

# LNG 운반선용 펌프타워의 구조해석 프로그램 개발에 관한 연구

## A Study on Development of Structural Analysis Program og LNG Pump Tower

이 강 수\* · 손 충 렬\*\* · 원 중 범\*\*\*

Lee, Kang-Su · Son, Choong-Yul · Won, Jing-Bum

### 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 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 analysis. All these design and analysis procedures are embedded in the analysis system successfully.

**Keywords:** LNG, Pump tower, Sloshing, FEM, ANSYS, Tcl/Tk

### 1. 서 론

펌프타워는 LNG선박 내에서 가장 중요한 구조물 중의 하나이다. 선박의 화물창 내에 LNG를 싣고 운반 시 액화되어 있기 때문에 유체가 출렁거리는 현상, 즉, 슬로싱(sloshing) 하중에 의하여 LNG탱크 내부에 있는 펌프 타워에 커다란 충격성 하중이 가해지게 된다. 이 커다란 충격 하중으로 인해 펌프 타워가 손상 또는 파괴가 일어나게 되면 큰 경제적 손실을 입게 된다. 따라서, 슬로싱 하중을 펌프타워에 적용시켜 정확한 강도평가가 이루어져야만 한다. 슬로싱 하중, 온도하중, 자중, 선박의 inertia하중 등을 계산하여 하중을 적용하고, 펌프타워 해석을 위한 최적모델을 선정하고자 하였다. 또한, API code를 check하여 문제가 있는 부재나 조인트를 알려주도록 강도평가가 이루어지는 해석과정을 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 자동화 하였으며, GUI를 구성하는 언어는 Tcl/Tk를 이용하였다.

#### 1.1 Pump Tower 개요

LNG Pump Tower는 그림 1의 (a)와 같은 Membrane형 LNG 선박의 탱크 내부에 설치되며, 그림 1의 (b)는 LNG 탱크를 확대하여 본 모습이다. 이 탱크에 LNG가 채워지게 된다.

\* 정희원 · 인하대학교 기계공학부 박사과정 E-mail: kslee@inha.ac.kr

\*\* 정희원 · 인하대학교 기계공학부 교수 E-mail: soncy@inha.ac.kr

\*\*\* 인하대학교 기계공학부 석사과정 E-mail: won0331@hotmail.com

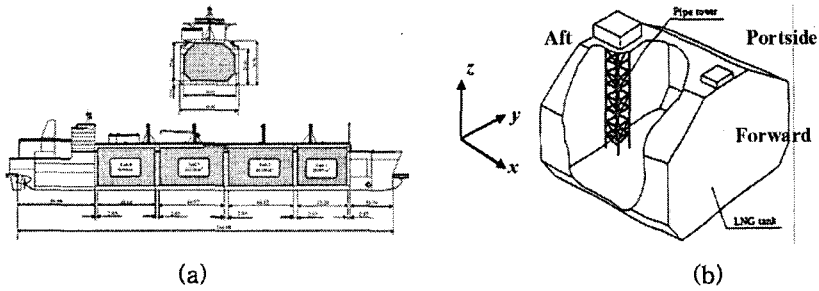


그림 1 LNG탱크 내의 펌프타워

### 1.2 Pump Tower의 구성

펌프타워는 원형단면을 갖는 Emergency Pipe, Portside Discharge Pipe, Starboard Discharge Pipe, Filling Pipe, Gauge Pipe, 세 가지 종류의 Strut과 H형단면을 갖는 펌프 연결 파이프, Base Plate와 Link 등으로 구성되어 있다. 그림 2는 위의 부재들로 이루어진 펌프타워의 전체 및 상하부 구조를 보여주고 있다.

