

해상풍력 삼각지주형 하부구조물의 충격손상방지용 고무펜더의 두께결정 방법 이 강 수†

(원고접수일 : 2012년 2월 28일, 원고수정일: 2012년 4월 18일, 심사완료일 : 2012년 5월 8일)

Method for Determining Thickness of Rubber Fenders of a Tripod Type Offshore Wind Turbine Substructure

Kang-Su Lee†

요 약 : 본 연구의 목적은 바지선에 의해 발생하는 해상풍력발전기의 충격손상을 최소화 시키기 위한 것이다. 충격해석은 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS LS-Dyna를 통하여 분석하였다. 바지선속을 변화시켜 다양한 상태의 하중케이스를 고려하였고 충격방지고무의 비선형성을 고려한 시간이력해석을 수행하였으며 변형률 에너지, 전체 변형률, 플라스틱 변형률, 내부충격에너지, 영구손상된 변형률 등을 검토하였다. 충격속도에 변화에 따른 영구변형을 확인한 후 자연고무, 복합고무, 네오프렌 등의 고무시험 물성치로부터 구한 Mooney-Rivlin 상수를 적용하여 적절한 충격방지고무의 두께를 제안하였다. 본 연구를 통하여 구조물의 두께와 충격방지고무의 두께비에 대한 경향을 파악할 수 있으며 구조물의 설계에 적용할 수 있다.

주제어 : 해상풍력, Tripod, 하부구조물, 충격해석, 보호장치, 변형률, 내부에너지, 고무

Abstract: The main object of this research is to minimize the shock effects which frequently result in fatal damage in offshore wind turbine on impact of barge. The collision between offshore wind turbine and barge is generally a complex problem and it is often impractical to perform rigorous finite element analyses to include all effects and sequences during the collision. On applying the impact force of a barge to the offshore wind turbine, the maximum acceleration, internal energy, and plastic strain are calculated for each load case using the finite element method. A parametric study is conducted with the experimental data in terms of the velocity of barge, thickness of the offshore wind turbine, and thickness and Mooney-Rivlin coefficient of the rubber fender. Through the analysis proposed in this study, it is possible to determine the proper size and material properties of the rubber fender and the optimal moving conditions of barge.

Key words: Offshore wind turbine, Tripod, substructure, Impact analysis, Protection equipment, Strain, Internal energy, Rubber

1. 서 론

해양구조물에 선박과의 충돌은 가장 위험한 요소 중의 하나이다. 해상풍력터빈 구조물은 해상의 기상조건을 고려함과 동시에 이러한 선박의 충돌에 대한 방지대책을 강구하여야 한다. 지난 10년간 들어 우리나라 해상에서 발생한 선박사고로 1300

여명이 사망하거나 실종됐으며 850여척의 선박이 침몰한 것으로 나타났다. 사고원인으로 선박충돌이 5%미만으로 많은 부분을 차지하고 있는 것은 아니지만 사고가 발생할 경우 많은 인명피해와 재산피해를 발생시킬 수 있다. 선박과 이러한 해양구조물의 충돌문제는 간단한 문제가 아니다. 일반적으로 선

† 교신저자(사단법인 한국선급 녹색산업기술원, E-mail:kslee@krs.co.kr, Tel: 042-869-9508)

박과 해양구조물의 충돌문제는 충돌 시 매우 짧은 시간동안 대변형 및 소성변형이 발생하게 되어 해석 상 매우 복잡한 문제로 취급되며 시간변화에 따른 비선형성을 고려한 비선형 동적 문제로 해석되어야 한다.

