

천연 액화 가스 운반선의 펌프타워 해석 시스템 개발

이광민*, 박재형[†]*, 한성곤*, 허주호*

대우조선해양 선박해양기술연구소*

A Development of LNG Pump Tower Analysis System

Kwang Min Lee*, Jae Hyung Park[†]*, Sung Kon Han and Joo Ho Heo*

Ship & Ocean R&D Institute, DSME Co., LTD. *

Abstract

The purpose of this study is to develop a structural analysis system of LNG pump tower structure. The system affords to build optimized finite element model and analysis procedure of the pump tower structure. The pump tower structure is one of the most important components of LNG (liquefied natural gas) carriers. The pump tower structure is subject to sloshing load of LNG induced by ship motion depending on filling ratio. Three types of loading components, which are thermal, inertia and self-gravity are considered in the system. All these design and analysis procedures are embedded in to the analysis system successfully.

※Keywords: Pump tower structure(펌프타워구조), Sloshing load(슬로싱 하중), Thermal Stress(열응력), Self-gravity (자중), Inertia force (관성력)

1. 서론

펌프타워는 LNG 선박의 화물창내 액화가스의 loading/unloading 을 위한 중요한 구조물 중의 하나이다. 선박의 화물창 내에는 LNG 가 액화되어 있기 때문에 유체가 출렁거리는 현상 즉, 슬로싱(sloshing) 하중에 의해 LNG 탱크 내부에 있는 펌프 타워에 큰 충격 하중이 가해지게 된다. 슬로싱 하중에 의한 펌프 타워의 손상여부는 LNG 선박의

구조 안전성 평가의 중요한 문제 중 하나이다. 따라서, 슬로싱 하중을 펌프타워에 적용시켜 정확한 강도평가가 이루어져야 한다.

전산유체해석(CFD)을 통해 속도와 가속도 형태로 나온 결과를 모리슨 식(Morrison's Equation)을 통하여 슬로싱 하중을 계산하였다. 또한, 펌프 타워 자체의 중량을 고려하고 LNG 가스가 영하의 온도를 유지하므로 온도 구배에 의한 열하중도 고려하여야 한다. 이러한 하중들을 범용 유한요소 해석 프로그램인 상용코드를 이용하여 구조해석을 수행하고 각 부재에 걸리는 응력, 모멘트, 변위 결

†교신저자: jhpark@dsme.co.kr, 010-4753-5531

과 등을 API Unity check code 를 통하여 member 의 강도 계산과 조인트(Joint)에서의 Punching shear unity 값도 검토하여 그 건전성 여부를 판단 할 수 있도록 하였다. 위에서 기술한 모든 과정을 상용 코드의 GUI(Graphic User Interface)가 아닌 새로운 형태의 GUI 를 개발하였다. 여기서 새로운 GUI 펌프 타워 전용 해석 툴(tool)은 Tcl/Tk 언어 로 개발되었고, GUI 사용 시 실행되는 파일들은 APDL(ANSYS Parametric Design Language)로 작성되었다. 펌프타워의 구조해석을 위한 최적모델 및 프로세스 GUI 를 개발하였다.

2. 펌프 타워 구조

2.1. 펌프 타워의 개요

LNG Pump Tower 는 Fig. 1 과 같은 Membrane 형 LNG 선박의 탱크 내부에 설치되며, Fig. 2 는 LNG 탱크를 확대하여 본 모습이다.

