

위상 최적설계를 이용한 APV Module Structure의 설계 및 구조해석

강상훈¹, 김준수¹, 박영철^{2*}

¹동아대학교 대학원 기계공학과, ²동아대학교 기계공학과

The Design and Structural Analysis of the APV Module Structure Using Topology Optimization

Sang-Hoon Kang¹, Jun-Su Kim¹, Young-Chul Park^{2*}

¹Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 논문은 해양 플랜트에 설치되는 압력 시스템 구조물의 위상 최적화를 통한 경량화 설계와 구조해석을 통한 구조안전성 평가에 대한 연구결과이다. 해양 플랜트에 설치되는 구조물은 기본적인 자중 외에도 해상에서 발생하는 풍하중 및 동하중 등에 따른 구조 설계가 매우 중요하고 구조 안전성 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 DNV 선급 규정에 따라 풍하중 및 동하중을 상황별로 분류해 이를 해석에 적용하여 수행하였다. 경량화된 형상을 얻기 위한 방법으로 위상 최적화 기법을 구조물에 적용하였다. 위상 최적화 해석을 통해 구조물에서 응력이 집중되는 부분을 확인할 수 있었다. 위상 최적화 해석을 통하여 설계 시 불필요한 요소를 제거한 형상을 얻어 보강대 형태를 가진 형태로 설계 하였다. 위상 최적화를 통해 얻은 설계 형태를 바탕으로 구조해석을 통한 안전성을 평가하여 형상에 대한 적합성을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서는 실제 시험을 통해 구조안전성 평가가 어려운 해양플랜트 구조물의 설계 및 안전성평가 방법을 제시하였다.

Abstract This paper presents the research results of a light weight through topology optimization and structural safety evaluation through structural analysis of a pressure system structure installed in an off-shore plant. Conducting a structure design according to the wind load and the dynamic load at sea in addition to a self-load and structure stability evaluation are very important for structures installed in off-shore plants. In this study, the wind and dynamic load conditions according to the DNV classification rule was applied to the analysis. The topology optimization method was applied to the structure to obtain a lightweight shape. Phase optimization analysis confirmed the stress concentration portion. Topology optimization analysis takes the shape by removing unnecessary elements in the design that have been designed to form a rib shape. Based on the analysis results about the light weight optimal shape, a safety evaluation through structural analysis and suitability of the shape was conducted. This study suggests a design and safety evaluation of an off-shore plant structure that is difficult for structural safety evaluations using an actual test.

Keywords : APV, Light weight, Off-shore plant, Structural-analysis, Topology optimization

1. 서론

APV(Air Pressure Vessels)는 해양 플랜트에 설치되는 압력저장 장치로 해양 드릴링 시스템에서 사용되는 라이저(Riser)에 압력을 공급하여 장력을 유지하기 위한

장치로 사용된다. 라이저는 플랜트에서 해저 유정까지 연결되어 있는 시추 장비로 주위의 환경하중에 따라 좌굴이 일어날 수 있다. 따라서 일정한 압력을 라이저에 주입하여 장력을 발생시켜 좌굴을 방지할 수 있도록 한다. 아래의 Fig.1은 APV 모듈이 모두 결합된 형상을 개략도

본 논문은 산업통상자원부와 산업기술진흥원의 기업연계형 연구개발 인력양성사업(과제번호: N0001592)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Chul Park(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-6991 email: parkyc67@dau.ac.kr

Received December 12, 2016

Revised (1st January 9, 2017, 2nd February 13, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

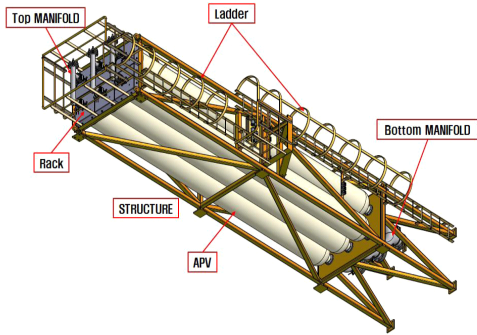


Fig. 1. Schematic Illustration of APV

로 나타내었다. APV 모듈은 크게 4가지로 나뉜다. 압력을 저장하는 압력용기(Vessel), 환경하중으로부터 압력용기를 보호하는 구조물(Structure), 압력용기에 연결되어 이송통로 역할을 하는 상하부 매니폴드(Top&Bottom Manifold), 상판역할을 하는 랙(Rack)으로 나누어진다.

