thrust force	36
Fig. 6.3. Relationship curve between Cd and Re	38
Fig. 7.1. Intact stability moment curves	43
Fig. 7.2. Damage stability moment curves	46

표 목차

Table 1.1. Korea's Green New Deal	
-green energy generation capacity planning	2
Table 4.1. Properties of wind turbine	10
Table 4.2. Properties of floater	10
Table 4.3. Top position of openings	11
Table 4.4. Weight distributions	12
Table 4.5. Hydrostatics table	13
Table 4.6. Righting arm by inclination angle	13
Table 4.7. Shape coefficient and Height coefficient values	14
Table 4.8. Result of intact stability assessment by current regulation	16
Table 4.9. Loading conditions for stability review by CLASS	17
Table 4.10. External environmental loads by CLASS	18
Table 4.11. Criteria of intact stability by CLASS	19
Table 4.12. Extent of damaged by CLASS	20
Table 4.13. Criteria of damage stability by CLASS	21
Table 5.1. Classification of loading conditions	22
Table 5.2. Lightweight distribution	24
Table 5.3. Deadweight distributions by loading conditions	25
Table 5.4. Hydrostatics table by loading conditions	27
Table 5.5. Righting moment by inclination angle	28
Table 5.6. Steady heel angle & downflooding angle	28
Table 5.7. Flooded weight distribution	29
Table 5.8. Hydrostatics table after damage	32
Table 5.9. Righting moment by inclination angle after damage	33
Table 5.10. Steady heel angle & downflooding angle after damage	33
Table 6.1. Environmental conditions by loading conditions	34
Table 6.2. Normal wind speed and Extreme wind speed	35
Table 6.3. Thrust coefficient by wind speed	36
Table 6.4. Current speed by water depth	37
Table 6.5. Overturning moment by external loads in case of intact	39
Table 6.6. Overturning moment by external loads in case of damage	40
Table 7.1. Result of intact stability assessments	42
Table 7.2. Result of damage stability assessments	45

기호 및 약어 설명

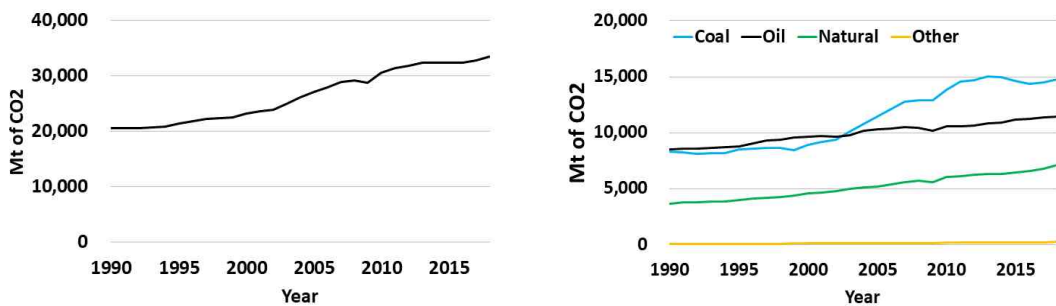
A_P	Projected area above waterline
A_R	Swept area of the rotor
A_C	Projected area under waterline
B	Center of buoyancy
B'	Center of buoyancy after inclination
BM	Transverse metacentric radius
C_D	Drag coefficient
C_F	Coefficient of Force
C_H	Height coefficient
C_S	Shape coefficient
C_T	Thrust coefficient
CoM	Center of mass
d	Horizontal distance from longitudinal axis to center of additional weight
DLCs	Design Load Cases
Downflooding (D.f.)	The entry of seawater through any opening into the floater due to heel, trim, or submergence
ECM	Extreme current model
F	Force
F_G	Weight
F_B	Buoyancy
$F_{B'}$	Buoyancy after inclination
F_W	Wind load
F_T	Thrust
F_C	Current load
G	Center of mass
G_O	The increased center of mass by free surface effect
GM	Transverse metacentric height
G_{oM}	Transverse metacentric height considering increased center of gravity by free surface effect
GZ	Transverse moment arm(lever)
h_w	Reference water depth by wind (50m)
h_r	Vertical distance from SWL
h_t	Water depth

I_T	The moment of inertia to the X-axis of a water plane area
i_T	The moment of inertia to the longitudinal axis passing the area center of the surface area of liquid cargo
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IMO	International Maritime Organization
IS Code	Intact Stability Code
k	Conversion factor (0.015 ~ 0.03)
KB	Height of center of buoyancy
KM	Height of transverse metacenter above baseline
M	Transverse metacenter
M_e	External moment
M_G	Weight moment
M_B	Buoyancy moment
M_R	Righting moment
MODU Code	Mobile Offshore Drilling Unit Code
NCM	Normal current model
SWL	Still water level
$U_{1\text{-hour},10\text{m}}$	1 hour mean wind speed at 10 m height
V_W	Wind speed
V_C	Current speed
V_{ave}	Annual average wind speed at hub height
V_{e50}	The Steady extreme wind speed with a return period of 50 years
$V_{c,wind}$	Current velocity by wind
$V_{c,tide}$	Current velocity by tidal
w	Additional weight by flooding
Z	The intersection of vertical lines from G to action line of B'
ρ	Density
∇	Displacement volume

제1장 서론

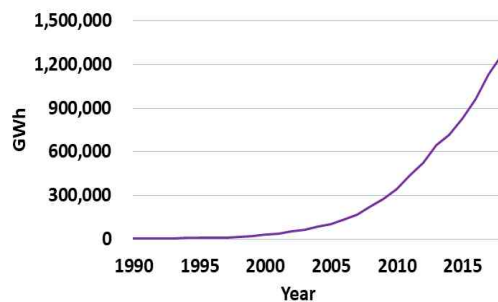
1.1. 연구 배경

전 세계적으로 인구증가와 산업의 발달로 인해 화석 연료 자원의 고갈문제와 환경 오염 문제가 심각해지면서 환경 친화적인 신재생 에너지로 대체하는 개발을 위해 노력 중이다. 국제에너지기구(IEA)에서 제공하는 데이터[1]에 따르면 주요 기술의 발전과 재생에너지의 빠른 성장에도 불구하고 에너지 수요의 끊임없는 증가와 화석 연료에 대한 지속적인 의존으로 인해 Fig. 1.1(a),(b)와 같이 CO2 배출량이 지속적으로 증가하였다. 늘어나는 이산화탄소 배출량을 줄이고자 재생에너지 발전을 늘려감에 따라 Fig. 1.1(c)에서 볼 수 있듯이 풍력발전 시장은 2000년 초 이후로 기하급수적으로 늘어났다. 유럽에서는 이미 많은 용량을 풍력 발전에서 만들어내고 있으며, 이후에는 아시아 부분에서도 큰 관심을 보이며 발전용량을 늘리고 있다.



(a) Total CO2 emissions

(b) CO2 emissions by energy source



(c) Wind electricity generation

Fig. 1.1. CO2 emissions and Wind electricity generation, World 1990–2018

최근 국내에서는 코로나19로 인한 위기를 극복하기 위한 국가발전전략으로 ‘한국판 뉴딜’ 정책[2]을 발표하면서 그 내용 중 하나인 그린 뉴딜에 대한 추진을 통해 2030년 온실가스 감축목표, 재생에너지 3020계획 등을 차질 없이 이행한다는 목표를 강조했다. 뉴딜 정책 중 Table 1.1과 같이 그린에너지에 대한 내용에서는 2025년까지 재생에너지(태양광&풍력) 발전용량을 42.7 GW로 늘리는 것을 목표로 하였

Table 1.1. Korea's Green New Deal - green energy generation capacity planning

현재 상황		미래 모습	
“선탄발전 중심의 온실가스 多배출 국가”		“신재생에너지 확산 및 다각화로 저탄소·친환경 국가로 도약”	
성과지표	‘20년	‘22년	‘25년
재생에너지 발전용량 (태양광, 풍력)	12.7 GW (‘19)	26.3 GW	42.7 GW

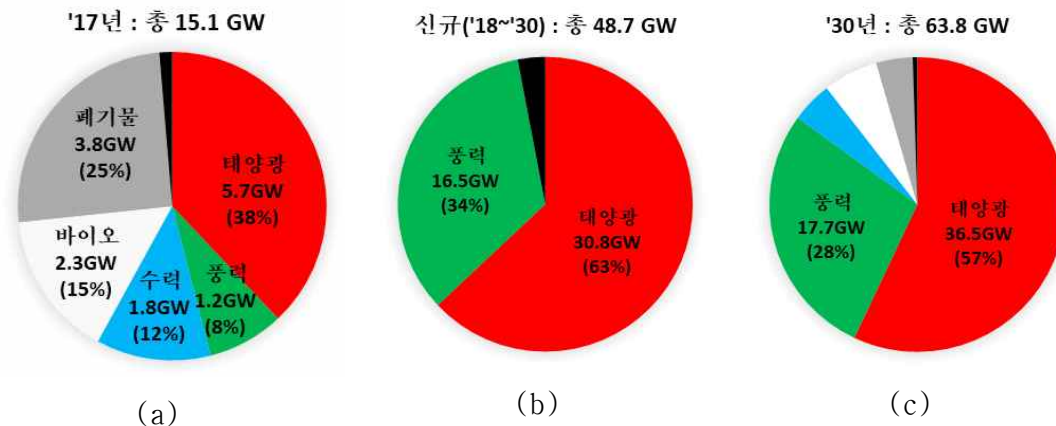


Fig. 1.2. Renewable Energy 3020 - implementation plan

다. 또한, 재생에너지 3020계획안[3]에서 풍력에너지는 2030년까지 총 17.7 GW 설치가 목표이다. 그린 뉴딜을 본격화 하면서 최근엔 2050년 탄소중립을 목표로 선언하면서 그린 뉴딜의 목표가 구체화되어 더욱 폭이 넓어지고, 속도를 더하게 되었다. 세계는 이미 탄소중립 전환에 속도를 내고 있으며 EU 와 미국 등 주요국들은 탄소 국경세 도입을 기정사실화 하는 등의 변화에 현 정부 역시 이 변화에 능동적으로 대응하려고 하기 위해 2050 탄소중립 목표를 담아 ‘장기 저탄소발전전략’을 연내에 UN에 제출할 계획이라고 발표한 바 있다. 이러한 세계적 변화추세로 신재생에너지의 개발은 더욱 빨라 질 것이며 현재 목표한 용량은 더욱더 확대될 것이다.

다만 현재 육상 풍력발전은 이미 많은 곳에 설치되어 있고, 국내 지리적 환경의 문제로 인해 추가적으로 대단지를 설치하기엔 문제점이 있다. 해결방안으로 육상에서 해상으로 위치를 이동하여 해상에서도 연안에 고정식으로 설치된 풍력발전기가 Fig. 1.3과 같이 제주도에 주로 위치하고 있으며, Fig. 1.4에서는 서남해에는 3 MW 급 터빈 20기가 설치되는 총 발전설비 용량 60 MW 규모의 해상풍력 실증단지가 건설되어 운영 중에 있다. 최근 울산에서는 울산형 뉴딜산업의 대표적인 사업으로



Fig. 1.3. Tamla wind farm in Jeju(Offshore, fixed)



Fig. 1.4. West-south wind farm(Offshore, fixed)

‘부유식 해상풍력발전단지 건설’이라고 하며 국내외 전문기업·기관들과 부유식 해상 풍력산업 육성 업무협약(MOU)를 체결하는 등 적극적으로 나서고 있다. 부유식 해상풍력 발전은 이미 개발 중이기도 하지만 실증을 위해 그 개발 및 연구 속도에 박차를 가할 때가 왔다.

부유식 해상풍력 발전은 재생에너지의 한 분야이기도 하지만 다른 관점으로 본다면 해상에 설치되는 해양구조물의 한 분야이기도 하다. 이미 재생에너지와 관련된 해양구조물로 파력발전, 조력발전 등의 구조물이 있지만, 부유식 해상풍력 발전은 부유체 상부에 높이가 매우 높은 발전시스템이 설치됨에 따라 그 형태는 기존의 해양구조물과는 조금 다른 형태를 가지고 있다고 볼 수 있다. 재생에너지 발전을 위해 설치되는 부유식 해상풍력발전은 설치 후 수 십년간 운영이 가능하다. 오랜 기간 다양한 해상환경 속에서 안전한 발전을 위해서는 설계단계에서부터 시뮬레이션을 통해 미리 예측하고 결과가 반영되는 것이 중요하다. 국제 전기기술 위원회

(IEC)에서 최근 2019년 제정된 IEC61400-3-2[4]는 부유식 해상풍력 발전기를 설계하는 기준서로 특히 구조설계 시 다양한 해상환경 하중조건을 검토하도록 되어 있다. 그리고 해양구조물로서 설계단계에서 반드시 검토되어야 항목은 부유체의 복원성능 평가이다.

복원력 상실로 인해 기울어진 이후 다시 제 상태로 돌아오지 못하고 있는 몇 가지 사고들이 있다. Fig. 1.5(a)와 같이 잘못된 적재로 인해 부유체의 충분한 복원력을 확보하지 못하여 발생하거나, Fig. 1.5(b)처럼 충분한 복원력을 예상하였으나 가진 복원력을 넘어서는 허리케인에 의한 외력으로 인해 복원성을 잃는 경우도 있다. 실제로 Fig. 1.5(c)는 후쿠시마 인근에 계획된 5 MW 부유식 부유체가 해수 밸러스트를 이용하여 가라앉히는 작업 중에 복원력을 상실하고 기울어진 상태로 있다. 이러한 사고들을 미연에 방지하고자 보다 안전한 상태를 유지할 수 있는 부유체를 설계하기 위해 다양한 적재 조건 및 외력 조건들을 적용하여 검토해 볼 필요가 있다.

IEC에서 언급하고 있는 부유체 복원성능에 대한 내용은 IMO 규정[5]에 의존하고 있는 것이 현재 상태이며, 그 규정 역시 부유식 해상풍력이라는 범주가 따로 존재하지 않는다. 또한 동적 통합하중해석에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있지만, 정적 하중에 따른 부유체 자체에 대한 안정성 연구는 그 비율이 현저히 떨어진다. 실제로 이 논문의 연구 내용인 5 MW 스파형 부유식 해상풍력 발전 시스템의 복

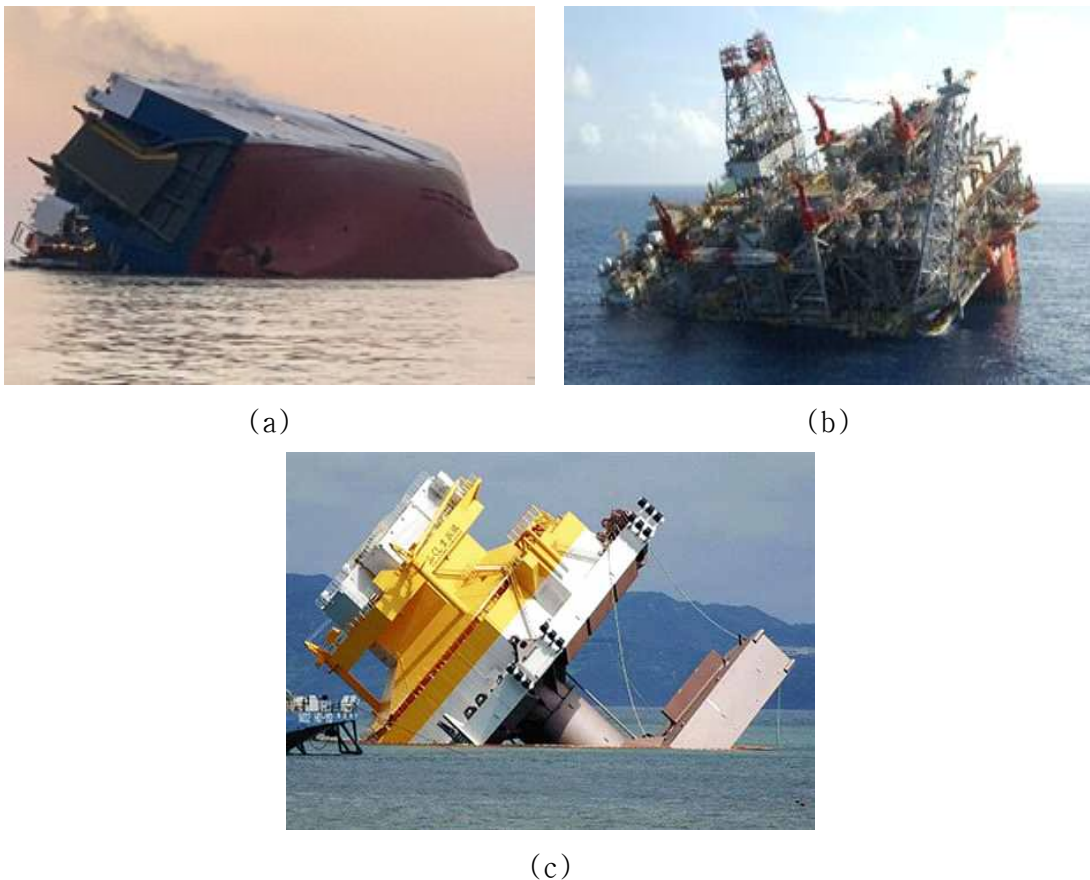


Fig. 1.5. Overturned accident due to loss of stability

원성 평가를 시작할 때, IMO 규정 내용을 적용하기에는 그 외력 조건 적용 등이 턱없이 부족함을 발견하였다. 단순 풍하중만 적용하기에는 가동 상태일 때 추력이 작용할 것이며, 수면 상부에서는 풍하중 또는 추력이 경사에 영향을 주지만 수면 하부에서는 해류 하중이 영향을 줄 수 있다. IEC에서 다루는 DLCs의 내용에서도 여러 환경하중에 대한 영향을 다루고 있어 IMO에서 다루는 풍하중과 매치가 전혀 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 이에 따라 부유식 해상풍력 발전 시스템에 적합한 복원성 평가에 대한 내용을 다루었다.