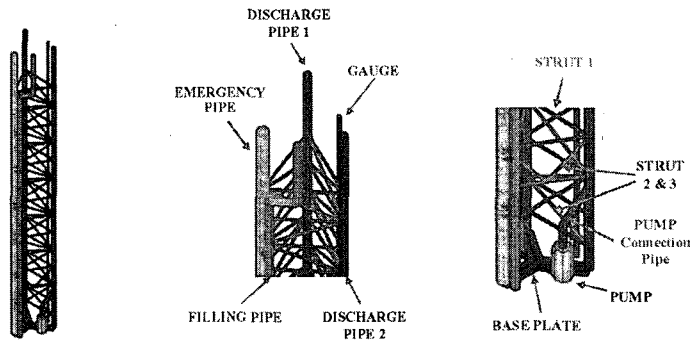


그림 2 Pump tower의 구성

### 1.3 Deck의 형태

Pump tower의 상부 구조 deck type에는 그림 3 (a)의 type 1과 (b)의 type 2와 같은 두 가지 형태가 있다. 실제로 pump tower의 전체길이는 동일하게 유지되고 유한요소해석(Finite Element Analysis) 시에 서로 다른 경계조건 형태로 고려된다.

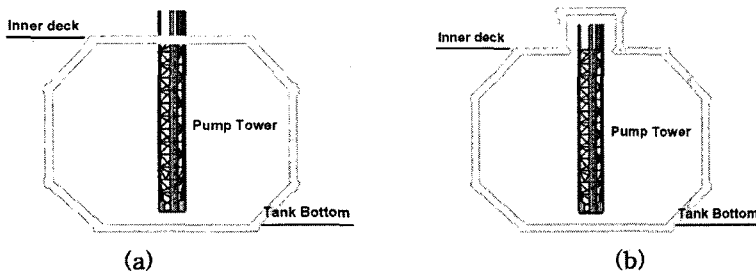


그림 3 Deck의 종류

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소 모델링

유한요소해석은 ANSYS version 9.0을 기반으로 수행 되었다. 유한요소해석을 위한 요소의 형태는 ANSYS element library의 188번을 사용하였다. 6개의 자유도를 갖고 모드 해석 시 부가수 질량(added mass)을 고려할 수 있다는 특징이 있고 실제의 형상을 그대로 구현하여 볼 수 있다. 표 1은 Beam188 요소에 대한 특징을 보여준다.

표 1 Summary of Beam188 element

요소종류	특징		비고
	DOFs	Ux,Uy,Uz, Rotx,Roty,Rotz	
Beam188	Inputs	Section properties	2. 모드해석 시 added mass
	Outputs	변위, 응력, 모멘트, 반력 등	고려 가능

### 2.2 최적 모델 및 프로세스

펌프타워의 구조해석을 수행하기 위한 최적의 모델과 프로세스를 개발하기 위하여 규칙적으로 절점과 요소의 번호를 부여하였다. 절점에 적용된 하중 크기 및 부재 또는 조인트의 unity 값을 쉽게 검토할 수 있게 된다. 하부 원점부터 상부 방향으로 각 파이프 별로 고유한 절점 및 요소의 번호를 갖고 증가하도록 설정하였다. 이와 같이 펌프타워의 구조해석 시 최적의 유한요소해석 모델을 제시하였다.

### 3.3 Beam Section

Emergency pipe는 EP, Portside pipe는 PDP, Starboard side pipe는 SDP, Filling pipe는 FP, Gauge pipe는 GP, Strut1, 2, 3, Pump connection pipe은 P.Con으로 나타내고 원형단면을 갖는다. Base plate는 B.P, Base plate의 연결 pipe는 B.P.Con., Link1,2로 나타내었고 H-형상의 단면을 갖는다. 펌프타워 부재의 단면은 표 2와 같다.

