



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고압 급수 가열기의 피로해석에 관한 연구

**A Study on the Fatigue Analysis of High Pressure Feedwater Heater**

지도교수 조 종 래

2010년 8월



한국해양대학교 대학원

기계공학과 권 정 현

# 목 차

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| Abstract .....                     | i   |
| Nomenclature .....                 | iii |
| List of Tables .....               | v   |
| List of Figures .....              | vii |
| <br>                               |     |
| 1. 서론 .....                        | 1   |
| 1.1 연구 배경 .....                    | 1   |
| 1.2 연구 동향 .....                    | 2   |
| 1.3 연구 내용 및 목적 .....               | 3   |
| <br>                               |     |
| 2. 탄성 유한요소 해석의 이론적 배경 .....        | 5   |
| <br>                               |     |
| 3. 고압 급수가열기의 열-구조 피로해석 .....       | 7   |
| 3.1 부분 모델 해석 .....                 | 8   |
| 3.1.1 유한요소 모델링 .....               | 8   |
| 3.1.2 해석 조건 .....                  | 12  |
| 3.1.3 열전달 해석 .....                 | 17  |
| 3.1.3.1 열전달 해석에 대한 가정 .....        | 17  |
| 3.1.3.2 열전달 계수 .....               | 17  |
| 3.1.3.3 해석 결과 .....                | 19  |
| 3.1.4 운전조건 시 강도 해석 .....           | 24  |
| 3.1.4.1 솔리드 영역의 결과 값 .....         | 29  |
| 3.1.4.2 튜브 구멍이 있는 영역의 결과 값 .....   | 30  |
| 3.2 피로 강도 해석 .....                 | 33  |
| 3.2.1 솔리드 영역의 피로 누적 계수 .....       | 33  |
| 3.2.2 튜브 구멍이 있는 영역의 피로 누적 계수 ..... | 39  |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. 결론 .....                                                                   | 43 |
| 참고문헌 .....                                                                    | 45 |
| Appendix 1. History of Stress Intensity in All Transient Event .....          | 46 |
| Appendix 2. Stress Linearization for Operation Condition at Cut A~N           | 54 |
| Appendix 3. Calculation of Stress Range at Perforated Region .....            | 56 |
| Appendix 4. Fatigue Evaluation at Perforated Region by using<br>FATFOST ..... | 58 |



# A Study on the Fatigue Analysis of High Pressure Feedwater Heater

Jung-Hun Kwon

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University

## Abstract

The objective of structural analysis is to verify the fatigue life of high pressure feedwater heater by using the thermo-mechanical analysis due to the operating pressure and thermal gradients at the event of cold start, warm start, hot start, shut down and load changes.

The heater consists of tubesheet, shell and hemi-head. There are many perforated holes in tubesheet to connect U-type tubes.

The tubesheet perforated region (ligament) was modeled as an equivalent solid plate. The heat transfer coefficients HTC derived from the Dittus-Boelter equation were given on the surface contacting with feedwater, and the HTC of tube out-surface in desuper heating zone were given on shell inner surface side. The three-dimensional, isoparametric elements were used to evaluate the fatigue life in the perforated region, hemi-head and shell. The appropriate high pressure feedwater heater operation pressures and temperatures were used for the analysis.

The finite element analysis was used to evaluate stress levels and thermal gradients for the feedwater heater. Finite element analysis models were constructed

for each analysis and consisted of nodes and elements representing the tubesheet solid, perforated regions, shell and hemi-head.

The first step of analysis is to determine the internal temperature distribution (thermal gradients) as a function of time for all operating mode and the internal stresses were calculated for the critical temperature distributions with operating pressure.

The second step is to calculate stress levels and evaluate code requirement and fatigue life. The heater is verified the integrity, because evaluated stresses satisfy the allowable stress and fatigue usage factors are not exceed 1.0.



## Nomenclature

|            |                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $C_p$      | : 비열(specific heat, W/kgK)                                               |
| $D$        | : 채널 지름(channel diameter)                                                |
| $E$        | : 탄성 계수(Young's modulus, GPa)                                            |
| $E^*$      | : 유효 탄성 계수(effective Young's modulus, GPa)                               |
| $h$        | : 튜브 구멍 사이 최단 거리의 너비<br>(width of ligament at the minimum cross section) |
| $h_t$      | : 열전달계수(heat transfer coefficient, W/m <sup>2</sup> K)                   |
| $k$        | : 열전도도(thermal conductivity, W/mK)                                       |
| $k_f$      | : 유체의 열전도도(thermal conductivity of fluid, W/mK)                          |
| $P$        | : 튜브 구멍의 중심점들 사이 거리(pitch)                                               |
| $Pr$       | : 프란틀 수(Prandtl number)                                                  |
| $Re$       | : 레이놀드 수(Reynold's number)                                               |
| $t$        | : 튜브시트 두께(thickness of tubesheet)                                        |
| $\alpha$   | : 선팽창계수(mean linear expansion, $\mu\text{m}/\mu\text{mK}$ )              |
| $\alpha_t$ | : 열확산계수(thermal diffusivity, m <sup>2</sup> /s)                          |
| $\gamma$   | : 전단 변형률(shearing strain)                                                |
| $\epsilon$ | : 인장 변형률(tensile strain)                                                 |
| $\eta$     | : 리가먼트 효율(ligament efficiency)                                           |
| $\mu$      | : 점도(viscosity, kg/m s)                                                  |
| $\nu$      | : 팽아송비(Poisson's ratio)                                                  |
| $\nu^*$    | : 유효 팽아송 비(effective Poisson's ratio)                                    |
| $\sigma$   | : 인장 응력(tensile stress)                                                  |

$\tau$  : 전단 응력(shearing stress)



## List of Tables

Table 1 Material properties of SA516-70

Table 2 The history of the temperature and pressure of feed water (channel) with time.

Table 3 The history of the temperature and pressure of steam (shell side) with time.

Table 4 Fatigue table for ultimate tensile stress  $\leq 552\text{MPa}$

Table 5 Thermal properties of saturated water for heat transfer analysis

Table 6 Detail information for section cuts Fig 9

Table 7 Maximum stress intensity range in solid region (Unit: MPa)

Table 8 Maximum primary and secondary stress range of SI-r in perforated region (Unit: MPa)

Table 9 Maximum primary and secondary stress range of SI-t in perforated region (Unit: MPa)

Table 10 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut A

Table 11 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut B

Table 12 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut C

Table 13 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut D

Table 14 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut N

Table 15 Usage factor counting of cut A(node 7948)

Table 16 Usage factor counting of cut B(node 803)

Table 17 Usage factor counting of cut C(node 838)

Table 18 Usage factor counting of cut E(node 801)

Table 19 Usage factor counting of cut N(node 9815)

Table 20 Summary of evaluation of usage factor at solid region

Table 21 Summary evaluation of usage factor at perforated region

Table 22 Usage factor counting of cut E(node 5382)

Table 23 Usage factor counting of cut E(node 5119)

Table 24 Usage factor counting of cut F(node 5371)

Table 25 Usage factor counting of cut F(node 5108)



## List of Figures

Fig. 1 Thermo-mechanical analysis process

Fig. 2 The whole geometry of high pressure feedwater heater

Fig. 3 Applied geometry and FE model

Fig. 4 ANSYS element description used in thermo-mechanical analysis

Fig. 5 Curves of the determination of  $E^*/E$  and  $\nu^*$

Fig. 6 Description of pitch(P) and ligament(h)

Fig. 7 Design Fatigue curve

Fig. 8 Thermal solid elements and boundary conditions

Fig. 9 Temperature distribution in accordance with time of each event

Fig. 10 Identification of cuts and node numbers near cuts

Fig. 11 Stress multiplier for stress intensity (K)

Fig. 12 Stress multipliers  $Y_1$  and  $Y_2$  for various orientation  $\phi$  of  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$



# 1. 서론

## 1.1 연구 배경

발전소·정유공장·담수화 설비 등 플랜트는 우리나라의 중요한 산업이다. 2007년 들어 수주한 5억 달러 이상 대형 프로젝트만 지금까지 27건, 금액으로 201억 달러에 달한다.