2.2. 펌프 타워의 구성

펌프타워는 원형단면을 갖는 emergency pipe, portside discharge pipe, starboard discharge

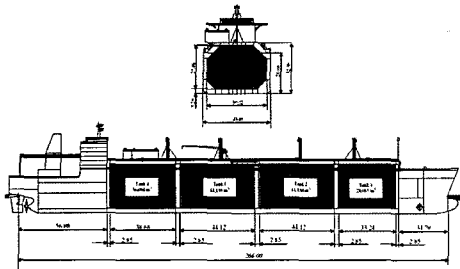


Fig. 1 General design of LNG carrier

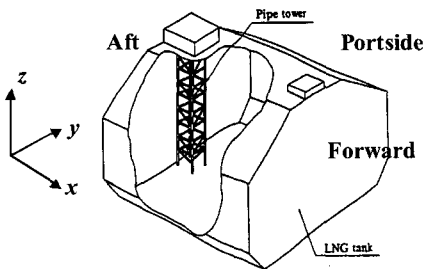


Fig. 2 Pump tower in LNG tank

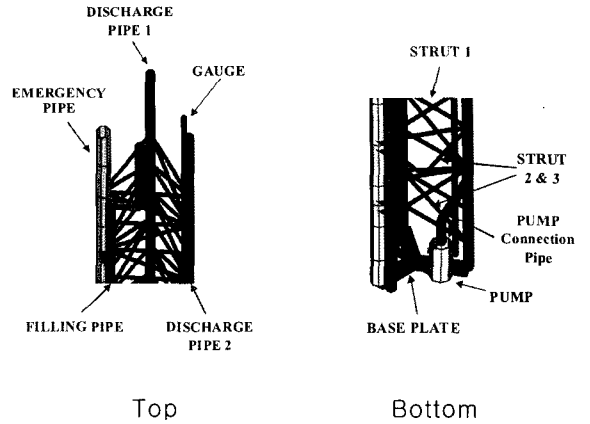


Fig. 3 Top and bottom structures for pump tower

pipe, filling pipe, gauge pipe, 세 가지 종류의 strut, H 형단면을 갖는 펌프 연결 파이프, base plate 등으로 구성되어 있다. Fig. 3 에서는 위의 부재들로 이루어진 펌프타워의 전체 구조 중 상부 및 하부를 자세히 보여주고 있다.

2.3. Deck 의 형태

Pump tower 의 상부 구조 deck type 에는 Fig. 4 의 type 1 과 type 2 와 같은 두 가지 형태가 있다. 실제로 pump tower 의 전체길이는 동일하게 유지되고 유한요소해석(Finite Element Analysis) 시에 다른 경계조건 형태로 고려된다.

3. 유한 요소 해석

3.1. 펌프 타워의 모델링 개요

Pump Tower 의 유한요소해석을 위해 6 개의 자유도를 갖는 Beam element 를 사용하였다. 6 개의 자유도를 갖고 모드 해석 시 부가수 질량 (added mass)을 고려할 수 있다는 특징이 있고 실제의 형상을 그대로 구현하여 볼 수 있다. Input data로는 section properties 를 고려하여 주면 되고, 변위, 응력, 모멘트, 반력등이 계산되도록 만들어 졌다.

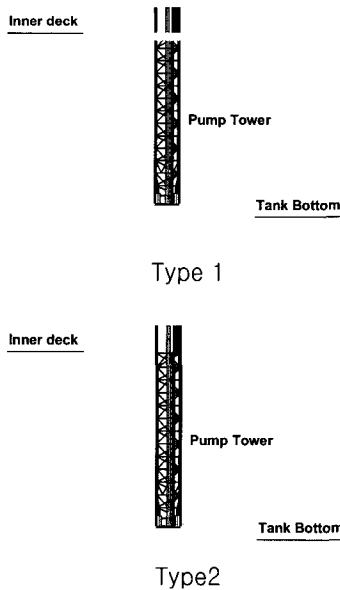


Fig. 4 Inner deck types

3.2 최적 모델 및 프로세스

펌프타워의 구조해석을 수행하기 위한 최적의 모델과 프로세스를 개발하기 위하여 규칙적으로 절점과 요소의 번호를 부여하였다. 하중이, 가해진 후 절점에 따른 하중 크기를 확인할 때 어느 영역에 하중이 크게 작용하는지 혹은 작게 작용하는 지를, 또한 해석이 완료된 후 결과를 검토할 때 어느 부재 또는 조인트에서 문제가 발생했는지 혹은 문제가 없는지를 쉽게 판단할 수 있게 된다.

