

API & AISC 기준을 적용한 PolyEthylene (PE) 부유식 플랫폼의 구조 안전성 검토

서광철* · 남택근** · 박주신****

* 목포해양대학교 조선해양공학과, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부, *** 삼성중공업 중앙연구소

Estimation of Structural Safety for PolyEthylene (PE) Floating Platforms with API & AISC Standards

Kwang-Cheol Seo* · Taek-Kun Nam** · Joo-Shin Park****

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

*** Central Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

요 약 : PE(PolyEthylene) 재료를 활용한 해상부유 구조물은 바다, 강 또는 호수의 인근이나 수역 내에 일정한 공간 부를 형성하는 부유식 구조물로, 현재는 그 용도가 소형선박 계류장뿐만 아니라 양식장, 수상 펜션, 해상부고 등에 다양하게 활용되고 있다. 이 제품군의 특징은 유연성이 뛰어나고 재활용할 수 있으며, 내약품성, 내후/내식성이 우수하다. 기존의 PE 제품군을 활용한 부유식 플랫폼은 한 개의 브래킷에 한 개의 부력관을 체결하는 단순한 구조를 구성하였고, 이로 인하여 사용자가 용도 변경 및 사용환경이 변경될 때는 적용하는데 제한이 있었다. 이에 본 연구에서는 한 개의 브래킷에 다양한 크기를 갖는 부력관을 체결할 수 있는 구조를 개발하고, 제품의 구조 안전성을 유한요소법을 활용하여 검증하였다. 구조해석 결과, 브래킷 하단에 지름 500 mm 부력관 모델에서 충돌 하중에 대해 최대값을 나타내었으나, 허용기준을 만족하였다. 본 연구 결과를 기반으로 하여, 향후 다양한 형태의 부유체 플랫폼에 대한 구조 안전성 평가에 관한 연구가 가능하며, 관련 평가 기준에 대한 정립이 필요하다.

핵심용어 : 폴리에틸렌, 부유식 플랫폼, 브래킷, 응력 비율, 허용기준

Abstract : Floating platforms made of PE (PolyEthylene) are often located in shallows of seas, rivers or lakes. They are widely used for marine pensions, marine pontoons, marine bridges, etc. These products are characterized by good flexibility, recyclability, chemical resistance and weatherability with corrosion resistance. Existing PE floating platforms have a simple structure in which one pipe is fastened to one bracket, but this has limited application, even if a user modifies the arrangement. Therefore, we developed a structure that allows buoyancy pipes of various sizes to be fastened to one bracket and verified the structural safety of the product using the finite element method. From the results of structural analysis for buoyancy pipes of different diameters, the maximum stress ratio was 0.78 compared with allowable criteria of 1.0, which represented sufficient safety for a model with 500 mm diameter pipes. Based on the results of this study, further research to evaluate the structural safety of various floating platforms can be carried out in the future; it will also be necessary to establish related evaluation criteria.

Key Words : PolyEthylene (PE), Floating platform, Bracket, Stress ratio, Allowable criteria

* First Author : kcseo@mmu.ac.kr, 061-240-7303

† Corresponding Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

1. 서론

PolyEthylene(PE) 제품군을 활용한 해상부유 구조물은 바다, 강 또는 호수의 인근이나 수역 내에 일정한 공간 부를 형성하는 부유식 구조물로, 현재는 그 용도가 소형선박 계류장뿐만 아니라 양식장, 수상 펜션, 해상부교 등에 다양하게 활용되고 있다. 이 제품군의 특징은 유연성이 뛰어나고 재활용할 수 있으며, 내약품성, 내후/내식성이 우수하다. 사용 수명이 반영구적이며 유지 및 보수비가 저렴하다. 소비자로서는 주문제작이 가능하고, 다양한 색상을 제공하기 때문에, 별도의 도장을 하지 않아도 되는 장점이 있다. 기존의 PE 제품군을 활용한 부유식 플랫폼은 한 개의 브래킷에 한 개의 부력관을 체결하는 단순한 구조를 구성하였고, 이로 인하여 사용자가 용도 변경 및 사용환경이 변경될 때는 적용하는데 제한이 있었다. 이에 본 연구에서는 한 개의 브래킷에 다양한 크기를 갖는 부력 관을 체결할 수 있는 구조를 개발하고, 제품의 구조 안전성을 유한요소법을 활용하여 검증하였으며 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Kim et al.(2002)는 유한요소법을 활용하여 어업용으로 사용되고 있는 프레임 구조물의 구조 안전성 해석을 수행하였다. 대상 모델은 2개의 부이가 고정장치와 벨트로 고정되고, 그 위에 발판을 지지하기 위한 프레임, 목재와 보조 받침대가 구성되어 있다. 구조해석용 프로그램은 MSC/Nastran이며, 1차원 빔과 2차원 셸 요소를 이용하여 모델링 하였다. 본 연구를 통하여, 주요 연결 부재에 대한 구조보강을 결정하였고, 고무의 대변형 해석에 대한 기초적인 자료를 제시하였다.