2000년대 초까지만 해도 선진 업체들의 하도급업무를 주로 담당하던 한국 기업들은 이제 이처럼 대형 프로젝트를 일괄 수주할 뿐 아니라 고도의 기술이 요구되는 기본 설계시장까지 개척하고 있다.

플랜트산업의 약진에는 한국 플랜트업계가 구조조정을 마친 이후 때맞춰 찾아온 고유가(高油價)의 영향도 있다. 중동 산유국들이 자원 개발뿐 아니라 자원의 부가가치를 높이고 전반적인 산업화를 추진하는 쪽으로 집중 투자하면서 석유화학 플랜트 등의 발주가 크게 늘어났다. 최근에는 UAE에 한국형 원전을 첫 수출하는 성과를 거두고 터키와 싱가포르에도 원전 수출이 전망되고 있다.

이처럼 플랜트 사업이 호황을 이루면서 발전소용 기계들의 수요가 늘어나고 있으며 그에 따른 건전성 평가는 필수적이라 할 수 있다. 그 중 급수가열기(feedwater heater)의 경우 압력에 의한 기계적하중과 내 외부 온도 편차에 의한 열적하중을 수없이 반복적으로 받게 된다. 피로 하중의 경우 누적이 심화될 경우 발전소 운전 및 안정성에 영향을 미칠 우려가 있으므로 각 운전모드에 따른 구조 해석을 통한 피로 강도를 평가 할 필요가 있다.

## 1.2 연구 동향

화력 발전에서 증기발생기로 들어가는 급수를 배수 및 추기증기로 가열하는 급수가열기에서는 동체 내부에 설치된 충격판의 형상에 따른 추기노즐 주위의 유동특성에 대해 알아보고, 급수가열기 추기노즐 주변의 동체 감육의 원인을 유체유동 측면에서 분석하는 연구되고 있다.<sup>(1)</sup>

석유 화학, 화력, 원자력 발전 등의 산업에서 널리 사용되고 있는 튜브형 열교환기는 헤드(head), 셸(shell), 튜브(tube), 튜브시트(tubesheet) 및 스커트(skirt)등으로 구성된다. 튜브와 튜브시트의 연결 방식에 따라 U-튜브형, 유동형, 고정형 튜브시트로 구분되는데 고정 튜브시트를 갖는 열교환기의 경우 튜브가 양단의 튜브시트에 확관 혹은 용접으로 고정되며, 가장 간단하고 경제적인 형태의 열교환기로 알려져 있으나, 튜브에 열하중이 가해질 경우 열팽창에 의한 열응력 발생으로 튜브에 파손이 일어날 수 있는 단점이 있다.

튜브시트에는 수백 혹은 수천 개의 튜브가 설치되는데, 각각의 튜브를 유한 요소 모델링에 고려하기는 매우 어렵기 때문에 등가 모델링을 통해 유한 요소 해석에 적용한다. 수직형의 경우 튜브의 배열이 원형 튜브시트의 중심을 기준으로 동심원 형태의 배열을 하고 있기 때문에 튜브와 튜브시트는 축대칭 모델링이 가능 하다.

튜브시트의 두께를 결정하기 위해 튜브는 전체 튜브와 같은 강성계수(stiffness)를 갖는 동심의 실린더로 가정하였으며, 튜브시트는 튜브 구멍이 있는 부분에 대해서는 등가의 물성치를 갖는 평판으로 가정하여 축대칭 유한 요소 해석에 적용하였다. 또한, 등가 튜브시트에서의 건전성 평가를 위해 등가 튜브시트에서 계산된 응력 강도(stress intensity)에 이축성비(biaxiality ratio)와 리가먼트 효율(ligament efficiency)의 역수를 곱하여 ASME 코드에 나타나 있는 설계 조건과 비교하였다.

등가 튜브시트와 등가 튜브를 이용하여 열교환기의 건전성을 평가한 연구도

있다.<sup>(2)</sup> 그러나 히터를 3차원으로 모델링하여 노즐을 포함한 피로해석을 수행한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

### 1.3 연구 내용 및 목적

발전소에 들어가는 급수 가열기는 저압 급수가열기와 고압 급수가열기가 있다. 본 연구 모델인 고압 급수가열기는 급수펌프 이후에 설치되어 있는 가열기로 고압 및 증기 터빈 내에서 팽창중인 증기 일부를 추가하여 가열된다.

발전소에 들어가는 고압 급수 가열기는 상온 시동(cold start), 중온 시동(warm start), 고온 시동(hot start), 정지(shut down), 하중 변화(load change)로 운전모드가 나누어지며 각 운전모드는 온도차가 크고 고압의 환경에서 운전되기 때문에 큰 온도차 및 고압 조건을 만족하는 구조의 안정성을 필요로 한다. 또한 각 운전모드의 운전 중에 발생하는 피로 누적에 대한 피로 강도를 평가하여야 한다.

본 연구에서는 발전소용 급수 가열기의 유한요소 해석을 통해 구조 안정성 평가 및 구조해석 방법을 제시하고자 한다. 유한요소 해석을 위해 ANSYS 11.0의 자체 모델러를 이용하여 솔리드 요소, 쉘 요소로 이루어진 유한요소 모델을 완성하였다.

열-구조 해석은 각 운전모드의 운전 중 급수가열기의 온도를 알기 위해 열 전달 해석을 수행하고, 이 결과를 열 하중으로 적용하고 내부에 압력을 적용하여 해석을 수행하였다. 급수가열기의 열-구조 해석은 등가 물성을 적용한 튜브시트 솔리드와 쉘, 반구형 헤드의 상세 평가를 위한 부분 모델 해석으로 수행하였다.

피로 해석은 각 운전모드의 운용 중에 발생하는 시간에 따른 온도차 및 압력에 의한 피로 강도를 평가하기 위해 과도 해석(transient analysis)을 수행하였다. 해석은 완성된 유한요소 모델과 해석 조건하에서 과도 열전달 해석을

수행하고, 과도 열전달 해석을 통해 구해진 결과를 열 하중으로 이용하여 과도 구조 해석을 수행하였다.

급수가열기의 열구조 해석은 ANSYS 프로세서<sup>(3)</sup>와 해양대학교 자체 프로세서인 FATPOST를 이용하여 ASME Section VIII Div. 2<sup>(4)</sup>의 방법에 따라 수행하였다.