이에 따라 절점의 생성 시 번호부여는 원점을 기준으로 상부방향으로 증가시키는 것을 원칙으로 하였고, 각각 Pipe 마다 고유한 번호 대를 선정하였다. 반복 스펀이 10 개일 경우를 기준으로 하였다.

3.3 Beam Section

개발된 해석 시스템의 Section data 를 Pipe GUI 에서 펌프에 관하여 입력되는 값은 펌프의 외경, 높이, 무게이다. 이 항목을 Fig. 5에서의 식을 통하여 계산되어 펌프의 중공원형 단면의 두께가 결정된다. 프로그램상에서 입력 시에 원형단면의 외경과

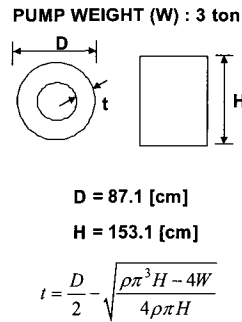


Fig. 5 Section properties

Table 1 Material properties of SUS304

Young' s Modulus	1968059.6 [kgf/cm ²]	
Poisson' s ratio	0.3	
Density	0.0078 [kg/ cm ³]	
Thermal Expansion Coefficient	Temp.[° C]	Value [cm/cm/ ° C]
	-185	13.3 x 10 ⁻⁶
	-180	13.9 x 10 ⁻⁶
	-70	14.8 x 10 ⁻⁶
	-20	15.7 x 10 ⁻⁶
	0	17.2 x 10 ⁻⁶
	100	17.2 x 10 ⁻⁶

두께가 입력되어진다. 펌프와 portside, starboard discharge pipe 와 연결되는 pipe 가 pump connection pipe 이고 펌프타워의 하부에 base plate 와 펌프가 연결되는 pipe 는 base plate 의 연결 pipe 이다. Base plate 의 유한 요소 모델링은 다른 부재들과 마찬가지로 beam model 로 고려하였다.

3.4 Material Property

펌프타워에 적용되는 재료 물성치는 SUS 304로서 Table 1에 나타내었다. 펌프타워가 섭씨 - 163°C 의 LNG에 잠겨있기 때문에 온도 차에 의한 수축, 팽창이 일어나게 된다. 이를 고려하기 위하여 온도에 따른 열팽창계수를 입력하였다. Reference 온도는 섭씨 20도이다.

3.5 하중 계산

펌프타워에 작용하는 하중은 4 가지로 분류할 수 있다. 먼저 선박이 운행할 때 탱크 내에 채워져 있는 LNG 가 출렁거리면서 발생시키는 슬로싱 하중과 선박의 rolling, pitching motion 에 의한 자중영향, translation 과 rotational 관성력, LNG 의 온도 차에 의한 열하중이 있다.

3.5.1 슬로싱 하중

슬로싱 하중은 식 (3.1)의 모리슨 식(Morrison' s Equation)을 통하여 계산 하였다.

$$\frac{dF}{dz} = \frac{1}{2} \rho C_d U |U| D + \rho C_m \frac{dU}{dt} A \quad (3.1)$$

먼저 전산 유체해석을 통하여 구해진 특정 슬로싱 시간 대에서의 각 위치별 속도와 가속도 값을 자동으로 계산되도록 하였다. 또한, 계산 되어진 하중은 각 요소에 속해있는 절점으로 나누어 적용시켰다. Cd 값은 0.7, Cm 값은 2.0 를 사용하였다. ρ 는 LNG 의 밀도이고 D 는 각 부재의 외경, A 는 부재의 단면적이다. 펌프타워의 유한요소 모델에 모리슨 식을 통하여 계산된 하중을 부여하면, 각 절점 별로 하중이 자동으로 누적되어 적용되도록 하였다.