Choi et al.(2006)는 내구성이 우수하여 반영구적으로 사용이 가능한 열가소성 폴리우레탄을 이용하여 가두리를 설계하였다. 폴리우레탄 시편에 대한 압축강도 시험 및 수치해석을 통하여 연결부 브래킷과 볼트에 대한 구조 안전성을 확인하였다. 설계안에 대한 운동성능을 확인하기 위하여, 단방향 파에 대해 모형 수조실험을 수행하여, 기존 어장관리용으로 사용하고 있는 제품 대비 성능이 우수함을 확인하였다.

Jung et al.(2006)는 친환경 소재인 폴리에틸렌 부력관과 시트를 활용하여 새로운 개념의 부소과제용 부체를 개발하였다. 개발품의 소파 성능 평가를 위하여 입사파 조건에 따른 유체력 실험을 수행하였다. 입사파랑 6초 이하 조건에서는 소파 성능이 양호하였으나, 장주기의 입사 파랑에 대해서는 부체 전체가 해수면과 같이 거동하면서 소파 성능이 거의 나타나지 않는다는 결론을 도출하였다.

Park(2011)는 부유식 구조물의 구조 건전성 평가 시스템 개발을 위한 평가 프로세스를 제안하였다. 구조물의 동적 특성을 이용한 건전성 평가는 구조물 전체의 거동을 파악하

므로 기존의 유지관리기술의 한계를 극복할 수 있다. 플로팅 구조물의 수치해석 모델을 이용하여 손상 부재 및 손상도를 예측하는데 적용하였으며, 5가지 모델에 대한 평가 시 모두 정확히 손상데이터를 찾을 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 시스템은 구조물 붕괴 시 발생하는 인명피해와 경제적 손실을 줄이는 동시에 적시에 구조물을 보수, 보강하여 구조물 유지관리 비용을 최소화하고 구조물의 수명이 연장되는 효과를 기대할 수 있다.

Seo et al.(2018)는 전장 15m 폰툰형 플랫폼의 구조설계 과정에 대한 제안 및 설계안에 대한 유한요소해석을 통한 구조 안전성을 검토하였다. 유사 크기에 대한 플랫폼에 대한 설계기준이 명확하지 않아서, 설계 지침서에 부합하는 하중 추정 방법 및 해석방법을 제시하였고, ANSYS 해석프로그램을 이용하여 외부 하중에 의한 구조 안전성을 검증하였다.

Wang and Tay(2011)는 최근의 VLFS 관련한 연구 및 개발에 대해서 검토하였다. 종래의 연구기술인 주파수 및 시간영역 접근법을 사용한 탄성 해석과 CFD 기반 연구의 주요 내용을 간략하게 요약하였다. VLFS에 대한 향후 연구과제로서 운동 감쇄 장치가 장착된 VLFS에 대한 유체탄성 응답과 이를 확인하기 위한 해양실험을 제안하였다.

본 연구에서는 연안 어업 활동에서 주로 활용되고 있는 PE 재료를 활용한 부유식 플랫폼의 다양한 활용을 위하여 고안된 브래킷 설계안 및 적용성을 검증하기 위한 구조 안전성 검토 결과에 대해서 언급하고 있다. 본 연구를 수행하는 데 있어서, 선행연구 결과들은 실험 및 수치 해석적 방법을 결정하는 데 도움이 되었으며, 미비한 점 중 한 가지인 평가절차 및 기준 제정의 필요성을 확인하는 좋은 밑거름으로 작용하였다.