이미 국내에서는 해양 구조물에 대한 연구는 해상풍력 콘크리트 지지구조물의 해양외력 안전성 평가(Jeong, 2013), 사고하중을 받는 해양구조물의 구조 안전성 평가(Kim, 2010), 해저 파이프 설치 및 해양 구조물 lifting crane 선박의 구조안전성 평가(Cha, 2011), 와류 유발 진동에 의한 해양 구조물 안전성 평가(You, 2015), 초대형 해상구조물의 붕괴거동 및 최종강도 특성(Ko, 2008)으로 여러 차례 진행된 바 있으나, DNV규정을 활용하여 위상최적설계로 설계를 하고 규정에 따른 구조 안전성을 평가하여 구조물 형상을 개발하는 과정은 거의 전무한 것으로 보인다. 본 논문에서는 최근의 해양플랜트 기자재의 국산화 개발 동향에 따라 해양플랜트 구조물에 대하여 DNV규정에 따른 위상최적화를 통해 해양 구조물을 설계하여 안전성을 평가하였다.

본 논문에서는 APV 구조물을 대상으로 밀도 법에 의한 위상최적 설계 기법을 적용하여 최적의 중량을 가질 수 있는 구조물 형태를 제안하였고, 구조해석을 통해 해상에서 발생을 DNV에서 규정한 바람에 의한 풍하중과 운용되는 구조물에 의해 발생하는 동하중을 중점적으로 적용하여 응력을 검토함으로써, 구조물의 전반적인 안전성에 대해 신뢰성 있는 평가를 하였다. 특히, 매우 거대한 해양플랜트의 구조 특성상 실제 제품의 시험 통한 안전성평가는 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 구조해석을 통해 구조물의 안전성을 검토하였다. 이러한 결과를 바탕으로 새로운 해양플랜트 구조물 개발 시 제안된 해

석 기법을 활용할 수 있는 기초설계 방안을 제시하고자 한다.[1]

2. 경량화설계

2.1 위상 최적설계

APV 구조물은 해양 드릴링 장비의 구조 지지대로서 APV 시스템 전체에 대한 환경하중으로부터 보호하고 지지하는 역할을 한다. 해양 드릴링 시스템에서의 하중에 대한 구조물의 변형은 드릴링 시스템의 정확성에 큰 영향을 준다. 하지만 구조물이 너무 높은 강도를 가지도록 과잉설계 시 중량이 증가하게 되고 이로 인하여 불필요한 형상을 가지는 등 문제점이 생기게 되므로, 이를 해결하기 위한 방법으로서 위상 최적화 기법을 이용하여 APV 구조물의 경량화 형상을 얻고자 한다. 위상 최적화는 Hyper Works Optistruct를 이용하여 해석을 수행하였다.[2]

2.1.1 위상 최적설계의 개념

위상 최적설계는 구조물에 대한 최적설계의 한 분야로서 구조물 내의 구멍의 개수와 위치, 영역간의 연결과 같은 형상결정의 문제로 정의될 수 있다.[3] 경량화를 위하여 최적화 문제에서 목적함수는 중량의 최소화로 정의하고 제한조건을 정의할 때는 등가제한조건과 비등가 제한조건으로 구분이 된다. 본 논문에서 APV 구조물의 경량화 형상을 얻기 위하여 위상 최적화 개념을 바탕으로 최적화를 수행하였다.[4]

2.1.2 이론적 배경

위상 최적설계는 재료를 배치하여 최대의 구조 강성을 갖도록 하는 것이다. 따라서 해당 구조물에 대한 컴플라이언스 지수(Compliance Index)만을 최소화하여 목표 질량을 감소시킨다. 식 (1), (2)는 컴플라이언스 지수의 계산과정을 나타내었다.

$$S = \sum W_i C_i \quad (1)$$

여기서, W_i : i 의 무게, C_i : i 의 컴플라이언스

$$C_i = U_i^T K_i U_i \quad (2)$$

여기서, U_i : i 의 변형 벡터, K_i : i 의 강성행렬

Fig. 2는 위상 최적설계의 이론을 도식적으로 나타낸 것이다. 설계 영역 Ω 에서 최적의 상태로 재료를 재분배하여 변형을 에너지를 최소로 가지면서 설정된 구속조건을 만족하는 물질 분포 함수 $E_{ijkl}(x)$ 를 구한다. 즉, 강성을 최대화 시키는 물질 분포 함수 $E_{ijkl}(x)$ 를 찾아낸다. 위상 최적설계는 목적함수를 최소화 하는 변형에너지의 문제로 정의되며, 구속조건은 초기물질의 밀도가 유지되는 것으로 정의된다.