3.5.2 자중

선박의 pitching 과 rolling motion 에 의하여 발생하는 선박 자체 중량의 영향을 고려하였다. Fig. 6 의 (a)는 선박의 횡방향 운동, (b)는 종방향 운동을 고려할 때를 보여주고 있다. 자중은 각 방향별로 고려하였고, 식 (3.2)에서 (3.5)는 각 방향에 대한 계산 식을 보여주고 있다.

$$G_y = -g \sin q_1 \quad (3.2)$$

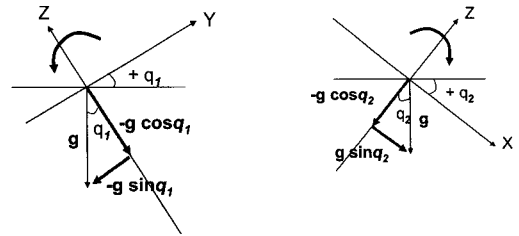
$$G_z = -g \cos q_1 \quad (3.3)$$

$$G_x = g \sin q_2 \quad (3.4)$$

$$G_z = -g \cos q_2 \quad (3.5)$$

3.5.3 관성력

Inertia 하중은 선박 운항 시 작용력을 고려하는



(a) Transverse motion (b) Longitudinal motion

Fig. 6 Self gravity

것으로 x, y, z 방향에 대한 식으로 translation 과 rotation 으로 나눌 수 있다. Rotational acceleration 은 선박의 center of gravity 의 x, y, z 좌표를 기준으로 작용하게 된다. 실제 하중을 고려 시에 self gravity 하중과 inertia 하중의 translation 하중이 더해져서 적용되었다.

3.5.4 열하중

펌프타워의 탱크 내부에 채워져 있는 LNG 는 영하의 온도를 유지하고 있기 때문에 펌프타워가 온도 차에 의한 수축 또는 팽창을 하게 된다. 따라서, 이에 대한 평가가 이루어 져야 한다. Fig. 7 은 펌프타워 높이에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 그래프의 수직축이 온도를 나타내고, 수평축은 펌프타워의 높이를 나타낸다. 수평축의 원점이 펌프타워 탱크의 바닥이 된다. LNG 에 잠겨져 있는 펌프타워의 Tank bottom 으로부터 free surface 까지 섭씨 -163 도로 유지되며 free surface 로부터 inner deck 까지는 -163 과 -30 사이의 값으로 선형 보간되어 적용된다. Inner deck 부터 trunk deck 까지는 -30 도가 된다.

3.6 경계조건

펌프타워의 경계조건으로써 크게 세가지를 고려해야 한다. 먼저 하부는 Base Plate 의 Center 에 Sliding Joint 로 설정되어 있다. 이 조건을 구현하기 위하여 자유도 구속을 설정하였다

Fig. 8 은 펌프타워 하부구조를 보여주고 있다. 펌프타워의 높이방향 Z 축의 변위를 제외한 다른 5 가지 자유도를 구속하였다. 상부의 경우는 2.3 절에서

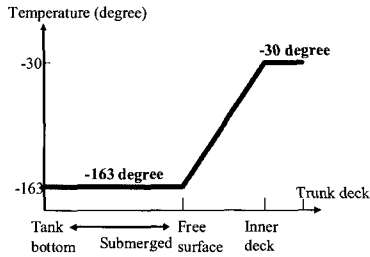
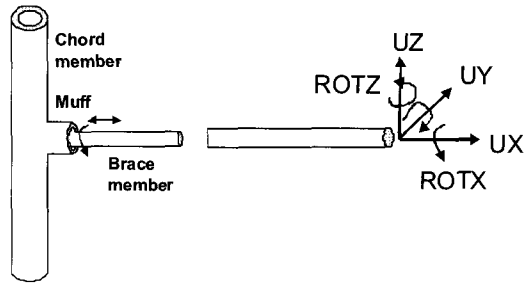


