

부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 계류선 손상 시 과도 응답 해석

배운혁^{1,*} · 이혜빈²¹제주대학교 해양시스템공학과
²제주대학교 풍력특성화협동과정

Transient Effects of Wind-wave Hybrid Platform in Mooring Line Broken Condition

Yoon Hyeok Bae^{1,*} and Hyebin Lee²¹Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea²Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

요 약

부유식 해양 구조물은 계류선을 이용하여 다양한 종류의 환경하중에 따른 표류를 방지하게 된다. 따라서 구조물의 초기 설계 단계에서 신뢰성 있는 계류선의 설계는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 하지만 다양한 해양의 하중 조건을 견딜 수 있도록 설계된 계류선이라 하더라도 극한 조건의 하중이나 오랜시간 반복된 피로 하중으로 인하여 파손되는 경우가 발생하기도 한다. 일부 계류선의 파손은 잔여 계류선의 장력 변화를 야기하여 경우에 따라서는 전체 구조물의 점진적인 파손을 초래한다. 본 연구에서는 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물에 연결된 12개의 계류선 중 일부가 손실된 경우의 구조물의 과도 응답을 시간 영역의 수치 시뮬레이션을 통하여 해석하였다. 이를 통하여 일부 계류선 손상 시 전체적인 구조물의 거동 변화 및 잔여 계류선의 장력 변화를 확인하였다.

Abstract – Floating offshore structures keep its position by a mooring system against various kind of environmental loadings. For this reason, a reliable design of the mooring system is a key factor for initial design stage of a floating structure. However, there exists possibility of mooring failure, even the system is designed with enough safety margin, due to the unexpected extreme environmental conditions or long-term fatigue loadings. The breaking of one of the mooring lines may change the tension level of the other mooring lines, which can potentially result in a progressive failure of the entire structure. In this study, time domain numerical simulation of 10MW class wind-wave hybrid platform was carried out with partially broken mooring line. Overall platform responses and variations of the mooring line tension were numerically evaluated.

Keywords: Mooring tension(계류선 장력), Transient response(과도 응답), Floating platform(부유식 플랫폼), Broken mooring line(손상 계류선)

1. 서 론

화석 연료의 고갈 및 환경 문제를 해결하기 위하여 신재생 에너지에 대한 관심이 전 세계적으로 증가하고 있으며 이와 관련한 연구개발 또한 활발히 이루어지고 있다. 특히 해상풍력, 파력, 조류, 해수 온도차 등과 같은 해양 신재생 에너지의 핵심 기술 확보를 위해 각국에서는 다양한 연구개발과 실증 실험 등을 진행하고 있다.

최근에는 다양한 해양 신재생 에너지를 복합적으로 활용하여 에너지를 만들어 내는 방법이 제안되고 있다. 덴마크의 Poseidon, 영국의 Wave Treader, 노르웨이의 W2-Power 등이 복합발전 형태로 제시된 해양 구조물이다. 국내에서도 ‘10 MW급 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’에 대한 연구과제가 2013년부터 해양수산부의 지원 하에 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서 수행되고 있다. 이 연구에서 개발된 복합발전 구조물은 설치해역에 12개의 계류선으로 계류되어 있는 대형 구조물이다. 설계 단계에서 다양한 환경 조건에 따른 계류선의 구조 특성을 결정짓고 설계 순환(Design Spiral) 과정을 통하여 충분한 안전율로 계류

*Corresponding author: yh.bae@jeju.ac.kr

본 연구는 2015년 ‘한국해양환경·에너지학회 추계학술대회’ 발표 내용으로 근간을 두고 있음을 밝힙니다.

선은 설계 된다. 하지만 이러한 과정을 거쳐 설계 되고 설치된 계류선이라 하더라도 예상치 못한 구조물의 과도한 운동이나 반복된 하중의 영향으로 계류선의 손상이 발생할 수 있으며, 계류선이 절단되면 구조물에 가해지는 하중의 급격한 변동으로 인하여 과도 응답이 발생하게 된다. 구조물의 과도 응답은 또 다른 잔여 계류선의 급격한 장력 변화를 가져와 경우에 따라 순차적인 파손을 야기하기도 한다. 계류선 손상에 의해 발생하게 되는 부유체의 순간적인 과도 응답과 표류 경로와 같은 연구는 주로 미국의 멕시코만에 설치된 다양한 석유시추 구조물에 대해 이루어져 왔다. TLP 구조물의 텐던(Tendon) 절단에 따른 순간적인 과도 응답이 Yang and Kim[2010]에 의해 수치적으로 확인되었으며, Han *et al.*[2011]은 FPSO의 계류선이 손상된 경우의 과도 응답에 대해 수치적인 방법으로 연구하였다. Zhang *et al.*[2009]는 미국의 멕시코만에 설치된 반잠수식 이동식 시추선 (Mobile Offshore Drilling Unit, MODU)이 허리케인 Ivan의 내습에 의해 계류선이 절단되고 표류하게 되었을 때의 표류 경로를 수치해석적인 방법으로 시뮬레이션 하였다. 국내에서는 Hong *et al.*[2015a]에 의해 터렛 계류된 FPSO의 운동 응답 및 계류선 손상 시 거동 특성에 대해 실험적 연구가 진행되었으며, 역시 Hong *et al.*[2015b]에 의해 대형 반잠수식 구조물의 계류선 손상 시 거동 특성변화에 대해 실험적인 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 12개의 계류선 중 하나가 손상되었을 경우 플랫폼과 다수 풍력발전기의 과도 응답을 시간 영역의 수치 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 플랫폼의 운동방정식 수립을 위하여 먼저 포텐셜 유동 기반의 방사산란 문제 해석 도구인 WAMIT (Wave Analysis at MIT)을 이용하여 주파수 영역에서 플랫폼의 부가질량과 방사감쇠계수, 파랑강제력을 계산하고 이를 시간 영역 운동방정식의 계수 형태로 변환하여 플랫폼과 계류, 다수 풍력발전기의 거동을 수치적으로 해석하였다. 이를 통해 복합발전 구조물의 계류선이 손상되었을 경우 일시적인 플랫폼의 과도 응답과, 계류선의 장력 변화, 상부에 설치된 다수 풍력발전기의 거동 변화를 수치적인 방법으로 해석 할 수 있었다.

