

## 원전기자재 설계와 관련된 내진해석<sup>§</sup>

이우형\* · 조종래\*\*† · 노민식\* · 류정형\*\*\*

\* 수중운동체특화연구센터, \*\* 한국해양대학교 기계정보공학부, \*\*\* (주)케이티중공업

### Seismic Analysis of Nuclear Power Equipment Related to Design

Woo Hyung Lee\*, Jong Rae Cho\*\*†, Min Sik Roh\*, and Jeong Hyung Ryu\*\*

\* Underwater Vehicle Research Center.,

\*\* School of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ.

\*\*\* KT Heavy Industries Co. LTD

(Received July 5, 2010 ; Revised December 31, 2010 ; Accepted February 1, 2011)

**Key Words:** Seismic Analysis(지진해석), Polar Crane(폴라크레인), Spectrum(스펙트럼), Sloshing(슬로싱), Finite Element Method(유한요소법)

**초록:** 본 논문에서는 원자력 발전소 폴라 크레인(polar crane)의 설계를 위해 유한요소법을 통한 내진해석을 수행하였다. 모드 해석(modal analysis)을 통하여 폴라 크레인의 고유진동수와 진동형상을 파악하고 응답스펙트럼(response spectrum)을 통해 폴라 크레인의 내진 안전성을 평가하였다. 그리고 액체저장탱크에 대한 내진해석을 유한요소법을 이용하여 수행하였는데, 탱크가 요동시에 액체가 탱크 외벽에 가하는 힘을 고려한 슬로싱해석과 안전정지지진 하중 조건에서의 해석을 수행하였다. 본 논문에서 유한요소해석 상용코드인 ANSYS를 이용하여 내진해석에 필요한 해석기법과 과정 등을 설계 시에 활용할 수 있도록 제안하였다.

**Abstract:** We use the finite element method to analyze the seismic design of a liquid storage tank for a polar crane at a nuclear power plant. We obtained the natural frequency and vibration modes by modal analysis, and we evaluated the seismic stability by response spectrum analysis. Furthermore, the seismic analysis of the tank was accomplished by analyzing not only the forces applied to the wall by the sloshing of the liquid, but also the safe-shutdown earthquake condition for the tank. We propose a seismic-design process and a seismic-analysis method for liquid storage tanks based on the commercial finite element analysis program, ANSYS.

### 1. 서론

지구 내부에는 많은 에너지가 보존되어 있으며, 지진은 지각내 또는 맨틀 상부에 급격한 변동이 일어나고, 짧은 시간에 에너지가 방출되어서 지상에 급격한 진동이 일어나는 현상이다.<sup>(1)</sup> 지진으로 인한 피해는 심각한데, 지진 피해의 규모를 줄이기 위해서 구조물이나 기기들의 지진에 대한 안전성 확보가 중요시 되고 있다.

지진에 대한 안전성 확보가 가장 중요하게 요

구되는 시설 중의 하나인 원자력 발전소는 원자로 내의 막대한 방사능과 에너지가 잠재적인 위험성을 안고 있기 때문에 발전소 내에서 작동되는 구조물들은 엄격한 내진 설계를 요구하고 있다. 내지진 기기검증은 내진 해석(seismic analysis)과 내진 시험(seismic test)의 두 가지 방법으로 구분할 수 있다.<sup>(2)</sup> 특히 원자력 발전소의 기기는 ASME코드<sup>(3)</sup>에 의해서 설계, 제작 및 검증을 엄격히 규제하고 있다.

본 연구에서는 원자력 발전소의 폴라 크레인의 유한요소해석을 통한 내진 안전성을 검증하고자 한다. 운전하중과 지진하중에 대한 폴라크레인의 건전성을 평가하는 방법을 제시하고 표준화하여 설계프로젝트에 유용하게 활용할 수 있도록 하는

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 부산지회 춘계 학술대회(2010. 5. 7., 신라대) 발표논문임

† Corresponding Author, cjr@hhu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

것이다. 유한요소해석은 ANSYS 11.0의 자체 모델러를 이용하였고, 내진해석은 안전정지지진 (SSE : safe shutdown earthquake) 하중을 고려하여 해석을 수행하였다. 또한 모드해석(modal analysis)을 수행하여 동적 특성을 파악하고, 설계 규격으로 제시된 응답스펙트럼(response spectrum)을 이용한 응답스펙트럼해석을 수행하여 폴라크레인의 내진 안전성을 평가하였다.