본 논문에서는 해상에 설치한 풍력발전기의 충격 방지 대책을 강구하기 위한 기초 연구로 수행되었다. 소성변형과 같은 비선형성이 큰 문제는 구조물의 영구변형 문제로 고려될 수 있다. 과거에는 해양구조물의 복잡한 충격거동을 이상화하여 등가해석법[1]을 사용하여 왔다. Gjerde(1999)는 jack-up boat의 충격해석 방법과 그 평가에 관하여 연구를 수행하였다. 우선 충격하중은 충격하는 vessel의 크기와 부가수질량, 충돌속도의 3가지 항목이 가장 영향이 클 것으로 가정하여 충격하중을 계산을 수행하였고 해석방법은 소성변형율을 구하는 방법을 고안하였다. 이 연구는 범요소를 갖는 트러스구조에 국한되어 있어 두께를 고려할 수 있도록 적용이 필요하다고 판단되어 쉘요소를 적용하고자 하였다. Kitamura는 선박-선박 충돌, 선박-암초 좌초에 관한 비선형 동적 유한요소 시뮬레이션을 연구하였다[2]. 단순화된 접근법과 상세화된 접근법의 두 가지 형태의 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 연구와는 달리 접촉력(contact force)를 중요 인자로 고려하였고 변형량이 접촉력과 직접적인 연관성이 있고 침투과피에 영향을 줄 수 있다는 것을 결론으로 도출하였다. Woisin(1988)은 선박-선박 충돌해석과 운동에너지의 손실에 관한 연구를 수행하였다[3]. 모델 테스트를 통해 선박이 충돌하여 손상을 발생시킬 수 있는 충돌속도에 주목하고 선박마다 충돌손상을 발생시키는 특정속도를 표준화 하고자 하였다. 또한, 에너지손실을 평가하여 손실된 에너지양과 변형된 양의 상관관계를 규명하였다. Wei-liang은 대형 선박이 자켓형 해양구조물에 충돌 시 구조물의 동적거동 정확히 모사하기 위한 연구를 수행하였다[4]. 결과 검증방법으로 응력을 주 평가 항목으로 하였고 운동에너지를 충격하는 구조물의 부위별로 흡수하는 양을 비교하여 향후 자켓형 해양구조물 설계 시 충격력을 고려한 구조설계의 초안을 마련하였다. 그러나, 시간영역에서의 구조물의 변

위응답과 응력응답은 선형을 넘어갈 경우 정확성이 떨어지게 되어 소성변형률을 기준으로 평가하는 게 좀 더 합리적이라 판단된다. 이강수(2012)는 선박과 해상풍속측정용 마스트 구조물과의 충돌과 구조물 손상방지방법에 관하여 연구하였다[5-7]. 마스트 구조물은 다른 해양구조물에 비하여 매우 세장비가 큰 장대구조물로서 충격 시 진동문제를 일으킬 수 있으므로 동적 변위응답을 고찰하였고 충격응답을 저감시킬 수 있는 장치를 고안하였다.

김형열은 충격하중을 받는 상태에서의 euler 탄성기둥의 동적좌굴 해석을 통하여 충격력이 동하중으로 작용할 때의 좌굴상태를 표현함에 있어 해석적으로 접근하였고[8], Gjerde는 보트의 충격강도 평가 방법에 관해 고찰하였다[9]. Dimitris(1999)와 Jin(2005)은 유한요소법을 통한 대형 선박과 해양구조물과의 손상평가법에 관한 연구를 수행하였다[10-11]. Bi되(2005)은 해상풍력터빈의 충격안전성에 관한 해석을 수행하였으나 보강 또는 충격완화에 관한 연구를 수행하지는 못하였다[12].

본 연구에서는 기존 연구에서 수행하지 못하였던 해상풍력터빈의 하부구조물에 관한 충격응답과 손상, 고무시험을 통해 구해진 고무의 강성과 손상과의 관계 등을 고찰하여 보다 정확한 동적시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였다. 기존에 수행되었던 해상풍력터빈 연구는 블레이드 모델을 단순히 질량요소로만 구현하였으나 본 연구에서는 보다 정확성을 높이기 위하여 로터블레이드도 모델링에 포함하였고 등가모델을 적용하였다[13]. 등가모델은 본래의 형상을 그대로 적용한 full 모델과 결과를 비교하여 적용 타당함을 검증하였다. 기존 연구는 내부 운동에너지에 의한 손상평가가 이루어지지 않았으나 본 연구에서는 내부 운동에너지에 따라 충격받는 구조물의 손상정도가 달라짐을 확인하였다. 최종적으로 바지선에 의해 발생하는 해상풍력발전기의 충격손상을 분석하고 손상을 최소화시키기 위하여 최고고무의 종류를 선정하고 충격을 받는 구조물과의 상대적인 고무펜더의 최소두께비를 제안하고자 한다.