본 연구를 통하여 도출된 주요 결과는 연안 어업 활동 기구재와 주요 설비에 대한 구조 안전성 평가 분야에 관련된 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

2. PE 부유식 플랫폼 설계

2.1 PE 브래킷 및 부력관 설계

Fig. 1에서는 본 논문의 주요대상인 PE 부유식 플랫폼에 대해서 나타내고 있다. 이 부유식 구조는 소형선박 계류장뿐만 아니라 양식장, 수상 펜션, 해상부교 등에 다양하게 활용되고 있다.

Table 1에서는 개발 대상물인 부유식 플랫폼의 주요치수를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 복수의 부력 관을 갖는 부유식 플랫폼은 길이 방향으로 17개의 브래킷과 상부 갑판 그리고, 12개의 계류용 의장품이 갑판 위에 설치되어 있다.

API & AISC 기준을 적용한 PolyEthylene (PE) 부유식 플랫폼의 구조 안전성 검토

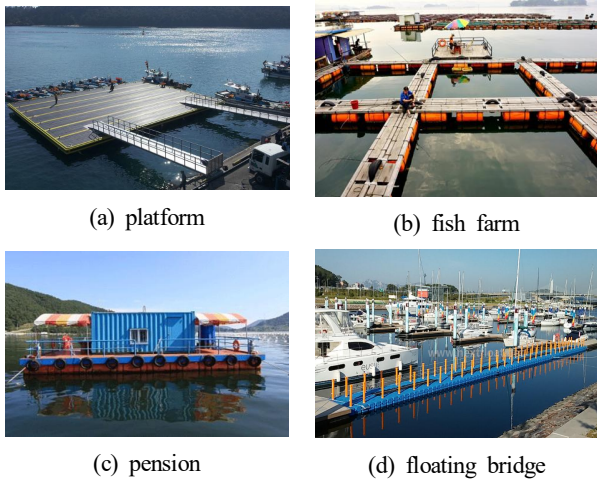


Fig. 1. PE floating platform.

Table 1. Principal of dimensions of PE floating platform

Components	Value
LOA	20.0 m
LBP	20.0 m
Breath	3.6 m
Depth	1.2 m
Draft	1.0 m
Bracket space	1.25 m
Displacement	4.83 ton

Fig 2와 같이 개발모델의 한 개의 bracket은 총 3개의 개별 유닛이 연속결합되어 있으며, 별도로 개발된 고정구를 이용하여 충분히 안정적으로 체결이 되며, 유지/보수가 쉽도록 고안되어 있다. 브래킷은 다양한 목적으로 사용될 수 있도록, 부력 관의 크기가 총 3가지(지름 300 mm, 400 mm, 500 mm)를 설치할 수 있도록 형상설계가 되어 있으며, 부력 관을 고정해주는 주변 부재가 충분히 구조 안전성을 확보할 수 있도록 구조배치 및 두께를 수치해석을 통하여 결정하였다. 이러한 부유식 플랫폼의 경우, 한번 설치가 되면 외관의 유지/보수는 쉽지만, 내부재의 경우 전문인력의 도움 없이는 제대로 된 검사가 불가능하다. 따라서, 초기 구조설계 시, 이러한 특징이 충분히 고려되어야 한다. 부유식 플랫폼에 사용된 PE 재료의 물성값은 아래 Table 2과 같으며, 인장 시편 테스트 결과에서 인용하였다.

Table 2. Material properties of PolyEthylene

Properties	Specification
Elastic Modulus	1,300MPa
Poisson's ratio	0.45
Density	960kg/mm ³
Tensile Strength	30.5MPa
Tensile Strain at yield	10%
Tensile Strain at break	50%

