

해수유체영역을 고려한 고정식 실린더형 해양구조물의 충격응답특성 비교연구

이강수[†] · 홍기용¹

(Received October 7, 2014 ; Revised April 2, 2015 ; Accepted May 21, 2015)

Comparison Study of the Impact Response Characteristics of Fixed Cylindrical Offshore Structures Considering Seawater Fluid Region

Kangsu Lee[†] · Keyyong Hong¹

요약: 본 연구의 목적은 선박의 충돌에 의해 발생하는 원형단면을 갖는 실린더형 해양구조물의 충격손상을 최소화시키기 위한 것이다. 기존의 설계기준, 코드 및 선급규정 등에 명시된 충격해석은 해수유체영역이 고려되지 않은 상태로 계산을 수행해 왔다. 본 연구에서는 해수유체영역을 고려한 모델링방법과 동적응답, 변형률, 내부에너지 등의 응답파라미터를 고찰하여 기존에 고려하지 않은 결과와 비교분석하였다. 충돌선박의 선속을 변화시켜 다양한 상태의 하중케이스를 고려하였고 가장 큰 충격하중상태인 2.0m/s에서의 선속에서의 응답결과를 비교분석하였다. ALE방법을 이용하여 해수유체영역을 고려한 경우 해수영역에서의 충격에너지 흡수와 유체감쇠를 통해 응답크기가 더 작고 구조물의 응력과 소성영역의 분포가 고르게 나타났다. 해수유체영역을 고려하지 않은 경우 보다 보수적인 설계가 될 수 있음을 알 수 있었다.

주제어: 해양구조물, 충돌, 소성변형률, 해수유체, 동적응답, 사고한계상태

Abstract: This research focused on minimizing the response of fixed cylindrical offshore structures to a ship impact considering the seawater fluid part. A collision between a ship and offshore structure is generally a complex problem and it is often impractical to perform rigorous finite element analyses to include all the effects and sequences during the collision. The structural behavior of a fixed cylindrical type offshore substructure with a seawater fluid part has a simpler response and small deformation due to the dissipation of impact energy. Upon applying the impact force of a ship to the cylindrical structure, the maximum acceleration, internal energy, and plastic strain are calculated for each load cases using Ls-dyna finite element software. In the maximum cases 2.0 m/s velocity, the response result for the structure was carried out to compare between having a fluid region and no fluid region. Fluid-structure interaction analysis was performed using the ALE method, which make it possible to apply a fluid region on the impact problem. The case of a fixed cylindrical type offshore structure without a seawater fluid part can be a more conservative design.

Keywords: Offshore structure, Collision, Plastic strain, Seawater fluid, Dynamic response, Accidental limit state

1. 서론

해양구조물에 있어서 선박충돌에 의해 발생하는 문제는 유지보수비의 급격한 증가 뿐만 아니라 해양구조물의 기능에 따라 다르지만 심각한 손실을 입을 수 있다. 해양구조물 설계에 있어서 이러한 선박충돌에 의한 구조물 강판의 두께나 보호장치 등의 형태, 모양 등을 결정하는 과정은 중요한 단계이며 기본적으로 폭발, 충돌과 같은 예기치 못한 상황을 고려하여야 하는 설계고려사항인 ALS(accidental limit state)설계법을 따르고 있다. 이는 LRFD(load resistance factor

design)의 설계상태법 중 하나로써 기본적으로 뚜렷한 항복응력과 극한응력을 가지는 연성재료에 대한 설계법이다.