또한 원자력 기자재 중 액체저장탱크의 구조해석과 관련하여 내진평가를 수행하였는데, 이는 슬로싱해석(sloshing analysis)을 통하여 액체가 요동시 구조물에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 내진평가를 위한 유한요소해석 이론

### 2.1 모드 해석 이론

외부로부터 외력 벡터  $\{F(t)\}$ 를 받는 다자유도 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$[M]\{\ddot{\chi}(t)\} + [C]\{\dot{\chi}(t)\} + [K]\{\chi(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

여기서  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 질량행렬(mass matrix), 감쇠행렬(damping matrix), 강성행렬(stiffness matrix)을 나타내고,  $\{\ddot{\chi}(t)\}$ ,  $\{\dot{\chi}(t)\}$ ,  $\{\chi(t)\}$ ,  $\{F(t)\}$ 는 각각 절점과 가속도, 속도, 변위, 작용 하중 벡터를 나타낸다. 모드 해석을 위하여 위의 식에서 감쇠행렬과 외력 벡터를 제외한 자유진동 시스템으로 나타내면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\chi}(t)\} + [K]\{\chi(t)\} = \{0\} \quad (2)$$

### 2.2 응답스펙트럼 해석 이론

지진과 같은 동적하중에 의한 구조물의 동적거동은 구조물의 고유진동주기와 감쇠비 등의 동적 특성에 따라서 크게 달라진다. 지진하중이 가해지는 동안 구조물에 발생하는 변위, 속도, 가속도 밀면전단력, 전도모멘트 등의 응답은 시간이력해석법(time history analysis)에 의하여 결정될 수 있다. 일반적으로 지진 발생 시 시간에 대해 불규칙적인 하중이 대상 구조물에 가해진다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 시간영역에서 구조물의 과도응답을 구해야 한다. 그러나 이는 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 간단하면서도 비교적 정확한 답을 구할 수 있는 응답스펙트럼해석 방법이 많이 사용되고, 관련 이론은 다음과 같다.<sup>(5)</sup>

$$[M]\{\ddot{\chi}(t)\} + [C]\{\dot{\chi}(t)\} + [K]\{\chi(t)\} = -[M]\{\ddot{\chi}_g(t)\} \quad (3)$$

비연성된 방정식은 다음과 같다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi \omega_i \dot{q}_i(t) + \mu_i \omega_i^2 q_i(t) = -\zeta_i \ddot{\chi}_g(t) \quad (4)$$

여기서,

$$\mu_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i, \quad 2\mu_i \xi \omega_i = \{\Phi\}_i^T [C] \{\Phi\}_i,$$

$$\mu_i \omega_i^2 = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i, \quad \zeta_i = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$$

으로 정의하고, 최대값  $q_{i, \max}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_{i, \max} = \max |q_i(t)| = \frac{\zeta_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (5)$$

여기서  $S_d$ 는 고유진동수  $\omega_i$ 와 모드 감쇠비  $\xi_i$ 를 갖는 1자유도계에서 입력 스펙트럼으로부터 구해진 최대 변위로 스펙트럴 변위(spectral displacement)이고,  $i$ 번째 모드에 관련된 구조물의 최대 변위  $\{\chi\}_{i, \max}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\chi\}_{i, \max} = \{\Phi\}_i q_{i, \max} = \{\Phi\}_i \frac{\zeta_i}{\mu_i} S_d(\omega_i, \xi_i) \quad (6)$$

위에서 구한 각 모드의 최대값을 조합하기 위해서 일반적으로 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 방법을 많이 사용하여, SRSS 방법을 사용한 전체 응답  $R_a$ 는 총  $n$ 개의 모드를 추출할 때 다음과 같다.