Fig. 7 Temperature distribution

연급한 바와 같이 두 가지 deck type 으로 나누어진다. Type1 의 경우에는 trunk deck 에 X,Y,Z 방향의 변위 구속, Z 축 회전변위구속을 적용하고, inner deck 에는 X,Y 변위를 구속하였다. Type2 의 경우에는 trunk deck 에 X,Y,Z 방향의 변위 구속, Z 축 회전변위를 구속하였다. 이들 경계조건 이외에 고려해야 하는 Muff condition 이 있다. Fig. 9 는 이에 대한 자유도 설정조건을 보여주고 있다. X 방향의 변위와 X 축 회전변위는 free 조건이 된다.



(a)muff condition (b)muff condition

Fig. 9 Muff condition

3.7 해석 결과

LNG filling ratio 50%일 경우, 슬로싱 하중이 큰 경우를 적용하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 10은 각각 deck type1의 변위분포, 응력분포, 최대응력이 발생하는 지점을 확대하여 본 결과이다.

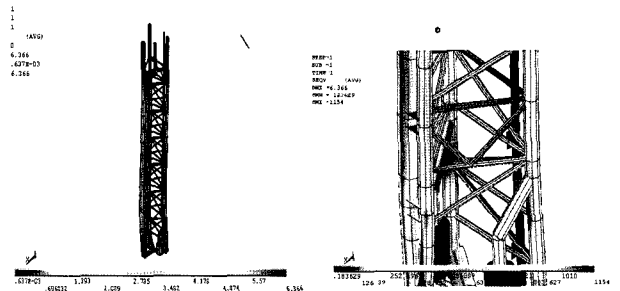


Fig. 10 Equivalent stress and displacement

3.8 API code check

API(American Petroleum Institute) code의 API-RP-2A-WSD를 기준으로 펌프타워 부재의 좌굴과 joint에서의 punching shear에 대한 검토를 하였다.

유한요소해석 결과에서 axial, in-plane/out of plane 의 급형 응력결과를 이용하여 식(3.6)와 (3.7) 를 통하여 unity value 를 검토하였고, 식(3.8) ~ (3.11)를 통하여 punching shear value 를 검토하였다.

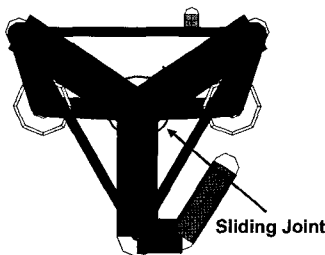


Fig. 8 Bottom structure of pump tower

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{(1 - \frac{f_a}{F_e}) F_b} \leq 1.0 \tag{3.6}$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \tag{3.7}$$

$$v_p = \tau f \sin \theta \tag{3.8}$$

$$v_{pa} = Q_q Q_f \frac{F_{yc}}{0.6\gamma} \tag{3.9}$$

$$\left(\frac{v_p}{v_{pa}}\right)_{IPB}^2 + \left(\frac{v_p}{v_{pa}}\right)_{OPB}^2 \leq 1.0 \quad (3.10)$$

$$\left|\frac{v_p}{v_{pa}}\right|_{AX} + \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{\left(\frac{v_p}{v_{pa}}\right)_{IPB}^2 + \left(\frac{v_p}{v_{pa}}\right)_{OPB}^2} \leq 1.0 \quad (3.11)$$