ALS는 한계상태설계법(하중저항계수 설계법)의 상태설계법 중 하나에 속하는데 현재의 응력중심의 허용응력설계법과 같은 탄성설계법과는 달리 확률론적 수학적 모델을 접목하여, 구조부재나 상세요소의 극한내력, 사용성한계 및 피로강도와 같은 각종 한계상태에 바탕을 두고 극한 또는 한계하중에 의한 부재력이 부재의 극한 또는 한계상태내력을 초과하지 않도록 하는 설계법이다. 소성변형과 같은 비

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9505-6802>): Offshore Plant Engineering Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, 32, 1312 Yuseong-Daero, Deajon 305-343, Korea, E-mail: klee@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3351

¹ Offshore Plant Engineering Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, E-mail: khong@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3003

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선형성이 큰 문제는 구조물의 영구변형 문제로 고려될 수 있다. 과거에는 해양구조물의 복잡한 충격거동을 이상화하여 등가해석법을 사용하여 왔다.

현재까지 수행되어 온 연구들을 분석해 보면 이강수 [1][2][6]는 해수유체영역을 고려하지 않은 상태에서의 원형 마스트 구조물과 삼각지주형의 구조물에 관한 충격거동해석을 통해 동적응답특성과 손상변형에 관한 분포, 충돌보호장치에 관한 연구를 수행하였고 Kitamura [3]는 선박-선박 충돌, 선박-암초 좌초에 관한 비선형 동적 유한요소 시뮬레이션을 연구하였으며 단순화된 접근법과 상세화된 접근법의 두 가지 형태의 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 연구와는 달리 접촉력(contact force)을 중요 인자로 고려하였고 변형량이 접촉력과 직접적인 연관성이 있고 침투과피에 영향을 줄 수 있다는 결론을 도출하였다.

Woisin [4]은 선박-선박 충돌해석과 운동에너지의 손실에 관한 연구를 수행하였다. 모델테스트를 통해 선박이 충돌하여 손상이 발생할 수 있는 충돌속도에 주목하고 선박마다 충돌손상을 발생시키는 특정속도를 표준화 하고자 하였다. 또한, 에너지손실을 평가하여 손실된 에너지양과 변형된 양의 상관관계를 규명하였다. Jin *at el.* [5]은 대형 선박이 자켓형 해양구조물에 충돌 시 구조물의 동적거동 정확히 모사하기 위한 연구를 수행하였고, Jin *at el.* [5]은 남중국해의 해양자켓 플랫폼 설치 시 바지선 위의 대형 기중기 충돌에 의한 손상된 대각선 방향의 브레이스 보강에 관한 연구를 수행하였고, Biehl [8]은 중국 해상풍력발전단지의 풍력터빈이 대형선박과 충돌 시의 거동에 대해 고찰하였다.

최근 해상에 설치되는 구조물이 다양화 됨에 따라 구조물의 충돌형태, 충돌속도, 충돌시간 등에 따라 매우 다양한 시나리오를 갖기 때문에 수치시뮬레이션을 위한 컴퓨터 하드웨어와 해석 시간 등이 크게 요구되고 있는 상황이며 과거에는 컴퓨터 성능 부족으로 인해 접근하지 못했던 대형 하드웨어 리소스(hardware resource)가 요구되는 문제들을 최근에 해결하고자 노력하고 있지만 미비한 실정이다.

충돌손상실험의 경우 실험실 규모의 시편단위 실험을 통해 강제 충격 물성치 특성과 수치시뮬레이션 결과를 비교하고 있는 수준이며 해양플랜트와 같은 대형구조물의 경우 시뮬레이션에 의존해야만 하는 상태이기 때문에 관련 기법 연구를 통해 신뢰성을 높이고 위험도를 낮출 수 있는 연구의 필요성이 대두되는 상황이며 또한, 새로운 형상과 고무 등 복합배료에 관한 재료 비선형성을 포함함으로써 새로운 충격강도 수치시뮬레이션 기법과 설계기준(design criteria) 등의 제안이 요구되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 기존에 잘 알려진 코드 및 기준 (recognized code & standard), [8]-[12]에서는 고려하지 않는 해수유체영역을 해석 시뮬레이션 상에 포함시켜 그 결과를 비교해 보고 보다 실제에 부합하는 결과를 얻기 위해 해양구조물의 충격강도해석을 위한 기초 연구를 수행하고

자 하였다.