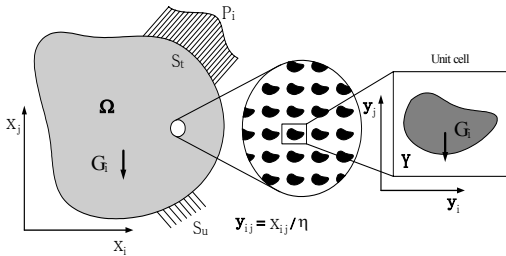


Fig. 2. Schematic Illustration of Topology Optimization

본 연구에서의 목적은 APV 구조물에 필요한 강건한 형상을 얻는 것 이므로 탄성계수 E 와 밀도 ρ 는 밀도 공식 (3)과 같이 정의되며, 밀도가 0일 경우 해당 요소의 탄성계수는 0이 되고, 밀도가 1일 경우 탄성계수는 원래 재료의 것을 가지게 된다. 여기서 밀도는 커질수록 탄성계수도 증가하고 변형이 쉬우며, 밀도가 0이라는 것은 해당 요소가 아무것도 없는 빈 공간이라는 것을 의미한다.

$$\frac{E^e}{E^0} = (\rho^e)^n \quad (3)$$

여기서, ρ^e : 유한요소 밀도

2.1.3 경계조건

위상 최적설계를 위해 Fig. 3와 같이 경계조건을 부여하였다. A에서 D까지는 경계조건으로 각각의 조건을 부여하였다. A에 해당하는 조건은 구조물의 상판에 작용하는 분포하중으로 작업자가 작업 중에 일정 하중에 대한 Deck Load로서 -Y축 방향으로 0.003 [MPa], B는 바람에 의해 작용하는 하중으로 'DNV-OS-E101, Drilling Plant(2009)'규정에 명기된 해수면으로부터 10 [m]위치에 대한 100년 주기를 가지는 1분 평균 풍속인 70 [m/s]로 작용하는 바람에 의해 작용하는 압력을 가정하여 +X 방향으로 0.00314 [MPa], C는 유체가 저장되어있는 상

태의 압력용기의 자중 4 [Ton]을 나타내며, D는 바닥면에 고정되어 있는 상태의 조건을 나타내었다.

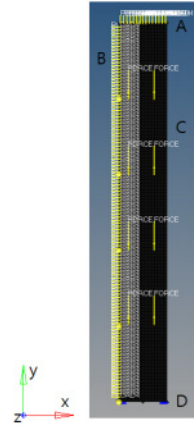


Fig. 3. Boundary Condition of Structure

2.1.4 초기해석

위상 최적설계를 통해 최적의 형상을 찾기에 앞서 대략적인 구조물의 형상을 예측하여 유한요소 모델로 나타내었다. Fig. 4과 같이 초기 해석용 모델의 유한요소 모델을 설계 및 비 설계 영역을 나누지 않고 나타내었다. 모델은 구조물의 형태를 Shell 모델로 생성하였다.



Fig. 4. Finite Element Model of Structure

2.1.5 초기해석 결과

경계조건에 따라 초기모델에 대하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 대략적인 수렴된 형상을 찾기 위하여 Iteration에 따라 40회에서 60회까지 나타내었다. 이는 최적형상을 찾기 위하여 형상을 반복하여 바꾼

횡수를 나타낸 것으로 최적형상은 Iteration 60회에서 가장 수렴된 결과로 판단하였다. 파랑색으로 가까울수록 밀도의 분포가 0으로 체적을 유지할 필요가 없다고 판단할 수 있고, 빨간색으로 갈수록 응력이 집중되는 부위로서 체적을 유지해야 하는 영역으로 판단할 수 있다. 최적형상으로 결정한 Fig. 5의 (c)와 같이 최 하단 고정부에서 상단부로 2갈래형상으로 만들어 지고 위로가면서 1갈래로 나누어지는 형상으로 구성되는 것을 파악하였다.