2. 해석모델 및 모델링 조건

2.1 일반사항

구조물의 충격시 효과적인 거동을 구현하기 위해서는 보다 비선형성을 정확히 구현해야 한다. 최근 유한요소해석을 통하여 이러한 충격해석에 접근하는 사례가 늘고 있고 실제 해석시간에 투자해야 하는 경우가 대부분이며 복잡하고 큰 문제가 된다.

2.2 형상 및 해석모델링

해상풍력터빈의 기하학적 개략의 형상은 Figure 1과 같으며 유한요소모델은 ANSYS LS-Dyna 11.0을 통하여 생성하였다. 상부는 블레이드 등가빔 이론을 모델에 적용하였고 하부구조물의 형태는 Tripod 형태로 구성되어 있으며 Table 1에서 상세 제원을 보여주고 있다. Table 2는 해석모델에 대한 유한요소 정보를 보여주고 있다.

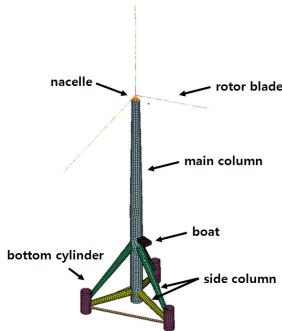


Figure 1: Finite element model of tripod substructure

Table 1: Specification of tripod substructure

Nacelle Weight [ton]		200
Blade Length [m]		84
Hub Height [m]		120
Sub-structure	Main Column [m]	6(Φ)×0.80(t)
	Side Column [m]	5(Φ)×0.53(t)
		4(Φ)×0.42(t)
	Bottom Cylinder [m]	2.5(Φ)×0.15(t)

Table 2: Information of FE model

Number of Nodes	6,561
Number of Elements	6,303
Element Types	BEAM 161
	LINK 160
	SHELL 163
	SOLID 164

2.3 블레이드 등가빔

블레이드의 형상은 등가빔 이론을 적용하여 유한요소모델에 반영하였다. 충격 시 풍력발전기의 동적거동을 보다 완벽하게 모사하기 위하여 블레이드의 무게와 강성을 등가모델을 사용하였고 등가모델은 3MW급 블레이드모델을 기준으로 3D 셀 모델과 비교하여 오차범위 3%미만을 유지함을 확인하였다. Figure 2는 본 논문에서 적용한 블레이드 구조설계 과정을 보여주고 있다.

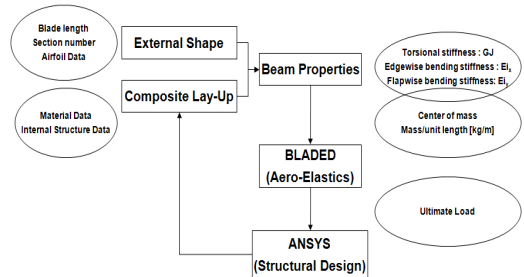


Figure 2: Procedure of blade structural design

블레이드 등가구조모델링은 등가강성모델링과 등가질량 모델링으로 나뉘어 진다. 블레이드의 굽힘 및 비틀림 강성특성, 질량이 고려되지 않는 탄성정보소를 사용하는 등가강성 모델링과 box와 질량관성이 고려된 집중질량요소를 적용한 등가질량 모델링이 있다. Figure 3은 등가모델을 적용하기 위한 블레이드의 좌표계를 보여주고 있다. 등가강성 모델링에서는 2개의 Translational, 1개의 Rotational의 Flapwise, Torsional, Edgewise 등의 총 3개의 자유도를 고려하였다. 각각 식 (1) ~ (3)을 적용하였고, 식 (4) ~ (6)은 등가질량 모델링에 적용된 식을 보여주고 있다.

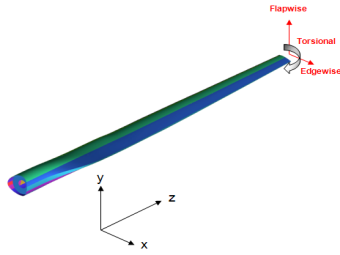


Figure 3: Coordinate system of rotor blade

$$EI_x = \frac{M}{d\theta/dz} \tag{1}$$

$$EI_y = \frac{M}{d\theta/dz} \tag{2}$$

$$GJ = \frac{M}{d\Phi/dz} \tag{3}$$

$$EI_x^i = \frac{M_x(L_i)^2}{2\delta_y^i} \tag{4}$$

$$EI_y^i = \frac{M_y(L_i)^2}{2\delta_x^i} \tag{5}$$

$$GJ^i = \frac{TL_i}{\Phi_z^i} \tag{6}$$

3. 해석방법

3.1 재료물성치

해상풍력터빈의 기계적 재료물성치는 Table 3과 같다.