2. 충돌모델 및 해석

2.1 일반사항

구조물의 충격시 효과적인 거동을 구현하기 위해서는 보다 비선형성을 정확히 구현해야 한다. ANSYS LS-Dyna 14.0을 이용하여 구조물의 충격조건을 모델링하였고 해석을 수행하였다.

2.2 형상 및 해석모델

LS-Dyna 14.0을 통하여 구현하였다. 아래의 그림과 같이 상부 트러스(truss)와 하부 원통(monopole)의 형태로 구성되어 있으며 Table 1 ~ 3 에서 상세한 값을 보여주고 있다. 상부 트러스(truss)와 하부 원통(monopole)은 보강관으로 구성되어 볼트로 연결되어 있다. 볼트연결부위의 국부적인 효과는 무시하였고 절점을 공유하도록 합치계(merging) 하였다. 해수표면을 기준으로 충돌영역에 공기층과 해수층이 공유되고 있기 때문에 두 개의 영역으로 해수유체영역을 모델링하였다.

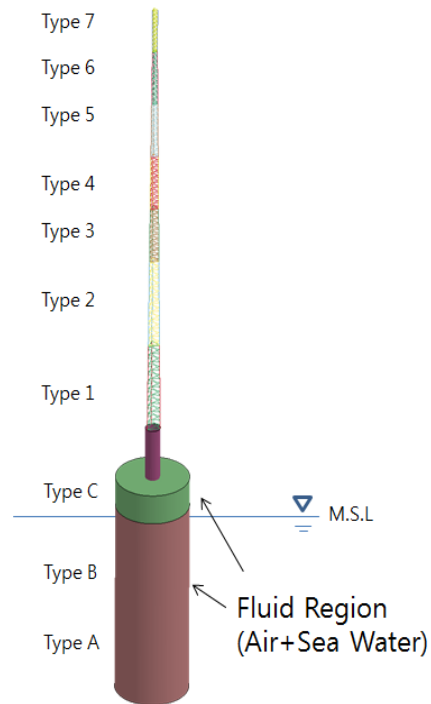


Figure 1: FE model of fixed cylindrical type offshore sub-structure

Table 1과 2는 모델의 주요제원을 보여주고 있고, Table 3은 대상모델의 유한요소정보를 보여주고 있으며 365,001개의 절점과 350,010의 요소, BEAM 161, LINK 160, SHELL 163, SOLID 164의 요소형태(element type)들로 구성되어 있다. 충돌영역 구조물의 두께는 25mm이며 그 다음 층은 30mm, 35mm로써 해저면으로 갈수록 두꺼워진다.

Table 1: Specification of the cylindrical structure (upper truss)

Type	H (m)	Legs (D) (mm)	Lattice (D) (mm)
1	12	80	32
2	12	65	30
3	7.5	55	28
4	7.5	45	26
5	7.5	38	24
6	7.5	32	18
7	6	32	14

Table 2: Specification of cylindrical structure (lower tubular)

Type	H(m)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
A	15	2,000	35
B	5	2,000	30
C	17	2,000	25

Table 3: Information of the Finite Element model

Number of Nodes	365,001
Number of Elements	350,010
Element Types	BEAM 161
	LINK 160
	SHELL 163
	SOLID 164

3. 해석조건

3.1 재료물성 및 계수

대상모델인 실린더형 고정식 해양구조물의 기계적 재료 물성치는 **Table 4**와 같이 일반 연강(mild steel)로 선정하였다. 해석을 수행하기 위해 입력해야 하는 물성치는 탄성계수, 프와송비, 밀도, 탄젠트계수 등이며 항복응력은 355 MPa를 갖도록 하였다. Failure Strain의 경우 steel 재료에서 통상적으로 적용되고 있는 0.45를 사용하였고 구조물의 응답특성을 고찰하기 위해 감쇠손실계수(damping loss factor)는 0.0004로 적용하였다.