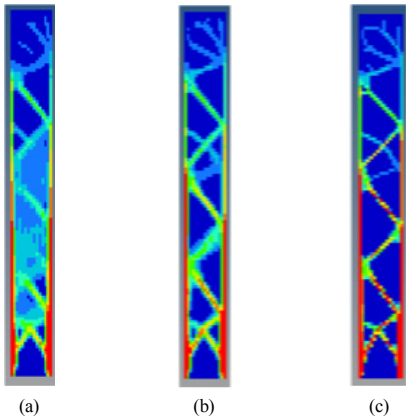


Fig. 5. Initial Results of Topology Optimization
(a) Iteration 40 (b) Iteration 50 (c) Iteration 60

2.1.6 최종해석

초기모델에 대한 해석한 결과를 바탕으로 Fig. 6와 같이 5층 구조의 유한요소 모델을 생성하였다. 최종 모델에서 형상의 변화가 없는 비 설계 영역은 양쪽옆면 및 5층의 구조를 나누는 판으로 지정하고 최상단 상판은 구



Fig. 6. Finite Element Model of Structure

조상 필요한 부분이므로 포함하였다. 나머지 영역은 설계영역으로 위상 최적화를 통해 형상의 변화가 생기는 부분을 나타내었다[5].

2.1.7 위상 최적화 결과

최종 모델의 형상에 대해 초기해석과 동일한 경계조건을 부여하여 위상 최적화를 수행하였다. Iteration 72회를 거쳐 Fig. 7과 같은 최적화 형상이 도출되었다. 초기모델에 대한 해석결과와 비슷한 형상이 도출되었다. 하중에 따른 밀도분포를 보게 되면 최 하층부는 고정되어 응력을 많이 받는 부위기 때문에 양쪽에서 지지대가 고정해줘야 하며, 2~5층에서는 지그재그형태로 대각선 방향의 지지대가 하나만 있어도 하중을 충분히 견딜 수 있는 형상으로 판단된다.

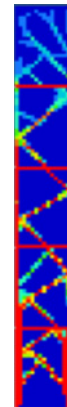


Fig. 7. Final Result of Topology Optimization

2.2 형상 설계

최종형상에 대한 결과를 반영하여 먼저 2D형상으로 만들고 이를 토대로 3D형상으로 구체화하였다. Fig. 8의 (a)는 2D형상을 나타내며 (b)는 구체화된 3D형상을 나타낸다. 3D형상은 2D형상을 구체화 한 형상이며, 가장 응력이 많이 집중되는 최하단부에 보강대가 2개가 연결되고 그 위로 하나씩 연결되어 지지하는 역할을 한다.

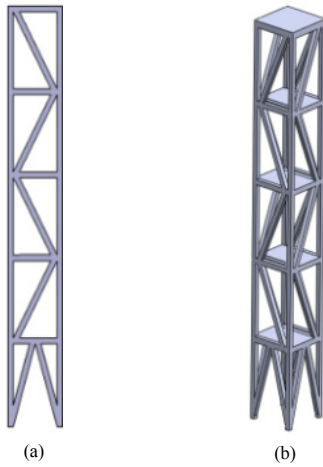


Fig. 8. 2D&3D Shape of APV Structure

3. 구조안전성 검토

APV 모듈이 결합된 상태에서의 주어진 하중조건은 풍하중과 해상에서의 동하중 조건을 부여하였다. 전체 구조물에 대한 응력해석을 상용 소프트웨어인 "ANSYS Structure"를 이용해 해석을 수행하였다. 구조해석에 적용되는 재료는 SS400으로 물성은 Table 1에 나타내었다. 하지만 'DNV-OS-C201(2012), Structural Design of Off-shore Units(WSD Method)'에서 정의된 재료의 항복 값에 따라 최소 항복 응력은 235 [MPa]을 가진다.

Table 1. Material Property of Structure

| | Data |
|------------------|----------------------------|
| Material | SS400 |
| Density | 7,850 [kg/m ³] |
| Tensile strength | Min. 410 [MPa] |
| Yield strength | Min. 235 [MPa] |

3.1 APV 구조물 형상

위상 최적화를 통해 구체화한 APV 구조물에 압력용기와 상관인 랙을 결합하여 응력해석을 수행하고자 한다. Fig. 9의 (a)는 구조물을 나타내고 (b)는 압력용기와 상관인 랙을 결합한 모습을 나타낸다.