2. 부유식 다수 풍력발전기의 운동 해석 방법

본 연구에 이용된 구조물은 Fig. 1와 같이 선박해양플랜트연구소 (KRISO)에서 개발 중인 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물로 사각 형상의 반잠수식 플랫폼의 네 기둥에는 4기의 3 MW의 풍력발전기가 설치되어 있다. 설치 대상 해역은 제주도 서부의 차귀도 근방으로 수심은 80 m로 가정하였고, Fig. 2과 같이 12개의 계류선으로 플랫폼의 표류를 제한하고 있다. 각각의 계류선에는 플랫폼의 위치 복원성을 향상시키기 위하여 수중에서 11,000 kg 하중의 클럼프(Clump)를 일정한 간격으로 3개씩 부착하였고, 동적 거동을 하는 계류선에 작용하는 유체력은 모리슨 방정식(Morison equation)을 이용하여 수치적으로 계산하였다(Morison *et al.*[1950]). 플랫폼 및 계류선의 제원은 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

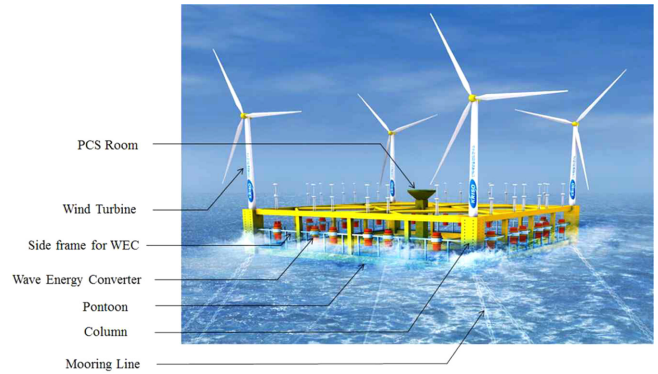


Fig. 1. Conceptual design of 10MW class hybrid power generation platform.

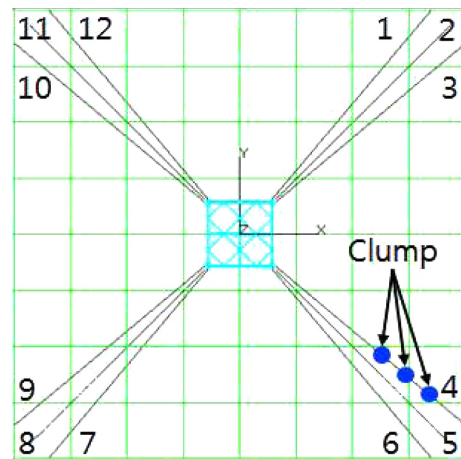


Fig. 2. Mooring line arrangement.

Table 1. Specifications of platform

Item	Unit	Value
Platform displacement	MT	26,848
Column span	m	150
Draft	m	15
Mooring load	MT	353
Center of gravity above keel	m	13.67
Roll radius of gyration about CG	m	58.59
Pitch radius of gyration about CG	m	58.65
Yaw radius of gyration about CG	m	78.44

Table 2. Specifications of mooring system

Item	Unit	Value
Number of mooring lines	ea	12
Depth to anchors below SWL	m	80
Depth to fairleads below SWL	m	13
Mooring line dry mass density	kg/m	322.6
Mooring line wet mass density	kg/m	280.6
Mooring line extensional stiffness	kN	1,300,000
Chain Mooring drag coefficient	-	2.4
Unstretched mooring line length	m	600
Clump mass in water	kg	11,000
Number of clump per line	ea	3

이와 같이 플랫폼-계류-다수 풍력발전기로 이루어진 복합발전 구조물의 운동 응답 해석은 Bae and Kim [2014]에 의해 개발된 수치해석 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 미국의 신재생 에너지 연구소에서 개발하여 배포하는 풍력발전기 해석용 수치 해석 프로그램인 FAST (Jonkman[2007]; Jonkman *et al.*[2004])를 계류-부유체 연성해석 프로그램인 CHARM3D (Kim *et al.*[1999]; Kim *et al.*[2001])와 결합하고 확장하여 개발된 프로그램으로 다수 풍력발전기의 공력하중, 다수 타워 및 블레이드의 탄성력, 개별 풍력발전기의 블레이드 피치 및 발전기 토크 제어, 로터 회전에 의한 관성력을 모두 고려하여 해석할 수 있다. 본 연구에서 사용된 복합발전 구조물의 경우, 개별 풍력발전기는 18개의 자유도를 가지며, 총 4기의 풍력발전기가 탑재되어 있으므로 플랫폼의 6자유도와 합쳐도합 78 자유도의 다물체 동역학 운동방정식을 매 시간 단계마다 구성하여 계산하게 된다.