이러한 과정을 거쳐서 발전소에 들어가는 급수가열기의 구조해석에 필요한 구조 모델링과 유한요소해석을 상용코드인 ANSYS를 활용하여 해석의 과정과 해석 결과를 이용한 상세설계 과정을 표준화하여 설계 프로젝트에 활용하는 것이 논문의 목적이다.



## 2. 탄성 유한요소 해석의 이론적 배경

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(finite element)로 나누어서 각 절점의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분원리(variational principle), 가중잔여법(method of weighted residual), 에너지 균형법(energy balance approach)등을 이용하여 세우고 이 미분방정식을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다.

재질이 등방성(isotropic)인 선형탄성 재료에 대하여 응력과 변형률의 관계를 후크의 법칙(Hook's law)에 의하여 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \Delta T$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha \Delta T$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha \Delta T$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (2.1)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{zx}$$



위 식들을 선형대수식으로 표현하면 (2.2)식과 같이 정리할 수 있으며, 이 행렬식의 역은 다음 (2.3)식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x - \alpha \Delta T \\ \epsilon_y - \alpha \Delta T \\ \epsilon_z - \alpha \Delta T \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

이 식에서  $E, \nu, \alpha$ 는 탄성계수(Young's modulus), 팽아송비(Poisson's ratio), 선팽창계수(mean linear expansion)와 같은 상수이므로 임의 점에서 변형률을 구하면 그 점에서의 응력도 계산할 수 있음을 알 수 있다.<sup>(5)</sup>

### 3. 고압 급수가열기의 열-구조 피로해석

이 연구는 콜드 스타트, 웜 스타트, 고온 시동, 정지와 하중 변화의 작동 압력과 열 구배로 인한 고압 급수가열기의 피로 강도를 분석적으로 검증한다.

ANSYS를 이용한 유한요소 해석 코드를 사용하여 모델의 각 단면 응력과 온도 구배를 계산하였다.

고압 급수가열기의 열-구조 해석 및 해석 절차는 Fig. 1의 순서와 같이 크게 형상 입력, 재질 및 경계조건 입력, 열전달 해석, 열-구조 해석 그리고 결과출력으로 나눌 수 있다.

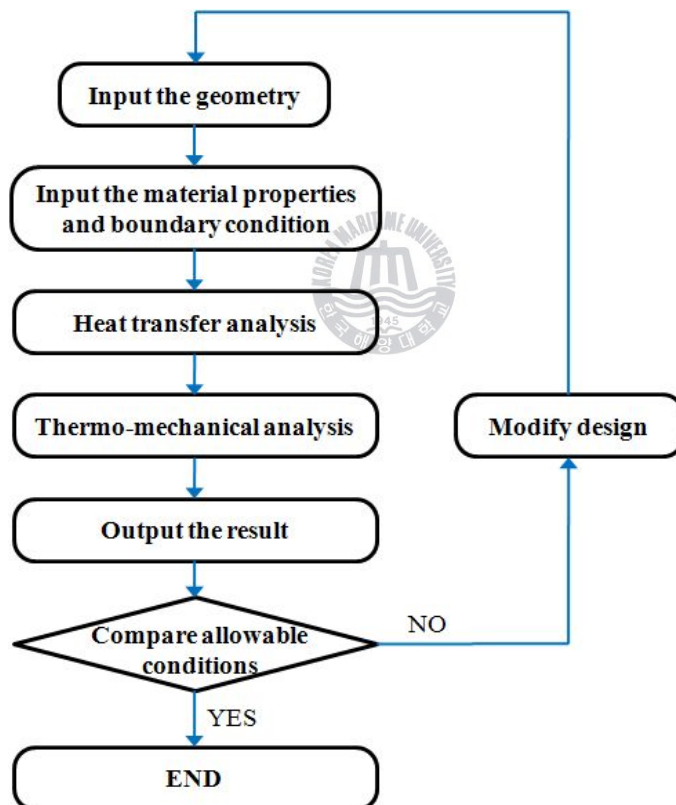


Fig. 1 Thermo-mechanical analysis process

형상입력 단계에서는 FEM 해석을 수행할 유한요소모델의 형상을 입력하는 작업을 수행하며, 재질 및 경계 조건 입력단계에서는 유한요소모델의 각 부분에 재질 및 경계조건을 부여한다. 완성된 유한요소모델과 해석 조건하에서 열전달 조건을 고려한 열전달 해석을 수행하고, 열전달에 의한 열응력과 내압에 의한 열-구조해석을 수행한다. 이러한 해석을 통해 결과를 출력하고 급수 가열기의 안정성을 평가한다.

### 3.1 부분 모델 해석

전체 솔리드 모델을 이용하여 해석을 수행 할 경우, 많은 양의 메모리와 해석 수행시간이 필요하다. 이러한 부분의 대체기술로 적은 메모리와 해석 수행시간을 필요로 하는 솔리드 부분 모델을 해석에 이용한다.

#### 3.1.1 유한요소 모델링

고압 급수가열기의 열-구조 해석을 위해 유한요소 모델링을 수행 하였다. 고압 급수가열기는 헤드, 튜브시트, 셸 부분으로 구성되어 1/4로 부분 모델링 하였다.

본 연구에서는 해석 프로그램으로 상용코드인 ANSYS 11.0을 사용하였다. 본 모델의 전체 형상은 Fig. 2에 나타내었으며 해석에 적용된 기하학적 모델과 유한요소 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

해석에 적용된 모델에는 8절점 솔리드 요소(thermal solid 70, structural solid 185)를 사용하였다. 해석에 적용된 모델의 요소와 절점의 개수는 직관 튜브 타입의 경우 13,570개의 요소와 15,921개의 절점이 사용되었다. 사용된 요소의 형상은 Fig. 4에 나타내었다.<sup>(4)</sup>

튜브시트의 경우는 리가먼트 효율을 적용하여 솔리드 형태로 모델링하여 등가의 물성치를 사용하였다.

셸 부분 길이는 헤드반경과 셸의 두께를 이용하여 유효한 길이를 정했다.