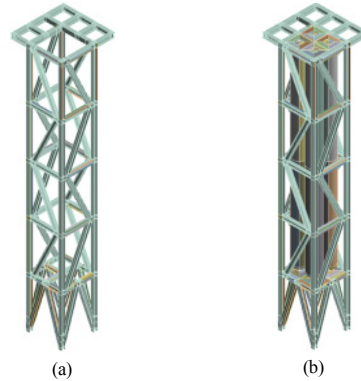


Fig. 9. Models of APV Structure

3.2 유한요소모델 생성

APV 모듈의 응력해석을 위하여 유한요소모델을 구성하였다. Fig. 10의 (a)는 압력용기와 랙으로 Solid Element로 격자를 구성하였으며, (b)의 Channel과 H-Beam으로 이루어진 구조물은 Shell Element 격자로 구성하였고 (c)는 두 개의 모델이 결합된 형태의 유한요소 모델을 나타내었다. Shell 요소는 각 노드에서 x, y, z 축 방향의 병진과 x, y, z 축 방향의 회전이 가능한 6자유도를 가지는 6-Node 요소이다. Shell 요소는 얇은 두께를 가지는 형상에 적합하며 유한요소를 생성함에 있어서 Solid 모델보다 간단하고 모델링이 간단한 장점을 가진다. 유한요소 모델에서 절점 수는 157,150 개, 요소 수는 134,658 개로 구성하였다. 압력용기와 랙 그리고 구조물의 각 유한요소모델 정보는 Table. 2에 나타내었다.

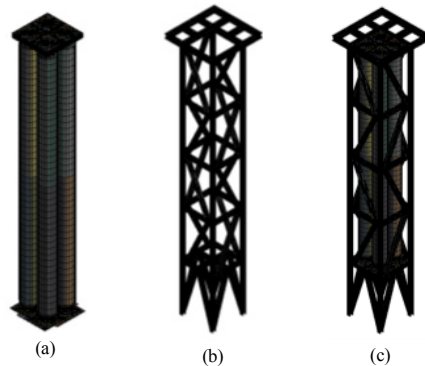


Fig. 10. Finite Element Model of APV Structure

Table 2. Finite Element Data of Structure

| | Type | Nodes | Elements |
|----------------|------------|---------|----------|
| Vessels & Rack | Hexahedral | 53,456 | 34,426 |
| Structure | Hexahedral | 103,694 | 100,232 |

3.3 경계조건

APV 모듈의 구조 응력해석을 위해 하중조건을 전체 모듈이 결합된 모델에 적용하였다. 적용 하중은 Fig. 11에 나타내었으며, APV 모듈의 자중인 Deck load를 -Y 방향으로 0.003 [MPa] Pressure Vessles 4 [Ton]을 부여하였고, DNV 선급 규정에 따라 풍하중과 동하중으로 나누어 적용하였다. 해상에서 발생하는 풍하중은 규정에 따라 해수면으로부터 10 [m]위치에 대한 100년 주기에 따라 가지는 1분 평균 풍속인 70 [m/s]를 식 (4), (5)와 같이 등가 압력으로 환산하여 3167.85 [Pa]을 적용하였다.[6]

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{1}{2} \rho_a U_{T,z}^2 & (4) \\
 &= \frac{1}{2} \times 1.293 \text{ [kg/m}^3\text{]} \times (70 \text{ [m/s]})^2 \\
 &= 3167.85 \text{ [kg/m}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

여기서, ρ_a : 공기의 밀도 (1.293 [kg/m³]),
 $U_{T,z}$: 평균 바람속도(70 [m/s])

$$\begin{aligned}
 p &= \pm C_p q \\
 &= \pm 1.0 \times 3167.85 \text{ [kg/m}^2\text{]} = 3167.85 \text{ [Pa]} & (5)
 \end{aligned}$$

여기서, C_p : 압력 계수(1.0)

구조물의 X, Y, Z축으로 각각 작용하는 동하중은 해상에서 운용되는 선박 또는 해양 플랜트에서 발생된다. 동하중은 모든 구조물들에 영향을 주게 되며, 이에 대한 하중조건은 풍하중과 같이 DNV규정에 의해 명시되어 있다. ‘DNV-OS-E101, Drilling Plant(2009)’ 규정에 따라 극악의 조건인 Maximum Pitch Acceleration 0.35g, Maximum Roll Acceleration 0.35g, Maximum Heave Acceleration 1.3g를 적용해 동하중을 적용하였다. 여기서 g는 중력가속도를 뜻한다. Table 3은 풍하중 및 동하중을 X, Y, Z축 방향에 따라 각 각 조합하여 Case 2-1부터 Case3-8까지 16가지로 상황별로 분류하여 나타내었다. Case 1-1은 동하중이 작용하지 않는 정적인 상태를 나타내었다.