1.2. 연구 목적과 연구 범위

본 연구의 목적 및 그에 따른 연구 범위로는 크게 네 가지로 구분하여 나타낼 수 있다.

첫 번째는 복원 모멘트와 전복 모멘트의 비교를 통해 현재의 복원성 규정인 국제해사기구(IMO)의 Resolution MSC.267(85) 복원성 평가기준을 적용하여 각 조건에 따라 복원성 평가를 한 후 평가기준에 만족하는지 여부를 확인한다. 그리고 여러 선급 규정에서 정의한 복원성 평가기준을 비교를 수행한다.

두 번째는 부유식 해상풍력 발전이 설치 시부터 가동하는 기간 동안 부유체의 정복원력에 영향을 미치는 조건에 따라 적재 조건을 구분하는 것이다. 이를 위해 크게 흘수의 변화가 생길 수 있는 조건과 흘수 변화를 주는 조건 중에서도 해수 적재 상태, 계류 상태, 가동 상태들을 구분하여 각각의 배수량, 무게중심, 흘수 등의 정역학적 정보와 정 복원모멘트 계산을 수행한다.

세 번째는 각 적재 상태에서 발생할 수 있는 외부 환경조건을 적용하여 전복 모멘트 계산을 수행한다. IEC61400-3-2 내용을 바탕으로 추가로 적용할 수 있는 외부 환경 조건을 적용하여 결과 비교를 수행하고, 추가 외부 환경 조건 적용에 대한 필요성에 대해 검증한다.

네 번째는 부유식 해상풍력 발전 시스템에 맞는 평가 기준을 새로이 작성하고, 새 기준에 따라 결과내용을 검토하여 예제 모델의 설계 평가를 통해 충분한 복원성능을 가지는 부유체를 설계할 수 있는 기준이 될 수 있는지 확인하도록 한다.

제2장 이전 연구

해양 구조물의 복원성에 대해서는 선박의 특성에 기초한 복원성 기준은 부유식 구조물에 대해서는 형태, 규모 및 구성이 다르기 때문에 구조물의 특성이 고려된 통합 분석을 수행하였고[6], 드릴쉽의 복원성을 MODU Code전체 기준을 통해 풍하중 모멘트에 대해 계산하고 풍동 시험 수행을 통해 결과를 비교한 연구가 있다.[7] 기존 규정 IS Code와 MODU Code에 따라 복원성 평가를 수행 후 추가로 참고할 수 있는 표준 및 지침을 분석하여 부유식 해상풍력 발전에서는 평가 기준의 적절한 보정이 필요하다는 연구가 있다.[8] 선박과 다르게 횡방향 경사에 대한 복원성만이 아닌 다양한 경사의 축 방향에 대한 복원성 평가가 수행된 연구가 있다.[9] 다른 연구에서도 다양한 해양구조물의 사고 사례를 통해 복원성 평가의 중요성을 다루며 여러 규정의 비교 분석을 하며 부유식 해양 구조물의 특성에 맞는 손상 사례, 손상 범위 등의 발생 확률 등을 연구하였다. 이처럼 현재 복원성 평가 기준은 계속 적용되어 운용중인 해양 구조물에 대한 적용에도 그 내용이 더 보완되어야 한다는 연구가 많다. 하지만 부유식 해상 풍력 발전 시스템의 복원성에 대한 연구 자체는 많지 않으며, 기존 규정에 대해 적용한 내용이 대부분이다.

본 연구에서는 기존 규정인 IEC와 IMO규정을 우선 적용하고, 여러 선급에서 제정되고 있는 부유식 해상풍력발전시스템 관련 규정들을 참고하였다.

제3장 이론

3.1. 정복원 모멘트

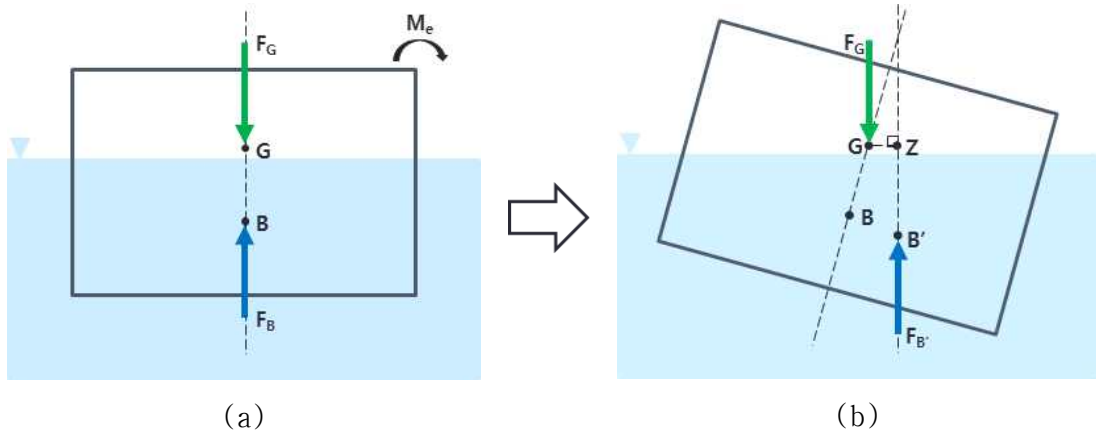


Fig. 3.1. The forces and moment of the external force acting on the inclination of the floater

Fig. 3.1 (a)와 같이 부유체 초기 상태에서 수면에 정적 평형상태로 떠있는 상황에서 외부 경사모멘트 M_e 를 가했다가 제거했을 때, Fig. 3.1 (b)와 같이 미소 경사한다고 가정한다. 초기 상태에서의 부력 중심인 B는 경사로 인해 B' 로 이동하게 되며, 이동한 부심 B' 에 작용하고 있는 부력 방향은 수선에 수직인 위쪽 방향이다. 이때 모멘트는 중력에 의한 모멘트와 부력에 의한 모멘트가 작용하며 두 모멘트의 합을 복원 모멘트라 한다. 부유체가 경사하기 전후의 용적에 변화가 없다고 하면, 결국 복원 모멘트는 모멘트 아암의 차이인 “GZ”에 의해 결정된다.

중력과 부력은 크기가 같고 방향이 서로 반대로 작용하는 짝힘으로 GZ에 따라 회전방향이 달라지며 안정성을 판단할 수 있다.

Fig. 3.2와 같이 양의 GZ일 경우 초기 상태로 돌아오려는 돌아오려고 하는 안정 평형상태가 되며, 0일 경우 경사진 상태를 유지한다. 음의 값일 경우 오히려 더 경사하는 방향으로 모멘트가 작용하게 되어 더욱 경사하게 된다.

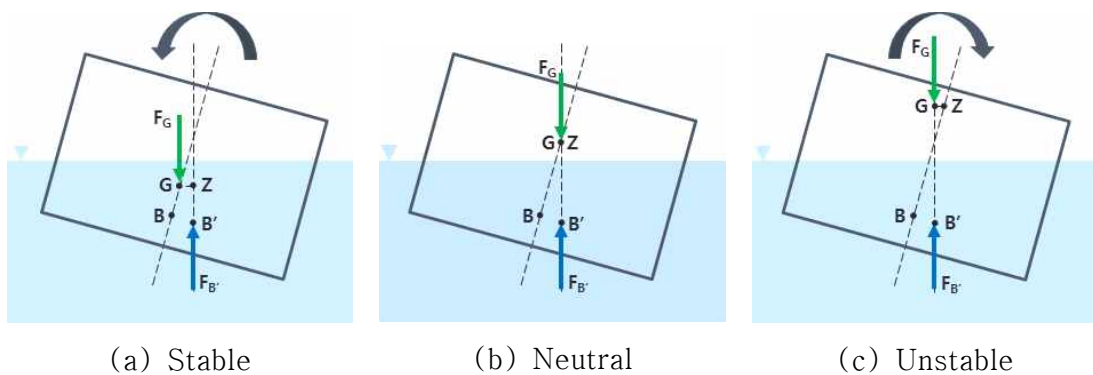


Fig. 3.2. Equilibrium condition of floater according to GZ

3.2. 외력에 의한 경사 모멘트

부유체가 외력에 의해 경사할 때, 그 외력은 경사하는 방향과 동일한 방향일 때 가장 크다고 가정한다. 정적 복원성을 평가하기 위함으로 외력 역시 정적인 힘으로 계산하여 적용한다. 부유체를 경사시키는 외력은 크게 상부에는 바람이 풍력터빈에 가하는 힘, 풍력 터빈이 공기에 가하는 힘이 있으며, 하부에는 해류가 부유체에 가하는 힘이 있다. 힘의 무차원수인 식(1)을 이용하여 각 힘을 계산할 수 있다. 구하

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2} \quad (1)$$

고자 하는 힘이 풍하중이면 형상계수 및 높이계수가 되며, 추력이면 추력계수, 해류에 의한 힘이면 유체의 항력계수가 된다. 무차원식을 통해 구한 힘에 기준점까지의 거리의 곱을 통해 경사 모멘트를 구한다. 기준점은 힘의 작용선에서 멀수록 모멘트 아암이 커지므로 모멘트가 커진다. 따라서 모멘트 레버는 각 하중을 받는 면적의 압력 중심부터 수면하부 측면 저항 중심까지의 수직거리로 하며, 만약 계류선이 연결되어 있을 시 계류선이 연결되는 페어리드 위치까지의 수직거리 중 더 큰 값을 사용하였다.

3.3. 손상 후 정적 평형상태

구획 손상으로 해수 침수가 발생하여 침수 공간에 유입되는 물을 추가적인 중량으로 보고 부유체의 중량이 증가한 것으로 가정하는 “부가 중량법”에 따라 계산하였다.

- ✓ 침수에 의한 부가중량 = {수선 아래의 침수구획 용적 + (침수구획의 수선면적 × 흘수 증가량)} × ρ
- ✓ 침수에 의한 부력 증가량 = 침수 전 구획의 전체 수선면적 × 흘수 증가량 × ρ

대칭 구획의 침수 시 침하만 발생하므로 흘수 증가량에 대해서만 고려하였으며, 비대칭 구획의 침수 시에는 전체 중량 중심이 이동하므로 횡경사가 발생하게 된다. 이 때 횡경사각은 식(2)을 통해 계산한다.

$$\tan\theta = \frac{w \times d}{(\Delta + w) \times G_O M} \quad (2)$$

제4장 현 복원성 기준

4.1. 예제 모델 제원

Fig. 4.1의 5-MW급 부유식 대형 해상풍력 발전 시스템 설계기술 개발 진행 중 스파형 부유체의 정복원성 평가를 설계기준에 따라 검토하였다. 상부 5-MW급 풍력 터빈은 기존 국내 신재생에너지 업체에서 개발된 모델을 부유식에 맞게 보완된 모델로 특성 정보는 Table 4.1, Table 4.2에서 확인할 수 있다. 하부 부유체는 바닥 직경 13 m, 상부 직경은 7 m의 스파 형태로 부유체 내부는 갑판형태로 여러 층으로 나누어진 구조로 이루어져있다. 단일 적재조건에서 규정의 평가 항목 기준에 맞게 검토하기 위해 2008 IS CODE 내용에 따라 바람에 의한 하중조건만 적용하였다.

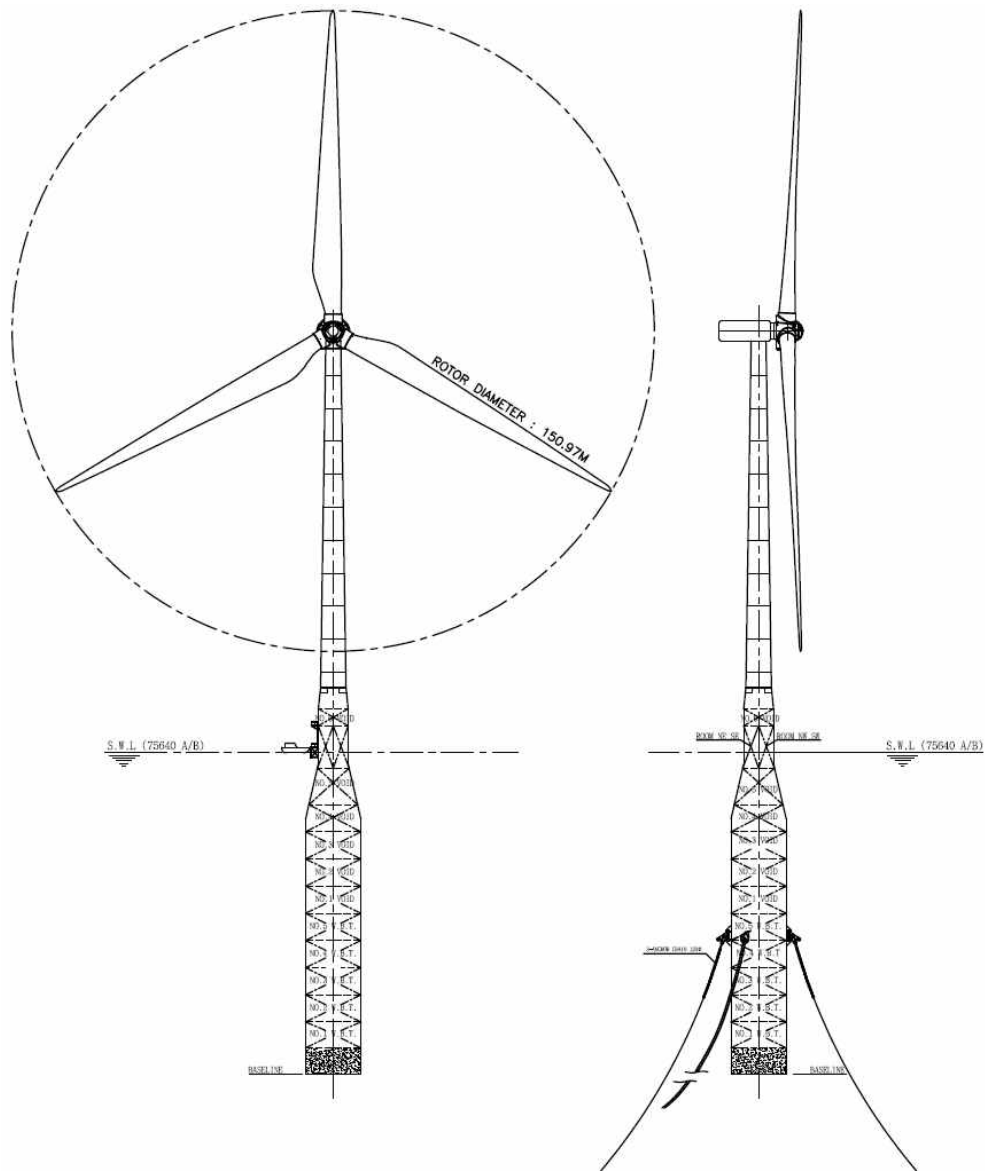


Fig. 4.1. General arrangement of FOWT for 5-MW spar type

Table 4.1. Properties of wind turbine

Wind turbine		
Items	Value	Unit
Rotor diameter	150.97	m
Rotor projected area	17900.70	m ²
Nacelle length	12.00	m
Nacelle breadth	4.50	m
Nacelle height	4.70	m
Tower diameter at top	3.50	m
Tower diameter at base	6.00	m
Tower height	81.675	m

Table 4.2. Properties of floater

Floater		
Items	Value	Unit
Depth to floater base below SWL (total draft)	75.65	m
Elevation of floater top (tower base) above SWL	10.35	m
Elevation to the tower base above SWL	15.35	m
Diameter of floater base	13.00	m
Diameter of floater top	7.00	m
Elevation to tapered cylinder top below SWL	2.65	m
Elevation to tapered cylinder bottom below SWL	15.65	m

복원성 평가 시 개구부의 위치는 결과에 큰 영향을 미친다. 개구부가 침수되기 시작하면서 추가 침수가 발생하게 되면 기존의 복원력은 상실하게 되어 더 이상 복원을 하지 못하고 전복 상태가 된다. 따라서 개구부가 침수되기 직전까지의 경사각 범위 내에서 충분한 복원성을 가질 수 있도록 설계해야 한다. 예제에서 개구부는 부유체 주갑판 상부에 위치하도록 가정되었으며, 그 개구부의 최상단 위치는 Table 4.3과 같다. 각각의 구획마다 하나의 개구부가 연결되도록 하였으며, 풍우밀로 가정하였다.