$$\sqrt{Rt} = \sqrt{762 \times 30.4} = 152.2$$

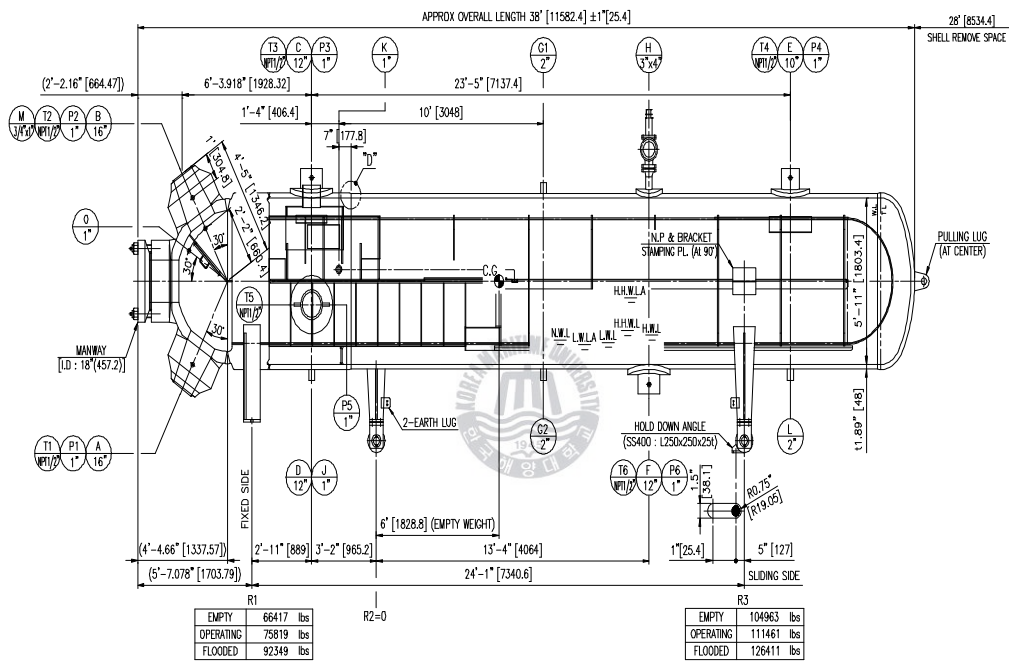
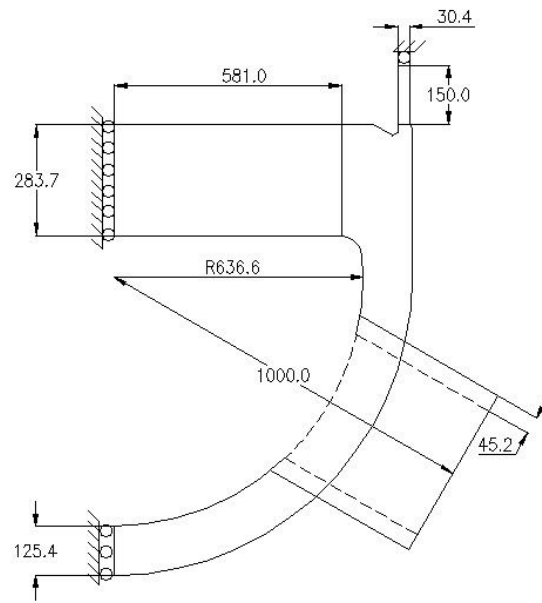
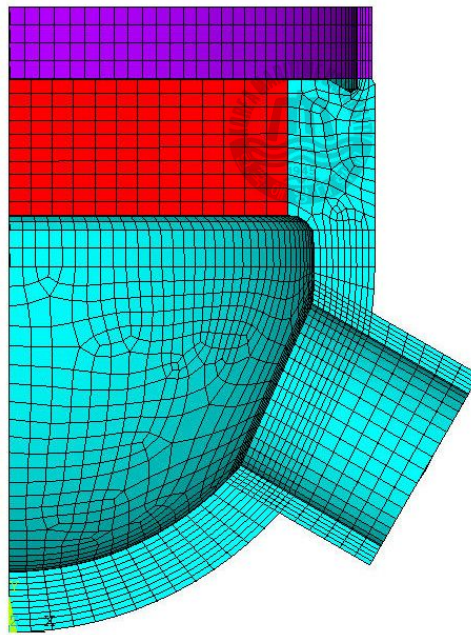


Fig. 2 The whole geometry of high pressure feedwater heater

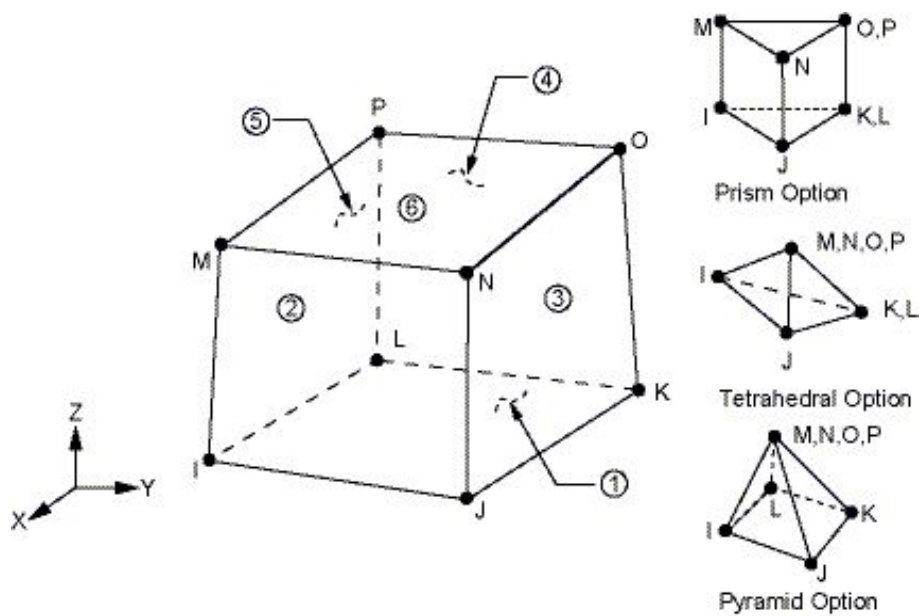


(a) Geometry and dimensions of high pressure feed water heater

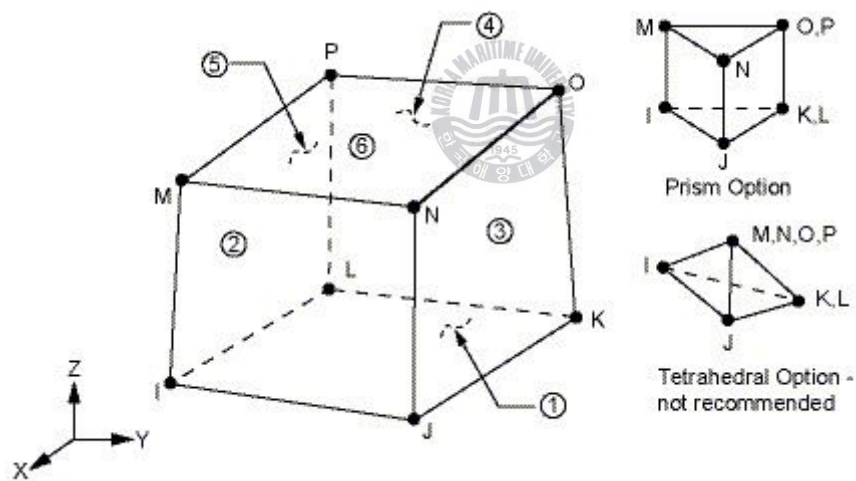


(b) FE model

Fig. 3 Applied geometry and FE model



(a) Thermal solid of element type number 70 in ANSYS



(b) Structural solid of element type number 185 in ANSYS

Fig. 4 ANSYS element descriptions used in thermo-mechanical analysis

### 3.1.2 해석 조건

각 재료의 물성치는 Table 1과 같다.<sup>(6)</sup> 피로해석에 적용될 각 운전모드의 시간에 따른 온도와 압력은 Table 2 ~ Table 3에 나타내었다.<sup>(7)</sup>

튜브시트의 경우 튜브가 꽂히는 부분에 구멍이 수 없이 있는데 이 경우 모두 모델링하기에는 비효율적이므로 구멍이 없는 유사한 솔리드 형태로 모델링하였다. 이 경우 ASME Section VIII, Division 2에 제시된 Fig. 5와 Fig. 6을 이용하여 리가먼트 효율을 적용하기 위한 각 계산 값은 아래와 같으며 등가물성치의 상세 수치는 Table 1의 MP 2에 나타내었다.

$$\frac{t}{P} = \frac{283.7}{20.6} = 13.77, \quad \eta = \frac{h}{P} = \frac{4.73}{20.6} = 0.23, \quad \frac{E^*}{E} = 0.19, \quad \nu^* = 0.42$$

피로 평가에 필요한 데이터는 ASME Section VIII, Division 2에 제시된 온도가 371℃를 초과하지는 않는 저합금 탄소강에 적용되는 Table 4와 Fig 7을 이용하였다.