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\{\chi\}_{i, \max})^2} \quad (7)$$

$$S_d(\omega_i, \xi_i) = \omega_i S_v(\omega_i, \xi_i) = \omega_i^2 S_a(\omega_i, \xi_i) \quad (8)$$

여기서  $S_a$ ,  $S_v$ ,  $S_d$ 는 Spectral acceleration, velocity, displacement 이다.

## 3. 폴라 크레인의 유한요소 모델

### 3.1 해석 및 설계 절차

내진평가를 위한 해석 절차는 Fig. 1과 같이 먼저 형상 및 재질을 입력하고, 구조물의 운전조건

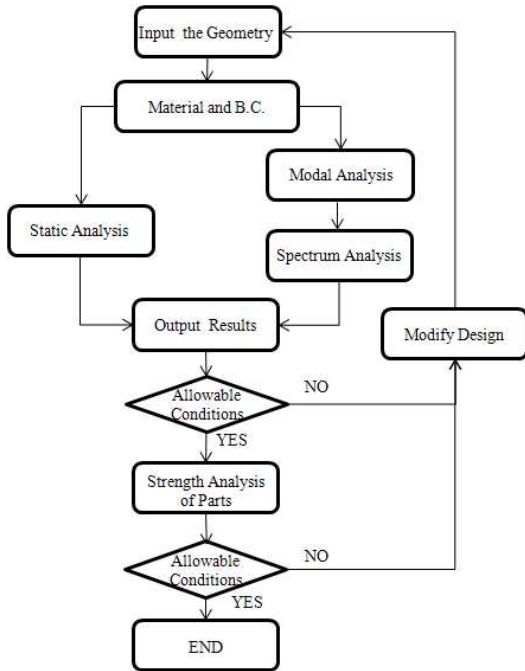


Fig. 1 Analysis and process

에 대한 경계조건을 부여한다. 해석 모델에 대한 모드해석, 스펙트럼해석을 수행하여 내진안전성을 평가한다. 스펙트럼해석에서는 모드해석을 통해 얻은 각 모드별 고유진동수와 응답스펙트럼의 가속도 값을 적용하여 안전정지지진하중을 고려한 내진해석을 수행한다.

3.2 유한요소 모델링

플라 크레인의 내진해석을 위해 유한요소 모델링을 수행하였다. 실제형상을 Fig. 2와 같이 2차원 도면으로 나타내었다. 플라크레인은 크게 브릿지, 트롤리, 서포트 그리고 주행로로 구성되어 있다.

본 연구에서는 해석프로그램으로 ANSYS 11.0을 사용하여 Fig. 3과 같은 형상으로 모델을 단순화 하여 모델링 하였다. 사용된 요소는 2절점 빔 요소 178개, 1절점 스프링 댐핑 요소 12개, 1절점 점 요소 14개이며, 절점 204개로 이루어져 있다.

3.3 해석 조건 및 허용 응력

플라크레인은 용접 구조용 강재인 JIS G3106 (항복응력=333MPa)를 사용하였다. 각 물성치의 밀도는 유한요소 모델링을 통해 간략화 되면서 반영되지 않은 질량에 대한 등가 밀도를 적용하였다. 플라크레인 내의 집중된 질량을 가지는

Table 1 Boundary conditions

Restraint		X	Y	Z
Bridge wheels	A	-	Fixed	Fixed
	B	-	Fixed	-
	C	Fixed	Fixed	Fixed
	D	Fixed	Fixed	-
Trolley wheels	E	Fixed	Fixed	Fixed
	F	-	Fixed	Fixed
	G	Fixed	Fixed	Fixed
	H	-	Fixed	Fixed