3. 유한요소해석 및 고찰

3.1 모델링 및 경계, 하중 조건

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 SACS V.11.3 (Offshore Structural Analysis Software, 2018)을 이용하였다. 모델링은 2개의 조인트를 갖는 1차원 빔(beam) 요소를 적용하였으며, 빔은 AISC(2005)/API(2014)에서 제공하는 라이브러리를 적용하여, 설계하중에 대해 구조적인 응답이 정확하게 구현하도록 반영하였다. 해석에 사용된 유한요소 수는 약 500개이며, 전체적인 처짐형상 및 응력 결과 판단 시 충분한 요소이다. 그에 대한 근거는 추후 기술되는 구조해석 결과에서 변형형상과 응력 분포 결과를 통하여 확인할 수 있다. 연구에서 구조 강도 검증하고자 하는 부유체 플랫폼의 외력 및 자중을 적용하였다. 부력관 지름의 크기(300 mm, 400 mm, 500 mm)에 따라서, 총 3가지로 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 부력관 지름 300 mm의 경우 부력관 배치 조건이 가장 양호하여 구조 안전성 검토 결과는 지름 400 mm와 500 mm 조건에 관해서 기술하였다. 해석의 경계조건은 네 번 대칭

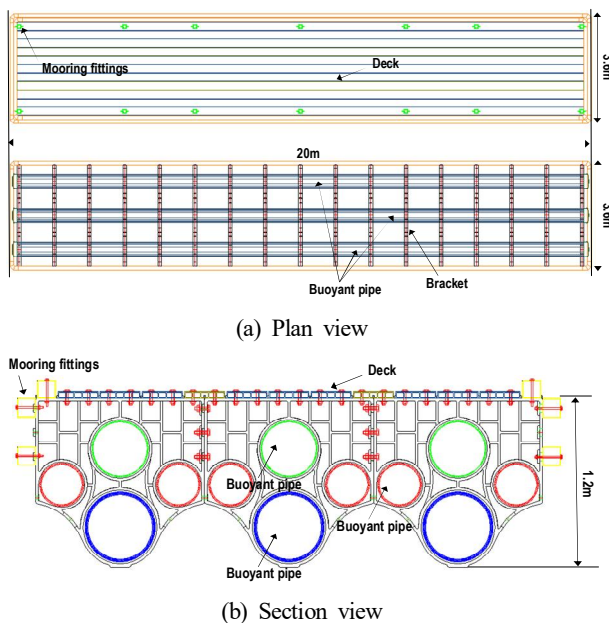


Fig. 2. The typical ordinary section of PE bracket.

경계조건(길이 방향 및 폭 방향)을 구현하여, 실제의 연속 구조 거동이 나타나도록 하였으며, Fig. 3 및 Table 3과 같다.

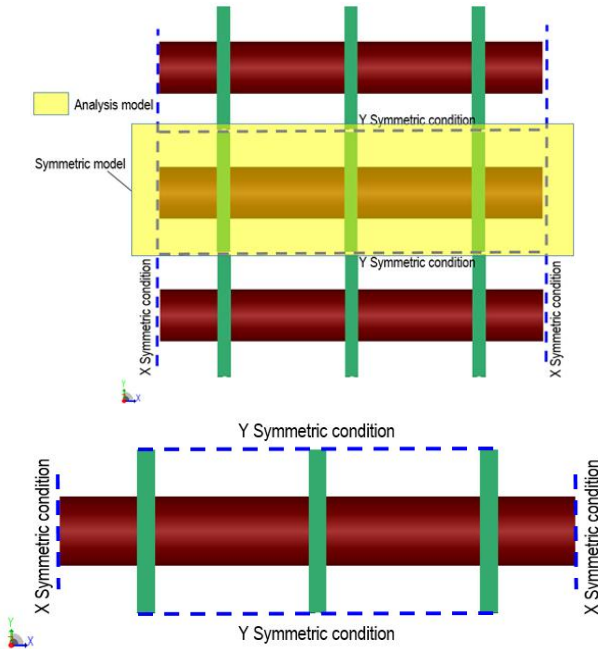


Fig. 3. Analysis model range and boundary condition.

Table 3. Boundary condition

Boundary condition	X	Y	Z	R.X	R.Y	R.Z
X Symmetric	Fixed	Free	Fixed	Free	Fixed	Fixed
Y Symmetric	Free	Fixed	Fixed	Fixed	Free	Fixed

Note; Fixed is applied constraint condition, Free is not applied constraint condition.

R is rotational restraint.