표 2 Section Properties

Member Type	Sec No.	Shape	Size
EP	1	Circular	609.6 x 12.7mm
PDP	2	Circular	406.4 x 12.7mm
SDP	3	Circular	406.4 x 12.7mm
FP	4	Circular	406.4 x 4.77mm
GP	5	Circular	219.1 x 3.76mm
Strut 1	6	Circular	141.3 x 6.55mm
Strut 2	7	Circular	141.3 x 6.02mm
Strut 3	8	Circular	141.3 x 3.05mm
Pump	9	Circular	141.3xH1531.1mmxW3000
P. Con.	10	Circular	355.6 x 4.70mm
B. P.	11	H	400x600x358x10x40x36
B. P.Con	12	H	200x300x175x5x20x16
Link 1	13	H	500x500x412x6x6x6
Link 2	14	H	500x500x212x6x6x6

Section Data Tab의 Pipe GUI에서 펌프에 관하여 입력되는 값은 펌프의 외경, 높이, 무게이다. 이는 식(그림 4)을 통하여 계산되어 펌프의 중공원형 단면의 두께가 결정된다. 그림 4의 (b)는 그림 11(a)의 식으로 계산된 펌프의 두께를 적용한 펌프 모델을 보여준다. base plate의 유한요소모델링은 다른 부재들과 마찬가지로 beam model로 고려하였다. 그림 5는 beam model로 치환된base plate의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 치수는 표 2의 B.P 항목과 같다.

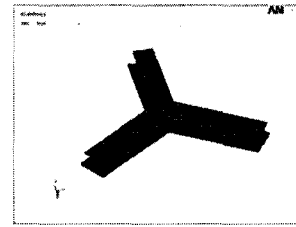
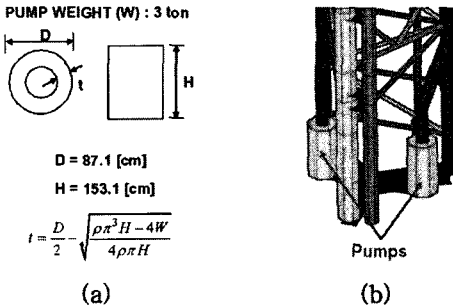


그림 4 펌프 치환 식과 중공원형 단면으로 표현된 펌프

그림 5 beam model로 고려된 base plate

### 2.4 Material Property

펌프타워에 적용되는 재료 물성치는 SUS304 로써 표 3에 나타내었다. 펌프타워가 섭씨 -163도의 LNG에 잠겨있기 때문에 온도 차에 의한 수축, 팽창이 일어나게 된다. 이를 고려하기 위하여 온도에 따른 열팽창계수를 입력하였다. Reference 온도는 섭씨 20도이다. 그림 6은 온도에 따른 열팽창계수를 보여주고 있다.

Young Modulus	1968059.6 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	
Poisson's ratio	0.3	
Density	0.0000078 [kg/ cm <sup>3</sup> /G]	
Thermal Expansion Coefficient	Temp.[ ° C]	Value [cm/cm/ ° C]
	-185	13.3 x 10 <sup>-6</sup>
	-180	13.9 x 10 <sup>-6</sup>
	-70	14.8 x 10 <sup>-6</sup>
	-20	15.7 x 10 <sup>-6</sup>
	0	17.2 x 10 <sup>-6</sup>
	100	17.2 x 10 <sup>-6</sup>

표 3 Material properties of SUS304

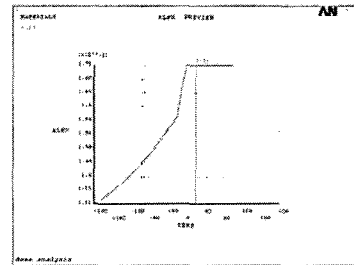


그림 6 온도에 따른 열팽창계수

### 2.5 하중의 산정

펌프타워에 작용하는 하중은 4가지로 분류할 수 있다. 먼저 선박이 운행할 때 탱크 내에 채워져 있는 LNG가 출렁거리면서 발생시키는 슬로싱 하중과 선박의rolling, pitching motion에 의한 자중영향, translation과 rotational inertia 하중, LNG 가스의 온도 차에 의한 열하중이 있다.

#### 2.5.1 Sloshing 하중

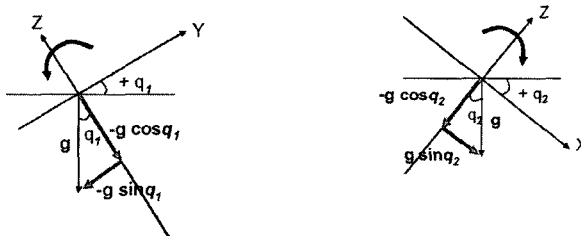
슬로싱 하중은 식 (1)의 모리슨 식(Morrison's Equation)을 통하여 산정하였다.