슬로싱 해석을 통하여 구한 최대 하중을 기준으로 높이에 따른 unity check 값과 punching shear 값의 분포를 확인하였다. Fig. 11 은 API code checking 을 수행하였을 때 각각의 주요 파이프에 대하여 펌프의 높이에 따른 unity value 의 분포를 보여주고 있다. LNG 가 탱크 내에 50%만 채워져 있기 때문에 펌프타워의 약 1/2 지점에서 하중이 크게 걸리게 된다. 이에 따라 Fig. 11 에서 보여지는 바와 같이 unity value 의 값이 약 1/2 지점에서 큰 것을 알 수 있다. 또한 펌프타워의 하단과 상단 모두 경계조건이 적용됨에 따라 큰 반력에 의한 영향으로 큰 값을 보인다. Fig. 12 는 펌프타워의 높이에 따른 punching shear 값의 분포를 보여주고 있다. Emergency pipe(EP)와 starboard discharge pipe(SDP), emergency pipe 와 portside discharge pipe(PDP), starboard discharge pipe 와 portside discharge pipe 의 세 개의 접합부위에서 값을 측정하였으며, unity value 의 분포와 마찬가지로 비슷한 경향을 보여주고 있다.

그러나, 하단과 상단에서 상대적으로 큰 값을 보이는 경향은 경계조건의 영향이 큰 것으로 사료된다.

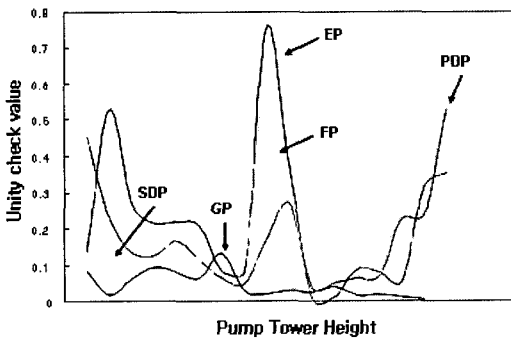


Fig. 11 Unity value Distribution

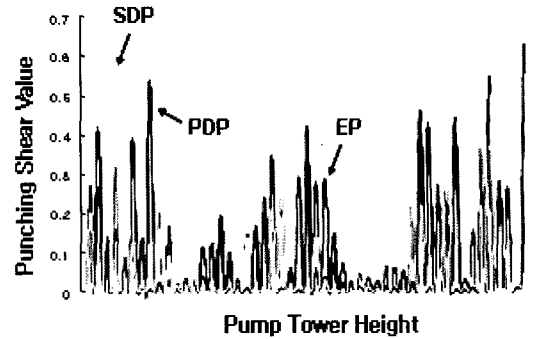


Fig. 12 Punching shear value Distribution

4. GUI 개발

4.1 Tcl/Tk 와 APDL

ANSYS 의 Contact Manager, Mechanical Toolbar, Material Property 입력 창 등은 바로 Tcl/Tk 를 이용하여 만들어진 가장 대표적인 것들이다. ANSYS 와의 호환성이 좋기 때문에 이번 연구과제에서 Tcl/Tk 를 이용하여 GUI 를 구성하였다.

4.2 PTAP v1.0

Pump tower에 관한 구조해석을 수행할 수 있도록 앞서 언급한 최적모델 및 최적화된 수행과정을 도입하여 Pump tower의 구조해석 전용해석 프로그램인 PTAP v1.0을 개발하였다. PTAP는 응력해석과 부가수 질량(added mass)을 고려한 모드해석이 가능하다. 해석 수행 후 결과 검토 시 API code를 통해 자동으로 violated member와 joint 등을 알려주며 변형형상 검토, animation, 결과 리스트 등을 출력해 준다. PTAP v1.0은 모든 해석 수행과정들이 자동화되어 있으며 GUI를 순차적으로 따라가면 해석이 이루어진다.

PTAP v1.0 의 주요 GUI 들을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 13 은 PTAP v1.0 의 초기화면을 보여주고 있다. 사용자 정의 파일명과 작업폴더, 제목 등을 입력하도록 되어있다.