현재 크기가 20 m 이내의 연안에서 사용하고 있는 부유식 플랫폼에 대한 구조 안전성 평가 시 명확한 평가 지침이 없으며, 하중 정의 및 조합 방법론은 아래 Table 4와 같으며, 참고문헌 (Seo et al, 2018)에서 제안하는 방법을 사용하였다.

Table 4. Summary of loading condition

Loading condition	Value	Reference
Impact load	20ton	Design Spec.
Wind load	5.6ton	Ref. 6
Wave load	8.2ton	Ref. 6
Deck load	2.0ton	Design Spec.
Acceleration - X	1.5 m/sec ²	Assumption value
Acceleration - Y	2.0 m/sec ²	Assumption value
Acceleration - Z	2.0 m/sec ²	Assumption value

평가에 적용된 하중 조건 중 한 가지인 wave load가 적용된 일례를 Fig. 4에 나타내고 있다. 모든 하중은 부재의 도심 방향에 적용되며, 횡 방향으로 작용한 경우이다. 선박의 접안 시 플랫폼 측면에 전달되는 하중에 대해서, 수선면 상단부에 하중이 적용된 경우에 대해서 Fig. 5에 나타내고 있다. 하중 조합은 브래킷별로 흡수선 위치별로 3가지를 고려하여, 발생 가능한 모든 시나리오를 반영하였다.

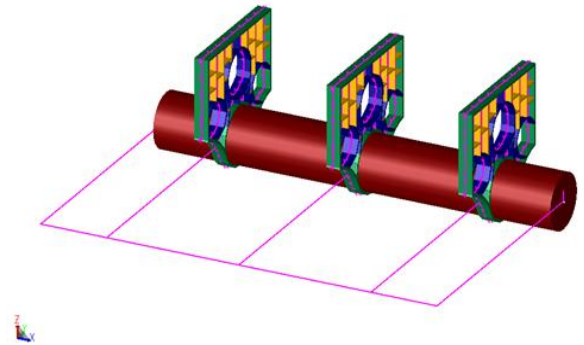


Fig. 4. Loading condition of the wave load for 500 mm pipe model.

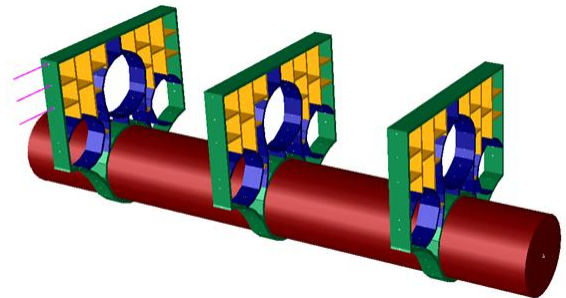


Fig. 5. Loading condition of the impact load for 500 mm pipe model.

3.2 구조해석 결과

부유식 플랫폼의 설계 시, 부재 상호 간의 구조 거동 영향을 고려하고, 설계조건에서 구한 하중(자중, 충격하중, 풍하중, 파랑 하중, 가속도) 등이 동시에 작용할 때 부유체의 구조 안전성을 평가해야 한다. 구조를 구성하고 있는 각 부재는 약천후 시, 계류 시, 접안 시의 플랫폼에 작용하는 외력에 대해서 안전성을 검토하여야 하며, 특히 약천후 시에 플랫폼에 작용하는 파력 및 풍력 등의 외력에 대하여 안전하여야 한다. 앞서 언급한 주요 구조 안전성 평가 항목에 대해 AISC 13th (2005)/API 21th (2014) 국제기준에서 제안하는 구조 안전성 평가법을 적용하였다. AISC의 경우에는 단면이 원형이 아닌 모든 경우에 적용 가능하며, API 기준은 원형 단면에 대해서만 구조 강도 평가 기준이 제시되어 있다. 부재의 단면 형상 및 세장비에 따라서 분류되며, 두가지 이상의 하

API & AISC 기준을 적용한 PolyEthylene (PE) 부유식 플랫폼의 구조 안전성 검토

중이 작용된 조합하중 상태로 구조물의 안전성을 평가하도록 구성되어 있으며, 현존하는 가장 신뢰할 만한 국제 평가 기준이다.