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

먼저 전산유체해석을 통하여 구해진 특정 슬로싱 시간 대에서의 각 위치별 속도와 가속도 값을 ANSYS 내부의 array table로 저장하고 각 요소의 center와 가장 가까운위치의 속도와 가속도 값을 자동으로 선택하도록 식 (1)의 APDL(Ansys Parametric Design Language)로 작성하였다. Cd 값은 0.7, Cm 값은 2.0를 사용하였다.  $\rho$  는 LNG의 밀도이고 D는 각 부재의 외경, A는 부재의 단면적이다.

### 2.5.2 Self gravity 하중

선박의 pitching과 rolling motion에 의하여 발생하는 선박 자체 중량의 영향을 고려하였다. 그림 7의 (a)는 선박의 횡방향 운동, (b)는 종방향 운동을 고려할 때를 보여주고 있다.



(a) transverse motion                      (b) longitudinal motion  
그림 7 Self gravity 하중

자중은 각 방향별로 고려하며, 식 (2-1),(2-2),(2-3),(2-4)는 각 방향에 대한 계산 식이다.

$$G_y = -g \sin q1 \quad (2-1), \quad G_z = -g \cos q1 \quad (2-2)$$

$$G_x = g \sin q2 \quad (2-3), \quad G_z = -g \cos q2 \quad (2-4)$$

### 2.5.3 Inertia 하중

Inertia 하중은 선박 운항 시 작용력을 고려하는 것으로 x, y, z 방향에 대한 식으로 translation 과 rotation 으로 나눌 수 있다. 식 (3)은 Inertia 하중에 대한 식을 보여주고 있다. 두 번째 term은 translational acceleration vector, 세 번째 term은 rotational acceleration vector를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \\ \ddot{\xi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i & j & k \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ x & y & z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 - y\ddot{\theta}_3 + z\ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\xi}_2 + x\ddot{\theta}_3 - z\ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\xi}_3 - x\ddot{\theta}_2 + y\ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.5.4 thermal 하중

펌프타워의 탱크 내부에 채워져 있는 LNG는 영하의 온도를 유지하고 있기 때문에 펌프타워가 온도 차에 의한 수축, 팽창을 하게 된다. LNG에 잠겨져 있는 펌프타워의 Tank bottom으로 부터 free surface까지 섭씨 -163도로 유지되며 free surface로부터 inner deck까지는 -163과 -30 사이의 값으로 선형 보간되어 적용된다. Inner deck부터 trunk deck 까지는 -30도가 된다. Reference temp는 섭씨 20도 이다.

### 2.6 경계조건의 적용

하부는 Base Plate의 Center에 Sliding Joint로 설정되어 있다. 이 조건을 구현하기 위하여 자유도 구속을 설정하였다. 그림 9은 펌프타워 하부의 경계조건을 보여주고 있다. 펌프타워의 높이방향 z축의 병진을 제외한 ux, uy, rotx, roty, rotz 자유도를 구속하였다.

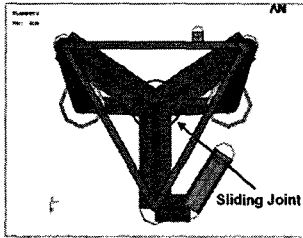


그림 8 펌프타워 하부의 sliding joint

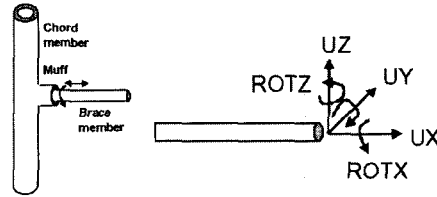


그림 9 miff condition 및 자유도 설정

Deck Type1의 경우에는 trunk deck에 ux, uy, uz, rotz, inner deck에는 ux와 uy 자유도를 구속, type2의 경우에는 trunk deck에 ux, uy, uz, rotz 자유도만을 구속하였다. 이들 경계조건 이외에 고려해야 하는 Muff condition이 있다. 그림 12는 이에 대한 자유도 설정조건을 보여주고 있다. ux와 rotx는 free 조건이 된다.