Table 1 Material properties of SA516-70

| °C  | Solid region                          |                                                                    |                                   |                                 |                                                               |                            | Perforated region                           |                                        |
|-----|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
|     | $k$<br>(thermal conductivity)<br>W/mK | $\alpha_t$<br>(thermal diffusivity)<br>$10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ | $c_p$<br>(specific heat)<br>W/kgK | $E$<br>(Young's modulus)<br>GPa | $\alpha$<br>(mean linear expansion)<br>$10^{-6} \text{ m/mK}$ | $\nu$<br>(Poisson's ratio) | $E^*$<br>(effective Young's modulus)<br>GPa | $\nu^*$<br>(effective Poisson's ratio) |
| 25  | 60.4                                  | 18.10                                                              | 425                               | 202                             | 11.52                                                         | 0.3                        | 38.38                                       | 0.42                                   |
| 100 | 58.0                                  | 15.68                                                              | 471                               | 198                             | 12.06                                                         |                            | 37.62                                       |                                        |
| 150 | 55.9                                  | 14.43                                                              | 493                               | 195                             | 12.42                                                         |                            | 37.05                                       |                                        |
| 200 | 53.6                                  | 13.40                                                              | 509                               | 192                             | 12.96                                                         |                            | 36.48                                       |                                        |
| 250 | 51.4                                  | 12.42                                                              | 527                               | 189                             | 13.14                                                         |                            | 35.91                                       |                                        |
| 300 | 49.2                                  | 11.48                                                              | 545                               | 185                             | 13.32                                                         |                            | 35.15                                       |                                        |
| 325 | 48.1                                  | 11.01                                                              | 554                               | 182                             | 13.41                                                         |                            | 34.77                                       |                                        |

Table 2 The history of the temperature and pressure of feed water (channel) with time.

| Event                  | Time<br>(min) | Temp<br>(°C) | Press.<br>(MPa) | Cycles | Event                   | Time<br>(min) | Temp<br>(°C) | Press.<br>(MPa) | Cycles |
|------------------------|---------------|--------------|-----------------|--------|-------------------------|---------------|--------------|-----------------|--------|
| CS<br>(cold<br>start)  | 0             | 110          | 8.7             | 180    | WS<br>(warm<br>start)   | 0             | 110          | 8.7             | 1110   |
|                        | 250           | 180          | 8.6             |        |                         | 84            | 180          | 8.6             |        |
|                        | 305           | 208          | 15.5            |        |                         | 120           | 208          | 15.5            |        |
|                        | 330           | 228          | 20.8            |        |                         | 145           | 228          | 20.8            |        |
|                        | 360           | 249          | 21.8            |        |                         | 170           | 249          | 21.8            |        |
| HS<br>(hot<br>start)   | 0             | 110          | 8.7             | 1500   | SD<br>(shut<br>down)    | 0             | 249          | 21.8            | 2430   |
|                        | 50            | 180          | 8.6             |        |                         | 12            | 228          | 20.8            |        |
|                        | 80            | 208          | 15.5            |        |                         | 25            | 208          | 15.5            |        |
|                        | 100           | 228          | 20.8            |        |                         | 55            | 180          | 8.6             |        |
|                        | 115           | 249          | 21.8            |        |                         | 75            | 110          | 8.6             |        |
| LL<br>(large<br>load)  | 0             | 249          | 21.8            | 2625   | SL<br>(small<br>load)   | 0             | 249          | 21.8            | 42000  |
|                        | 25            | 208          | 8.6             |        |                         | 12            | 228          | 20.8            |        |
| ML<br>(middle<br>load) | 0             | 249          | 21.8            | 21000  | TT<br>(turbine<br>trip) | 0             | 249          | 21.8            | 360    |
|                        | 20            | 216          | 17.6            |        |                         | 5             | 208          | 15.5            |        |
|                        |               |              |                 |        |                         | 20            | 110          | 21.8            |        |

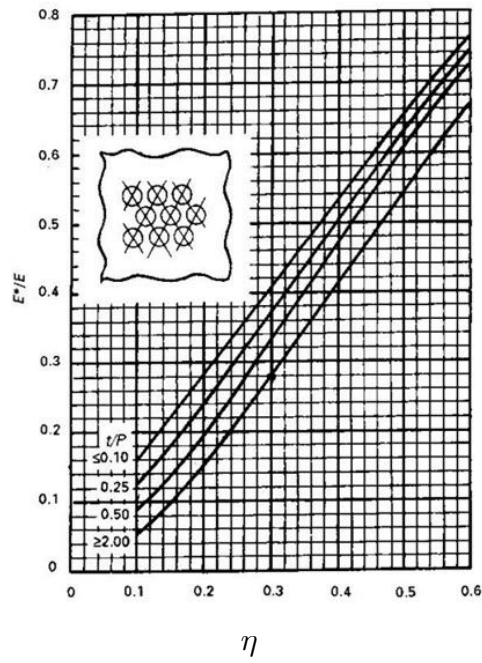
Table 3 The history of the temperature and pressure of steam (shell side) with time.

| Event               | Time (min) | Temp (°C) | Press. (MPa) | Cycles | Event                | Time (min) | Temp (°C) | Press. (MPa) | Cycles |
|---------------------|------------|-----------|--------------|--------|----------------------|------------|-----------|--------------|--------|
| CS<br>(cold start)  | 0          | 40        | 0.1          | 180    | WS<br>(warm start)   | 0          | 40        | 0.1          | 1110   |
|                     | 250        | 324       | 1            |        |                      | 84         | 324       | 1            |        |
|                     | 305        | 309       | 1.8          |        |                      | 120        | 309       | 1.8          |        |
|                     | 330        | 302       | 2.7          |        |                      | 145        | 302       | 2.7          |        |
|                     | 360        | 323       | 3.6          |        |                      | 170        | 323       | 3.6          |        |
| HS<br>(hot start)   | 0          | 40        | 0.1          | 1500   | SD<br>(shut down)    | 0          | 323       | 3.6          | 2430   |
|                     | 50         | 324       | 1            |        |                      | 12         | 302       | 2.7          |        |
|                     | 80         | 309       | 1.8          |        |                      | 25         | 309       | 1.8          |        |
|                     | 100        | 302       | 2.7          |        |                      | 55         | 324       | 1.0          |        |
|                     | 115        | 323       | 3.6          |        |                      | 75         | 40        | 0.1          |        |
| LL<br>(large load)  | 0          | 323       | 3.68         | 2625   | SL<br>(small load)   | 0          | 323       | 3.6          | 42000  |
|                     | 25         | 309       | 1.84         |        |                      | 12         | 302       | 2.7          |        |
| ML<br>(middle load) | 0          | 323       | 3.6          | 21000  | TT<br>(turbine trip) | 0          | 323       | 3.6          | 360    |
|                     | 20         | 306       | 2.1          |        |                      | 5          | 309       | 1.8          |        |
|                     |            |           |              |        |                      | 20         | 40        | 0.1          |        |