파랑 및 풍하중의 입사각이 90도 조건이고, 접안어선에 의한 충격력이 모델의 중앙에 있는 브래킷에 작용한 조건에서의 조합 응력 비율(최대 응력/허용응력)과 변형형상을 Fig. 6부터 Fig. 9까지 나타내고 있다. 하중투영면적이 상대적으로 큰 부력관에의 변형이 브래킷에 전달되고 있으며, 부력관이 비어있는 연결구조에서 최대 응력이 발생하고 있다.

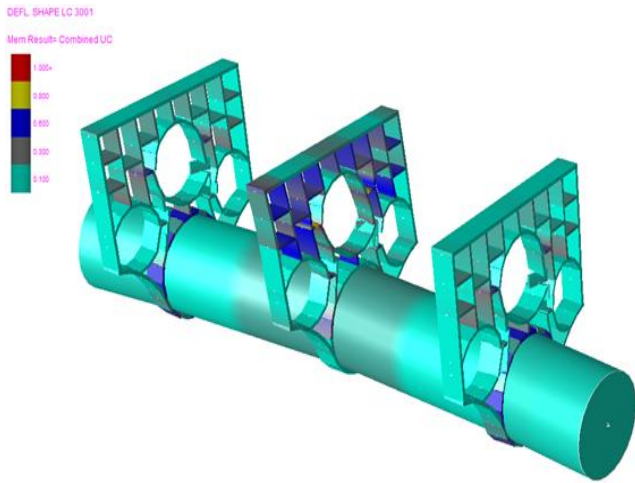


Fig. 6. Combined stress ratio and deformed shape for D-500 mm pipe under combined environmental and impact loads (ISO-view).

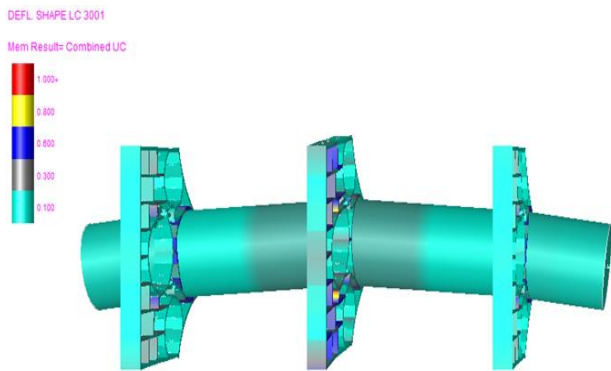


Fig. 7. Combined stress ratio and deformed shape for D-500 mm pipe under combined environmental and impact loads for D-500mm pipe (PLAN-view).

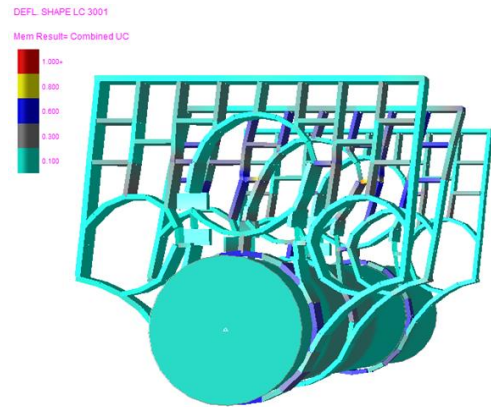


Fig. 8. Combined stress ratio and deformed shape for D-500 mm pipe under combined environmental and impact loads for D-500 mm pipe (SECTION-view).

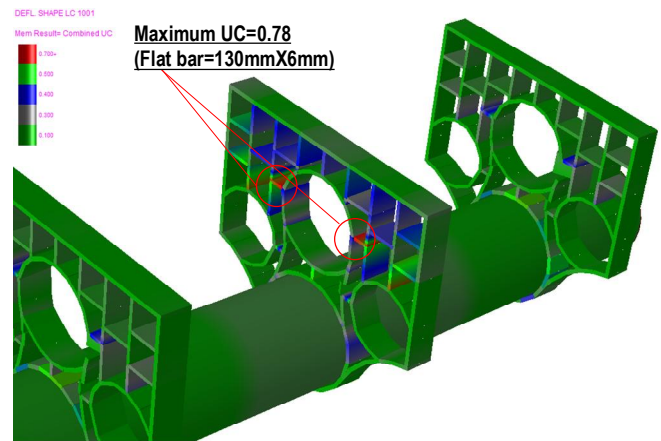


Fig. 9. Critical member of maximum stress ratio for D-500 mm pipe under combined environmental and impact loads (ISO-view).