Table 3: Material property of tripod substructure

Elastic Modulus	207x10 ⁹ [MPa]
Poisson's Ratio	0.34
Density	7,850 [Kg/m ³]
Tangent Modulus	13.8x10 ⁹ [MPa]
Yield Stress	355 [MPa]
Failure Strain	0.45

고무 fender와 같은 초탄성재료의 본래의 거동은 보통 변형을 에너지 포텐셜로부터 유추할 수 있다. 또한 초탄성 재료는 일반적으로 매우 작은 압축성을 갖는다. 이는 종종 비압축성으로 간주하기도 한

다. 초탄성 재료 모델은 재료의 응답이 등온성으로 가정한다. 이 가정은 변형을 에너지 포텐셜이 불변항 또는 주스트레치비의 항으로 표현될 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 순수한 비 압축성이라는 의미를 내포하게 된다. 열팽창계수는 항상 등방성이며 총 변형률이 200퍼센트를 넘는다는 것이다. 본 연구에서는 고무의 거동을 표현해 주는 Mooney-Rivlin 상수 값 2개를 사용하여 응력-변형을 곡선을 fitting하였으며 자연고무, 복합고무, 네오프렌 등의 세 가지 종류의 고무에 대하여 실시하였다. 각각의 고무에 관한 Mooney-Rivlin 상수 값은 Table 4와 같다.

Table 4: Mooney-Rivlin coefficient of rubber Fenders

Mooney-Rivlin Coefficient	NR	CR	Neoprene
C01	-0.076	0.256	226.01
C10	0.675	0.396	13,079

3.2 하중 및 경계조건

해상풍력터빈 구조물 해저 바닥면의 지반조건을 고려하지 않고 고정경계조건이 적용되었다. 바지선의 자유도는 wave에 대한 영향을 무시하고 강제운동을 방지하기 위하여 수직방향으로 고정하였다. 충돌속도 0.5m/s에 대응되는 충격하중은 약 268.33kN으로 Table 5와 같다.

Table 5: Load calculation of collision force

Collision Velocity	= 0.5 [m/s]
Collision Force(Ps)	= 1.2 x 10 ⁵ Vx√DWT = 1.2 x 10 ⁵ x0.5√20 = 268.33kN (AASHTO LRFD 2004)

상부 lattice와 하부 monopole의 경계부위에는 하중과 모멘트를 전달할 수 있도록 강제영역을 설정하였다. 바지선과 해상풍력터빈 구조물 사이의 접촉조건은 단일 면대면 접촉조건으로 구현하였으며 이는 접촉영역 설정 조건 중 가장 간단하고 쉬운

방법 중 하나이다. ANSYS LS-Dyna는 자동으로 이를 구현해 주게 된다.

3.3 충돌 시나리오

고무 fender가 적용되지 않은 상태의 충격해석과 고무 fender를 적용하고 고무 종류에 따른 충격해석을 나누어 실시하였다. Figure 4는 충돌해석에 대한 해석모델을 보여주고 있으며 총 30개의 load case에 대한 해석을 수행하였다. Table 6은 선속에 따른 해석시나리오를 보여주고 있다.