PTAP v1.0 의 핵심기능 중 하나인 하중입력 GUI 는 Fig. 14 와 같다. LNG 의 filling level 과 sloshing time 에 따라 하중파일을 펌프타워의 절점력으로 자동으로 부여해 준다. 또한, load weighting factor 에

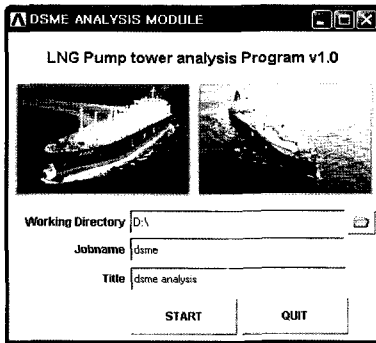


Fig. 13 Initial GUI screen for PTAp v1.0

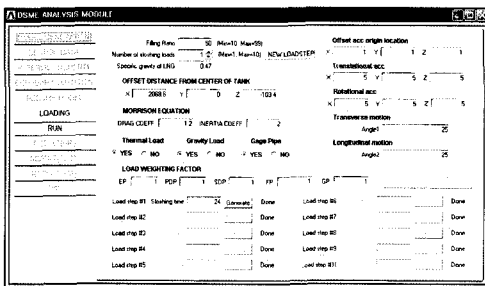


Fig. 14 GUI screen for load input PTAp v1.0

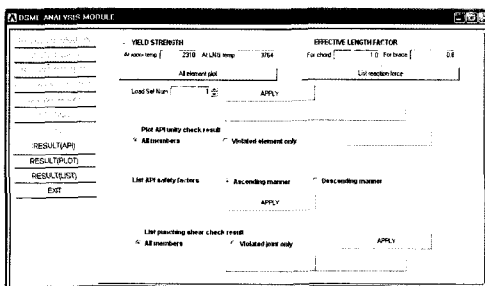


Fig. 15 GUI screen for API Code check

따라 하중을 주요 pipe 별로 몇 %만 고려할지를 설정할 수 있다. 앞서 적용된 하중에 대한 해석을 수행한 후 API code check 를 통하여 문제가 있는 member 와 joint 를 출력해주며 그래픽으로 확인할 수 있도록 해준다. 또한, 중간 계산 값들도 선택적으로 리스트하여 볼 수 있다. 리스트로 확인한 내용은 자동으로 파일로 저장하게 된다

5. 결론

본 연구를 통해 펌프타워의 구조해석 시 최적의 유한요소 모델의 작성에서 최종 결과 분석까지 수행 가능한 시스템을 개발하였다.

펌프타워에 가장 문제가 되는 최대 슬로싱 하중이 작용하는 경우 해석을 수행하여 unity check 값과 punching shear 값의 분포 경향을 확인하였다. 액화 가스 운반선의 펌프타워의 구조안전성 평가를 위한 보다 편리한 시스템의 개발을 통해 구조 해석 및 설계 시간의 단축 및 반복작업에 의한 에러를 줄이는데 많은 기여가 예상된다. 추후 최적화 모듈, 강제진동해석 모듈 등을 개발하여 추가하여야 할 것이며, 좀 더 정도 높은 계산 방법을 찾아 적용하여야 할 것이다.

참고 문헌

- American Bureau of Shipping, 2004, “ Sloshing and Structural Analysis of Pump Tower for Membrane Type LNG Carriers,” pp. 21-35.
- ANSYS User’ s Manual for Revision 9.0, Structural Analysis Guide.
- American Bureau of Shipping, 2005, “ Sloshing Analysis for Ocean-Going Membrane Type LNG Carriers,” pp. 26-28.
- Harrison/Mark, 1997, “ Effective Tc1/Tk Programming,” Addison-Wesley
- Jae Hyung Park, S. H. Moon, S.K. Han and Y.S. Bae, 1995, “ Structural Analysis of LNG Pump Tower,” Proceedings of the Sixth International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units(PRADS), pp. 2.982-2.991



< 이 광 민 > < 박 재 형 > < 한 성 곤 > < 허 주 호 >