Table 4.3. Top position of openings

Positions Compartment	x-position from center [m]	y-position from center [m]	z-position from baseline[m]
ROOM SW	3.1	3.1	87.5
ROOM SE	-3.1	3.1	87.5
ROOM NW	3.1	-3.1	87.5
ROOM NE	-3.1	-3.1	87.5
No.5 VOID	2.1	-2.1	87.5
No.4 VOID	2.1	2.1	87.5
No.3 VOID	-2.5	-2.5	87.5
No.2 VOID	-2.5	2.5	87.5
No.1 VOID	2.5	2.5	87.5
No.5 W.B.T.	-2.7	-2.7	87.5
No.4 W.B.T.	2.7	-2.7	87.5
No.3 W.B.T.	2.7	2.7	87.5
No.2 W.B.T.	-2.7	2.7	87.5
No.1 W.B.T.	-2.5	2.5	87.5

4.1.1 적재 상태

Fig. 4.2와 같이 부유체 가장 아래 구획에는 콘크리트 벨러스트가 가득 채워진 상태이며, 그 위로 순서대로 해수 벨러스트가 채워져 있다. 부유식 해상풍력 시스템의 상부 터빈의 구조물이 대형화 되고 그에 따라 시스템 전체 무게 중심이 높아질 수 밖에 없기 때문에 복원력을 확보하기 위해서는 부유체 하부에 벨러스트를 적재하여 전체 무게 중심을 낮추었다. 그 과정에서 해수 벨러스트만으로는 부족함이 있어 큰 비중을 가지는 콘크리트를 영구적으로 적재하는 방식을 선택함으로써 무게 중심을 크게 낮출 수 있었다. 계류선은 수직으로 작용하는 하중을 페어리드 위치에 무게 정보로 적재하는 형식으로 계산되었다. No.1~4 W.B.T.는 해수가 가득 찬 상태이며 No.5 W.B.T.에는 전체 용량의 약 15% 부분 적재가 되었다. 전체 적재 상태에 대한 각 항목에 따른 무게 및 무게중심에 대한 내용은 Table 4.4에서 확인할 수 있다.

정해진 적재 상태에 대한 유체 정역학적 특성은 Table 4.5와 같으며, 식(3)~(6)을 통해 도출되었다.

$$KM = KB + BM \quad (3)$$

$$GM = KM - KG \quad (4)$$

$$BM = \frac{I_T}{\nabla} \quad (5)$$

$$GG_0 = \frac{i_T}{\nabla} \quad (6)$$

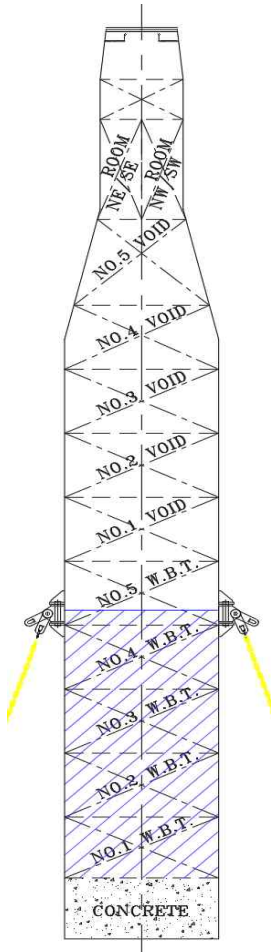


Table 4.4. Weight distributions

Items	Weight [t]	CoM [m]
Floater steel	1,734.400	34.0
Equipment	107.300	86.0
Transition Piece (TP)	68.400	88.5
Mooring	221.100	32.4
Rotor	126.600	175.0
Nacelle	200.000	174.6
Tower	283.500	122.7
Water ballast	3,395.600	19.1
- No.1 W.B.T.	793.400	9.1
- No.2 W.B.T.	832.400	15.3
- No.3 W.B.T.	832.400	21.7
- No.4 W.B.T.	832.400	28.1
- No.5 W.B.T.	128.369	31.9
Concrete ballast	3,085.200	3.1

Fig. 4.2. Loading condition

4.1.2 정복원 모멘트

복원 모멘트 아암(GZ)은 CATIA V5를 이용해 해상풍력 부유체 모델링을 한 후, 부유체를 경사시키며 홀수선 하부의 부력중심을 찾는 과정을 수행하였다. 수선면 하부 부유체의 부력중심은 경사된 수면에 연직으로 작용하는 부력의 작용선 위에 위치한다. 그리고 전체 무게중심으로부터 이 부력의 작용선에 내린 수선의 길이인 복원 모멘트 아암을 경사각도에 따라 측정하여 Table 4.6에 나타내었다. 측정한 경

사각에 따른 GZ값을 배수량과의 곱을 통해 복원 모멘트를 구한 결과를 아래의 Fig. 4.3으로 나타내었다. 경사가 진행되면서 72.18 deg.에서 개구부 침수가 발생하였다.

Table 4.5. Hydrostatics table

Description	Value
Displacement [t]	9,322.200
Draft [m]	75.65
KG [m]	27.86
KM [m]	34.573
KB [m]	34.560
BM [m]	0.013
GM [m]	6.713
GGo [m]	0.157
GoM [m]	6.556

Table 4.6. Righting arm by inclination angle

Heel [deg.]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
GZ [m]	0	1.165	2.295	3.356	4.316	5.148	5.833	6.405	7.064

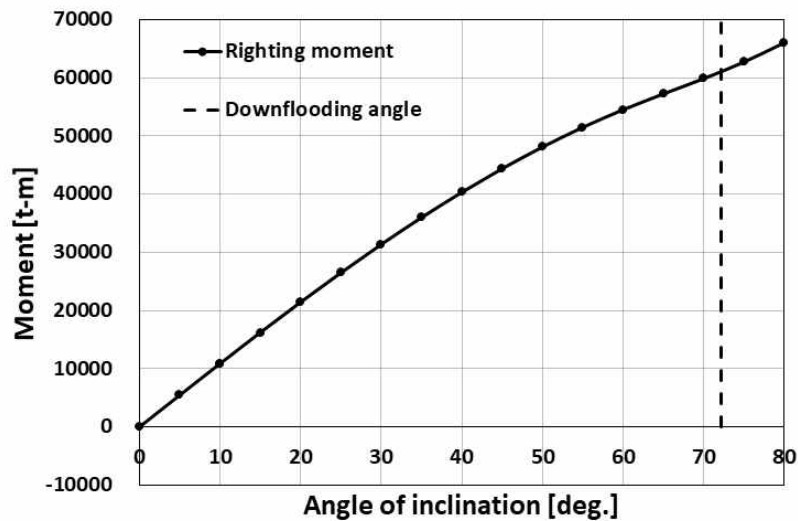


Fig. 4.3. Righting moment curve by inclination angle

4.1.3 풍하중에 의한 경사 모멘트

2008 IS CODE의 내용에 따르면 풍하중 적용 시 풍속은 가동 상태 시 최소 풍속 36 m/s(70 knots), 심한 폭풍 상태 시 최소 풍속은 51.5 m/s(100 knots)를 적용하도록 되어 있다. 검토 중인 모델은 가동/심한폭풍 상태 구분 없는 단일 적재조건이기 때문에 두 풍속 모두 적용할 수 있으나 그 중 더 악조건인 51.5 m/s의 풍속을 적용하여 계산하였다.

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_S \cdot C_H \cdot A_P \cdot V_W^2 \quad (7)$$

Table 4.7. Shape coefficient and Height coefficient values

Values of the shape coefficient C_S		Values of the height coefficient C_H	
Spherical	0.4	Height above sea level (m)	Value
Cylindrical	0.5	0 - 15.3	1.00
Large flat surface	1.00	15.3 - 30.5	1.10
Drilling derrick	1.25	30.5 - 46.0	1.20
Wires	1.2	46.0 - 61.0	1.30
Exposed beams and girders under deck	1.3	61.0 - 76.0	1.37
Small parts	1.4	76.0 - 91.5	1.43
Isolated shapes	1.5	91.5 - 106.5	1.48
Clustered deckhouses or similar structures	1.1	106.5 - 122.0	1.52
		122.0 - 137.0	1.56
		137.0 - 152.5	1.60
		152.5 - 167.5	1.63
		167.5 - 183.0	1.67
		183.0 - 198.0	1.70
		198.0 - 213.5	1.72
		213.5 - 228.5	1.75
		228.5 - 244.0	1.77
		244.0 - 259.0	1.79
		above 259.0	1.80

바람하중은 식(7)에 따라 계산되었으며, 형상 계수와 높이 계수는 규정에서 정의한 Table 2.6을 참고하였다. 형상계수의 경우 수면상부의 부유체 및 타워는 Cylindrical 형상을 적용하였고, 블레이드는 Large flat surface 형상을 적용하였다. 높이계수는 상부 바람하중을 받는 면적의 중심 높이에 따라 적용하였다. 바람하중을 받는 투영 면적 역시 CATIA V5 통해 얻은 값을 사용하였다. 위 내용에 따라 계산된 풍하중에 의한 경사 모멘트 결과는 Fig. 4.4로 나타내었다.

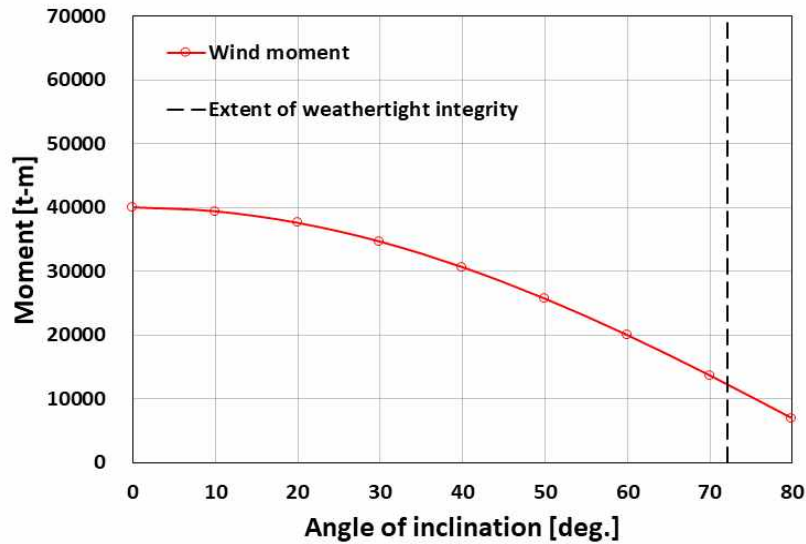


Fig. 4.4. Overturning moment curve by wind load

4.1.4 복원성 평가

정복원 모멘트 결과와 풍하중에 의한 경사 모멘트 결과를 이용하여 복원성 평가기준에 따라 기준에 적합하게 설계되었는지 판단할 수 있다. 정복원 모멘트 평가는 비손상 복원성뿐만 아니라 손상 복원성에 대한 평가도 이루어져야 하지만 IEC61400-3-2에 언급된 손상 복원성 내용에서는 그 평가 기준에 대한 참고 규정조차 언급되어 있지 않으므로 비손상 복원성에 대한 결과만으로 평가 기준에 의해 판단할 수 있다. 평가 기준은 부유체의 형상에 따라 구분되어 있으며 부유체 형상에 대한 정의는 다음과 같다.

- ✓ Column-stabilized unit은 주압관이 해저 선체에 연결되거나 기둥 또는 잠함의 바닥판에 연결된 유닛이다.
- ✓ Surface unit은 부유 상태에서 작동하기 위한 단일 혹은 다중 선체 구조의 선박 또는 바지선 형태의 선체를 가진 유닛이다.
- ✓ Self-elevating unit은 선체를 바다 표면 위로 올리고, 다시 바다로 내려올 수 있는 이동 가능한 다리를 가진 유닛이다.

규정에 명시된 비손상 복원성 평가 기준[5]은 다음과 같다.

- ✓ Surface 와 Self-elevating unit은 복원 모멘트와 바람하중에 의한 경사모멘트의 두 번째 교차점까지 또는 해수유입개구부에 도달하는 경사각 중 작은 경사각까지의 하부 면적의 비교하였을 때 복원 모멘트의 하부 면적의 크기가 바람하중에 의한 경사모멘트의 하부 면적의 크기보다 140% 이상이어야 한다.
- ✓ Column-stabilized unit은 앞의 내용과 동일한 조건에서 면적의 크기가 130% 이상이어야 한다.
- ✓ 직립 상태에서 두 번째 교차점까지 전체 경사 범위동안 양의 복원 모멘트 값을 가져야 한다.

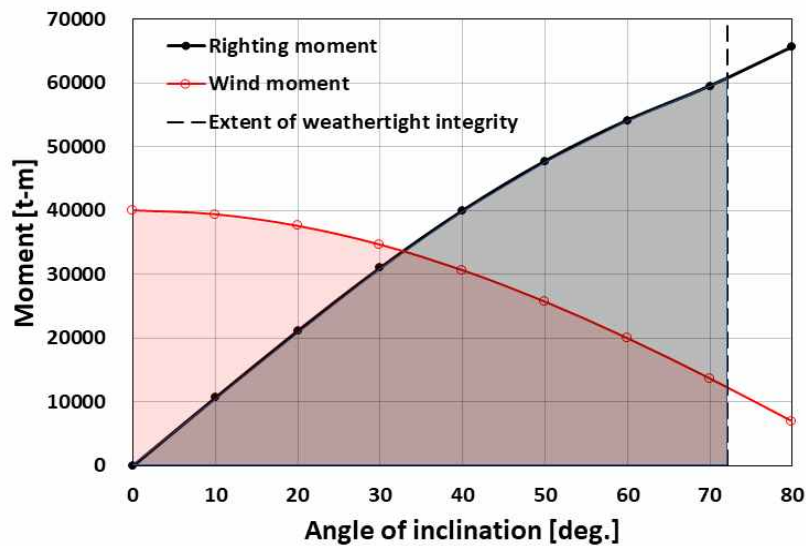


Fig. 4.5. Results curves by current regulations

Table 4.8. Result of intact stability assessment by current regulation

Criteria	Attained value	Status
Area under the righting moment > 1.3 × Area under the wind heeling moment	1.14	not satisfied
Righting moment > 0	Table 4.6	Satisfied

규정에 정의된 내용에 따라 예제로 적용한 부유식 해상풍력 발전시스템의 부유체는 Column stabilized unit으로 구분될 수 있다. 평가를 위해 앞의 복원 모멘트 곡선과 풍하중에 의한 경사 모멘트 곡선을 함께 나타내면 Fig. 4.5과 같다. 복원성 평가를 위해 개구부의 해수 유입각인 72.18 deg.까지 복원 모멘트 하부 면적은

$2.49 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{deg.}$, 풍하중에 의한 경사 모멘트 하부 면적은 $2.18 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{deg.}$ 을 얻을 수 있었다. 비손상 복원성 평가 결과는 Table 4.8에 나타내었다. 중요한 평가 항목인 복원 모멘트와 경사 모멘트의 비가 요구하는 값인 1.3보다 적은 값인 1.14 이 나와 평가 기준을 만족하지 못한다. 다른 평가 항목인 직립 상태에서 개구부의 해수 유입각까지 양의 복원 모멘트를 가져야 하는 조건은 만족함을 확인할 수 있다.