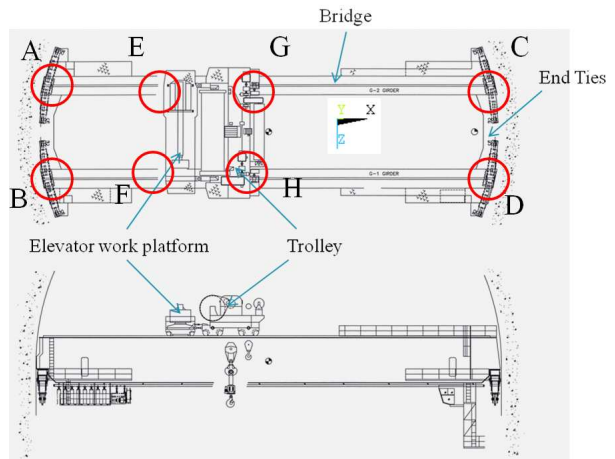


Fig. 2 Component Arrangement

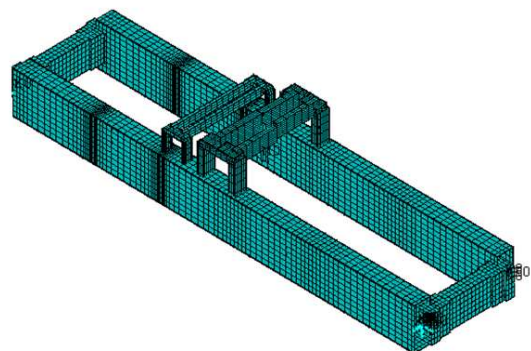


Fig. 3 Finite element model

구조물의 경우 1절점 요소인 MASS21을 이용하여 적용하였다.

Fig. 2의 A~H는 플라크레인의 경계조건을 적용한 위치를 나타내고 있으며, Table 1에 각 위치의 경계조건을 정리하였다. 경계조건은 회전운동은 모두 자유롭게 하여 실제 거동과 유사한 조건을

Table 2 Materials summary

Stress	Operating condition	SSE condition
$\sigma_t$	$0.5\sigma_y = 166.7$	$0.9\sigma_y = 300.0$
$\sigma_c$	$0.5\sigma_y = 166.7$	$0.9\sigma_y = 300.0$
$\sigma_v$	$0.4\sigma_y = 133.3$	$0.5\sigma_y = 166.7$

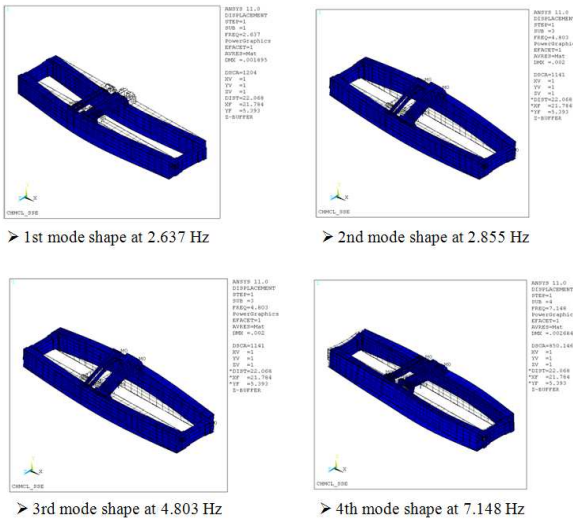


Fig. 4 Results of modal analysis

적용하였다.

구조물의 응력상태에 따라 구조물의 안전정지 지진을 고려한 SSE조건에 대한 허용응력을 각각 구하여야 한다. 이에 MCN 2311에 따라 아래와 같이 허용 응력을 결정하였으며, Table 2에 각 재료에 따라 정리하였다.

3.4 고유치 해석 결과

내진해석을 수행할 때에 고려되어야 할 모드를 계산하기 위해서 우선 고유치 해석을 수행하였다. 동적거동에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 구조물의 진동수와 진동모드형상이다. 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드계수가 기준 값 이하가 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 조합에 대해서 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때 보다 더 많은 모드를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 모드계수를 0.01로 설정하였으며 이것은 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 1% 크기의 모드기여계수 값을 갖는 모드에 한해서 모드 조합을 수행한다는 뜻이다. 해석기법으로는 Block Lanczos