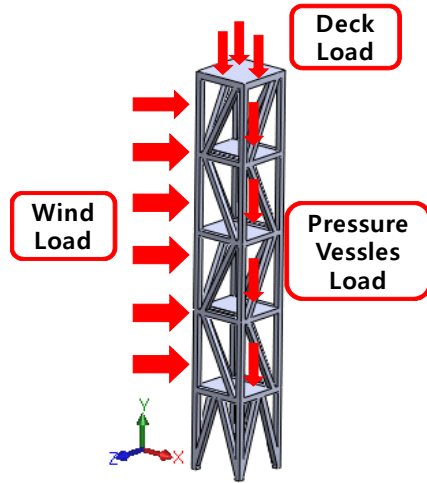


Fig. 11. Schematic Illustration of Boundary Condition

Table 3. Boundary Condition for Structure Analysis

| Case | Wind Load [kPa] | | | Acceleration [m/s] | | |
|----------|-----------------|------|-------|--------------------|-------|-------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| Case 1-1 | 3.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.81 | 0.00 |
| Case 2-1 | 3.17 | 0.00 | 0.00 | 3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 2-2 | 3.17 | 0.00 | 0.00 | 3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 2-3 | 3.17 | 0.00 | 0.00 | -3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 2-4 | 3.17 | 0.00 | 0.00 | -3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 2-5 | -3.17 | 0.00 | 0.00 | 3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 2-6 | -3.17 | 0.00 | 0.00 | 3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 2-7 | -3.17 | 0.00 | 0.00 | -3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 2-8 | -3.17 | 0.00 | 0.00 | -3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 3-1 | 0.00 | 0.00 | 3.17 | 3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 3-2 | 0.00 | 0.00 | 3.17 | 3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 3-3 | 0.00 | 0.00 | 3.17 | -3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 3-4 | 0.00 | 0.00 | 3.17 | -3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 3-5 | 0.00 | 0.00 | -3.17 | 3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 3-6 | 0.00 | 0.00 | -3.17 | 3.43 | 12.75 | -3.43 |
| Case 3-7 | 0.00 | 0.00 | -3.17 | -3.43 | 12.75 | 3.43 |
| Case 3-8 | 0.00 | 0.00 | -3.17 | -3.43 | 12.75 | -3.43 |

3.4 구조해석 결과 및 검토

APV Structure에 대하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석 결과 발생한 응력을 압력용기와 랙으로 나타내었

고, Table 4에 17가지 하중에 따른 Case별로 분류하여 나타내었다. Fig. 12의 (a)에는 -X방향의 풍하중과 +X방향 +Y방향 -Z방향에서 작용하는 동하중을 나타내는 Case 2-6의 해석결과를 나타내었고, 이때 압력용기와 랙이 결합되는 하단부에서 최대 응력인 134.95 [MPa]이 발생 하였다. (b)는 +X방향의 풍하중과 -X방향 +Y방향 +Z방향에서 작용하는 동하중을 나타내는 Case 2-3의 해석결과를 나타내었고, 이때 최 하단 지지부에서 181.25 [MPa]이 발생 하였다.

응력분포를 살펴봤을 때 상단으로 갈수록 응력이 낮게 나타났고 응력특이사항은 나타나지 않았다. 또한, 구조안전성 측면에서 살펴봤을 때 압력용기와 랙에서 최대 응력 134.95 [MPa], 구조물에서 181.25 [MPa]이 발생하여 소재의 항복강도 235 [MPa]보다 각각 100.05 [MPa], 53.75 [MPa]의 차이를 보였고, 각각 1.74, 1.30의 안전율을 가진다. 소재의 강도에 대한 최대 발생 응력의 안전율을 Table 5에 나타내었다. [7]

Table 4. Results of Structure Analysis

| Case | Max. Equivalent Stress [MPa] | |
|----------|------------------------------|-----------|
| | Vessel & Rack | Structure |
| Case 1-1 | 33.99 | 32.73 |
| Case 2-1 | 74.41 | 70.98 |
| Case 2-2 | 81.33 | 78.72 |
| Case 2-3 | 132.88 | 181.25 |
| Case 2-4 | 134.70 | 171.71 |
| Case 2-5 | 134.71 | 174.07 |
| Case 2-6 | 134.95 | 179.27 |
| Case 2-7 | 80.21 | 70.02 |
| Case 2-8 | 77.77 | 77.79 |
| Case 3-1 | 94.64 | 99.32 |
| Case 3-2 | 118.24 | 152.21 |
| Case 3-3 | 90.58 | 102.24 |
| Case 3-4 | 113.22 | 149.96 |
| Case 3-5 | 116.18 | 150.85 |
| Case 3-6 | 92.09 | 100.85 |
| Case 3-7 | 116.29 | 153.89 |
| Case 3-8 | 92.95 | 96.60 |