시간영역 해석을 위한 환경 하중 조건으로 바람은 공간상에 x , y , z 방향의 속도 성분을 가지는 모든 풍황장(Full field) 데이터를 IEC 스펙트럼에 맞추어 생성하여 적용하였고, 허브 높이(Hub height)에서의 평균 풍속은 13 m/s를 이용하였다. 파랑 조건으로 유의파고(H_s) 5.93 m, 피크 주기(T_p) 10.81초, 첨두신장인자(Peak-enhancement factor) 2.2를 적용한 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 이용하여 불규칙 입사파를 생성하였다. 평균 해수면에서 조류(Current)의 속도는 1.75 m/s이고, 수심에 따라 1/7 멱법칙(1/7th Power law)을 이용하여 수면 하부의 조류 속도를 적용하였다. 환경 하중의 방향은 Fig. 2의 좌측에서 우측방향으로 작용하는 것으로 해석하였다. 일반적으로 계류선 설계를 위한 계류 하중을 산출하기 위해서는 대상 해역의 극한환경조건을 적용하여야 하나 논문에서는 정상작동상태로 플랫폼이 거동 중에 다양한 요인으로 인하여 계류선이 절단되었을 경우, 플랫폼의 과도 응답 및 상부 풍력발전기 응답의 변화를 살펴보기 위하여 재현주기 1년의 환경조건을 적용하였다. 해석에 적용된 환경 하중의 조건은 Table 3에 나타내었다.

초기 과도 응답을 감소시키기 위하여 400초까지는 점진적으로 외력을 증가시켰으며, 이후 7,200초 (2시간)동안 주어진 환경 조건에서 해석을 수행하여 전체 시뮬레이션 시간은 7,600초가 되도록 하였다.

플랫폼에 작용하는 파랑 강제력은 선형 포텐셜 이론이 적용된 WAMIT을 이용하여 주파수 영역에서 산출 한 후 이를 시간영역으

로 변환하여 적용하였다. 이번 연구에서는 1차의 선형 파랑 강제력만을 고려하였으며, 플랫폼의 수면 하부 구조물에 작용하는 비선형 점성 항력은 모리슨 방정식을 적용하여 시간영역의 응답 계산에 포함시켰다. 이때 비선형 점성 항력 계산에 포함된 구조물은 풍력발전기 하부의 주 기둥(Column), 폰툰(Pontoon), 수평 및 수직 방향의 브레이스(Brace), 파력 발전기(WEC), 파력 발전기 지지 구조물(WEC guide frame) 등이며, 평균 해수면 상부의 구조물에 작용하는 파에 대해서는 균등 외삽법(Uniform extrapolation)을 이용하여 점성 항력을 계산하였다.

3. 불규칙 파랑 중 계류선 손상에 따른 운동 응답

계류선 손상에 따른 구조물의 과도 응답을 확인하기 위하여 구조물이 불규칙 파랑중에서 운동하고 있을 때 인위적으로 계류선을 절단하였다. 이를 수치적인 방법으로 구현하기 위하여, 절단 시점에 해당 계류선의 최 상부 인장력을 강제로 제거하였다. 계류선의 손상 시점을 결정하기 위하여, 우선 계류선이 손상되지 않은 정상 상태의 거동을 계산하고, 이를 바탕으로 플랫폼의 전후동요(Surge)가 가장 큰 값을 가지는 시점을 계류선 절단 시점으로 결정하였다. 또한 비교를 위하여, 절단 시점을 최대 전후동요 시점보다 10초 전, 20초 전의 2가지를 추가로 설정하여 해석을 수행하였다. 절단 대상으로 선정한 계류선은 Fig. 2에서와 같이 풍상측에 위치하여 일반적으로 가장 큰 장력 응답을 보이는 9번 계류선을 선정하였다.

Fig. 3(a)의 전후동요 응답을 보면, 계류선이 손상되지 않을 경우 최대 변위는 2,713초 시점에서 약 24.93 m였으나, 이 시점에 계류선을 절단하면 초기에 변위가 일시적으로 감소하였다가 이 후 최대 25.77 m의 변위가 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 정상상태의 최대 변위보다 약 3.4% 증가된 값이다. 하지만 계류선을 정상상태의 최대 변위 시점보다 10초 전(2,703초 시점), 20초 전(2,693초 시점)에 절단하게 되면 최대 변위가 각각 26.69 m, 27.22 m에 달하게 된다. 이 최대 변위는 정상 상태의 최대 변위보다 각각 7.1%, 9.2% 증가된 값이며 이 결과를 통해 계류선 손상 시 전후 동요의 최대 변위는 정상상태의 최대 변위가 발생하는 시점보다 조금 빠른 시점에 손상되었을 경우 발생함을 확인할 수 있었다. 플랫폼의 변위가 최대치를 향해 진행되고 있을 때, 즉 최대 변위에 이르기 전에 계류선을 절단하면 플랫폼의 관성력이 계류선 절단 이후에도 작용하므로 최대 변위가 더욱 크게 나타나는 것으로 사료된다. 하지만 계류선 손상 시점을 지속적으로 감소시킨다고 해서 전후 동요의 최대 변위가 계속 증가하는 것은 아니다. 정상상태에서 최대 변위가 발생하는 2,713초보다 30초 전(2,683초 시점), 40초 전(2,673초 시점)에 계류선 손상이 발생하도록 하였을 때 과도 응답에 의한 전후 동요의 최대 변위는 Fig. 4에서와 같이 20초 전(2,693초)에 절단한 경우와 거의 동일하였다.