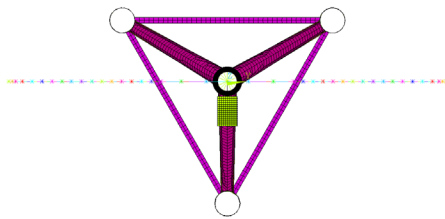


Figure 4: Modeling of impact between substructure and barge vessel

Table 6: Analysis scenario due to barge velocity

Parameter	Analysis Cases
Velocity	1, 1.5, 2.0 [m/s]
Rubber Fender Thickness	0, 500, 1000, 1500, [mm]
Substructure Thickness (Impact Region)	53 [mm]

4. 동적응답해석

4.1 충격해석

해상풍력터빈 구조물의 변위, 영구변형량, 응력, 내부에너지의 크기 등에 관하여 결과를 분석하고자 하였다. 바지선의 충돌속도는 1.0m/s, 1.5m/s, 2.0m/s 까지 변화시켜 계산을 수행하였다. Figure 5는 해상풍력터빈 구조물 손상영역의 소성변형률 분포를 보여주고 있고 Table 7은 각각의 속도에 대한 충돌해석 결과를 보여주고 있다. 충격 시 영구 변형이 발생하는 위치는 조인트 부위이고 거동의 경향은 선속별로 매우 유사함을 알 수 있었다.

Table 7: Result of Collision Analysis

V [m/s]	Dent Depth [mm]	Max. Plastic Strain	Internal Energy [J]
1	x: 13 y: 0.06 z: 0.06	0.0005	2.11×10^6
1.5	x: 18 y: 0.09 z: 0.09	0.0038	4.74×10^6
2	x: 22 y: 0.13 z: 0.12	0.0078	8.40×10^6

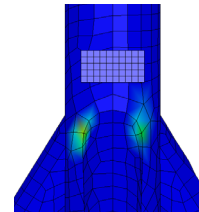


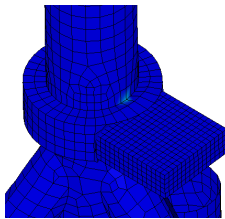
Figure 5: Plastic strain distribution at the impact region

4.2 충격방지해석

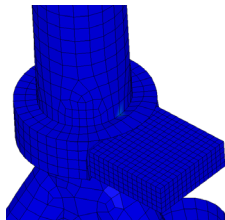
NR, CR, 네오프렌 고무에 대한 충격방지해석을 실시하였고 그 결과는 Table 8에서 보여주고 있다. 각각의 고무 종류와 두께에 따라 소성변형이 발생했는지를 확인하였다. 바지선속 1.0m/s의 경우와 고무 fender의 두께 1000mm이상 부터 1.5m/s의 경우 고무 fender의 두께 1500mm부터 영구변형이 발생하지 않았으나 2.0m/s 이상의 경우에는 영구변형이 발생하였고 NR과 CR고무의 경우 고무가 찢어지는 거동을 확인할 수 있었다. 또한 최소 1500mm 이상의 고무 fender의 두께를 유지하여야 한다. 내부 에너지, 소성변형률, 등가응력 분포 등을 해상풍력터빈 구조물의 위치별로 비교하였다. 네오프렌 고무의 경우 2.0m/s의 선속에서 NR, CR고무의 1500mm이상과는 달리 1000mm의 두께로도 손상을 방지할 수 있음을 알 수 있었고 고무 역시 손상 없이 완전히 탄성복원함을 확인할 수 있었다. CR과 NR의 경우 손상영역은 고무 fender가 없을 경우 조인트 부위에서 발생했지만 fender를 적용하였을 경

Table 8: Result of collision analysis with rubber fender

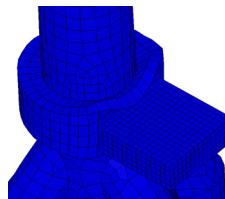
V [m/s]	Thickn ess [mm]	Plastic Strain Occurrence Check		
		CR	NR	Neo -prene
1.0	500	Yes	Yes	No
	1000	No	No	No
	1500	No	No	No
1.5	500	Yes	Yes	Yes
	1000	Yes	Yes	Yes
	1500	No	No	No
2.0	500	Yes	Yes	Yes
	1000	Yes	Yes	Yes
	1500	Yes	Yes	No



(a) NR(V=2.0m/s, Thickness 1500[mm])



(a) CR(V=2.0m/s, Thickness 1500[mm])



(a) Neoprene(V=2.0m/s, Thickness 1500[mm])

Figure 6: Plastic strain distribution at each rubber fenders(NR, CR, NPR)

우 실제 충격하는 부위에서 발생하는 것으로 나타났다. 해석결과는 DnV와 AASHTO규격을 통해 구해진 충돌하중과 비교하여 동일한 하중값을 얻게 되었고 향후 보다 정확한 충격시험을 다수 수행하여 통계적으로 해석결과의 신뢰성을 높여야 할 것으로 판단된다.