Table 5. Safety Factor of Structure Analysis

| Parts | Safety Factor |
|---------------|---------------|
| Vessel & Rack | 1.74 |
| Structure | 1.30 |

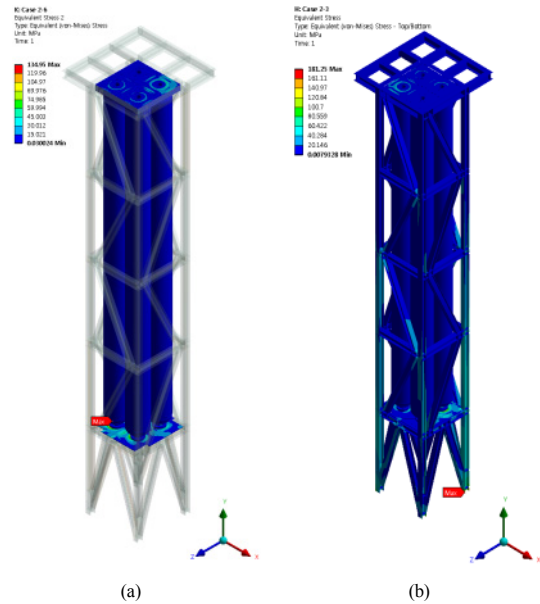


Fig. 12. Stress Distribution for the used Structure (Maximum Stress)

3.5 구조해석 결과 비교 및 검증

앞서 안전하다고 판단된 APV Structure의 구조해석 결과에 대하여 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 SACS를 이용하여 구조해석을 수행하였다. SACS는 해양 구조물 전용 해석 프로그램으로 본 연구의 해석대상인 APV Structure와 같은 구조물에 대하여 신뢰도 높은 안전성 평가가 가능하다. ‘API RP 2A-WSD Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms (21th Ed.2005)’에 의거하여 Unity Check를 수행하였다. Unity Check는 안전율과 유사한 식으로 나타내지며 식(6)과 같이 나타낸다. 이때 Unity Check의 값은 1미만일 때 안전성이 확보되었다고 판단하고 1이상의 값은 불안정한 상태를 나타낸다.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{b,c}}{F_b} < 1.0$$

$$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{b,t}}{F_b} < 1.0 \quad (6)$$

여기서, f_a : 축 응력, $f_{b,c}$: 최대 압축응력, $f_{b,t}$: 최대 인장 응력, F_a : 허용 압축응력, F_b : 허용 굽힘 모멘트, F_t : 허용 인장응력

Table. 6에는 하중에 따라 Unity Check의 결과를 나타낸 것으로 최댓값은 Case 2-6에서 0.92로 산출되었고 Fig. 13는 Case2-6을 나타낸 그림이다. 앞서 ANSYS를 이용한 해석결과와 SASC의 해석결과 모두 주어진 하중에 대해 충분한 안전성을 나타낸 것을 확인할 수 있었다. 또한, 해양구조물 특성상 시험을 통해 검증이 어려운 APV Structure에 대하여 두 해석결과를 비교함으로써 해석결과와의 신뢰도를 확보하였다.

Table 6. Unity Check Results of Structure Analysis

| Case | Max. Unity of Member |
|----------|----------------------|
| Case 1-1 | 0.24 |
| Case 2-1 | 0.31 |
| Case 2-2 | 0.44 |
| Case 2-3 | 0.87 |
| Case 2-4 | 0.51 |
| Case 2-5 | 0.75 |
| Case 2-6 | 0.92 |
| Case 2-7 | 0.82 |
| Case 2-8 | 0.42 |
| Case 3-1 | 0.63 |
| Case 3-2 | 0.49 |
| Case 3-3 | 0.73 |
| Case 3-4 | 0.35 |
| Case 3-5 | 0.35 |
| Case 3-6 | 0.23 |
| Case 3-7 | 0.43 |
| Case 3-8 | 0.22 |