Figs. 3(b)~3(c)에 나타난 좌우동요(Sway)와 횡동요(Roll)의 경우 절단 시점과는 큰 관계없이 일시적인 과도응답 변위의 크기는 유사하며, 선수동요(Yaw)의 경우 계류선 손상 후 급격한 과도응답의

Table 3. Environmental conditions

Item	Unit	Value
Water depth	m	80
Significant wave height	m	5.93
Peak wave period	sec	10.81
Peak-enhancement factor	-	2.2
Current at sea surface	m/s	1.75
Wind velocity at hub height (67.5 m)	m/s	13
Turbulence model	-	Kaimal
Turbulence type	-	NTM

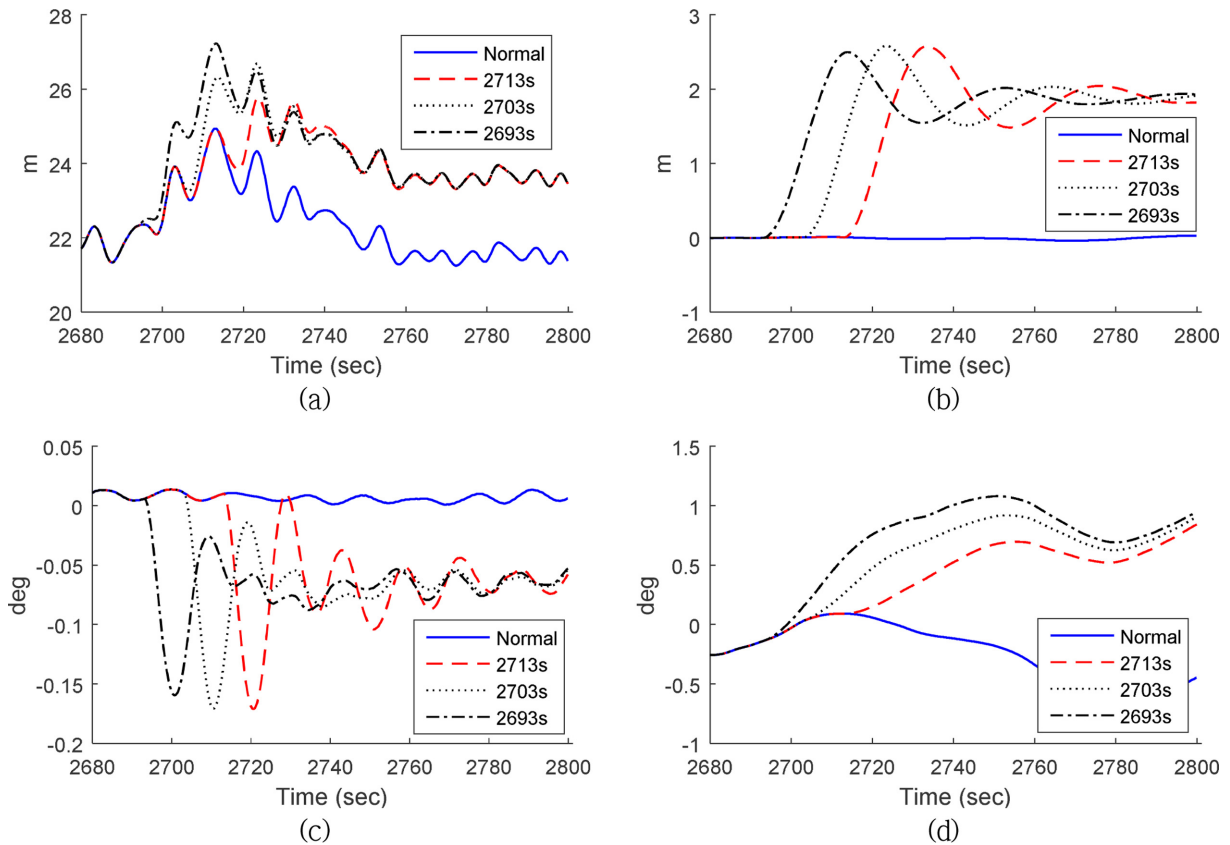


Fig. 3. Platform (a) Surge, (b) Sway, (c) Roll and (d) Yaw after one mooring line loss (0 deg).

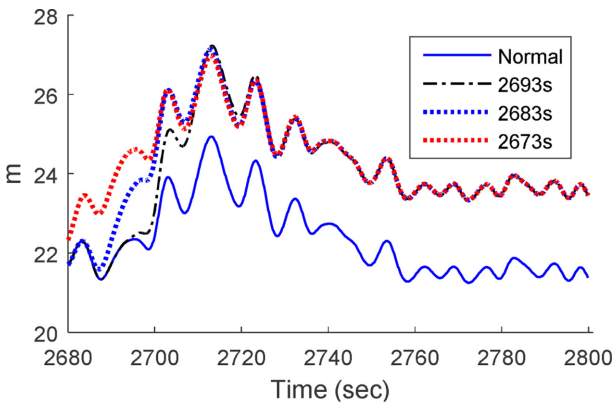


Fig. 4. Platform surge with different broken time.

양상은 보이지 않으나 절단 시점에 따라 운동의 양상이 다소 다르게 나타나고, 다른 운동과 비교하여 평형상태에 이르는 시간이 더 소요됨을 알 수 있다.

환경외력의 입사각이 22.5 deg일 때의 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 전후동요의 경우 전체적인 과도응답의 양상은 입사각이 0 deg일 때와 유사하고, 최대 변위의 증가율 또한 2,713초, 2,703초, 2,693초 일때 각각 4.0%, 7.2%, 9.8%로 0 deg일 때와 거의 유사함을 확인할 수 있다. 횡동요의 경우 입사각이 22.5 deg인 경우 계류선 손상에 따른 과도응답의 양상이 0 deg인 경우와 비교하여 현저히 적

게 나타나는데 이는 입사각의 영향으로 초기부터 지속적인 횡동요 운동이 존재하였기 때문이다.