Table 4: Material property of the cylindrical structure

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
Damping Loss Factor	0.0004

3.2 하중 및 경계조건

해상풍력터빈 구조물 해저 바닥면의 지반조건은 고려하지 않았으며 고정경계조건을 적용하였다. 바지선의 자유도는 파랑(wave)에 대한 영향을 무시하고 강체운동을 방지하

기 위하여 수직방향으로 고정하였다. 충돌속도 0.5m/s에 대응되는 충격하중은 약 268.33 kN으로 **Table 5**와 같다.

상부 트러스(truss)와 하부 원통(monopole)의 경계부위에는 하중과 모멘트를 전달할 수 있도록 강체영역을 설정하였다. 바지선과 해상풍력터빈 구조물 사이의 접촉조건은 단일 면대면 접촉조건으로 구현하였으며 충돌 선박의 변형에는 관심이 없으므로 강체로 가정하여 모델링 하였다.

Table 5: Load calculation of the 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)

4. 동적응답해석

4.1 충격해석

시나리오에 따라 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. 충돌알고리즘은 유체-구조 연성효과를 구현한 충돌해석을 수행하고자 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)법을 채택하였다.

기존의 Eulerian 알고리즘의 문제는 유한요소 격자의 distortion을 피할 수 없고, 유체문제에서는 적용하는데 어렵지 않을 수 있으나 대변형이 발생하는 구조문제에서는 적용하기 어렵다. 따라서, 주로 상대적으로 변형이 적은 구조문제나 대류해석과 같은 유체문제에 적용되고 있다. Lagrangian, Eulerian, ALE 각각의 접촉 알고리즘은 마찰의 영향으로 고려하느냐에 따라 구별될 수 있어 고전적인 Lagrangian 포물레이션의 경우 접촉알고리즘이 계속 개선되어 왔다. 이는 격자의 뒤틀림 변형을 피하기 어렵기 때문인데 ALE의 경우 이 뒤틀림 변형을 피할 수 있도록 설계되어 있다. 해수유체영역을 구현하지 않은 해석과 결과를 비교분석하였다.

4.2 동적응답비교 및 고찰

Figure 2는 동적응답결과 그래프에서 A는 구조물의 최상부이고 순차적으로 B, C, D, E, F, G는 최하부(해저면)로 부터 높이별로 응답을 고찰하였다. **Table 6**은 해수유체영역을 갖는 실린더형 구조물의 2.0 m/s 선속에서의 영구변형 깊이, 최대 소성변형률, 내부에너지 등을 보여주고 있으며 결과를 분석하였다.

Table 6: Result of Impact Analysis (Monopile Structure with Fluid)

Velocity [m/s]	Dent depth [mm]	Max. plastic strain	Internal energy [J]
2.0	96.4	0.002241	36,075