최대조합 응력이 발생하는 부재에서의 외력 하중 조건에 의해서 발생하는 최대 응력과 허용응력을 각 하중 성분별로 정리하여 Table 5에 나타내고 있다. 횡 방향 하중 작용 때문에, 부재는 휨 거동을 하며, 최대조합 응력은 AISC 기준에 의해서, 휨 응력 성분 두 가지를 조합하여 평가하였다.

Table 5. Summary of stress results according to structural members (500 mm pipe).

Stress Components	Allowable Stress (MPa)	Actual Stress (MPa)	Units Ratio*
Axial Tension	74.85	0.67	-
Shear-Y	44.91	7.51	-
Axial compression	74.18	0.67	-
Bending-Y	112.27	-1.24	0.01
Bending-Z	112.27	-86.23	0.77
Flange shear-Z	44.91	7.51	-
Euler buckling	5822.98	0.19	-

* Units Ratio : Actual stress / Allowable stress
 → Combined unity check value = 0.01 + 0.77 = 0.78 (AISC)

앞서 언급한 최대조합 응력이 발생하는 하중 조건에서 400 mm 부력관을 사용한 경우에 조합 응력 비율(최대 응력/허용응력)과 변형형상을 Fig. 10과 11에 나타내고 있다. 개발품의 구조부재 배치 및 조합의 특이성으로 인하여, 고려된 하중 조건에 대해서 투영면적이 넓은 부력관의 변형에 의한 브래킷의 구조손상이 발생하는 특징을 충분히 설계 단계에서 반영해야만 빨리 설계안을 확정할 수 있다. 최대 응력이 발생하는 부재는 부력관 상단부를 지지하는 수직부재에서 발생하며, Table 6과 같이 전단력과 휨 응력의 조합에 의해서 응력 비율 0.55가 발생하고 있고, 여전히 허용기준 1.0에 비해서 충분히 작은 수치이다.

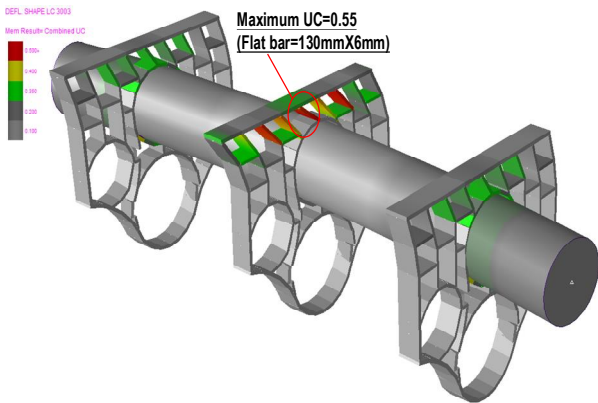
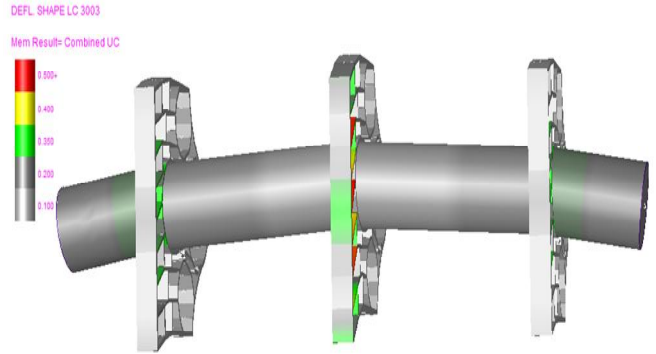
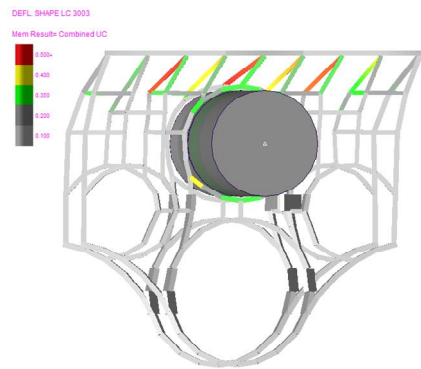


Fig. 10. Combined unity check contour and deformed shape under combined environmental and impact loads for D-400 mm pipe (ISO-view).