계류선 손상 시 인접한 타 계류선의 최 상부 장력의 과도 응답도 확인하였다. 9번 계류선이 절단 된 경우, Figs. 6~7에서와 같이 동일한 기둥에 위치한 7번과 8번 계류선의 장력이 가장 크게 증가하며 동적 평형상태에 이르기 전까지 나타나는 과도 응답에 의한 장력 증가도 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 2,680초 부터 2,800초 사이의 정상상태의 최대장력과 계류선 손상상태의 최대장력의 비를 Table 4에 나타내었다. 환경외력의 입사각이 0 deg인 경우, 9번 계류선의 손실로 인하여 인접한 7번 계류선은 절단 시점에 따라 최대 장력이 62~91% 까지 증가하는 것으로 확인되었고, 8번 계류선은 64~98% 까지 증가하였다. 반면 다른 기둥에 위치한 10번 및 11번 계류선의 최대 장력은 4% 내외로 증가하여 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 초기 과도 응답에 의한 급격한 장력의 변화 이후 힘의 평형 상태에 도달하게 되었을 때 손상된 계류선과 같은 기둥에 위치한 7, 8번 계류선의 장력 증가가 인접한 10, 11번 계류선의 장력 증가보다 상대적으로 크게 나타나며, 이는 9번 계류선이 상실한 장력의 대부분이 7번과 8번 계류선으로 분배되었음을 의미한다. 평형상태에서의 장력 증가는 7번 계류선이 약 58%, 8번 계류선이 66%로 더욱 가까이 위치한 8번 계류선의 평균 장력 증가분이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 10번과 11번 계류선의 평균 장력은 정상 상태보다 각각 약 5%, 2% 증가하였다.

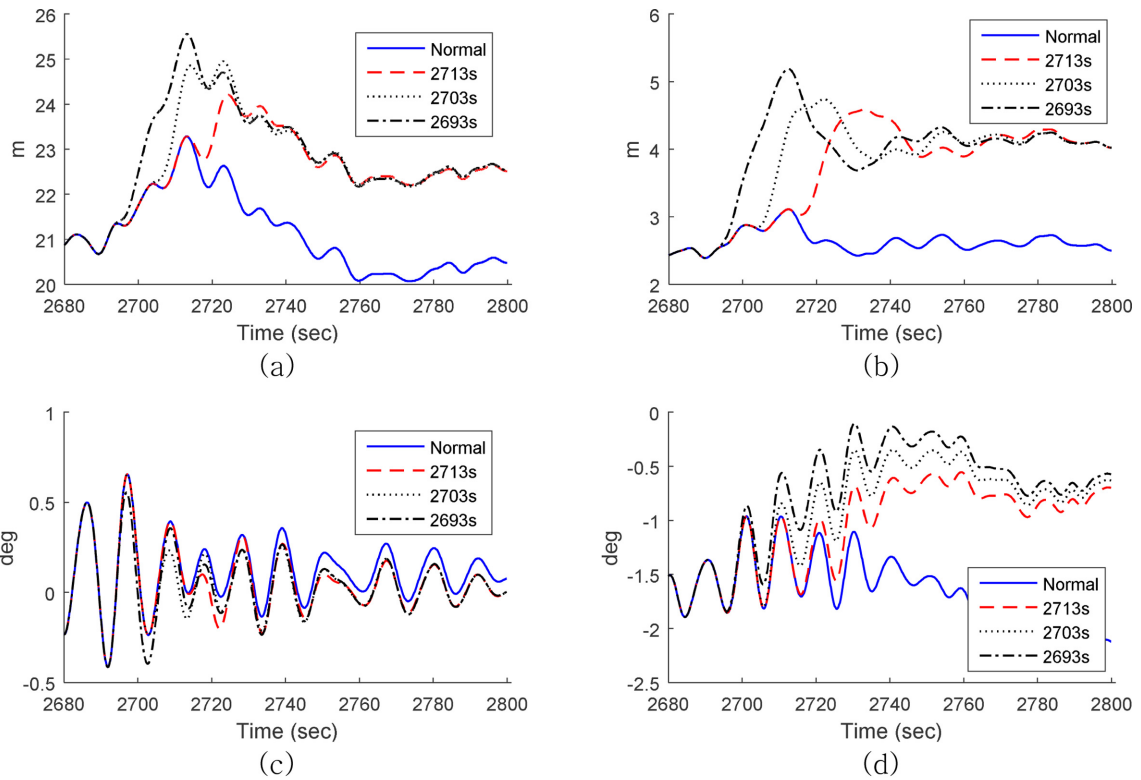


Fig. 5. Platform (a) Surge, (b) Sway, (c) Roll and (d) Yaw after one mooring line loss (22.5 deg).