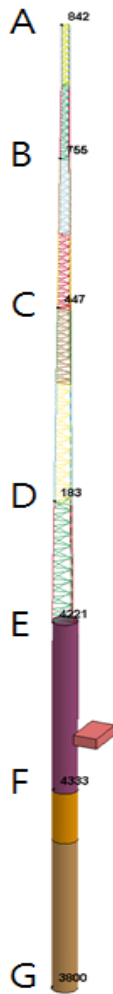


Figure 2: Response points for analysis model

해수유체영역을 갖는 실린더형 구조물의 충격해석은 변위응답, 내부에너지, 최대응력, 최대소성변형률 등이 가장 큰 값이 발생하는 최대응답 조건인 선속 2.0m/s에서의 결과를 기준으로 해수유체영역이 없는 경우와 비교분석하였다. 해수유체영역을 고려하지 않은 경우 손상깊이(dent depth)는 110.8mm였고 최대 소성변형률은 0.005931, 내부에너지는 41702J 이었다. 고려한 경우는 96.4mm, 0.002241, 내부에너지는 36075J 이었다. 기본적으로 이러한 결과가 발생한 원인은 해수유체영역의 유체감쇠에 의해 해수유체영역을 고려한 경우 감쇠에 의한 가속도 성분이 다소 줄어든 것으로 판단된다. 또한, 탄성복원이 불가능한 소성변형이 발생한 영역들이 해수유체영역을 고려한 경우 보다 적은 분포를 보여주고 있다. Figure 3은 2.0m/s에서의 선속에 대한 해수유체영역을 고려하지 않았을 경우 충돌방향(수평방향)의 높이별 동적응답변위결과이며, Figure 4는 고려하였을 경우의 결과를 보여주고 있다. 해수유체영역을 갖는 원통형 구조물 부위의 충격해석은 변위응답, 내부에너지, 최대응력, 최대소성변형률이 가장 큰 값이 발생하는 조건인 선속 2.0 m/s에서의 결과를 기준으로 하였으며 해수유체영역이 없는

경우와 비교분석하였다.

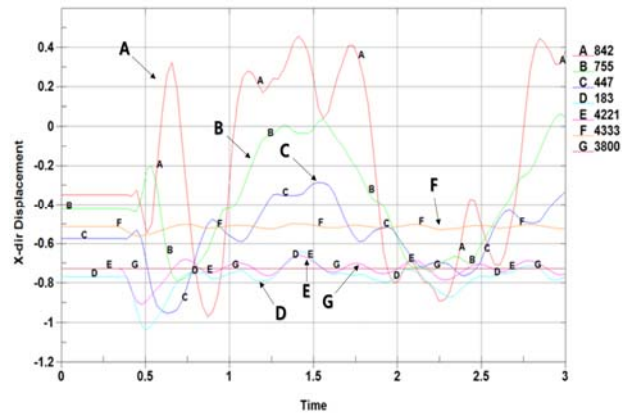


Figure 3: Dynamic Responses of the X-dir Displacement for a Monopile Structure (without Fluid, V=2.0)

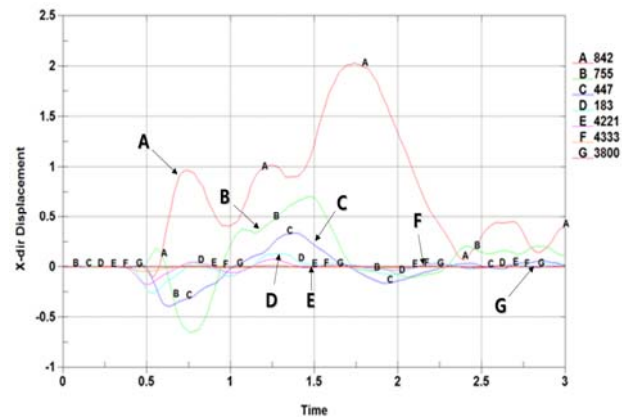


Figure 4: Dynamic Responses of the X-dir Displacement for a Monopile Structure (with Fluid, V=2.0)

Figure 5와 6은 각각 구조영역과 해수유체영역에서의 내부흡수에너지를 보여주고 있다. 해수유체영역을 고려하지 않은 일반적인 해석들의 경우 보다 안전한 결과를 얻을 수 있다. 위의 약 36000 J의 내부에너지중 12000 J은 해수유체영역에서 흡수하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 전체 가해진 에너지 중 약 1/3에 해당하는 부분이 해수유체영역으로 에너지 흡수되어진다는 것이다. 이는 해수유체영역을 고려한 경우 보다 현실적이고 덜 보수적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 구조물이 충격되는 방향(X-dir)의 시간에 따른 변위응답을 해수유체영역을 고려하지 않은 경우와 비교해보면, 충격 후 약 1.5초 간격 내에 응답변위의 곡선이 보다 완만하고 주기가 길어진 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 응답피크의 뾰족도(sharpness)가 작아지는 경우는 해수에 의한 감쇠의 영향이 커진 것으로 판단할 수 있다. 이는 구조물 주위의 해수유체영역으로 인한 감쇠와 부가수 질량으로 인하여 구조물의 고유진동수가 이동(shift)될 수 있다는 것 또한 내포하고 있다. 해수유체영역을 고려하지 않은 원통구조물 부위의 경우 선속 0.5 m/s를 제외하고 1.0 m/s 이상의 선속에서는 모두 영구손상(permanent damage)이 발생하였고