4.2. 선급 별 FOWT 복원성 규정 비교

설계 기준에서 참고하도록 제시된 IMO의 규정 외에 각 나라의 선급에서는 세계 시장의 변화에 맞춰 부유식 해상풍력 시스템에 적합한 규정이 발간되었다. 그 중에서 현재 정식으로 발간되어 있는 규정이 있는 DNV·GL[10], ABS[11], BV[12]를 선택하여 복원성 부분에 대한 내용을 비교해보았다.

- ✓ DNVGL-ST-0119 (Edition July 2018), Section 10 Floating stability
- ✓ ABS #195 (July 2020), Chapter 9 Stability and Watertight/Weathertight Integrity
- ✓ BV_NI 572 (January 2019), Section 6 Stability

4.2.1 비손상 복원성 규정 비교

복원성 평가에 대한 기본은 동일하나 선급별로 적재 상태의 구분, 외부 하중 조건의 적용 및 내용, 복원성 평가 기준에 대한 부분에서 차이를 가지고 있었다. 우선 적재 상태 구분은 IEC61400-3-2에서 구분한 DLCs의 조건과는 별개로 복원성 검토를 위한 상태 구분이 정의되어 있는 공통점을 확인할 수 있었으나, 그 상세 구분은 Table 4.9와 같이 약간의 차이가 있다.

Table 4.9. Loading conditions for stability review by CLASS

CLASS	Loading conditions	
DNVGL-ST-0119	- Operation condition - Temporary condition	- Survival condition - Transit condition
BV_NI 572	- Lightweight condition - Operation condition - Parked condition - Transit, Installation and maintenance condition	
ABS #195	- Power production - Parked - Parked and fault conditions	

두 번째로 외부 하중 조건역시 IMO에서 복원성 평가를 위한 전복모멘트 고려 시 적용했던 풍하중외에 추가적인 외부 하중조건을 구분할 수 있었다. 역학적 수식에 대한 내용은 동일하게 나타나 있었으나, 적용하는 외부 하중조건의 상세 내용 역시 Table 4.10에서와 같이 각 선급이 다르게 요구하고 있음을 알 수 있다.

세 번째로 복원성 평가기준은 각기 다른 기준을 나타내고 있으며 그 내용은 Table 4.11와 같다. Table의 내용 중 ①~④은 Fig. 4.6에서 확인 가능하다. IMO 규정과 유사하게 보일 수 있지만, 부유체 형태에 따라 평가 기준을 달리 하는 선급이 있는 반면에 가동 상태에 따라 구분하여 평가기준을 정의한 선급도 있음을 확인할 수 있다.

Table 4.10. External environmental loads by CLASS

CLASS External load	DNVGL-ST-0119	BV_NI 572	ABS #195
Wind	✓ Intact : 100 knots (Metocean data) ✓ Damage : 50 knots	Metocean data or 100 knots / 70 knots	Metocean data
Wave	-	Metocean data	Metocean data
Current	-	Metocean data	Metocean data

4.2.2 손상 복원성 규정 비교

IEC61400-3-2에서는 손상 복원성 관련해서는 면제조건, 침수 구역에 대한 내용만 다루고 있다. 손상에 의해 구획이 침수된 후의 복원성을 어느 정도 확보 할 수 있으며, 확보해야 하는지에 대한 평가 기준은 없다. 비손상 복원성에서 참고하도록 되어있는 IMO 규정 역시 비손상 복원성에 대한 내용만 나타나 있다. 해양 구조물에 대한 손상 복원성에 대한 내용은 2009 MODU Code[13]로 비손상 복원성 참고 규정과 함께 참고할 수 있다. 다만, 손상 복원성 역시 IMO뿐 아니라 여러 선급에서 다른 기준을 가지고 있다.

Table 4.12에서 볼 수 있듯이 비손상 복원성과 동일하게 부유체 형상에 따라 구분하거나 적재 상태에 따라 구분됨을 알 수 있다. 또한 각 구분에 따른 손상 범위 역시 각각의 차이가 있음을 알 수 있다. 다만 주요 구역의 침수부분에는 대부분 다루고 있음을 알 수 있다.

손상 범위에 따른 구획의 침수 이후 복원성 결과를 평가 기준에 따라 검토할 수 있다. Table 4.13은 선급별 손상 복원성 평가 기준으로 추가 침수가 발생하지 않도록 개구부 위치에 대한 기준과 갑판선의 침수 여부를 주로 다루고 있다.

Table 4.11. Criteria of intact stability by CLASS

CLASS		DNVGL-ST-0119		BV_NI 572		ABS #195	
Classification		Semi-submersible	Spar	Operation condition	Parked condition	Semi-submersible	Spar
Criteria	GZ moment >0 (range ④)	0	–	–	–	0	
	②+③ >1.3(①+③)	0	–	0		0	~ 30 °
	GoM	–	≥ 1.0 m	≥ 0.15 m		–	–
	Downflooding angle	–	–	–	–	–	≥ 30 °
	etc.	–	–	Freeboard to be remain		–	–

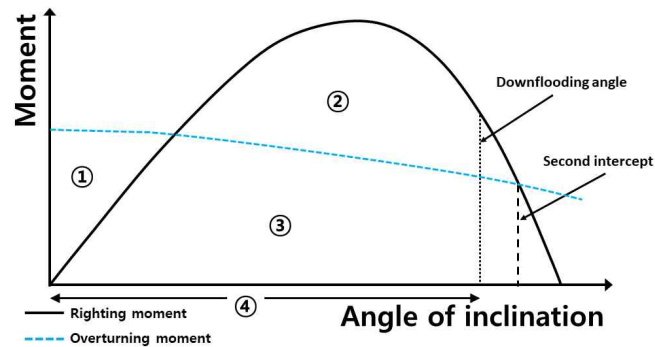


Fig. 4.6. Righting moment and Overturning moment curves

Table 4.12. Extent of damaged by CLASS

CLASS		DNVGL-ST-0119		BV_NI 572		ABS #195	
Classification		Semi -submersible	Spar	Operation condition	Parked condition	Semi -submersible	Spar
Extent of damage	Transverse extent(y)	-	-	1.5 m		-	-
	Vertical extent(z)	-	-3 m to +5 m of the waterline	-2 m to +2 m of the waterline		-	-
	1. Pump room 2. Machinery room 3. Single compartment adjacent to the sea	0	-	0		0	
	etc	-	Single compartment	- 1 compartment (water depth < 100 m) - 2 compartment (water depth ≥ 100 m)		-	-

Table 4.13. Criteria of damage stability by CLASS

CLASS		DNVGL-ST-0119		BV_NI 572		ABS #195	
Classification		Semi-sub.	Spar	Operation condition	Parked condition	Semi-sub.	Spar
Criteria	Range ≥ 7 deg.	0		-	-	-	-
	angle of inclination after the damage set out < 17 deg.	-	0	-	-	-	-
	A/B	-	≥ 2	-	-	-	-
	Area ratio	-	-	> 1		-	-
	Openings	watertight opening under the final waterline)		-	-	Unprotected opening ≥ 1.5 m above final waterline	
	etc.	-	within 4m above the final waterline	Deck edge line $>$ final waterline		Deck edge line $>$ final waterline	

제5장 적재 상태

5.1. 서론

복원성 평가에 있어 중요한 항목 중 하나가 정복원 모멘트 하부 면적과 바람하중에 의한 경사 모멘트 하부 면적의 크기 비교이다. 이 말인즉, 복원성 평가 결과에 영향을 줄 수 있는 요소는 크게 정복원 모멘트가 달라질 수 있는 조건과 경사 모멘트에 영향을 줄 수 있는 조건으로 나뉠 수 있다. 그 중에서 정복원 모멘트는 부유체의 적재 상태에 따른 무게중심의 변화 또는 배수량의 변화가 생길 때 그 결과가 달라질 수 있으므로 이런 내용을 고려하여 다양한 적재 조건으로 구분될 수 있다.

이전 연구 내용에서 보인 예제에서는 적재 조건을 구분하지 않고 단일 조건 상태를 검토하였지만, 설계 기준의 밸러스트 시스템(IEC61400-3-2, 17.3) 항목에서 영구 밸러스트로 사용하지 않는 밸러스트 탱크는 밸러스팅과 디밸러스팅이 가능한 시스템이 제공되어야 한다고 나타나있다. 이는 필요시 밸러스트 조정에 의해 적재 조건이 달라질 수 있음을 예상할 수 있다.

5.2. 적재 상태의 구분 및 정의

앞에서 언급한바와 같이 밸러스트 조정에 따른 적재 구분과, 정복원력에 영향을 주는 항목 중 하나인 계류선 상태에 따른 구분도 가능하다. 더 세밀하게 구분하면 해상에 풍력발전 시스템이 설치될 때, 여러 계류선을 동시에 부유체에 체결하는 것

Table 5.1. Classification of loading conditions

Case no.	Loading conditions
1	Operating condition min. draft
2	Operating condition max. draft
3	Operating condition min. draft - redundancy
4	Operating condition max. draft - redundancy
5	Parked condition min. draft
6	Parked condition max. draft
7	Parked condition min. draft - redundancy
8	Parked condition max. draft - redundancy
9	Installation condition (no mooring line)
10	Installation condition (1 mooring line)
11	Installation condition (2 mooring lines)
12	Transit condition(towing condition)

이 아닌 하나씩 작업하는 형태이기 때문에 계류선이 완전히 체결될 때까지 각 단계 별로 그 적재 상태는 모두 구분되어질 수 있다. 또한 계류선의 영향은 가동 시에도 적용가능하다. 다만 설치 시 때와는 달리 IEC의 DLCs의 조건에서 나와 있는 내용 중 중복 조건인 하나의 계류선에 과단이 발생하여 나머지 계류선만 연결된 상태를 정의할 수 있다. 추가적으로 구분할 수 있는 기준에 대한 내용은 적재 상태에 따른 구분이 아닌 외력 조건에 의한 구분으로 나뉠 수 있다. 이에 대한 내용은 제 4장에서 설명하고 있다. 다양한 구분을 통해 적재 상태를 정리하면 Table 5.1과 같으며 각 상태에 대한 정의는 아래에서 확인 할 수 있다.

- Case1. Operating condition min. draft
시스템이 가동 중으로 밸러스트 조정으로 최소 흘수선을 가지는 상태이다.
- Case2. Operating condition max. draft
시스템이 가동 중으로 밸러스트 조정으로 최대 흘수선을 가지는 상태이다.
- Case3. Operating condition min. draft - redundancy
Case1에서 하나의 계류선 과단 후의 상태이다.
- Case4. Operating condition max. draft - redundancy
Case2에서 하나의 계류선 과단 후의 상태이다.
- Case5. Parked condition min. draft
시스템이 정지한 상태이며 밸러스트 조정으로 최소 흘수선을 가지는 상태이다.
- Case6. Parked condition max. draft
시스템이 정지한 상태이며 밸러스트 조정으로 최대 흘수선을 가지는 상태이다.
- Case7. Parked condition min. draft - redundancy
Case5에서 하나의 계류선 과단 후의 상태이다.
- Case8. Parked condition max. draft - redundancy
Case6에서 하나의 계류선 과단 후의 상태이다.
- Case9. Installation condition (no mooring line)
시스템은 정지 상태이며 계류선이 설치되기 전 자유 부유 상태이다.
- Case10. Installation condition (1 mooring line)
시스템은 정지 상태이며 하나의 계류선이 설치된 상태이다.
- Case11. Installation condition (2 mooring lines)
시스템은 정지 상태이며 두 개의 계류선이 설치된 상태이다.
- Case12. Transit condition (Towing condition)
Case9의 상태에서 이동하기 위해 예인선과 연결된 상태이다.

5.3. 초기 중량 정보

적재 상태에 따른 중량 정보를 나타내었으며, 상부 터빈 정보 및 부유체의 경하중량 및 재화중량 정보는 Table 5.2, Table 5.3에서 확인할 수 있다.

최소 흘수선을 가지는 적재 상태는 GoM이 최소 양의 값을 가지도록 하였으며,

Table 5.2. Lightweight distribution

Items	Weight [t]	CoM [m]
Floater steel	1,734.400	33.960
Transition piece	68.400	88.500
Equipments	107.300	86.000
Rotor	126.602	175.000
Nacelle	200.000	174.600
Tower	383.549	122.700

DNVGL규정에서 Spar 형상의 비손상 복원성 평가규정 항목 중 하나인 GoM의 값이 최소 1.0m 이상이어야 한다는 내용을 참고하여 계산하였다. 또한 복원성에 부정적인 영향을 미치는 자유표면 효과 발생이 없도록 부분 밸러스팅을 하지 않았다.

최대 흘수선을 가지는 적재 상태는 추력으로 인한 피치 크기 및 IEC에서 규정하는 에어갭 높이 등을 고려하였다. 이 조건에서는 부분 밸러스팅으로 인해 무게 중심높이가 높아졌지만 충분히 GoM을 가질 수 있도록 계산하였다.

5.4. 비손상시 정복원 모멘트 결과

5.4.1 유체 정역학적 특성 및 정복원 모멘트 결과

3.2절에서 정의된 내용을 바탕으로 계산 하였으며, Table 5.4의 내용에서 확인되듯이 유체 정역학적 특성과 정복원 모멘트 결과는 같다. 가동상태의 여부와 관계없이 적재 상태가 동일한 상태이기 때문에 그 결과는 동일하게 나타나지만, Case에 따라 이후에 정의되는 외력조건이 적용된다면 복원성 평가 결과는 달라질 수 있다. 또한 Case11의 경우 역시 설치 조건 중에서 2개의 계류선만 체결된 상태이기 때문에 하나의 계류선이 파단 상태인 계류선 파단 상태와 동일한 결과임도 알 수 있다. 초기 미소 경사각에서 복원성을 평가하는 척도가 될 수 있는 GoM은 모든 상태에서 충분한 양의 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 최대 흘수선을 가지는 상태에서는 부분 해수 밸러스트로 인하여 자유 표면효과로 인한 무게중심 상승으로 인해 GoM에서 불리한 영향을 미치지만, 충분한 GM의 확보로 인해 그 영향은 크지 않다.

복원 모멘트 결과인 Table 5.5에서는 계류선 파단 상태에서는 정적 평형상태에서 경사가 발생하므로 음의 모멘트 값을 가지는 불안정한 평형상태가 됨을 볼 수 있다. 하지만 개구부의 위치가 부유체 최상단의 중심에 밀집하고 있어 해수 유입각은 모든 조건에서 70도 이상이 나타남을 Table 5.6에서 확인할 수 있다.