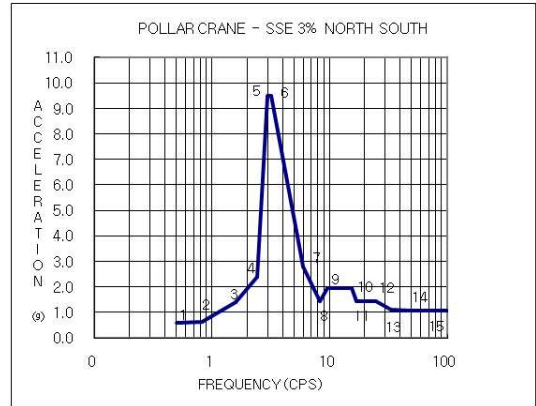


Fig. 5 North-South direction reference response spectra

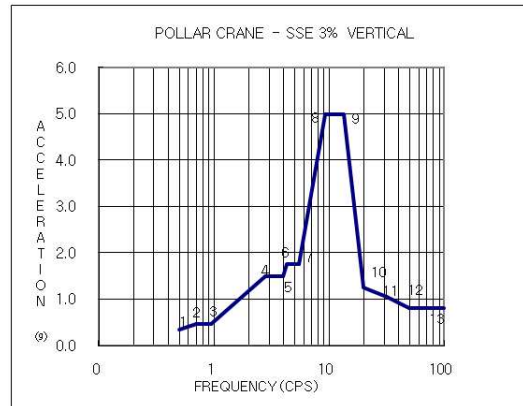


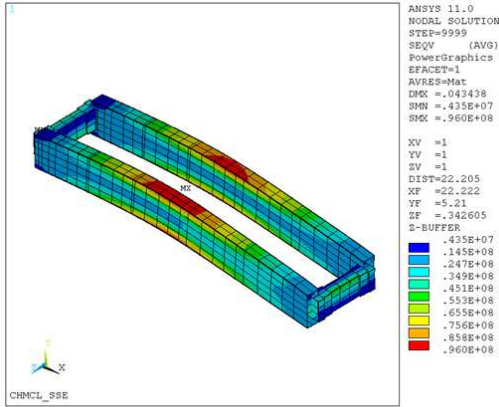
Fig. 6 Vertical direction reference response spectra

법을 사용하였다. 총 50개의 모드의 고유치 해석을 수행하였으며, 해석 결과 중에서 모드 기여도가 높은 1~4차의 주요 고유진동수와 진동모드 형상을 파악하여 Fig. 4에 나타내었다.

3.5 응답스펙트럼 해석 결과

내진설계를 위하여 간편하고 쉬운 방법으로 구조물의 최대 지진응답을 알아내고, 이러한 목적으로 흔히 사용되는 것이 응답스펙트럼이다. 설계용 응답스펙트럼은 구조물의 내진설계에서 지진의 영향을 고려하여 지진력을 산정하기 위하여 사용된다. 특정한 지반운동에 대하여 작성된 응답스펙트럼은 진동주기에 따라서 급격히 변하므로 들쭉날쭉한 형태를 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 응답스펙트럼 값은 Fig. 5, 6과 같고, North-South, Vertical 방향에 대하여 각각 나타내었고, SSE조건에 사용된 응답스펙트럼은 3%의 감쇠비를 적용하였다.

위에서 제시한 응답스펙트럼을 이용하여 내진



➤ Maximum von Mises stress in Bridge : 96 MPa

Fig. 7 Distributions of stress in bridge

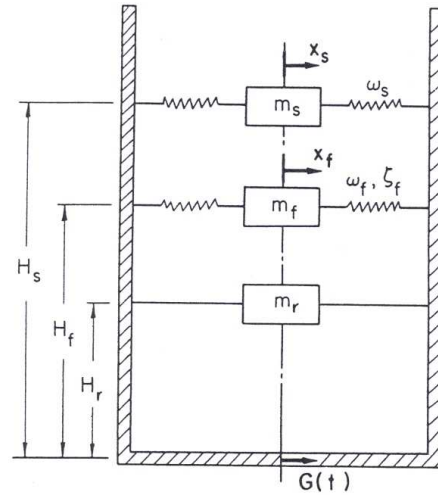
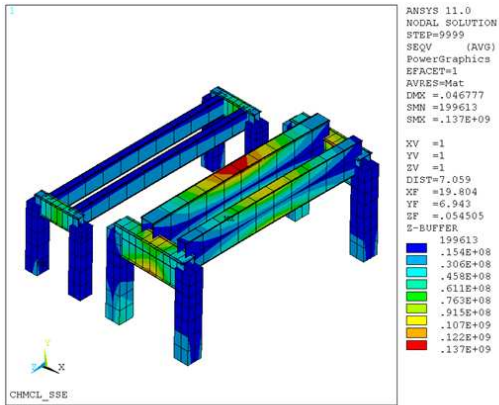