약 50mm에서 110mm까지의 손상깊이를 갖는다. 최상부 위치인 A지점에서의 동적응답변위가 가장 큰 것으로 관찰되었고 상부에서 최하부지점인 G위치로 갈수록 응답이 작아지는 것을 알 수 있었다. 0.5m/s 이외에서는 모두 소성영역이 존재하여 영구변형이 발생한 것으로 관찰되었고 1.0 m/s 이상의 선속에서 모두 소성변형이 발생하였다.

해수유체영역을 고려하지 않은 해석에서는 구조감쇠(beta damping, 0.001)의 영향만 존재하여 응답의 모양이 뾰족(sharp)하고 협소(narrow)하여 감쇠능력(damping capability)에 의한 영향이 거의 없었으나 해수유체영역의 감쇠가 변위응답결과가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

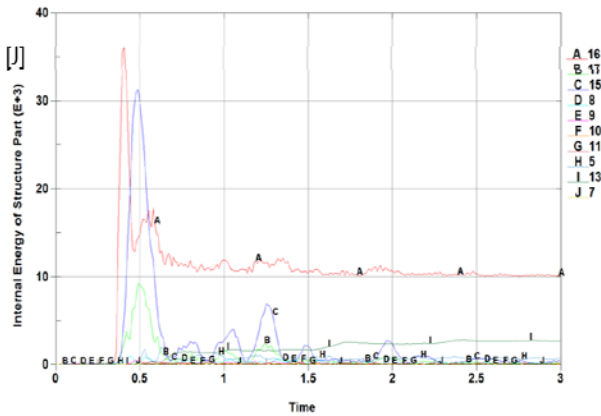


Figure 5: Internal Energy of the Structure Part (with Fluid, V=2.0)

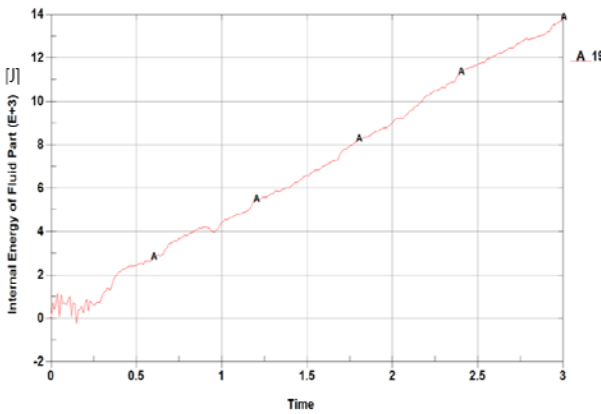


Figure 6: Internal Energy of the Fluid Part (with Fluid, V=2.0)

Figure 7과 8은 선속에 따른 대상 구조물의 등가응력(von mises stress) 분포와 최대소성변형률(maximum plastic strain) 분포를 보여주고 있다. 2.0m/s 선속에서의 등가응력분포의 경향은 해수유체영역을 고려하지 않은 경우와 비교해보면 충격부위와 함께 고정단 근처에 분포된 것과는 달리 해수유체영역을 고려한 경우에는 구조물의 보트충격부위에 국부적으로 큰 응력성분들이 분포하고 있음을 알 수 있었다. 이는 보트의 충격 후 1/3의 충격에너지가 해수유체영역으로 에너지가 소산되고 2/3에 해당하는 충격에너지가 구조물의

충격부위에 집중적으로 적용되었음을 알 수 있다.