Table 5.3. Deadweight distributions by loading conditions

Items \ Cases	Case1&5		Case2&6		Case3&7		Case4&8	
	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]
Concrete ballast	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050
No.1 W.B.T.	793.400	9.090	793.400	9.090	793.400	9.090	793.400	9.090
No.2 W.B.T.	832.400	15.340	832.400	15.340	832.400	15.340	832.400	15.340
No.3 W.B.T.	832.400	21.740	832.400	21.740	832.400	21.740	832.400	21.740
No.4 W.B.T.	0	0.000	832.400	28.140	0	0.000	832.400	28.140
No.5 W.B.T.	0	0.000	128.369	31.893	0	0.000	128.369	31.893
No.1 mooring line	73.700	32.430	73.700	32.430	73.700	32.430	73.700	32.430
No.2 mooring line	73.700	32.430	73.700	32.430	0	0.000	0	0.000
No.3 mooring line	73.700	32.430	73.700	32.430	73.700	32.430	73.700	32.430

Items \ Cases	Case9		Case10		Case11		Case12	
	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]	Weight [t]	CoM [m]
Concrete ballast	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050	3,085.200	3.050
No.1 W.B.T.	793.400	9.090	793.400	9.090	793.400	9.090	793.400	9.090
No.2 W.B.T.	832.400	15.340	832.400	15.340	832.400	15.340	832.400	15.340
No.3 W.B.T.	832.400	21.740	832.400	21.740	832.400	21.740	832.400	21.740
No.4 W.B.T.	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
No.5 W.B.T.	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
No.1 mooring line	0	0.000	73.700	32.430	73.700	32.430	0	0.000
No.2 mooring line	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
No.3 mooring line	0	0.000	0	0.000	73.700	32.430	0	0.000

Table 5.4. Hydrostatics table by loading conditions

<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Cases Description </div>	Case1&5	Case2&6	Case3&7	Case4&8	Case9	Case10	Case11	Case12
DRAFT [m]	61.734	75.650	61.132	73.189	60.004	60.557	61.132	60.004
DISPLACEMENT [t]	8384.8	9345.5	8311.1	9248.5	8163.7	8237.4	8311.1	8163.7
KB [m]	30.816	34.560	30.544	34.142	30.002	30.273	30.544	30.002
KG [m]	27.786	27.874	27.744	27.826	27.660	27.703	27.744	27.660
BM [m]	0.133	0.013	0.147	0.013	0.176	0.161	0.147	0.176
KM [m]	30.949	34.573	30.691	34.155	30.178	30.434	30.691	30.178
GM [m]	3.163	6.699	2.947	6.329	2.518	2.731	2.947	2.518
GGo [m]	0.000	0.154	0.000	0.155	0.000	0.000	0.000	0.000
GoM [m]	3.163	6.545	2.947	6.174	2.518	2.731	2.947	2.518

Table 5.5. Righting moment by inclination angle

Heel [deg.] Cases	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Case1&5	0	4612	9097	13340	17247	20752	23913	27150	34310
Case2&6	0	10888	21448	31364	40335	48111	54512	59858	66017
Case3&7	-341	3915	8078	12018	15658	18966	21999	25191	32430
Case4&8	-435	9739	19616	28911	37345	44679	50792	56110	62668
Case9	0	3568	7029	10311	13356	16131	18760	21715	28883
Case10	0	3913	7710	11302	14621	17644	20445	23501	30775
Case11	-341	3915	8078	12018	15658	18966	21999	25191	32430
Case12	0	3568	7029	10311	13356	16131	18760	21715	28883

Table 5.6. Steady heel angle & downflooding angle

Cases Description	Case1&5	Case2&6	Case3&7	Case4&8	Case9	Case10	Case11	Case12
Steady heel [deg]	0.00	0.00	-0.81	-0.42	0.00	0.00	-0.81	0.00
D.f. angle [deg.]	79.81	72.18	79.91	73.55	90.00	79.78	79.91	90.00

5.5. 손상 후 정복원 모멘트 결과

5.5.1 손상 시 침수중량 정보

손상 조건은 적재 상태에 따른 정적 평형상태에서 수선에 접하는 단일 구획 손상을 가정하였다. 최소 흘수를 가지는 상태는 No.4 VOID 구획이 손상되며, 최대 흘수를 가지는 상태는 Room SE 구획 손상을 적용하였다. Fig. 5.1은 Case1과 Case2를 예로 손상 전후의 흘수 및 구획 침수정도를 나타낸 것이며, Case에 따라 손상 구획의 침수 정보를 Table 5.7로 나타내었다. 손상 후 정적 평형상태는 No.4 VOID 구획 손상 시 전체 침수가 발생하며, Room SE 구획은 부분 침수가 발생함을 확인할 수 있다.

Table 5.7. Flooded weight distribution

Cases	Damaged compartment	Weight [t]	CoM [m]
Case1	No.4 VOID	796.564	59.998
Case2	Room SE	48.881	74.430
Case3	No.4 VOID	796.564	59.998
Case4	Room SE	16.509	72.789
Case5	No.4 VOID	796.564	59.998
Case6	Room SE	48.881	74.430
Case7	No.4 VOID	796.564	59.998
Case8	Room SE	16.509	72.789
Case9	No.4 VOID	796.564	59.998
Case10	No.4 VOID	796.564	59.998
Case11	No.4 VOID	796.564	59.998
Case12	No.4 VOID	796.564	59.998

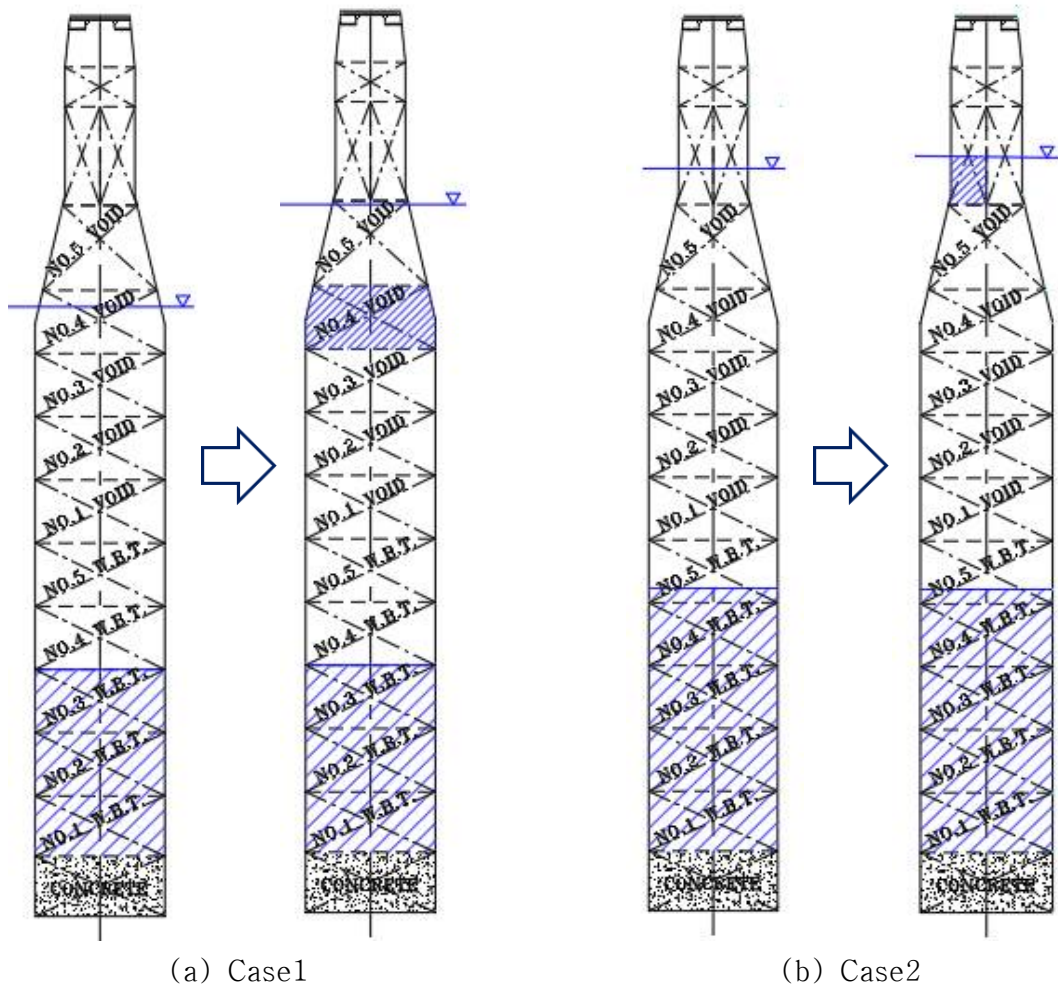


Fig. 5.1 Example of loading conditions before/after damage

5.5.2 유체 정역학적 특성 및 정복원 모멘트 결과

손상 구획의 침수에 의해 흘수 및 무게중심이 높아짐에 따라 그 결과는 손상 전과 차이가 발생하였다. 하지만 손상 후 역시 같은 적재상태에서 같은 손상이 발생하였기 때문에 Table 5.8과 같이 동일한 결과가 나옴을 볼 수 있다.

낮은 흘수일 경우 침수 용량이 크고 그 무게 중심이 높아 GoM이 크게 떨어질 것이라 예상할 수 있지만, 오히려 증가하거나 줄어들어도 그 정도가 미미함을 볼 수 있다. 이는 흘수가 높아짐에 따라 BM을 결정하는 자유 표면적이 현저히 줄어들었기 때문이다. 최대 흘수 상태에서는 손상의 피해를 최소화하기 위해 수선에 접하는 구획을 등분하였기 때문에 침수로 인한 정적 평형 시 초기 경사각과 GoM의 변화가 적다. 또한 부분 침수로 인해 추가적으로 자유 표면효과에 의한 무게중심 상승이 있지만, 그 역시 매우 작은 영향을 준다. 이러한 결과들로 유추하였을 때, 부유체 내부의 구획 구분은 손상 시에 대비가 잘 되어 있음을 알 수 있다. 실제로 선박이나 해양구조물의 경우, 초기 설계 시 손상 복원성에 검토의 결과에 따라 구획의 구

분이 새로 이루어지는 경우도 있다.

복원 모멘트 역시 그 정도는 크지 않지만 손상 전에 비해 대부분의 case에서 약간 증가한 것을 Table 5.9를 통해 알 수 있으며, Table 5.10에서 비손상 시에 비해 추가적으로 경사가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 최대 흘수 상태에서의 손상으로 비대칭 구획의 침수 발생하였기 때문이다. 하지만 이 역시도 구획 분할로 인해 침수량이 적어 경사각에 미미한 영향만 주었다. 침수로 인한 흘수증가로 해수 유입 각은 모든 경우에서 손상 전에 비해 줄었음에도 불구하고 70 deg. 이상의 큰 경사각에서 발생한다.

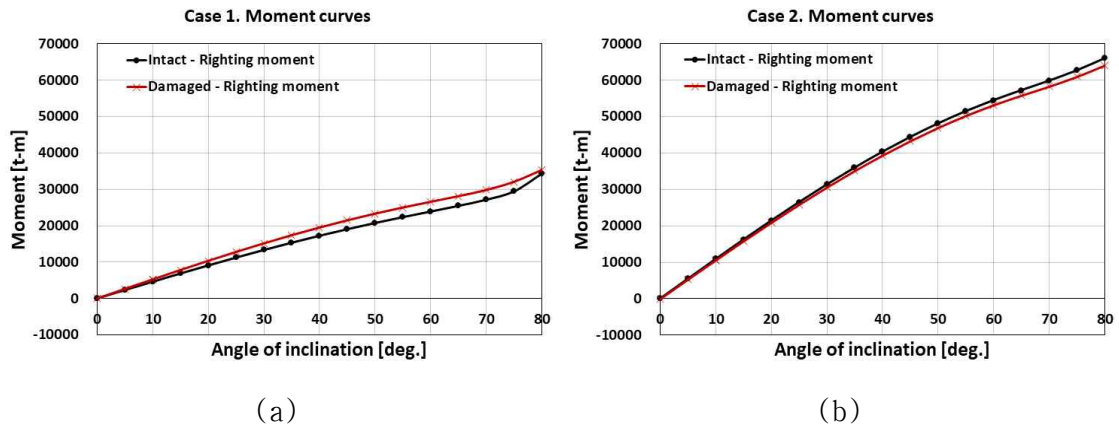


Fig. 5.2 Comparison of righting moment curves before/after damage

Fig. 5.2는 Table 5.5, Table 5.9의 결과 중 최소 흘수 적재 상태인 Case1과 최대 흘수 적재 상태인 Case2를 예시로 손상 전/후의 정복원 모멘트를 비교한 곡선이다. Case1에서는 정복원 모멘트가 증가 하였으며, Case2에서는 정복원 모멘트가 감소 하였음을 쉽게 확인할 수 있다.

Table 5.8. Hydrostatics table after damage

Description \ Cases	Case1&5	Case2&6	Case3&7	Case4&8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
DRAFT [m]	71.617	76.889	70.177	74.200	67.838	68.936	70.177	67.838
DISPLACEMENT [t]	9181.3	9394.4	9107.6	9288.3	8960.2	9033.9	9107.6	8960.2
KB [m]	33.862	34.777	33.563	34.312	32.980	33.269	33.563	32.980
KG [m]	30.580	28.116	30.565	27.917	30.535	30.550	30.565	30.535
BM [m]	0.019	0.013	0.026	0.013	0.044	0.035	0.026	0.044
KM [m]	33.881	34.790	33.589	34.325	33.024	33.304	33.589	33.024
GM [m]	3.301	6.674	3.024	6.408	2.489	2.754	3.024	2.489
GGo [m]	0.000	0.154	0.000	0.156	0.000	0.000	0.000	0.000
GoM [m]	3.301	6.520	3.024	6.252	2.489	2.754	3.024	2.489

Table 5.9. Righting moment by inclination angle after damage

Heel [deg.] Cases	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Case1&5	0	5261	10366	15168	19529	23348	26617	29858	35385
Case2&6	-75	10569	20893	30588	39363	46963	53210	58320	64117
Case3&7	-383	4399	9062	13452	17459	20993	24090	27268	33015
Case4&8	-464	9873	19914	29360	37924	45373	51569	56872	63291
Case9	0	3871	7634	11191	14426	17320	19919	22660	28583
Case10	0	4318	8519	12467	16071	19251	22070	25015	30869
Case11	-383	4399	9062	13452	17459	20993	24090	27268	33015
Case12	0	3871	7634	11191	14426	17320	19919	22660	28583

Table 5.10. Steady heel angle & downflooding angle after damage

Cases Description	Case1&5	Case2&6	Case3&7	Case4&8	Case9	Case10	Case11	Case12
Steady heel [deg.]	0.00	-0.07	-0.81	-0.45	0.00	0.00	-0.81	0.00
D.f. angle [deg.]	74.47	71.46	75.06	72.95	76.29	75.27	75.06	76.29
Deck edge immersion angle [deg.]	72.14	67.76	73.26	70.46	74.85	74.10	73.26	74.85

제6장 외력 조건

6.1. 서론

기존 규정에서 전복 모멘트에 작용하는 하중은 오로지 풍하중만 고려되었으나, 실제로 수면 하부에서는 해류에 의한 하중도 작용하고 있다. 풍속이 달라질수록 해류 속도 역시 그 영향이 있으므로 각 조건에 맞게 적용할 수 있는 조건이 주어져야 한다.

Case1~4는 시스템이 가동 중인 정의 내용에 따라 극심한 환경조건을 적용할 필요성은 없다. 극심한 환경이 발생할 경우에는 이미 Case5~8인 시스템 정지 상태로 전환되기 때문에 그에 맞게 각각 일반 환경 조건과 극심한 환경 조건을 적용 적용할 수 있다. 또한, 설치 상태인 Case9~11와 이동 상태인 Case12도 극심한 환경 조건에서는 작업할 일이 없기 때문에 일반 환경 조건을 적용하는 것이 맞다.

6.2. 외력 조건의 구분 및 정의

Table 6.1. Environmental conditions by loading conditions

Case no.	WIND	CURRENT
1	V_{ave}	NCM
2	V_{ave}	NCM
3	V_{ave}	NCM
4	V_{ave}	NCM
5	V_{e50}	ECM
6	V_{e50}	ECM
7	V_{e50}	ECM
8	V_{e50}	ECM
9	V_{ave}	NCM
10	V_{ave}	NCM
11	V_{ave}	NCM
12	Towing speed	Towing speed

Table 6.1에 나타낸 것과 같이 일반 환경 조건과 극심한 환경 조건은 기존 IEC61400-1[14], IEC61400-3-1[15]에서 정의된 내용을 활용하였다. 가동 중인 상태 혹은 설치를 위한 상태에서는 해상환경의 제한을 받는 상태이기 때문에 극한 환경이 아닌 평균 풍속과 평균 풍속에 따른 해류속도를 적용하였다. 정지 상태는 극한 환경조건을 견딜 수 있도록 풍속 및 해류속도를 적용하였다.