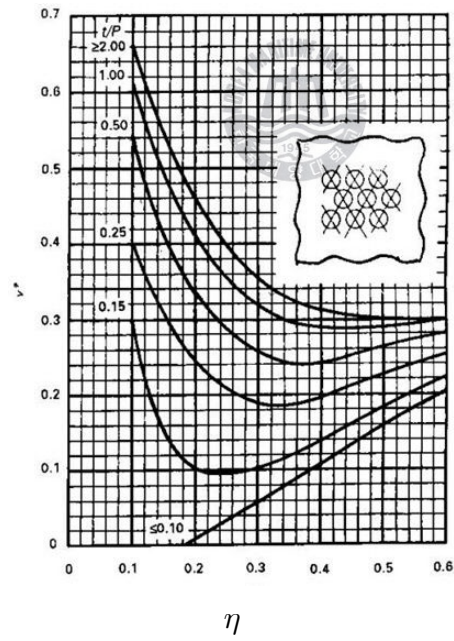


Table 4 Fatigue table for ultimate tensile stress  $\leq 552$  MPa

| No. of cycle                        | 10   | 20    | 50    | 100   | 200    | 500    | 1000   | 2000    |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Alternative stress, $S_{alt}$ (MPa) | 3999 | 2827  | 1896  | 1413  | 1069   | 724    | 572    | 441     |
| No. of cycle                        | 5000 | 10000 | 20000 | 50000 | 100000 | 200000 | 500000 | 1000000 |
| Alternative stress, $S_{alt}$ (MPa) | 331  | 262   | 214   | 159   | 138    | 114    | 93     | 86      |



(a)  $E^*/E$  (equilateral triangular pattern)



(b)  $\nu^*$  (equilateral triangular pattern)

Fig. 5 Curves of the determination of  $E^*/E$  and  $\nu^*$

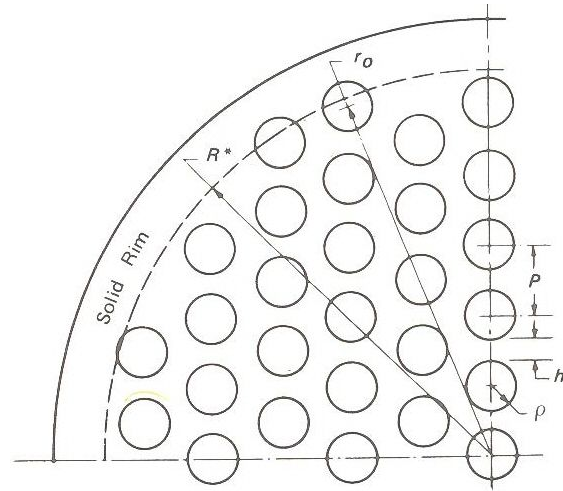


Fig. 6 Description of pitch(P) and ligament(h)

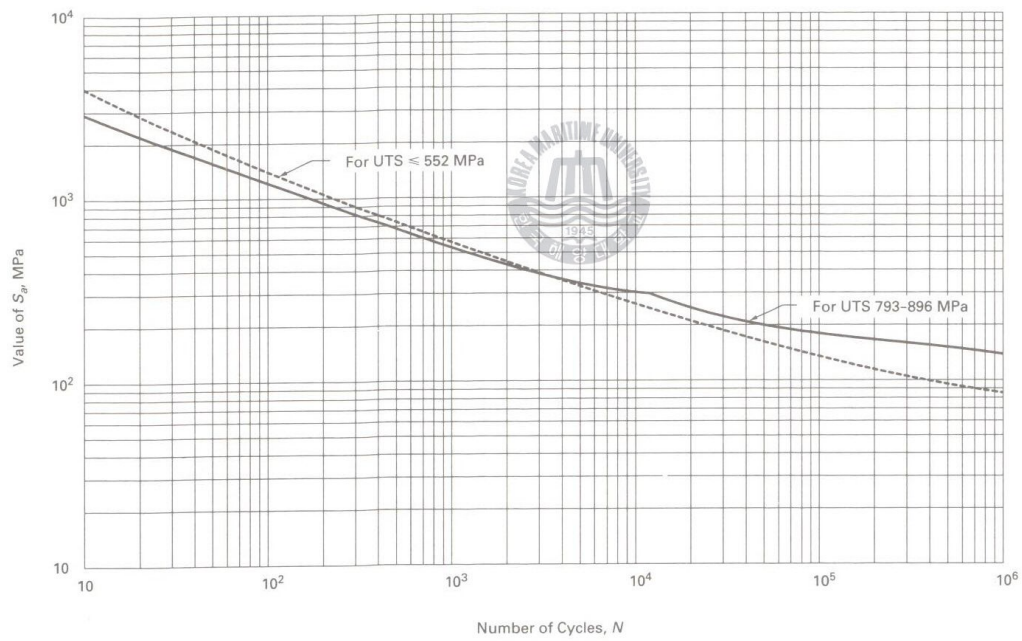


Fig. 7 Design Fatigue curve

### 3.1.3 열전달 해석

열전달 해석의 결과를 구조해석과 피로해석에 열 조건으로 쓰기 위해 수행하였다.

#### 3.1.3.1 열전달 해석에 대한 가정

열전달 해석 시 아래와 같은 가정을 하였다.

- 1) 열 생성은 무시할 수 있다.
- 2) 모든 외부 표면은 완전히 절연되었다.
- 3) 열 물성치는 온도에 따라 다르다.
- 4) 구멍 난 부분 튜브시트 유대는 매우 가늘고, 튜브와 튜브시트 간의 열전달은 우수하기 때문에 튜브시트의 구멍 난 부분 전체 온도는 튜브의 측면 온도와 같다고 가정한다.



#### 3.1.3.2 열전달 계수

온도는 규정된 과도 곡선으로 보여진 것처럼 열전달 표면에 바뀐다. 조립체의 물리적 성질은 3.1.2 절에 있으며 열전달 계수는 아래와 같이 주어진다. 헤드 내부의 열전달계수는 Fig. 8에 나타난 것처럼 HTC1과 HTC2로 각각 적용하였으며 계산은 다음과 같다.

레이놀드 수(Reynold's number)가 2000보다 클 경우, 가해지는 대류는 열전달에 좌우된다.

Dittus Boelter 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$h_t = (kf/D) \times (0.023) \times (Re)^{0.8} \times (Pr)^{0.3} \quad (3.1)$$

온도에 따른 각 계수들은 Table 5에 나타내었다.

셀 부분 내부에 적용된 열전달 계수 값은 튜브 바깥 표면 값으로 추정되었고, Fig. 8에 나타낸 것처럼 HTC(heat transfer coefficient) 3으로 표현하였고 값은 1600W/m<sup>2</sup>K이다.