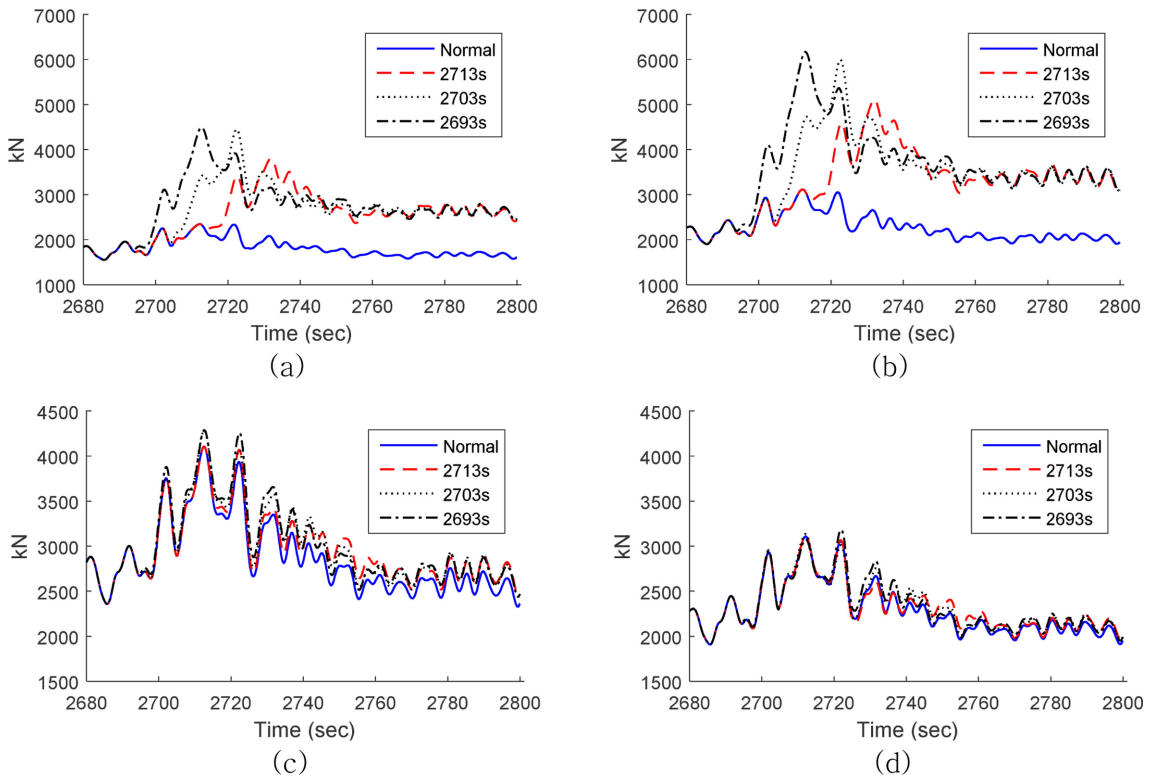


Fig. 6. Mooring line top tension of (a) line #7, (b) line #8, (c) line #10 and (d) line #11 (0 deg).

입사각이 22.5 deg인 경우, 플랫폼 운동 변위의 과도 응답 양상에서 확인한 바와 같이 환경외력과 접한 7, 8번 계류선의 최상부의

장력은 입사각 0 deg와 비교하여 크게 나타난다. 하지만 10번, 11번 계류선의 경우 장력의 크기는 입사각 0 deg인 경우 보다 작은

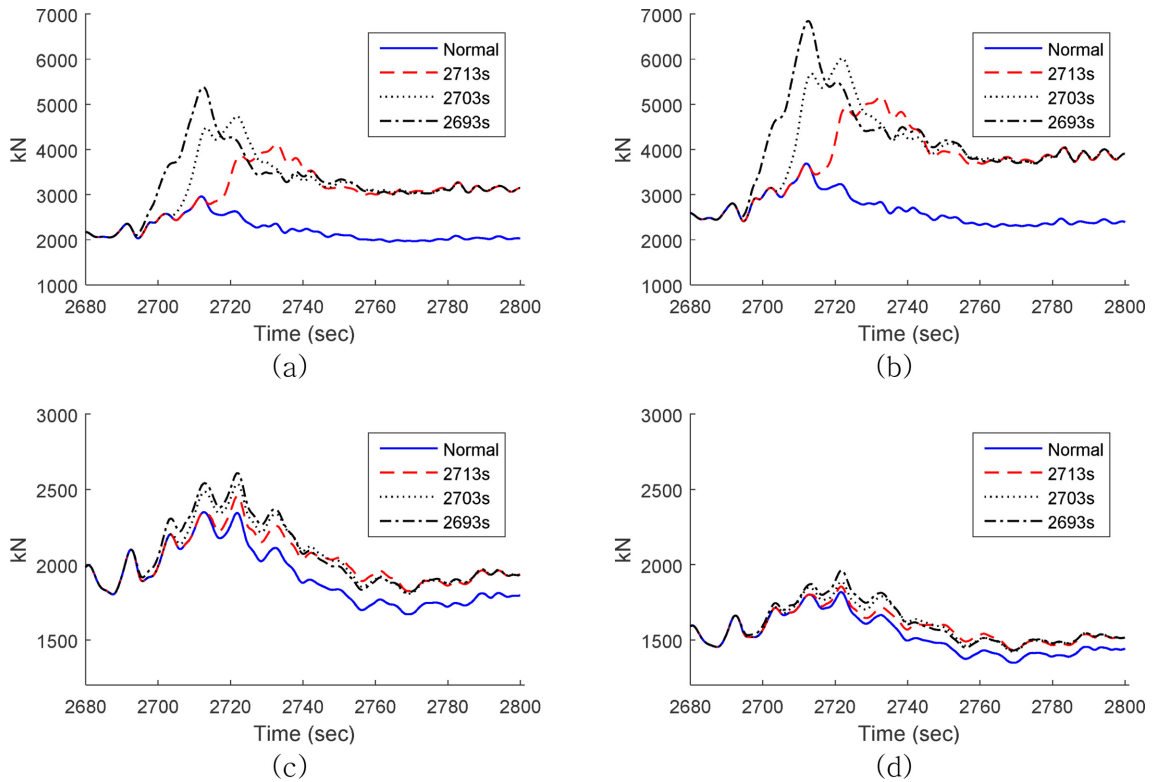


Fig. 7. Mooring line top tension of (a) line #7, (b) line #8, (c) line #10 and (d) line #11 (22.5 deg).