6.2.1 풍하중 계산

풍속 자료는 기상청에서 얻을 수 있으며 울산 해양기상부이 자료를 분석한 [16]를 참고하였다. 획득 자료는 4.3 m 높이에서 측정된 풍속이므로 식(8)을 통해 hub 높이로 확장한 풍속을 사용하였다. 여기서 IEC61400-1에서는 정상상태 풍속 전단으로 α 의 값을 0.14, 극한상태 풍속 전단으로 α 의 값은 0.11로 적용할 것을 권장한다. 극한상태에서는 Gumbel method를 이용한 극치 통계분석을 통해 얻어진 50년 회기주기의 풍속을 사용하여 Table 6.2와 같이 나타내었다.

단, Case12의 경우 예인선에 의해 견인되는 상태이기 때문에, 예인선의 속도를 풍속이라 가정한다. DNV규정에서는 예인선 속도를 8~10 knots를 권장하며[17], 계산에는 10 knots를 적용하였다.

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (8)$$

Table 6.2. Normal wind speed and Extreme wind speed

Height [m]	Normal Wind Profile Speed [m/s]	Extreme Wind Profile Speed [m/s]
4.30	6.41	31.96
99.35	9.96	45.18

4.1.3의 식(7)을 적용하며, 풍하중을 받는 투영면적은 시스템의 가동 상태 여부에 따라 달라진다. 시스템 가동 시, 상부 발전에서의 하중은 추력으로 대체되고 그 외 수면 상부로 노출된 부분은 기존의 바람하중을 적용할 수 있다. 타워 경사각이 최대 10 deg. 인 것을 참고하여[18], 풍력 터빈이 10 deg. 기울어졌을 때 컨트롤 시스템에 의해 정지된다는 가정을 하였다. 이는 직립 상태에서부터 10 deg.까지는 추력에 의한 모멘트와 풍하중에 의한 모멘트가 모두 적용되며, 10 deg. 이후의 경사각에서는 수면상부 전체 투영면적에 대한 풍하중에 의한 모멘트만 발생하도록 계산하였다. 추력은 식(9)을 따른다.

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_T \cdot A_R \cdot V_W^2 \quad (9)$$

추력 계수는 풍력 터빈 설계사 유니슨(주)로부터 획득한 정보를 이용하였으며, 적용하는 풍속에 맞는 추력계수를 사용하였다. 풍속에 따른 추력계수는 Table 6.3과 Fig. 6.1에서 확인 가능하다. 이 정보를 통해 풍속에 따른 추력은 Fig. 6.2와 같이 나타난다.

추력은 가동 상태일 때만 적용되는 조건으로 Case1~4에만 해당되며, Case5~12는 풍력 터빈이 정지되어 있는 상태이므로 추력에 의한 모멘트는 적용하지 않았다.

Table 6.3. Thrust coefficient by wind speed

Wind Speed [m/s]	Thrust coefficient	Wind Speed [m/s]	Thrust coefficient
3	1.0802	13	0.2681
4	0.8559	14	0.2119
5	0.7892	15	0.1713
6	0.7912	16	0.1410
7	0.7926	17	0.1178
8	0.7939	18	0.0997
9	0.7325	19	0.0855
10	0.6570	20	0.0740
11	0.4823	21	0.0646
12	0.3511	22	0.0569

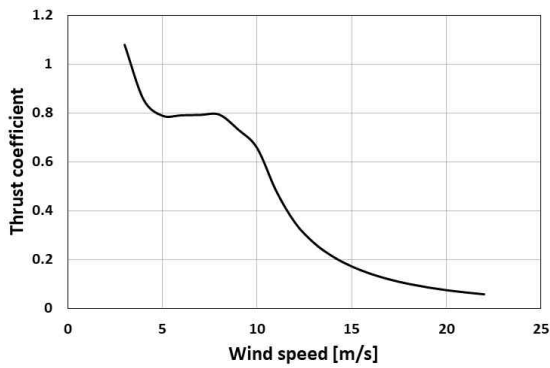


Fig. 6.1. Curve of thrust coefficient

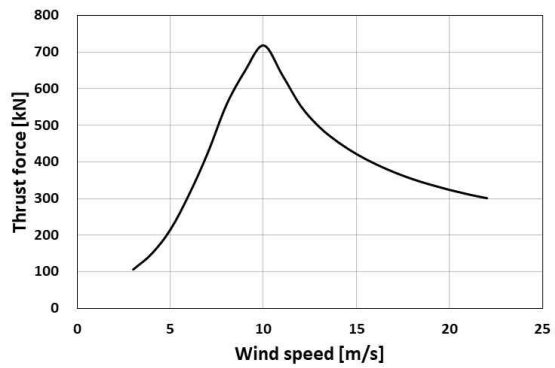


Fig. 6.2. Curve of thrust force

6.2.2 해류하중 계산

해류 조건은 깊이에 따라 해류의 속도가 달리 나타나며, 바람에 의해서도 달라질 수 있다. 국립해양조사원의 보고서[19]에서 획득한 최대 유속 및 평균 유속의 자료를 획득하였다. 이 데이터를 이용하여 DNVGL[20]에 있는 식(10~12)을 통해 구해진 수심에 따라 평균 유속에 대한 해류 전단 및 극한 해상환경에서의 해류전단을 Table 6.4와 같이 구하였다. 이 때 풍속은 10 m 높이에서의 1시간 평균 풍속과 50년 주기 극한 풍속을 적용하였다. 얻어진 수심에 따른 해류 속도를 이용하여 식

$$V_{c,wind}(0) = kU_{1-hour,10m} \quad (10)$$

$$V_{c,wind}(z) = V_{c,wind}(0) \cdot \left(\frac{h_w + h_r}{h_w} \right) \quad (11)$$

$$V_{c,tide}(z) = V_{c,tide}(0) \cdot \left(\frac{h_t + h_r}{h_t} \right)^{1/7} \quad (12)$$

Table 6.4. Current speed by water depth

Water Depth [m]	Normal Current Profile Speed [m/s]	Extreme Current Profile Speed [m/s]
Surface	0.37	1.63
-1	0.37	1.61
-5	0.35	1.53
-10	0.33	1.43
-50	0.14	0.66
-90	0.13	0.61
-110	0.12	0.58
-130	0.11	0.53
-150	0.07	0.34

$$F_C = \frac{1}{2} \cdot \rho_{water} \cdot C_D \cdot A_C \cdot V_C^2 \quad (13)$$

(13)에 따라 해류에 의한 하중을 계산하였다.

항력 계수는 해양기상부이 자료를 통해 얻은 평균 수온을 통해 ITTC의 해수 및 청수 특성표에서 동점성 계수를 획득하였다.[21] 이를 이용하여 레이놀즈 수를 구한 뒤 Fig. 6.3의 원통형의 레이놀즈 수와 항력 계수의 관계그래프[22] 를 통해 찾아낸 항력 계수를 사용하였다.

단, Case12의 경우 풍속과 동일하게 예인선의 속도를 해류속도라 가정하며, DNV에서 권장하는 예인선 제한 속도인 8~10 knots 중 10 knots를 적용하였다.[17]

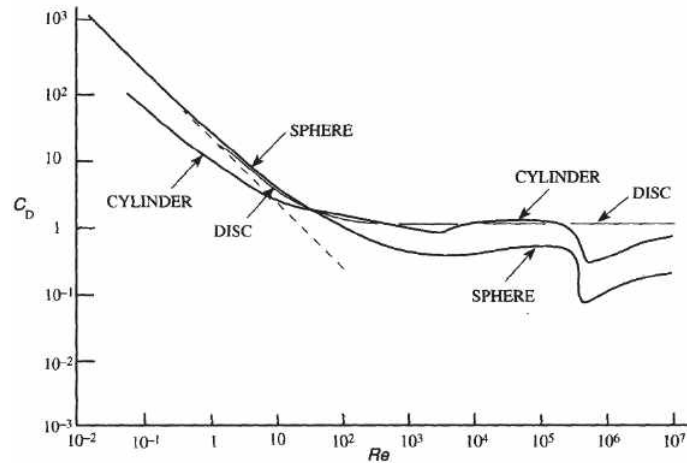


Fig. 6.3. Relationship curve between C_d and Re

6.3. 전복 모멘트

6.3.1 비손상 및 손상 시 전복 모멘트 결과

Table 6.5, Table 6.6의 결과에서 가동 상태 시 전복 모멘트는 세 가지 외력이 모두 적용되는 상태이며, 가동 가능한 최대 타워 경사각 10 deg. 까지는 추력이 작용하여 큰 경사 모멘트가 발생하다 이후에는 가동이 정지되어 수면상부 전체 풍압면적에 따른 풍하중만 작용하여 경사 모멘트가 급격히 줄어들었다. 풍압 면적 및 높이가 높아 풍하중 계산 시 높이계수가 크게 적용되었지만, 적용되는 풍속이 평균 풍속이기 때문에 풍하중 자체는 크지 않다. 하부에 작용하는 해류에 의한 모멘트 역시 풍속의 영향을 받기 때문에 모멘트에 적은 영향을 미친다.

반대로 정지 상태에서는 추력은 발생하지 않지만 50년 회기주기의 극한 풍속을 사용하였기 때문에 풍하중에 의한 모멘트가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 해류에 의한 모멘트는 극한 풍속에 따른 해류 속도를 적용하였기 때문에 그 모멘트 역시 가동 상태에 비해서는 매우 큰 값이 발생하였다. 두 모멘트의 합인 전복 모멘트의 값은 가동 상태와 비교하였을 때도 그 크기가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 설치 상태에서는 가동 상태와 동일한 풍속이 적용되지만 추력이 발생하지 않기 때문에 평형 상태에서부터 적은 전복 모멘트를 가지며 그 정도는 가동이 중지된 10 deg. 이후에서 나타나는 전복 모멘트와 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

운송 상태에서는 적용되는 풍속 및 해류속도가 다르기 때문에 그 모멘트 역시 달라진다. 예인선의 속도에 따라 적용되었기 때문에 풍속은 오히려 평균 풍속보다 낮아 풍하중에 의한 모멘트 역시 적다. 하지만, 하부에 작용하는 모멘트는 평균 풍속에 따른 해류 속도나 극한 풍속에 따른 해류 속도에 비해서는 수배로 크기 때문에 모멘트는 훨씬 더 크게 발생한다.

Table 6.5. Overturning moment by external loads in case of intact

Heel[deg.] Cases	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Case1	11333	11161 1629	1554	1433	1267	1063	827	566	287
Case2	10998	10831 1531	1460	1346	1191	999	777	532	270
Case3	11348	11175 1633	1558	1436	1270	1066	829	567	288
Case4	11058	10890 1546	1475	1360	1203	1009	785	537	273
Case5	33102	32599	31105	28667	25357	21277	16551	11321	5748
Case6	31197	30724	29316	27018	23899	20053	15599	10670	5417
Case7	33177	32673	31176	28732	25415	21325	16588	11347	5761
Case8	31495	31016	29595	27275	24126	20244	15747	10772	5469
Case9	1667	1641	1566	1443	1277	1071	833	570	289
Case10	1661	1636	1561	1439	1273	1068	831	568	289
Case11	1658	1633	1558	1436	1270	1066	829	567	288
Case12	8825	8691	8293	7643	6760	5673	4412	3018	1532

Table 6.6. Overturning moment by external loads in case of damage

Heel[deg.] Cases	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Case1	11098	10929 1558	1487	1370	1212	1017	791	541	275
Case2	10968	10801 1522	1453	1339	1184	994	773	529	268
Case3	11117	10948 1568	1496	1379	1220	1023	796	545	276
Case4	11033	10866 1540	1469	1354	1198	1005	782	535	272
Case5	31708	31226	29796	27460	24290	20382	15854	10845	5506
Case6	31042	30571	29170	26884	23780	19954	15521	10617	5390
Case7	31900	31416	29976	27626	24437	20505	15950	10911	5539
Case8	31375	30898	29483	27172	24035	20168	15688	10731	5448
Case9	1609	1584	1512	1393	1233	1034	804	550	279
Case10	1572	1548	1477	1362	1204	1011	786	538	273
Case11	1592	1568	1496	1379	1220	1023	796	545	276
Case12	10968	10801	10306	9498	8402	7050	5484	3751	1905

제7장 복원성 평가

7.1. 서론

2.1에서 언급한 다양한 형태에 따른 다양한 평가기준이 다루어 져야 한다는 원칙에 따라 부유식 해상풍력 시스템의 형태에 맞는 구분 및 그 평가 기준이 달리 적용되어야 한다. 부유식 해상풍력 시스템의 부유체 형상은 크게 Semi-submersible, Spar, TLP로 구분되며 평가 기준역시 이 구분에 맞게 다루어져야 할 필요가 있다. 다만, 본 논문에서는 스파형의 부유체에 대한 예제 검증이 이루어 졌기 때문에 해당 형상에 따른 평가 기준을 작성하고 결과를 반영해 보고자 한다.

7.2. 비손상 복원성 평가

7.2.1 비손상 복원성 평가 기준

첫 번째로 IMO의 비손상 복원성 평가 기준을 바탕으로 모멘트 하부 면적 비는 기준의 1.4에서 1.3으로 변경하여 적용한다. 선급 별 부유식 해상풍력 시스템 규정 비교내용에서도 동일하게 면적비의 기준을 1.3배로 채택하는 것을 확인할 수 있다. 면적비 1.4는 선박형에 적용하는 안전마진으로 부유식 해상풍력발전시스템 하부 부유체 형태에는 1.3을 적용하는 것이 적절하다.

두 번째로 기존 규정 내용인 직립 상태에서 교차점 혹은 해수유입개구부에 도달하는 경사각까지의 정복원 모멘트는 양의 값을 가져야 한다. 계류선 파단 조건은 예외로 한다. 이는 계류선 파단 조건은 비손상으로 검토하는 조건이지만 일종의 손상된 상태로도 볼 수 있기 때문에 계류선의 파단으로 인해 초기 경사각이 발생할 수 밖에 없으므로 예외로 둔다.

세 번째는 부유식 해상풍력 발전에 맞는 조건으로, 가동상태에서 정복원모멘트와 전복모멘트의 첫 번째 교차점은 상부터빈이 작동하는 최대 타워 경사각 이내에서 발생해야 한다. 첫 번째 교차점은 모든 하중을 받으면서 터빈이 작동하고 있는 경사각이기 때문에 이 교차점이 최대 터빈 작동 최대 경사각 이후 나타난다면 가동에 큰 문제가 발생할 것이다.

앞의 내용을 바탕으로 새롭게 제시하는 비손상 복원성 평가 기준은 다음과 같다.

- ✓ Area ratio > 1.3 (to downflooding angle)
- ✓ Righting moment > 0 (range : upright ~ 2nd intercept)
- ✓ If the turbine is operating, 1st intercept angle should be less than max. tower tilt.

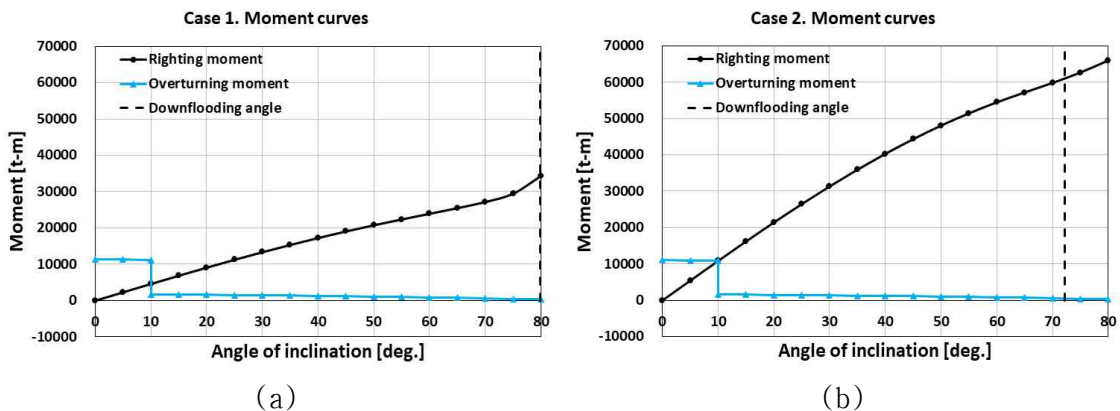
7.2.2 비손상 복원성 평가 결과

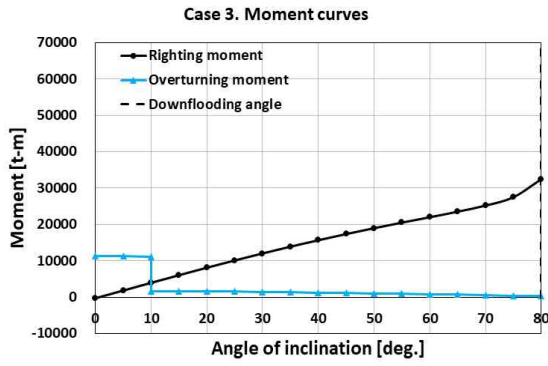
새로운 평가 조건에 따라 앞의 모든 조건이 복원성 평가 조건을 만족하는지 확인해보았다. 복원 모멘트 곡선과 전복 모멘트 곡선을 함께 비교한 Fig. 7.1으로 나타내었으며 기준에 따른 결과는 Table 7.1에서 확인할 수 있다. 12개의 Case중에서 5개가 평가 기준을 만족하지 못하며, 특히 낮은 흘수 상태가 모두 포함되었다. 가동 조건에서는 두 모멘트 곡선의 첫 번째 교차점의 위치가 10 deg.에서 발생하였고, 정지 상태에서는 낮은 흘수를 가지는 조건에서 모멘트 하부 면적의 비가 1.3보다 적게 나옴으로서 평가 기준을 만족시키지 못하였다.