Figure 6은 바지선속 2.0 m/s, 두께 1500mm일 때의 충돌영역에서의 등가응력 분포를 보여주고 있다. NR과 CR보다는 네오프렌 고무 rubber fender가 가장 효과적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 해상풍력터빈 구조물의 충돌해석 및 해석과정 정립과 충격완화 대책에 관한 연구를 수행하였다. 인장 및 전단 물성치 테스트를 통하여 구한 고무의 Mooney-Rivlin Coefficient를 적용하여 고무 fender의 비선형 동적거동을 구현하였다. 바지선속변화에 따른 해상풍력터빈 구조물의 응력 및 변형률 등을 고찰한 결과 고무펜더마다 각각 다른 특정속도에서 소성변형이 발생하였으며 구조물의 손상을 방지하고자 해상풍력터빈 구조물의 충격방지에 적합한 고무펜더의 종류와 최소두께비가 8 이상이 되어야 함을 제안하였다. 응력은 파손을 판단하는 항목으로 변형률보다는 적절하지 않음을 알 수 있었다. 고무펜더의 종류는 네오프렌 고무가 가장 적합한 것으로 판단된다. 고무펜더 중 고무의 강성치가 높아질수록 보다 효과적임을 알 수 있었다. 향후 수조에서의 충돌실험을 다수 수행하여 통계적으로 보다 해석에 관한 신뢰성을 높이고 해수 영역 조건을 고려한 유체-구조연성(FSI)해석을 수행하여 시뮬레이션 모델링에 관한 신뢰성을 확보하여야 할 것이다.

참고문헌

[1] P. Gjerde, "Assessment of jack-up boat impact analysis methodology", Marine Struct. vol 12, pp. 371-401, 1999.
 [2] O. Kitamura, "FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage," Marine Struct, vol 15, pp. 403-438, 2005.

- [3] G. Woisin, "Instantaneous loss of energy with unsymmetrical ship collisions" Schiff and Hafen, vol 40, no 1, pp. 50-55, 1988.
- [4] Wei-liang, "Evaluation of damage to offshore platform structures due to collision of large barge", Engineering structures, pp. 1317-1326, 2005.
- [5] Kang-Su Lee and Ro-Sik Park, "Effective arrangement of rubber fenders of wind-measuring met mast due to barge", International Journal of Offshore and Polar Engineering, vol. 22, no. 1, pp. 69-75, 2012.
- [6] 이강수, "해상풍속측정용 마스트의 충격손상 방지 연구", 한국풍력에너지 추계학술대회, 2009.
- [7] Kangsu Lee, "A Study on the Impact Analysis of Met Mast for Wind Measurement", World Wind Energy Conference, 2009.
- [8] 김형열, "충격하중을 받는 Euler기둥의 동적좌굴 해석". 한국전산구조공학회지, 제9권 제3호, pp. 187-197, 1996.
- [9] P. Gjerde, "Assesment of jack-up boat impact analysis methodology", Marine Structures, pp. 371-401, 1999.
- [10] Dimitris P. Servis, "Ship Collision Analysis Using Finite Elements", SAFER EURORO spring meeting, pp. 1-29, 1999.
- [11] WL, Jin, et al, "Evaluation of damage to offshore platform structures due to collision of large barge," Eng Struct, vol 27, pp. 1317-1326, 2005.
- [12] F. Biehl, Collision Safety Analysis of Offshore Wind Turbines, LS-DYNA Anwenderforum, pp. B-III-27-34, 2005.
- [13] 김동현, "대형풍력발전용 복합재료 블레이드의 개선된 등가 모델링 기법", 유체기계저널, 11권 4호, pp. 23-27, 2008.

저 자 소 개



이강수(李康洙)

1975년생, 1998년 인하대학교 조선해양공학과(학사), 2000년 인하대학교 조선해양공학과(공학석사), 2009년 인하대학교 조선해양공학과(공학박사), 2008년 - (사)한국선급 녹색산업기술원 책임연구원, 관심분야: 해상구조물, 해상풍력터빈, 구조진동, 구조강도, 해양에너지.