등가응력크기는 약 224MPa로써 해수유체영역을 고려하지 않은 경우의 응력크기인 300MPa보다 약 76MPa 만큼의 최대 응력 차이가 난다. 소성변형률 분포의 경우 해수유체영역을 고려하지 않은 2.0m/s의 분포와 비교하여 dent depth, 영구변형이 발생한 영역 등이 낮은 수준을 나타내고 있다.

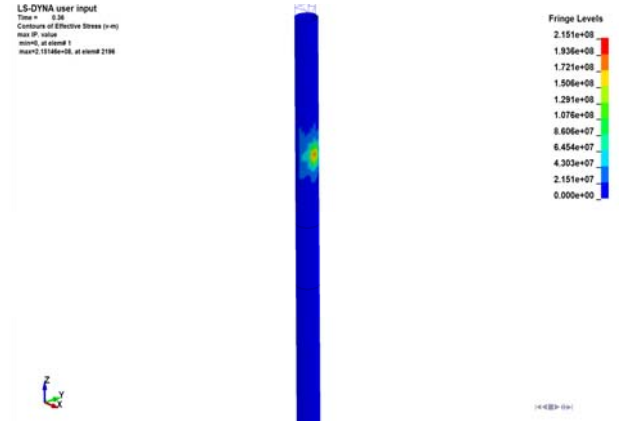


Figure 7: Equivalent Stress Distribution of a Cylindrical Structure(with Fluid, V=2.0)

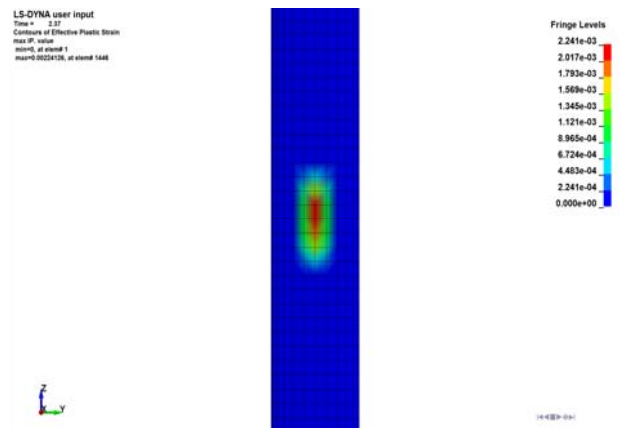


Figure 8: Plastic Strain Distribution of a Cylindrical Structure(with Fluid, V=2.0)

즉, 전체적인 구조물의 변위응답 및 가속도응답 결과와 더불어 구조물의 응력관점에서도 해수유체영역을 고려하지 않은 경우 보수적인 설계가 될 수 있음을 알 수 있었다. 앞 장에서 분석하였던 DNV, API, AASHTO 등의 설계코드들도 해수유체영역을 고려하고 있지 않아 더 보수적인 설계가 될 수 있으나 구조물의 두께가 매우 두꺼워 질 수 있기 때문에 경제성 측면에서 불리할 수 있다. 따라서, 해수유체영역을 고려할 경우 발생하는 계산시간의 경제적 손실을 감안하여 해수유체영역을 고려하지 않았을 경우와의 안전계수를 찾아내고 상관관계를 만들어 경험식의 형태로 잘 알려진 코드(RCS)에 반영되는 것이 바람직할 것으로 판단 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 수치시물레이션 기법연구를 통한 실린더형 해양플랜트 구조물의 동적 충돌응답 및 파손경향 분석 연구를 수행하였다. 첫 번째로 다양한 알고리즘 적용을 통한 충돌수치해석 시물레이션 기법 평가, 해석 수행 시 반복법을 수행하는 수치해석기법 고찰, ALS 설계를 위한 RCS(recognized code & standard)에 제시된 경험식 조사 및 수치시물레이션 비교, 해수 해수유체영역 고려 시의 충돌응답, 충돌부위의 손상형태 및 경향 분석 등을 수행하였다.