가동 및 정지 상태에서는 기준을 만족하더라도 크게 여유를 가지지 못하는 것을 확인할 수 있다. 특히 가동 상태의 세 번째 평가 기준에서는 정적 하중에 따른 결과의 여유가 적기 때문에 더 다양한 동적 하중이 작용하는 실제 해상 상태에서는 안정적인 상태라고 장담할 수 없다.

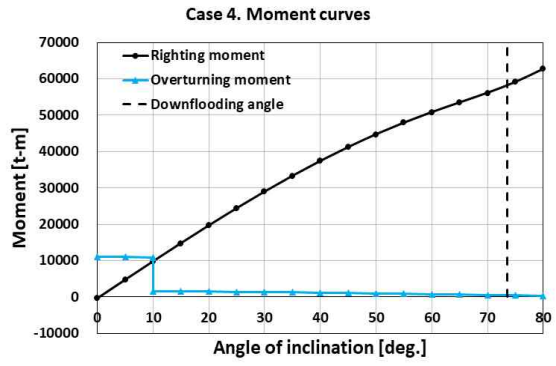
결과내용에 따라 4개의 Case들은 적재 상태를 조정하여 복원성을 만족할 정도의 흘수로 변경하면 이는 곧 최대 흘수 상태와 동일하게 된다. 즉, 예제로 적용된 모델의 경우에는 설치조건 외 상태에서 단일 적재 상태인 최대 흘수 상태가 가동 및 극한 환경을 견디는 정지 상태가 된다. 여기서 더 안정적이기 위해서는 첫 번째 교차점의 위치를 앞당길 수 있는 방안을 모색해야 한다.

비손상 복원성 평가 결과 내용을 종합하면, 해당 부유체는 과소설계가 이루어졌다고 할 수 있다. 최대 흘수선을 가지면서 무게중심을 낮추기 위해 부유체 하부에 고비중의 콘크리트 밸러스트를 적재 하였음에도 불구하고 가동 상태에서 첫 번째 교차점의 위치가 한계점에 가깝다. 이는 가동 자체에 문제가 발생할 수 있는 상태이므로 반드시 재설계가 이루어 져야 한다. 콘크리트 밸러스트이 양을 늘리거나 더 큰 비중의 콘크리트를 적재한다면 개선될 수 있을 것이다. 다만 이미 너무 고비중이기 때문에 양을 늘려 무게중심을 낮춰 정복원 모멘트를 더 크게 하는 방향으로 수정되는 것이 더 나올 수 있으나 이는 추가적인 검토가 이루어져 할 것이다. 또한, 최소 흘수선을 가지는 상태에서의 복원성 기준을 만족하지 못하는 부분은 예제 모델의 가동 및 정지 상태에서는 최대 흘수선을 가지는 단일 적재 상태로 운용하면 된다.

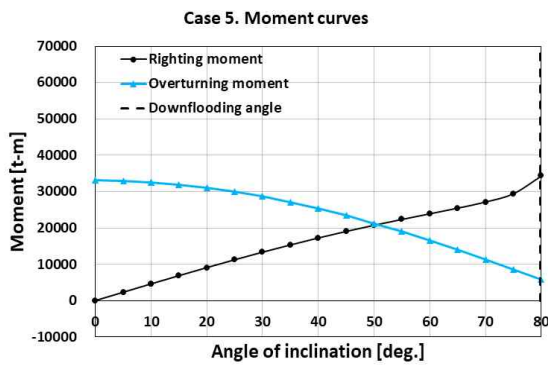




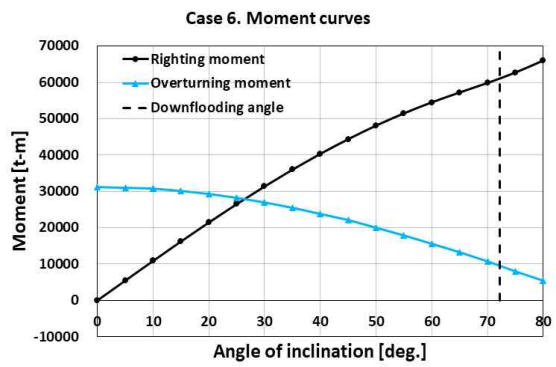
(c)



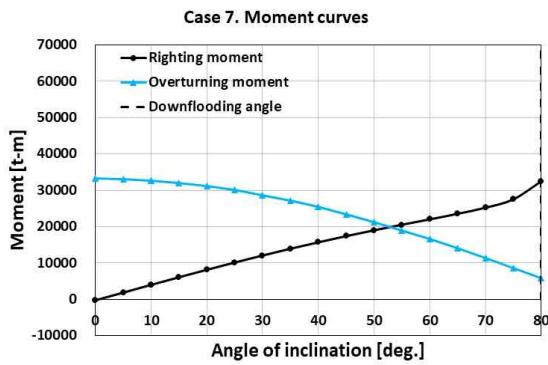
(d)



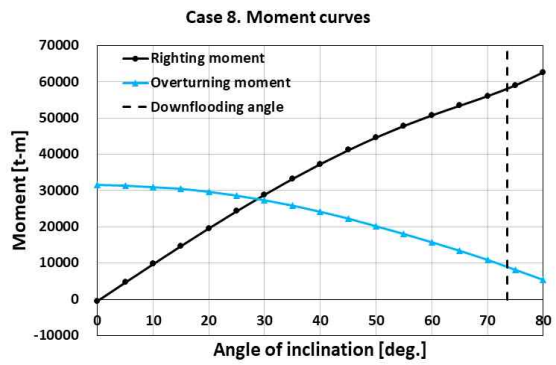
(e)



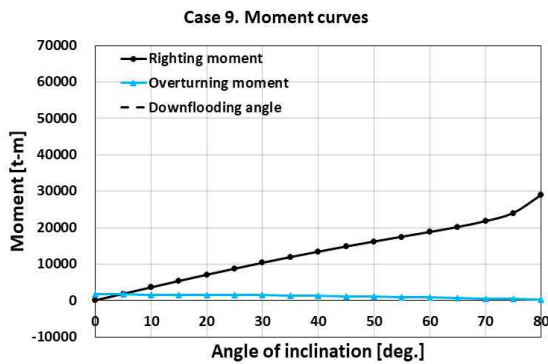
(f)



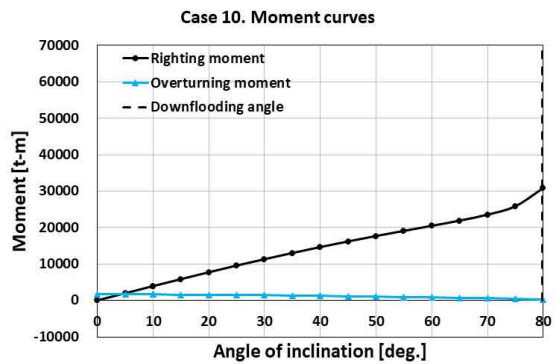
(g)



(h)



(i)



(j)

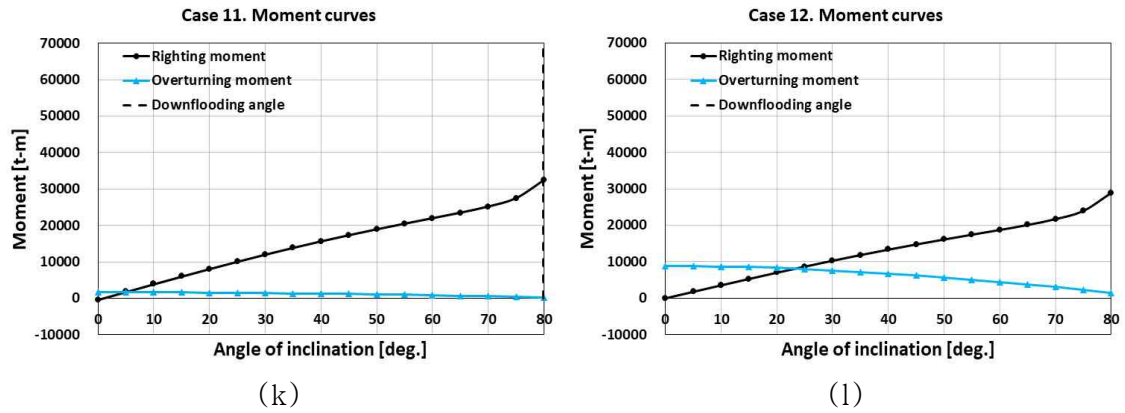


Fig. 7.1. Intact stability moment curves

Table 7.1. Result of intact stability assessments

Cases	Intact stability criteria			
	A.Ratio > 1.3	GZ > 0	1 st intercept < 10 deg.	Status
Case1	7.03	0	10	not satisfied
Case2	13.90	0	9.96	satisfied
Case3	6.42	-	10	not satisfied
Case4	13.35	-	10	not satisfied
Case5	0.71	0	-	not satisfied
Case6	1.46	0	-	satisfied
Case7	0.65	-	-	not satisfied
Case8	1.40	-	-	satisfied
Case9	11.17	-	-	satisfied
Case10	12.14	-	-	satisfied
Case11	13.04	-	-	satisfied
Case12	2.10	0	-	satisfied

7.3. 손상 복원성 평가

7.3.1 손상 복원성 평가 기준

손상 복원성에 있어 평가 기준은 최소한으로 두고자 한다. 손상으로 인한 침수 외에 추가 침수가 발생하지 않도록 하는 것이 가장 중요하다. 복원성 평가에 있어 중요한 요소 중 갑판 침수 지점, 개구부 해수 유입지점과 두 모멘트 면적비의 제한을 돕으로써 손상 후에도 외력에 의해 경사 시에 추가 경사가 발생하지 않을 최소한의

에너지를 지닐 수 있도록 한다.

이런 내용을 바탕으로 손상 복원성에 대한 평가 기준은 다음과 같이 정리한다.

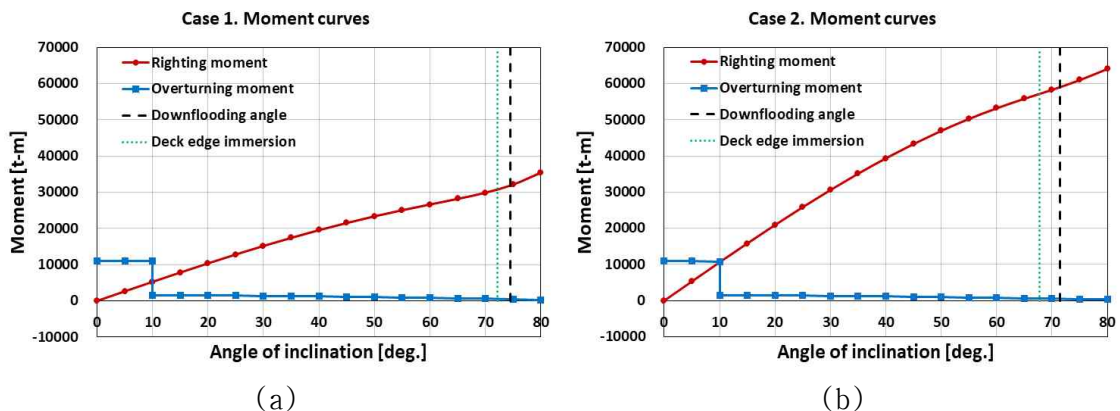
- ✓ Area ratio > 1.0 (to downflooding angle)
- ✓ 1st intercept < the angle of deck edge immersion

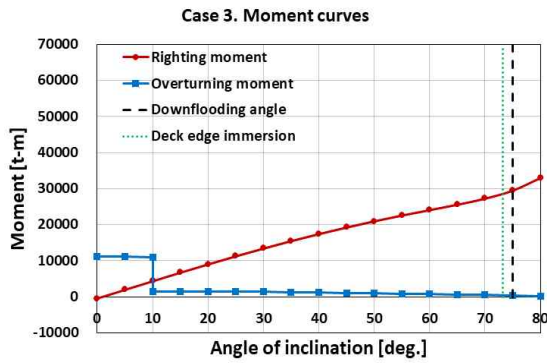
7.3.2 손상 복원성 평가 결과

손상 복원성의 평가 기준 자체를 가동과 상관없이 완전 전복상태가 되는 것을 방지하고자 하는 최소한의 기준이다. Table 7.2의 결과에서 볼 수 있듯이 가동 상태 조건에서는 모멘트 곡선들의 첫 번째 교차점이 10 deg.에서 발생하는 것을 볼 수 있으며 이는 가동에 있어서는 문제가 발생하는 부분이다. 하지만 면적비나 갑판 침수지점보다 낮은 위치에서 나타나야 하는 기준에 대해서는 만족함을 볼 수 있다. 따라서 이 상황으로 인해 발전 효율이 떨어지기 때문에 빠른 수리가 필요하다. Case2의 경우에는 10 deg.에서 정복원 모멘트와 전복 모멘트의 차이가 매우 작음을 볼 수 있는데 이는 초기 조건에서 정복원 모멘트를 더 높이는 방안 혹은 손상 Fig. 5.2에서도 확인하였듯이 손상 전/후의 정복원 모멘트, 그 중에서 10 deg.에서의 변화는 아주 적기 때문에 이는 비손상 상태인 초기 조건에서의 정복원 모멘트가 개선되는 방안을 찾는 것이 나은 방법이다.

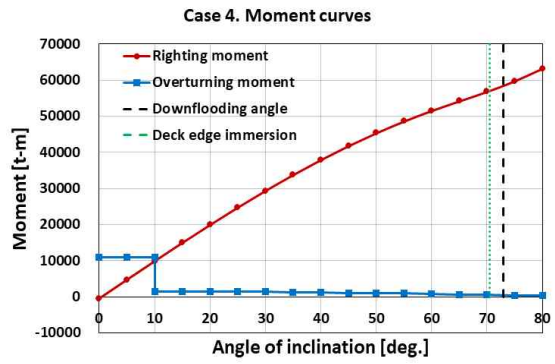
또한, 정지 상태에서는 비손상 결과와 동일하게 손상 조건에서도 최소 흘수 상태에서 면적비를 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 최대 흘수가 아닌 상태에서 가동 중이더라도 극한 환경이 오는 상황에서는 추가 밸러스팅을 통하여 최대 흘수까지 배수량을 증가시켜야 극한 환경을 버텨낼 수 있다는 의미가 된다.

손상 복원성 평가 내용 역시 부유체의 과소설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다. 이는 최소 흘수선에 대한 조건까지 평가했을 때의 결과이며, 비손상 복원성의 결과를 고려하여 최대 흘수선을 가지는 단일 적재 상태만을 고려한다면 손상 복원성에 대한 평가 결과는 특히 정지 상태에서 모멘트 면적비에 대한 결과가 제한 조건을 적절하게 만족하는 수준이기 때문에 적절한 설계로 간주할 수 있다. 하지만 단지 손상 복원성 평가만 고려하였을 때의 결과라는 것을 구분하여 생각해야 하며, 결국 설계에 대한 평가는 전체적으로 이루어져야하므로 그 결과는 달라질 수 있다.