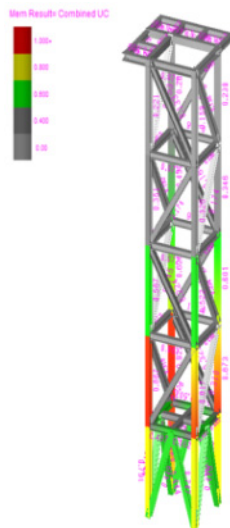


Fig. 13. Stress Distribution for the used Structure (Maximum Unity Check)

4. 결론

본 연구에서는 해양 드릴링 시스템 라이저 텐서닝 (Riser Tensioning) 장치인 APV 시스템중 구조물에 대한 경량화를 위해 위상 최적화를 이용하여 설계하였고, 구조 안전성을 고려할 때 정적인 압력이 아닌 동하중과 풍하중에 의해 발생하는 응력을 구해 안전성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) APV 구조물의 경량화 설계를 위하여 위상 최적화를 거쳐 APV 구조물의 응력집중 부위에 따른 경량화 형상을 찾는 밀도 법에 따른 위상최적화 방법을 제시하였다.
- 2) 위상 최적화 해석 결과 응력이 하단으로 갈수록 집중되는 것을 알 수 있었으며 이를 반영하여 하단부에 높은 강도를 가질 수 있는 형상으로 설계되었다.
- 3) 구체화된 3D형상으로 구조해석 수행 결과 최대 발생응력은 구조물이 고정되어 있는 바닥면에서 181.25 [MPa]이 발생하였다. 이는 소재의 항복강도 235 [MPa]와 비교해 각각 53.75 [MPa] 낮은 응력이 발생한다. 이는 설계에 대한 환경하중 작용을 평가하였을 때 접합되어있는 고정부에 응력이 집중되며, 고정부를 제외한 부분에서는 매우 낮은 응력 값을 가진다. 고정부 형상의 두께는 두꺼울수록 낮은 응력을 가질 것으로 판단되지만 본 논문에서 상세설계 된 형상은 안전성 측면에서 충분한 두께를 가진다고 판단된다.
- 4) 본 연구의 구조해석에 적용한 DNV규정에 따른 하중조건은 극한상황의 조건으로, 규정에 따라 평가한 APV 구조물의 응력을 소재의 항복강도와 비교했을 때 압력용기과 랙에서 1.74, 구조물에서 1.3로서 강도 적으로 안전한 것을 확인하였다. 또한, Unity Check 최댓값이 1이하의 값인 0.92로 산출되어 구조안전성을 확인하고 결과비교를 통해 신뢰성을 확보하였다. 그 결과 구조물의 운용 시 구조물의 파단현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시한 설계 과정은 실제 실험을 통한 안전성 평가가 어려운 거대 해양플랜트 시스템의 기초 형상 설계 자료로서 활용될 수 있는 범용성을 가진다고 판단되어 추후 유사한 형태의 설계 시 반복재현성을 가져 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Vanderplaats Research&Development, Inc, "Design Optimization Tools", 2001.
- [2] Altair, "Hyperworks 9.0", 1996.
- [3] B. Y. Lee, "Shape Optimal Design to Minimize the Weight of a Mask-Frame for OLED Vapor Deposition", Journal of the Korea Academia-Industrial, 14, 10, pp. 4685-4693, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.4685>
- [4] H. S. Kim, Y. S. Park, M. K. Yang, M. H. Lee, J. Y. Kim, "Initial Shape Design of Space Truss Structure using Density Method", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, 10, 4, pp. 59-66, 2010.
- [5] M. P. Bendsoe, "Optimization of Structural Topology, Shape and Material", Springer, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03115-5>
- [6] K. C. Ro, "An Evaluation of the Structural Stability of a Clip Type Prefabricated Greenhouse under Strong Wind and Heavy Snow Conditions", Journal of the Korea Academia-Industrial, 15, 6, pp. 3423-3428, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.6.3423>
- [7] Y. C. Ryu, Y. C. Park, "Study on Numerical Analysis for Structural Safety Verification of Overflow Preventer System for LNG Tank", Journal of the Korea Academia-Industrial, 15, 4, pp. 1801-1806, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.4.1801>

강 상 훈(Sang-Hoon Kang)

[정회원]



- 2013년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계 공학과 (석사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : (주)엔케이 선입연구원

<관심분야>

구조설계, 조선해양

김 준 수(Jun-Su Kim)

[정회원]



- 2015년 8월 : 동아대학교 기계공학과(학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 대학원(석사과정)

<관심분야>

금속재료, 구조설계

박 영 철(Young-Chul Park)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 금속공학과 대학원(석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원(박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

금속재료, 구조설계