### 3 응력해석

LNG filling ratio 50%일 경우, 가장 큰 슬로싱 하중인 0.24초 일 때를 적용하여 두 가지deck type에 대한 변위 및 응력 결과를 비교하였다. 최대 변위 값은 6.366 cm 이었고, 최대 응력 값은 1154 kgf/cm<sup>2</sup> 이었다. 변형형상을 살펴보면 Filling ratio가 50%이기 때문에 펌프타워의 슬로싱 하중이 펌프타워의 1/2 지점 이하에 크게 작용하게 됨을 확인할 수 있고, 하부지점이 sliding support로 되어 있기 때문에 온도 구배에 따라 변위가 주로 펌프타워의 높이 방향으로 크게 발생하였다. 펌프타워의 상부 deck부위에도 경계조건이 적용됨으로써 응력이 크게 발생하였는데, miff condition에 의해 다소 완화된 것으로 보인다. 최대응력이 발생한 지점을 살펴보면 하부의 discharge pipe 사이의 brace임을 확인할 수 있었다. 이는 슬로싱 하중의 y방향의 커다란 하중들의 영향이 큰 것으로 사료된다. Deck type1과 마찬가지로 deck type2의 결과를 살펴보았다. 최대 변위 값은 6.426 cm 이었고, 최대 응력 값은 1147 kgf/cm<sup>2</sup> 이었다. 변형형상과 응력분포 등의 결과는 type 1과 거의 유사하게 나왔다. 변위 및 응력 결과 값 모두 type 1보다 약간 크게 나왔다. 이는 반복 스펜이 1개 증가하면서 펌프타워에 걸리는 하중이 다소 커진 것과 inner deck 부위에 ux, uy 구속경계조건이 없어지고 trunk deck에만 적용된 조건으로 인하여 상부에서 발생하는 응력이 다소 커진 것을 확인할 수 있었다.

### 4. API Code check

API(American Petroleum Institute) code의 API-RP-2A-WSD를 기준으로 펌프타워 부재의 buckling과 joint에서의 punching shear에 대한 검토를 하였다. 유한요소해석 결과로부터 axial, in-plane/out-of-plane의 굽힘 응력결과를 이용하여 식(4)와 (5)를 통하여 unity value를 검토하였다. 슬로싱 해석을 통하여 구한 최대

하중을 기준으로 높이에 따른 unity check 값을 확인하였다.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{(1 - \frac{f_a}{F_e}) F_b} \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (5)$$

그림 15는 API code checking을 수행하였을 때 각각의 주요 파이프에 대하여 펌프의 높이에 따른 unity value의 분포를 보여주고 있다. LNG가 탱크 내에 50%만 채워져 있기 때문에 펌프타워의 약 1/2지점에서 하중이 크게 걸리게 된다. 이에 따라 그림 10 (a)에서 보여지는 바와 같이 unity value의 값이 큰 것을 알 수 있다. 또한 펌프타워의 하단과 상단 모두 경계조건이 적용됨에 따라 큰 반력에 의한 영향으로 사료된다. emergency pipe와 starboard discharge pipe, emergency pipe와 portside discharge pipe, starboard discharge pipe와 portside discharge pipe의 세 개의 접합부위에서 값을 측정하였으며, unity value의 분포와 마찬가지로 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그러나, 하단과 상단에서 상대적으로 큰 값을 보이는 경향은 모멘트에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다.