Fig. 9 Mechanical model of a flexible tank



➤ Maximum von Mises stress in Trolley : 137 MPa

Fig. 8 Distributions of stress in trolley

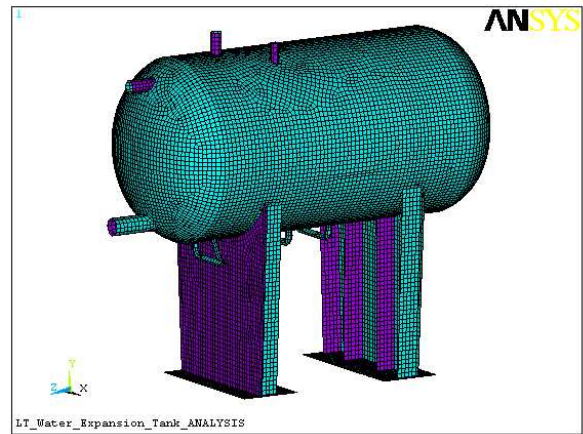


Fig. 10 Finite element model

해석을 수행하였다. 응력해석 결과는 Fig. 7, 8과 같고, 최대응력이 허용응력보다 낮은 것을 알 수 있었다.

#### 4. 슬로싱해석

##### 4.1 이론적 배경

슬로싱 해석은 Haroun<sup>(6)</sup>이 제안한 계산식이 있는데, 이는 액체가 탱크의 외벽에 가해지는 힘과 높이를 계산한다. Fig. 9는 개념도를 나타내었고, Fig. 9에서의 각 값을 구하면 다음과 같다.

$$m_s = 0.455\pi\rho_1 R^3 \tanh\left(1.84\frac{H}{R}\right) \quad (9)$$

$$\frac{H_s}{H} = 1 - \left(\frac{R}{1.84H}\right) \tanh\left(0.92\frac{H}{R}\right) \quad (10)$$

$$\omega_s^2 = \frac{1.84g}{R} \tanh\left(\frac{1.84H}{R}\right) \quad (11)$$

$$f_s = \omega_s/2\pi \quad (12)$$

$$\omega_f = 0.08/H\sqrt{\rho_f/E} \quad (13)$$

$$f_f = \omega_f/2\pi \quad (14)$$

외벽에 액체가 가하는 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{\max} = \sqrt{(m_s S_{as})^2 + (m_f S_{af})^2 + [(m_r - m_f) G_{\max}]^2} \quad (15)$$

여기서 가속도 값인  $S_{as}$ 는 0.5% 설계응답스펙트럼 감쇠비,  $G_{\max}$ 는 3% damping in EL. 77'-0" Response Spectra이고,  $S_{af}$ 는 3% damping in EL. 77'-0" Response Spectra의 1.5배한 값이다.

##### 4.2 해석 모델 및 결과

본 연구에서 해석할 모델은 온수팽창탱크(water

Table 3 Input data

Height (mm)	637.5
Radius (mm)	830
Thickness (mm)	10
Mass (kg)	1392
S <sub>as</sub> (g)	0.38
G <sub>max</sub> (g)	1.28
S <sub>af</sub> (g)	0.4
Allowable Stress (MPa)	0.21