Table 5 Thermal properties of saturated water for heat transfer analysis

| °C  | $\mu$<br>(viscosity)<br>kg/ms | $k_f$<br>(thermal<br>conductivity<br>of fluid)<br>W/mK | Pr<br>(Prandtl<br>number) | At Channel                                                    | At nozzle inside                                              |
|-----|-------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|     |                               |                                                        |                           | HTC 1<br>(heat transfer<br>coefficient)<br>W/m <sup>2</sup> K | HTC 2<br>(heat transfer<br>coefficient)<br>W/m <sup>2</sup> K |
| 20  | 1.00E-03                      | 0.598                                                  | 7.01                      | 2130                                                          | 5250                                                          |
| 50  | 5.47E-04                      | 0.644                                                  | 3.55                      | 2836                                                          | 6990                                                          |
| 100 | 2.82E-04                      | 0.679                                                  | 1.75                      | 3828                                                          | 9440                                                          |
| 200 | 1.34E-04                      | 0.663                                                  | 0.91                      | 5219                                                          | 12860                                                         |
| 250 | 1.07E-04                      | 0.616                                                  | 0.859                     | 5673                                                          | 13980                                                         |
| 300 | 8.60E-05                      | 0.548                                                  | 0.902                     | 6129                                                          | 15110                                                         |
| 325 | 7.55E-05                      | 0.514                                                  | 0.924                     | 6357                                                          | 15675                                                         |

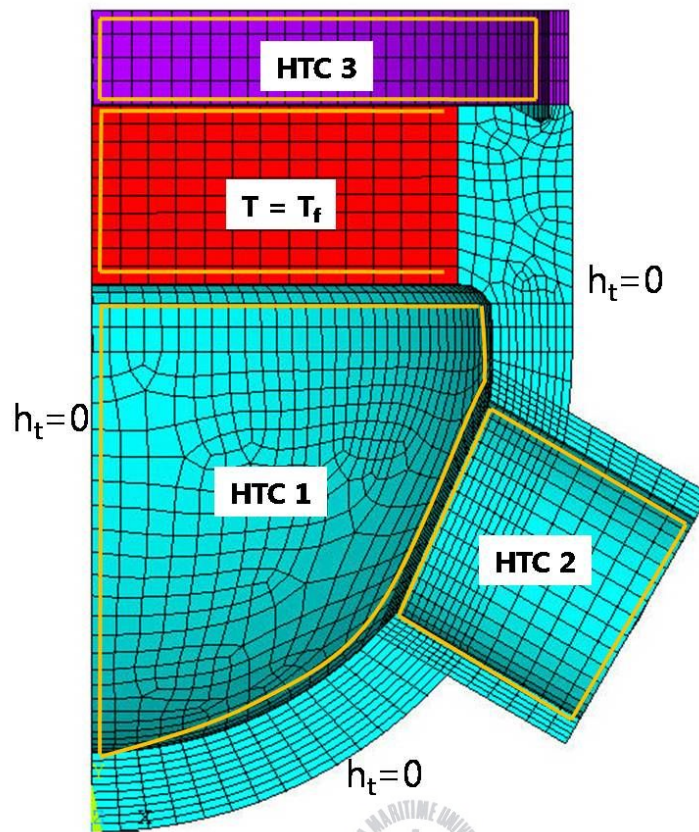
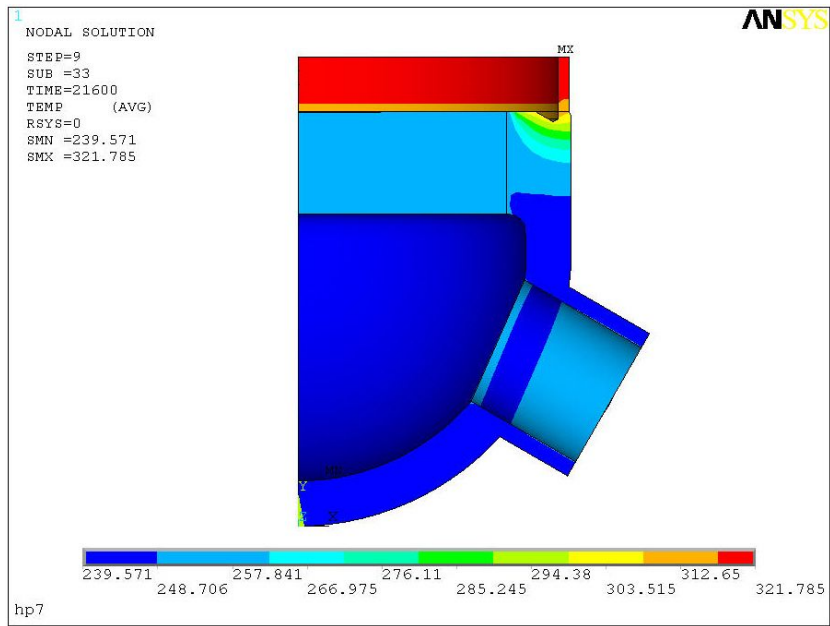


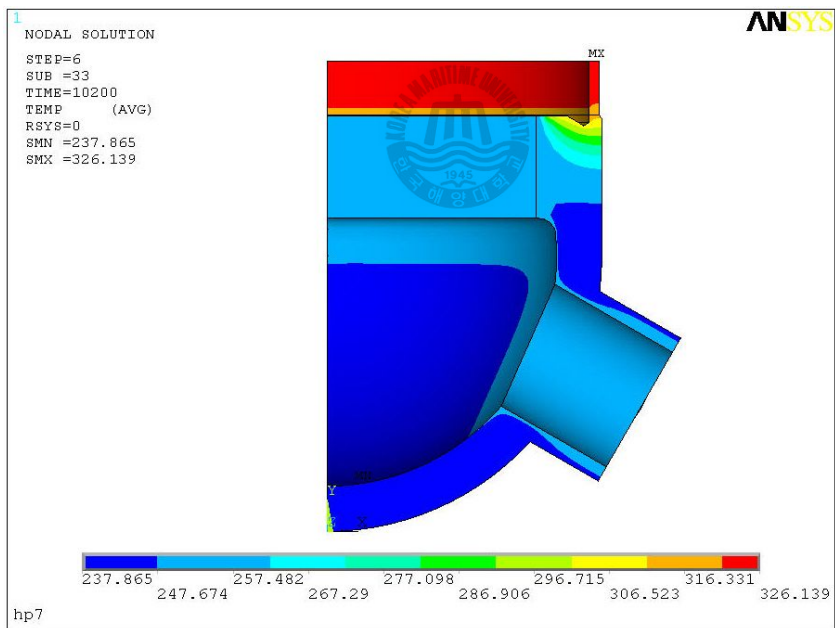
Fig. 8 Thermal solid elements and thermal boundary conditions