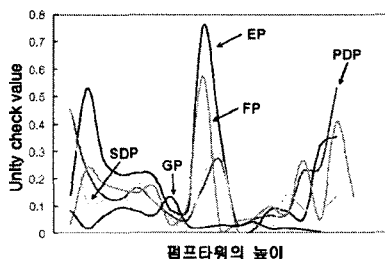


그림 10 높이에 따른 unity값과 punching shear 값의 분포

### 5. PTAP v1.0

GUI는 Tcl/tk 언어를 이용하여 개발하였고, 최적모델 및 최적화된 수행과정을 도입하여 Pump tower의 구조해석 전용해석 프로그램인 PTAP v1.0을 개발하였다. PTAP은 옹력해석이 가능하다. 해석 수행 후 결과 검토 시 API code를 통해 자동으로 violated member와 joint 등을 알려주며 변형형상 검토, animation, 결과 리스트 등을 출력해 준다. solver는 ANSYS v9.0을 사용하였다. PTAP v1.0의 핵심기능 중 하나인 하중입력 GUI는 그림 11과 같다. LNG의 filling level과 sloshing time에 따라 하중파일을 펌프타워의 절점력으로 자동으로 부여해 준다. 또한, load weighting factor에 따라 하중을 주요 pipe 별로 몇 %만 고려할지를 설정할 수 있다.

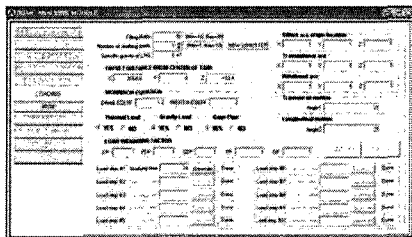


그림 11 PTAP v1.0의 하중입력 GUI

앞서 적용된 하중에 대한 해석을 수행한 후 API code check를 통하여 문제가 있는 member를 출력해주며 그래픽으로 확인 할 수 있도록 해준다. 또한, 중간 계산 값들도 선택적으로 리스트하여 볼 수 있다. 리스트로 확인한 내용은 자동으로 파일로 저장하게 된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 펌프타워의 구조해석 시 최적의 유한요소 모델을 선정하였고, 프로세스를 개발하였다. 펌프 타워의 구조해석과정을 최적의 유한요소모델과 프로세스를 적용하여 자동화 프로그램 PTAP v1.0을 개발하였다. 하중 case가 여러개일 경우도 동시에 해석이 가능하며 자동으로 하중이 적용되고, 결과점토도 다양하게 할 수 있도록 하였다. 해석을 수행한 후 후처리과정에서 API code를 적용하여 unity check 값과 punching shear 값의 분포 경향을 쉽게 확인할 수 있도록 list 뿐만 아니라 contour결과를 출력하도록 개발하였다. LNG 운반선의 Deck type의 변경에 따른 응력해석 결과를 쉽게 비교 검토할 수 있다. 고PTAP v1.0 펌프타워 구조해석 프로그램을 개발함으로써 구조해석 전용프로그램 개발 국산화를 가속화하는데 공헌을 하였으며, 추후 고유진동수 모듈, 최적화 모듈, 강제진동해석 모듈 등을 개발하여 추가하고 좀 더 실제 현상에 맞는 이론적인 접근과 프로그램의 안정성 측면을 고려하여 보다 심도 있는 접근을 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 대우조선해양(주)와의 공동연구에 의한 성과물입니다.

## 참고문헌

- 손충렬 (1995) 해양구조물공학, 미래내, 서울
- 한국강구조학회 (2005) 강구조의 설계, 구미서관, 서울
- 김석준, 김성찬, 윤장호 (1998) Technigaz형 액화 천연가스 운반선 Pump Tower의 구조해석, 대한조선학회, 대한조선학회, 35, pp.296~299.
- 한국선급 (1999) 선박진동소음 제어지침, 한국선급, 대전
- ABS (2004) Sloshing and structural analysis of pump tower for membrane type LNG carriers, American Bureau of Shipping Press, Texas.
- ANSYS (2004) *User's Manual for Revision 9.0, Structural analysis guide*, Ansys, inc., Pittsburgh.
- ABS (2005) *Sloshing analysis for ocean-going membrane type LNG carriers*, American Bureau of Shipping Press, Texas.
- Harrison/Mark (1997) *Effective Tcl/Tk Programming*, Addison-Wesley, Boston.