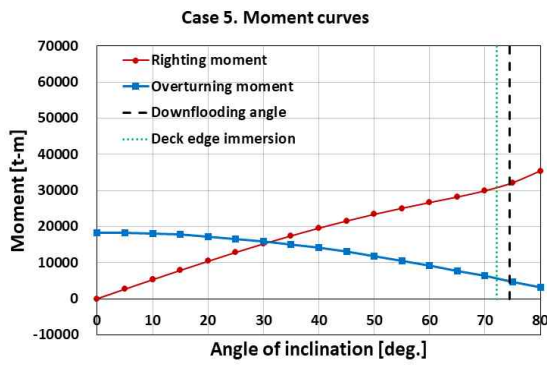




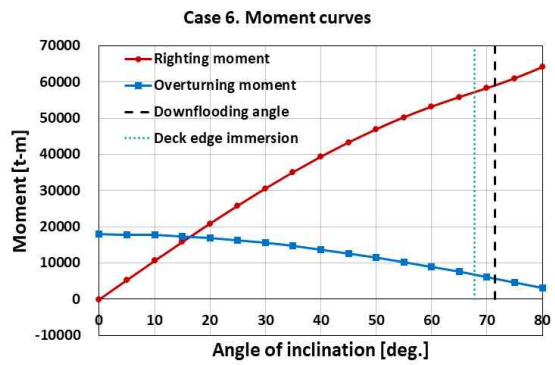
(c)



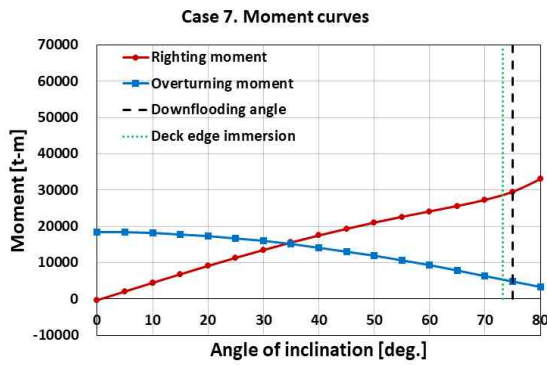
(d)



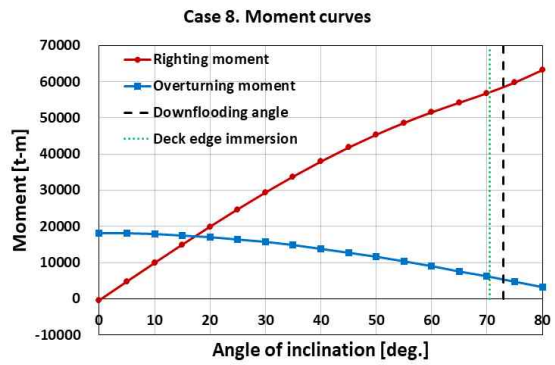
(e)



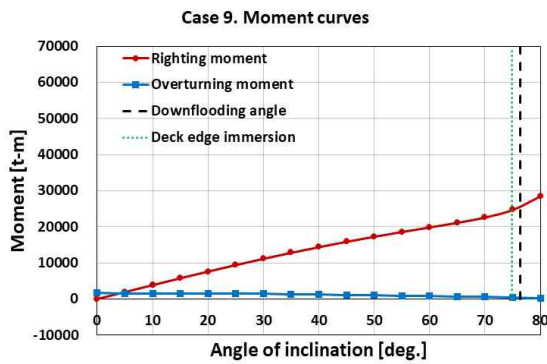
(f)



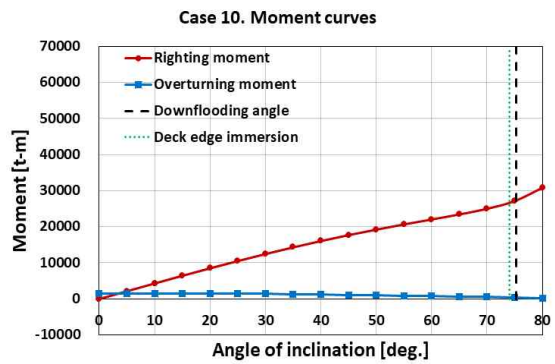
(g)



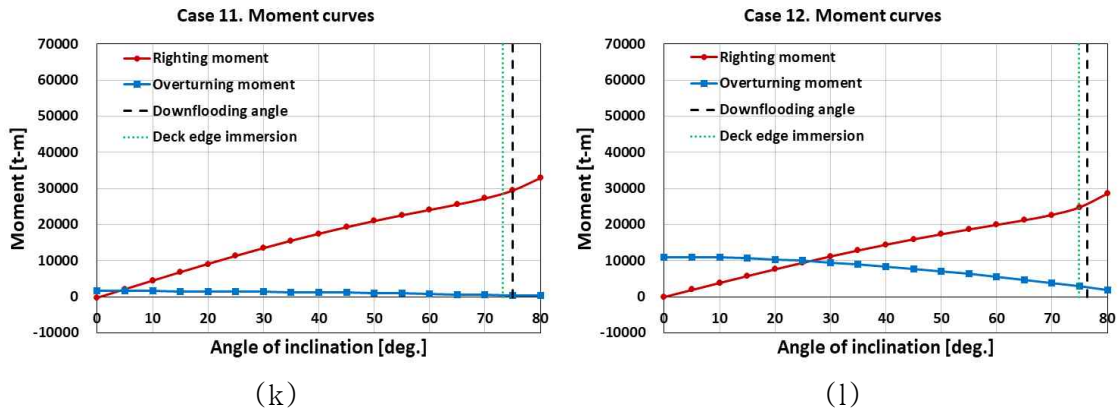
(h)



(i)



(j)



(k) (l)
 Fig. 7.2. Damage stability moment curves

Table 7.2. Result of damage stability assessments

Cases	Damage stability criteria			Status
	A.Ratio > 1.0	1st intercept point < Deck edge immersion		
		Attained value	Required value	
Case1	7.04	10	72.136	satisfied
Case2	13.42	10	67.757	satisfied
Case3	6.33	10	73.264	satisfied
Case4	13.29	10	70.456	satisfied
Case5	0.73	45.9	72.136	not satisfied
Case6	1.41	26.9	67.757	satisfied
Case7	0.66	49.1	73.264	not satisfied
Case8	1.39	28.2	70.456	satisfied
Case9	11.37	4.1	74.848	satisfied
Case10	12.40	3.6	74.096	satisfied
Case11	13.12	4.1	73.264	satisfied
Case12	1.67	1.2	74.848	satisfied

제8장 결론

본 연구에서는 5-MW급 스파형 부유식 해상풍력 발전 시스템 모델을 통해 복원성 평가를 수행하였다. 기존 설계기준에서의 복원성에 대한 내용에 따라 복원성 평가 결과를 확인 하고, 여러 선급에서 제정한 부유식 해상풍력 발전 시스템 규정을 비교하여 현재의 평가기준에 대한 보완할 점을 분석하였다.

복원성 평가 기준에 있어서 기존의 내용은 부유식 해상풍력 발전 시스템의 특성이 전혀 고려되지 않았기 때문에 그대로 적용하여 설계된다면 추후 너무 과설계가 되거나 혹은 작동 자체가 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제에 따른 기존의 내용이 보완이 될 필요가 있으며, 그 내용은 비손상 복원성에서는 복원 모멘트와 전복 모멘트의 면적비를 복원성이 충분히 확보 되면서 보다 낮은 기준을 적용하였다. 추가적으로 발전기 가동 자체에 문제가 발생할 수 있는 두 모멘트의 첫 번째 교차점의 위치 제한을 두었다. 적용되는 평가 적재 상태는 정복원력에 영향을 미칠 수 있는 조건에 따라 구분하였으며, 그에 맞는 환경 조건들도 구분하여 나타내었다. 가동상태는 타워 피치각이 경사각에 따라 가동여부를 달리 적용하였다. 경사각 10 deg. 이후에는 추력과 풍하중이 적용되고 그 이후로는 풍하중만 적용하도록 하였다. 환경 조건은 울산 해양기상부이의 재해석 데이터를 이용하였다. 풍속은 가동 상태에서는 평균 풍속, 정지 상태에서는 극한 풍속을 적용하였다. 해류속도는 국립해양조사원의 자료를 이용하여 풍속과 수심에 맞는 속도를 계산하였다. 결과를 통해 복원력을 충분히 확보하더라도 가동 자체에 문제가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 가동 상태에서는 충분한 복원력을 가졌으나 극한 환경에서는 그 복원력이 충분하지 못함을 알 수 있었다. 특히 풍하중만 적용했던 기존 규정에서 추력이 적용됨에 따라 전복 모멘트가 크게 작용하게 되고, 이는 가동이 정지되는 각도 근처까지 경사하게 된다. 또한 해류에 의한 하중이 풍하중과 비교했을 땐 그 크기는 작지만, 세 번째 평가기준에 따른 경사각의 여유가 적기 때문에 여기에 대한 영향은 결코 작다고 할 수 없다. 평가기준에 만족하지 못한 조건은 적재상태의 변경을 통해 복원력을 확보하여 만족시킬 수 있다.

손상 복원성에서는 손상으로 인한 침수 외 추가 침수가 발생하지 않으며, 전복 모멘트의 에너지를 상쇄시킬 수 있는 복원 모멘트를 가질 수 있도록 기준을 작성하였다. 최소 흘수조건에서는 수선에 인접한 구획이 대칭구획으로 인해 침하만 발생하였고, 그로 인해 오히려 정복원 모멘트가 상승하는 효과가 발생하였다. 최대 흘수조건에서는 횡경사가 발생하였지만, 최소한의 손상을 위해 구획을 구분하여 놓아 침수량 및 횡경사 정도는 매우 적었다. 그로 인해 정복원 모멘트가 크게 줄지 않아 복원성 평가 결과에도 큰 영향을 미치지 않았다. 다만 손상으로 인해 더 큰 전복을 방지하기 위한 평가조건은 가동이 가능해야하는 조건에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 모든 가동상태에서는 모멘트 곡선들의 첫 번째 교차점이 최대 각도를 넘어서 발생하기 때문에 가동에 문제가 발생한다는 것을 예상할 수 있다.

본 연구의 네 가지 목적에 대해 정리하면 제 4장에서 현 복원성 기준에 따라 복원성 평가를 수행하였고, 여러 선급에서 정의하는 부유체 복원성 기준을 비교해보았

다. 제 5장을 통해 적재상태를 구분하여 각각의 정복원 모멘트를 수행하였으며, 제 6장을 통해 풍하중 외 환경 조건을 추가적으로 적용하여 그 결과를 확인하였다. 이를 바탕으로 제 7장에서 비손상 및 손상 복원성의 기준을 새로이 작성하여 그 기준에 따라 복원성 평가를 수행하였다.

이러한 내용을 통해 적재 상태의 변경 또는 구획의 재설정 등의 방법을 통해 비손상 및 손상조건에서 모두 평가 기준을 만족할 수 있는 상태를 도출해낼 수 있다. 더 크게는 어떠한 상황에서도 모든 조건을 만족하지 못한다면, 부유체 형상 자체의 변경까지도 이루어질 수 있으며, 이는 더 안정적인 부유체 개발에 도움이 될 수 있다. 새로이 적용한 복원 모멘트와 전복 모멘트의 첫 번째 교차점에 대한 기준이 초기 단계에 검토된다면 이후 검토과정에 진행되는 통합연성하중해석 단계 전에 부유체의 가동범위 내의 경사각에서 평형상태가 이루어지는지 확인할 수 있다. 이는 부유체 초기 설계 단계에서 소요되는 시간을 많이 줄일 수 있을 것이다.

차후 본 연구에서 검토된 스파형외, 다른 형태의 부유체까지 검토되어 보완된 복원성 평가기준이 실제 설계기준에 반영이 된다면 부유식 해상풍력 터빈 시스템에 보다 적합한 기준이 될 수 있을 것이다. 다음으로 정복원 모멘트 계산 시 계류선의 장력에 의해 복원성능에 긍정적인 효과를 줄 수 있는 부분에 대해서 추가적으로 고려해 볼 수 있을 것이다. 또한 설계단계에서 이러한 기준에 맞춰 충분한 복원성 확보를 한다면 실제 환경에서 발생할 수 있는 위험 요소를 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] IEA, <http://www.iea.org/>
- [2] 관계부처 합동, 2020.07, “한국판 뉴딜 종합계획”
- [3] 산업통상자원부, 2017, “재생에너지 3020이행계획(안)”
- [4] IEC, 2019.04, IEC61400-3-2, Edition 1.0, Wind energy generation system-Part 3-2 : Design requirements for floating offshore wind turbines
- [5] IMO, 2008.12, Resolution MSC.267(85), Adeption of the international code on intact stability
- [6] Dimitris Konovessis, Kie Hian Chua and Dracos Vassalos, “Stability of floating offshore structures”, Ships and offshore structures, 2014, Vol.9, No.2, p125-133
- [7] J. Mendonça Santos & C. Alves, “A wind heeling moment curve for ship-shaped MODU early design stability considerations”, 2016, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03000-8
- [8] Maurizio Collu Alan Maggi, Paola Gualeni, Cesare Mario Rizzo, Feargal Brennan, “Stability requirements for floating offshore wind turbine(FOWT) during assembly and temporary phases:Overview and application”, 2014, Ocean Engineering 84, p165-175
- [9] T.M. Hendriks & J. Mendonça Santos, “Challenges in stability assessment of offshore floating structures”, 2018. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-8153-7993-5
- [10] ABS, 2020.07, “Floating offshore wind turbine”, #195
- [11] BV, 2019.01, “Classification and certification of floating offshore wind turbines”, NI 572
- [12] DNV GL, 2018.07, “Floating wind turbine structures”, DNVGL-ST-0119
- [13] IMO, 2009, 2009 MODU code

- [14] IEC, 2019.02, IEC61400-1, Edition 4.0, Wind energy generation system-Part 1 : Design requirements
- [15] IEC, 2019.04, IEC61400-3-1, Edition 1.0, Wind energy generation system-Part 3-1 : Design requirements for fixed offshore wind turbines
- [16] 유영재, 2019, “울산 앞바다의 환경조건을 적용한 부유식 해상풍력발전시스템의 부유체 비교연구”, 석사학위논문
- [17] DNVGL 2017.07, “Ships”, Part 5, Chapter 10, DNVGL-RU-SHIP
- [18] G K V Ramachandran, L Vita, A Krieger, K mueller, 2017, “Design basis for the feasibility evaluation of four different floater designs”, Energy procedia 137 p.186-195
- [19] 국립해양조사원(KHOA), 2018, “2017 국가해양관측망 연간백서”, 11-11 92136-000032-01, pp.314-316
- [20] DNV 2010.10, “Environmental conditions and environmental loads”, DNV-RP-C205
- [21] ITTC, “Fresh water and seawater properties”, 2002, Recommended procedures rev.02
- [22] Merle C. Potter, David C. Wiggert, Bassem H. Ramadan, 2011, “Mechanics of fluids”, 4th edition

The stability assessment of spar type for floating offshore wind turbine

Minji Kim

Department of Naval architecture and Ocean engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

Stability of floating offshore structures is based on the intact stability regulation called 2008 IS CODE which is a resolution MSC.267(85) presented by the International Maritime Organization(IMO). Each intact stability criterion is shown based on defined vessels, among which offshore structures are also distinguished.

IEC61400-3-2 clause15, a floating offshore wind turbine system design standard established by the International Electrotechnical Commission(IEC), include the floater stability, but refers to the 2008 IS CODE for intact stability assessment criteria, and the damage stability assessment criteria are not indicated.

Based on these, the criteria for the stability assessment and the calculation of stability need to be prepared to suit the floating offshore wind turbine system. In this paper, the stability assessment by current stability regulation was carried out as an example of a 5-MW spar type FOWT model. A comparison of the floating offshore wind turbine systems covered by ABS, DNVGL and BV classification has been made to determine the difference between FOWT's stability assessment rules. In this paper, the stability assessment is redefined applicable to floating offshore wind turbine systems.

First, a variety of cases are defined that may actually occur through the classification of loading conditions, and secondly, the environmental loads are specified that can be applied to the defined loading conditions. Third, the criteria for intact and damage stability are defined for assessing stability through righting moment and overturning moment calculated by loading conditions and environmental loads. Based on the three definitions defined, a 5-MW spar type FOWT model is calculated and results are presented.