(a) Deformed shape (PLAN-view)



(b) Deformed shape (SECTION-view)

Fig. 11. Combined unity check contour and deformed shape under combined environmental and impact loads for D-400 mm pipe.

Table 6. Summary of stress results according to structural members (400 mm pipe)

Stress Components	Allowable Stress (MPa)	Actual Stress (MPa)	Units Ratio*
Axial Tension	140.71	1.11	-
Shear-Y	84.43	6.78	0.08
Axial compression	134.16	0.67	-
Bending-Y	209.80	-3.12	0.01
Bending-Z	211.08	-112.49	0.53
Flange shear-Z	84.43	0.74	0.01
Euler buckling	2063.47	0.19	-

* Units Ratio : Actual stress / Allowable stress
 → Combined unity check value = 0.01 + 0.01 + 0.53= 0.55 (AISC)

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구논문에서는 전장 20 m 부유식 플랫폼 개발을 위하여, 초기 설계안에 대한 구조 안전성 검토를 유한요소해석을 활용하여 분석 및 검증하였다. 관련 업계에 종사하는 엔지니어들이 더 손쉽게 하중 추정, 적용 및 해석까지를 체계적으로 따라 할 수 있도록, 중요한 평가법에 대해서 언급하였으며, 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 부유식 플랫폼 초기 설계안은 운용 중 발생 가능한 하중 조건으로 충분한 구조 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다.
- (2) 부력관의 투영면적 및 위치에 따라서 브래킷 구조부의 최대 응력은 차이가 발생하며, 500 mm 경우에서 최대조합 응력 비율 0.78을 나타냈다.
- (3) 하중 조합 시, 기본적인 환경조건이 있는 상태에서 접안어선의 충돌력이 작용하는 것이 보수적인 설계안을 도출하는데 합리적이다.
- (4) 최대하중 조건에서의 최대 응력 성분은 휨 응력과 전단응력에 기인한다.

향후 연구과제로서는 부유식 플랫폼의 표준 설계안을 설정하여, 별도의 전문적인 유한요소해석을 수행하지 않고도 설계안에 대한 구조 강도 검토가 가능한 사용자 편의 프로그램을 개발하는 것이며, 이러한 연구를 위하여 본 연구에서는 기초적인 구조성능 검토 및 절차에 대해서 검토하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 2018년도 경제협력권산업육성사업(P0002284)으로 수행된 연구결과이며, 위 기관의 지원에 감사를 표합니다.

References

[1] AISC(2005), American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, Chapter B-H, pp. 10-76.

[2] API(2014), American Petroleum Institute, API Recommended Practice 2A-WSD, Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, Chapter 4-7, pp. 5-86.

[3] Choi, J., S. Y. Kim, D. E. Kim and S. J. Jeong(2006), A

Study on Performance Analysis of a Fish Cage using Air Chamber Structure, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 1, pp. 119-127.

[4] Jung, D. H., H. J. Kim, J. H. Kim and D. S. Moon(2006), A Preliminary Experiment Study for Development of Floater of Floating Breakwater, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 141-147.

[5] Kim, T. H., C. R. Ryu and D. A. Kim(2002), Analysis on Deformation and Stiffness of Frame Structure for Fishery using Finite Element Methods, Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 307-316.

[6] Park, S. Y.(2011), Integrity Evaluation of Floating Structure, Journal of Architecture and Building Science, Vol. 55, No. 9, pp. 44-48.

[7] SACS User's manual(2018), Introduction of linear and nonlinear analysis and it's application of shell model ling Vol. 2, pp. 50-65.

[8] Seo. K. C., J. M. Oh and J. S. Park(2018), Pontoon Type Design and Structural Safety Estimation, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 24, No. 5, pp. 604-610.

[9] Wang, C. M. and Z. Y. Tay(2011), Very Large Floating Structures : Applications, Research and Development, Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 62-72.

Received : 2019. 01. 07.

Revised : 2019. 02. 22. (1st)

: 2019. 03. 04. (2nd)

Accepted : 2019. 04. 26.