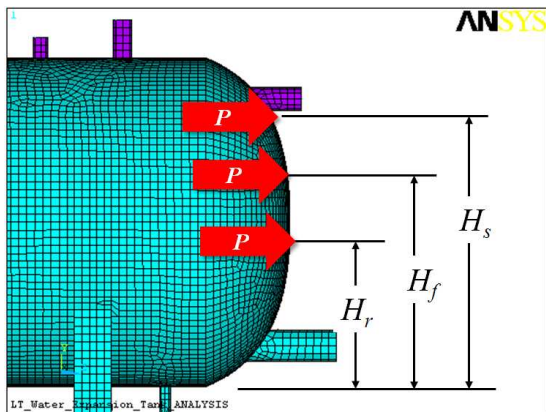


Fig. 11 Schematic diagram of applied sloshing loads

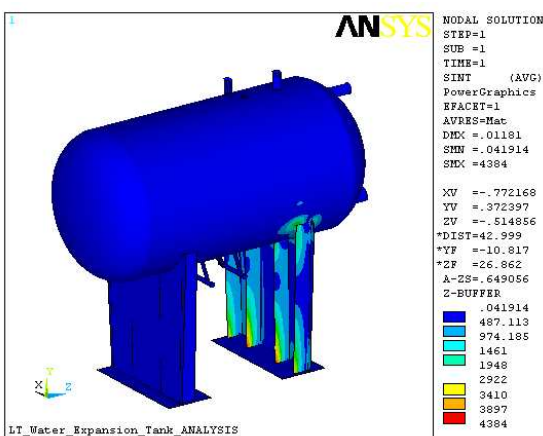


Fig. 12 Results of sloshing analysis

expansion tank)로서 주요 구성품은 shell, head, nozzle, saddle support, base plate 등으로 되어 있고, Fig. 10에 온수팽창탱크의 유한요소모델을 나타내었다.

해석 모델의 탄성계수는,  $E = 28.6 \times 10^6$  psi 이고, 푸아송비는,  $\nu = 0.3$  이다.

위의 4.1절에서 구조물이 내에 액체가 요동시에 외벽에 가하는 힘을 구해서 Fig. 11과 같이 유한요소해석 모델에 적용하였고, Table 3은 input data를 정리하였고, Fig. 12는 해석결과를 나타내었다. 최대응력은 saddle 부근에서 발생하였고, 그 값은 허용이내에 있음을 확인하였다.

### 6. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 폴라 크레인의 설계를 위해 유한요소법을 이용하여 내진해석을 수행하였다. 고유치 해석을 통하여 폴라 크레인의 고유진동수와 진동형상을 파악하고 응답스펙트럼해석을 통해 폴라크레인의 내진 안전성을 평가하였다. 구조물에 발생한 최대 응력값은 137MPa로 허용응력인 300MPa 이내에 있음을 확인하였다. 그리고 액체 저장탱크의 슬로싱해석을 통하여 구조적인 안전성 평가 기법을 제시하였고, 해석 후 발생한 최대응력값은 0.03MPa (4.6ksi)이고, 이는 허용값인 0.21MPa 이내에 있음을 확인하였다. 이를 통해 유한요소해석을 이용하여 상세설계 과정을 표준화하여 기기설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) Son, Y. H., 2000, "Seismic Analysis of National Highway Bridge Considering Korea Earthquake Character," *Kyungbuk College Collection of Dissertations*, Vol. 18 No. 1.
- (2) Cho, C. R., 2005, "Dynamic Analysis of the Reactor Safety System of the Nuclear Power Plant," Keimyung University Mechanical Engineering Master's Thesis.
- (3) "ASME Code SECTION. II PART D," 2007 Edition.
- (4) Jeon, H. J. and Kim, E. G., 1999, "Mechanical Dynamic," HYOSUNG.
- (5) Chopra, A. K., 2005, "Dynamic of Structures," PEARSON EDUCATION KOREA.
- (6) Haroun, M. A., 1983, "Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 179~206.
- (7) Housner, G. W., 1963, "The Dynamic Behaviour of

- Water Tanks," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, pp. 381~387.
- (8) Lee, J. K., Kim, J. Y. and Chung, P. J., 2001, "Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plant Ulchin 5&6," *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers*, Vol. 26, No.7, pp. 1376~1383.
- (9) Kim, S. J., Lee, Y. S., Ryu, C. H., Yang, K. H. and Jung, S. H., "Seismic Analysis of Rack Structure with Fluid-Structure Interaction," 2001, *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers*, 2001, Nov. 01, pp. 465~470.