Table 4. Maximum top tensions and ratio (0 deg)

Line	Normal		2,713 sec		2,703 sec		2,693 sec	
	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio
#7 (kN)	2346.33	1.00	3796.76	1.62	4445.50	1.89	4489.05	1.91
#8 (kN)	3115.79	1.00	5104.81	1.64	5990.65	1.92	6166.05	1.98
#10 (kN)	4104.58	1.00	4104.58	1.00	4283.88	1.04	4287.78	1.04
#11 (kN)	3107.08	1.00	3107.08	1.00	3134.22	1.01	3183.24	1.02

값을 나타낸다. 계류선 손상에 따른 일시적인 최대 장력의 값과 정상상태에서의 최대 장력간의 비율을 Table 5에 나타내었으며, 절단 시점에 따라 최대 장력의 증가 양상이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 일시적인 과도 응답이 지나고 평형 상태가 되면 9번 계류선의 장력 손실분이 인접한 계류선에 분배되는데 7번 계류선의 평균 장력이 약 54% 증가하였고, 8번 계류선의 장력은 약 62% 증가하였음을 확인하였다. 0 deg의 환경외력의 경우와 비교하여, 절대적인 장력의 최대 수치는 22.5 deg의 경우가 크게 나타나지만 최대 장력의 증가 비율은 상대적으로 감소하였음을 확인할 수 있었

다. 다른 기둥에 위치한 10번 계류선의 경우 평균 장력이 약 9% 증가하였으며, 11번 계류선의 평균 장력은 약 6% 증가하였다. 7번 및 8번 계류선의 경우에는 반대로 0 deg 조건과 비교하여 최대 장력의 증가 비율은 다소 증가하였으며 이를 통하여 환경외력의 방향이 변경되면 계류선 손상 후 평형상태에서의 장력 변화율도 계류선의 위치에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

계류선 손상으로 인한 플랫폼의 과도 응답이 상부의 풍력발전기에 미치는 영향을 확인하기 위하여 손상된 계류선과 같은 기둥에 부착된 풍력발전기의 출력 파워, 로터의 회전 속도, 타워 하부의 전

Table 5. Maximum top tensions and ratio (22.5 deg)

Line	Normal		2,713 sec		2,703 sec		2,693 sec	
	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio	Maximum	Ratio
#7 (kN)	2960.23	1.00	4119.03	1.39	4735.19	1.60	5377.19	1.82
#8 (kN)	3689.37	1.00	5169.29	1.40	6016.57	1.63	6843.92	1.86
#10 (kN)	2348.52	1.00	2455.50	1.05	2535.67	1.08	2608.39	1.11
#11 (kN)	1817.45	1.00	1854.11	1.02	1887.10	1.04	1961.33	1.08

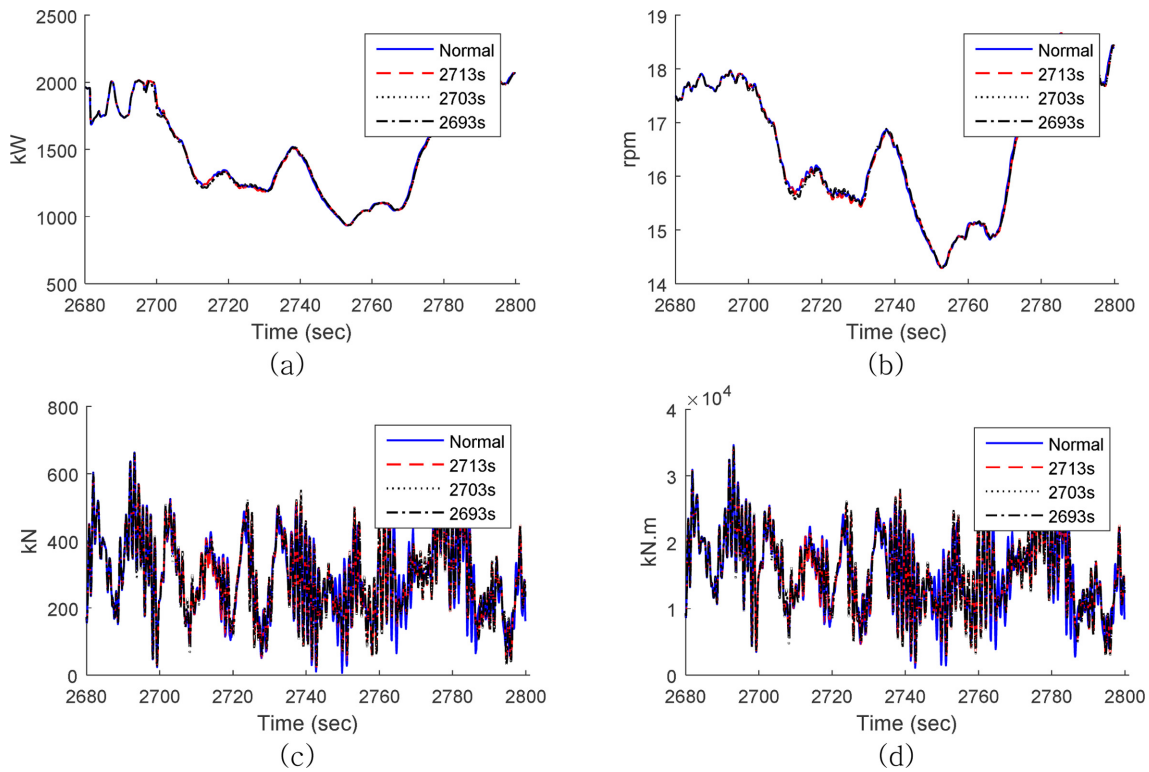


Fig. 8. (a) Generated power, (b) Rotor speed, (c) Tower base fore-aft shear force and (d) Tower base fore-aft bending moment (0 deg).