1. 해수유체영역을 고려하지 않은 원통구조물 부위의 경우 선속 0.5 m/s를 제외하고 1.0 m/s이상의 선속에서는 모두 영구손상(permanent damage)이 발생하였고 약 50 mm에서 110 mm까지의 손상깊이를 갖는다. 최상부 위치인 A지점에서의 동적응답변위가 가장 큰 것으로 관찰되었고 상부에서 최하부지점인 G위치로 갈수록 응답이 작아지는 것을 알 수 있었다. 0.5 m/s 이외에서는 모두 소성영역이 존재하여 영구변형이 발생한 것으로 관찰되었고 1.0 m/s 이상의 선속에서도 소성변형이 발생하였다. 이는 원통구조물이 갖는 구조물의 두께로는 해양플랜트 구조물에 요구되는 충격강도를 만족시킬 수 없다는 것을 의미한다.
2. 해수유체영역을 고려한 경우 감쇠에 의한 가속도 성분이 줄어드는 경향으로 인해 탄성복원이 불가능한 소성변형이 발생하는 영역들이 보다 적은 분포를 보여주고 있다. 따라서, 해수유체영역을 고려한 경우에는 보다 현실적이고 경제성을 높일 수 있는 결과를 얻을 수 있었으며 선박 충격부위에 국부적으로 큰 응력성분들이 분포하고 있음을 알 수 있었고 해수유체영역을 고려하지 않은 경우에 비해 더 작은 크기의 응력분포가 됨을 알 수 있었다. 해수유체영역의 에너지흡수에 의해 충격력이 소산되었고 구조물에는 더 적은 손상도(damage rate)가 발생함을 알 수 있었다.

향후 연구로써 구조물의 형태에 따라 구조물의 두께변화의 영향을 규명하는 것이 필요한 것으로 판단되며 해수유체영역을 고려 시 해양환경조건의 영향이 반영된 해석이 추후 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 창의연구사업으로 수행된 신진연구자 지원과제인 “해양플랜트 구조물의 ALS설계를 위한 충격강도 시물레이션 연구 (PES1640)” 및 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발 (PMS2940)”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] K. S. Lee and R. S. 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.
- [2] K. S. Lee, “Effects on the various rubber fenders of a tripod offshore wind turbine substructure collision strength due to boat.” *Journal of Ocean Engineering*, vol. 72, no. 1, pp. 188-194, 2013.
- [3] O. Kitamura, “FEM approach to the simulation of collision and grounding damage,” *Marine Structures*, vol. 15, pp. 403-438, 2005.
- [4] G. Woisin, “Instantaneous loss of energy with unsymmetrical ship collisions,” *Schiff und Hafen*, vol. 40, no 1, pp. 50-55, 1988.
- [5] W. L. Jin, J. Song, S. F. Gong, and Y. Lu, “Evaluation of damage to offshore platform structures due to collision of large barge,” *Engineering structures*, vol. 27, pp. 1317-1326, 2005.
- [6] K. S. Lee, “Method for determining thickness of rubber fenders of a tripod type offshore wind turbine substructure,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* vol. 36, no. 4, pp. 490-496, 2012.
- [7] F. Biehl, “Collision safety analysis of offshore wind turbines,” *LS-DYNA Anwender forum*, pp. B-III-27-34, 2005.
- [8] DNV, “Design against accidental loads,” *Recommended Practice RP-C204*, 2010.
- [9] DNV, “Fatigue design of offshore steel structures,” *Recommended Practice RP-C203*, 2000.
- [10] NORSOK, “Design of steel structures, NORSOK standard N-004,” 1998 Revision, 1998.
- [11] AASHTO, “Bridge design specifications,” 1994.
- [12] American Petroleum Institute, “Recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD),” 21st ed, 2000.