후 방향 전단 응력, 그리고 전후 방향 굽힘 모멘트를 조사하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 풍력발전기의 다양한 응답은 계류선 손상 후에도 큰 차이를 보이지 않았는데, 2,680초 시점에서 2,800초 시점까지의 통계 분석을 수행한 결과, 계류선 손상 후 각 응답의 최대값의 변화는 0.05% 이내이며, 표준편차 변화는 1% 이내로 확인되었다. 이는 계류선 손상에 따른 플랫폼의 과도 응답으로 발생하는 저주파수 대역의 가진력이 풍력발전기가 반응하는 고주파 대역과는 차이가 있기 때문이며 플랫폼의 과도 응답은 상부 풍력발전기의 과도 응답을 유발하지 않은 것으로 파악할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물에 연결된 12개의 계류선 중 일부가 손상되었을 경우, 구조물의 과도 응답을 수치적인 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 상부에 설치된 4개의 풍력 발전기의 동적 거동, 타워 및 블레이드의 탄성력, 날개 피치 제어 및 발전기 토크 제어, 플랫폼에 작용하는 유체력, 계류선의 동역학이 모두 고려된 시간영역의 운동응답을 구하기 위하여 FAST와 CHARM3D를 연성하여 운동 해석을 수행하였으며, 계류선이 손상되지 않은 정상상태의 운동 응답과 특정 시점에 계류선을 절단하였을 때 변화되는 거동을 비교하였다. 절단되는 계류선은 풍상측에 위치한 계류선을 선택하였고, 절단 시점은 정상상태에서 최대의 전후동요 변위가 발생하는 시점과, 이 시점보다 10초, 20초 빠른 시점을 선택하여 해석을 수행하였다.

본 연구를 통해 계류선 손상에 따른 구조물의 과도 응답은 계류선이 손상되는 시점에 따라 차이가 나며, 정상상태에서 최대 전후동요 변위가 발생하는 시점보다 조금 빠른 시점에 계류선이 손상되었을 때 과도응답의 크기가 크게 나타남을 확인하였다. 과도 응답에 따른 전후동요 변위의 최대값은 환경외력의 입사각에 따라 약간의 차이가 있으나 대략 3.4~9.8% 증가하는 경향을 나타내었다. 계류선 손상에 따른 인접 계류선의 장력 변화도 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 손상된 계류선과 같은 기둥에 연결되어 있는 계류선의 장력증가가 현저히 크게 나타났으며, 계류선의 절단 시점에 따라 최대 장력이 98%까지 증가될 수도 있음을 확인하였다. 반면, 손상된 계류선과 다른 기둥에 연결된 계류선의 최대 장력 증가는 11%이내로 상대적으로 작게 나타났다. 환경외력의 입사각은 본 구조물이 설치될 해역의 환경 조건에 따라 0 deg와 22.5 deg에 대해 각각 해석을 수행하였고, 12개 계류선의 배치와 환경외력 입사각에 따라 과도 응답에 따른 최대 장력과 이후 평형상태에서의 평균 장력의 경향은 약간의 차이를 보였다. 본 연구에 사용된 수치 시뮬레이션 도구는 구조물의 응답과 계류선 장력의 변화 뿐만 아니라 상부에 설치된 풍력발전기의 거동 특성도 함께 산출할 수 있다. 해석 결과에 따르면 계류선의 손상 시 발생하는 구조물의 과도 응답이 풍력발전기의 전력 생산 및, 타워 하부에 작용하는 전단 또는 굽힘 응력 변화에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 이는 플랫폼의 과도 응답 주파수 대역이 풍력발전기가 반응하는 다양한 고주파 대역과는 상당히 차이가 있기 때문인 것으로 파악된다. 추후 계류선 손상에 따른 구조물의 거동 변화 특성 및 계류설계의 신뢰

성을 더욱 상세하게 파악하기 위하여 극한환경 조건에서의 해석 수행이 필요하며, 이때 주요 선급기준에 따른 안전을 검토도 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Bae, Y.H. and Kim, M.H., 2014, "Coupled dynamic analysis of multiple wind turbines on a large single floater", *J. Ocean Eng.*, Vol. 92, 175-187.
- [2] Han, J.S., Son, Y.J., Choi, H.S. and Rho, J.B., 2011, "The Transient Behavior of Mooring Systems in Line-Broken Condition", *Proc. 21st ISOPE*, Maui, USA.
- [3] Hong, J.P., Cho, S.K., Seo, J.H., Sung, H.G., Lee, D.Y., Park, I.B., Won, Y.U., Choi, S.K. and Kim, D.W., 2015a, "Experimental Study of Effect of Mooring Line Failure on Behavior of Turret-moored FPSO Ship", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 29, No. 3, 231-240.
- [4] Hong, J.P., Kim, K.H., Park, I.B., Park, S.W. and Hong, K., 2015b, "An Experimental Study of the Dynamic Behavior during Mooring Line failure for Large Semi-Submersible Platform", *Proc. KSOE Conf.*
- [5] Jonkman, J.M. and Buhl Jr, M.L., 2004, "FAST user's guide", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- [6] Jonkman, J.M., 2007, "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- [7] Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S. and Beynet, P., 1999, "Hull/mooring coupled dynamic analysis of a truss spar in time domain", *Proc. 9th ISOPE*, Brest, France.
- [8] Kim, M.H., Tahar, A. and Kim, Y.B., 2001, "Variability of TLP motion analysis against various design methodologies/parameters", *Proc. 11th ISOPE*, Stavanger, Norway.
- [9] Lee, C. and Newman, J., 1999, "WAMIT User Manual", Dept. of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [10] Morison, J.R., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A., 1950, "The force exerted by surface waves on piles", *J. Petro. Technol.*, Vol. 2, No. 5, 149-154.
- [11] Yang, C.K. and Kim, M.H., 2010, "Transient effects of tendon disconnection of a TLP by hull-tendon-riser coupled dynamic analysis", *J. Ocean Eng.*, Vol. 37, No. 8-9, 667-677.
- [12] Zhang, Z., Kim, M.H. and Ward, E.G., 2009, "Progressive Mooring-Line Failure of a Deepwater MODU in Hurricane Conditions", *Proc. OMAE2009*, Honolulu, USA.

Received 21 January 2016

Revised 11 March 2016

Accepted 22 March 2016