### 3.1.3.3 해석 결과

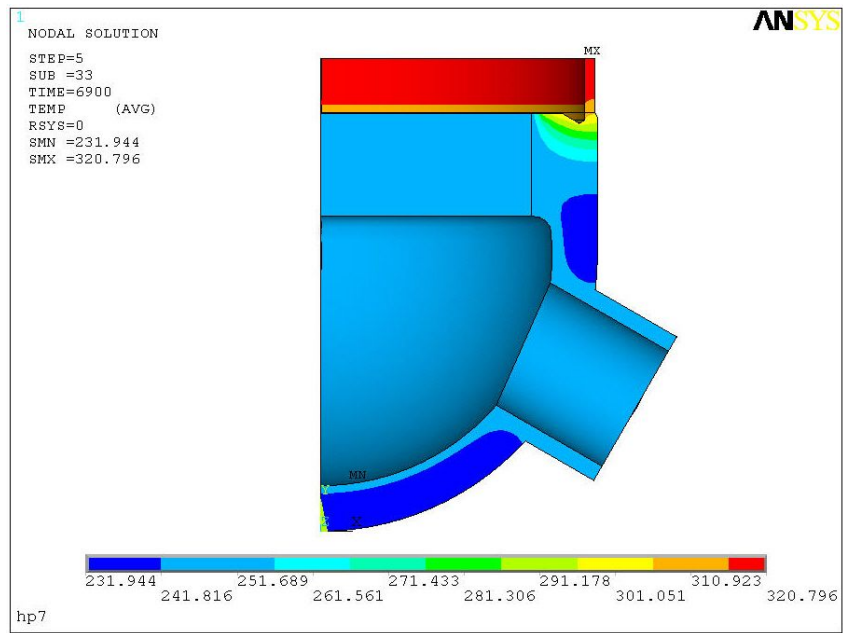
3.1.2절에 있는 Table 1 ~ Table 3의 물성치를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 9는 각 운전모드의 열전달 해석 결과 값을 나타낸다. 시간 단위는 초(sec)이며 온도 단위는  $^{\circ}\text{C}$ 이다.



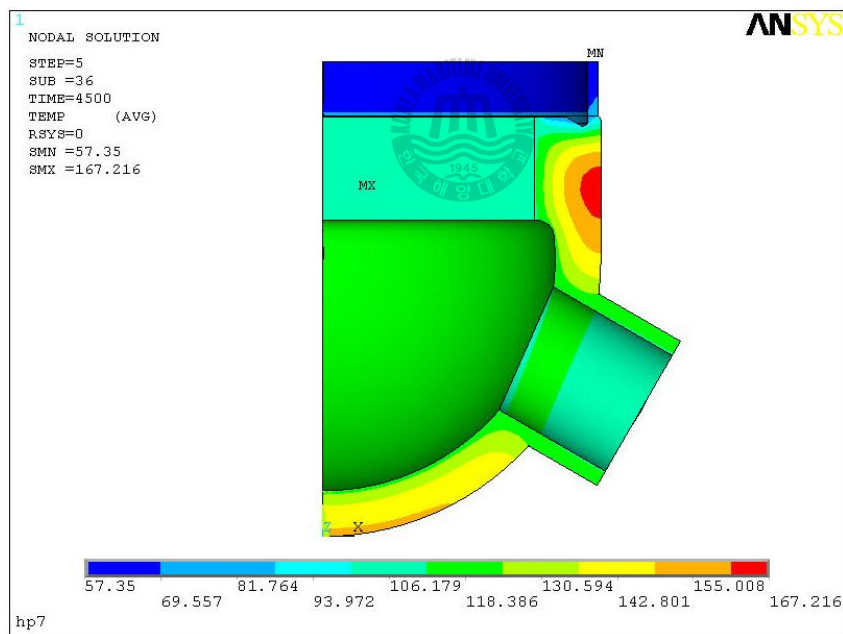
(a) Temperature distribution at 21600 after cold start



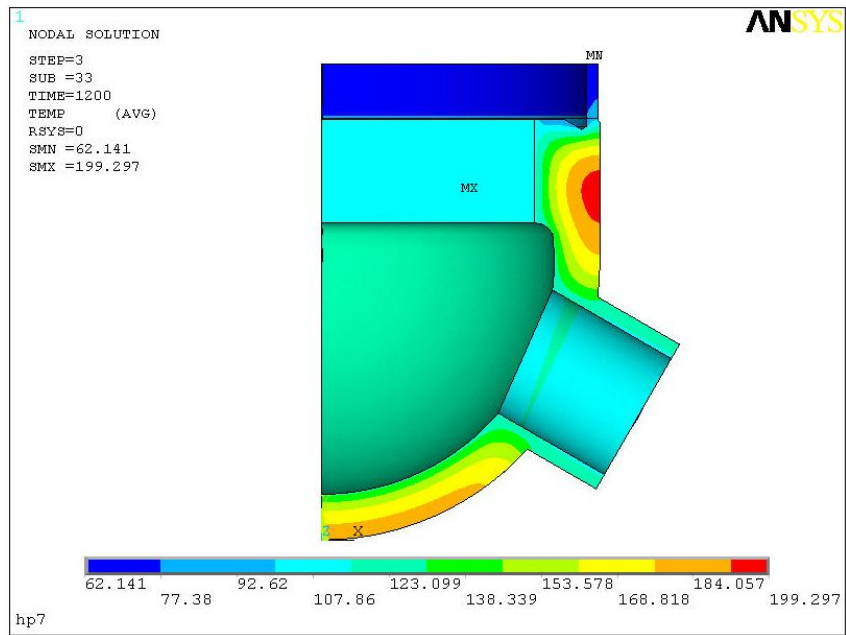
(b) Temperature distribution at 10200 after warm start



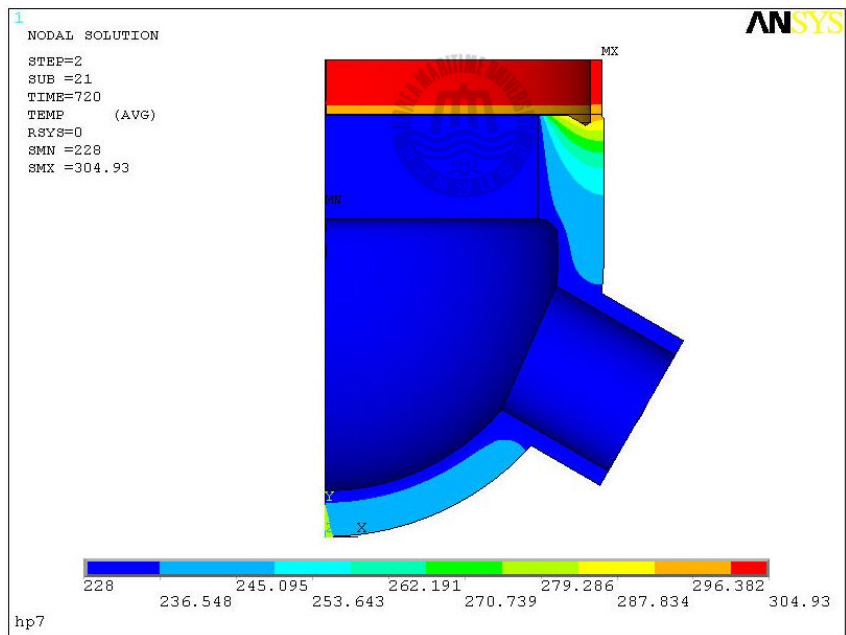
(c) Temperature distribution at 6900 after hot start



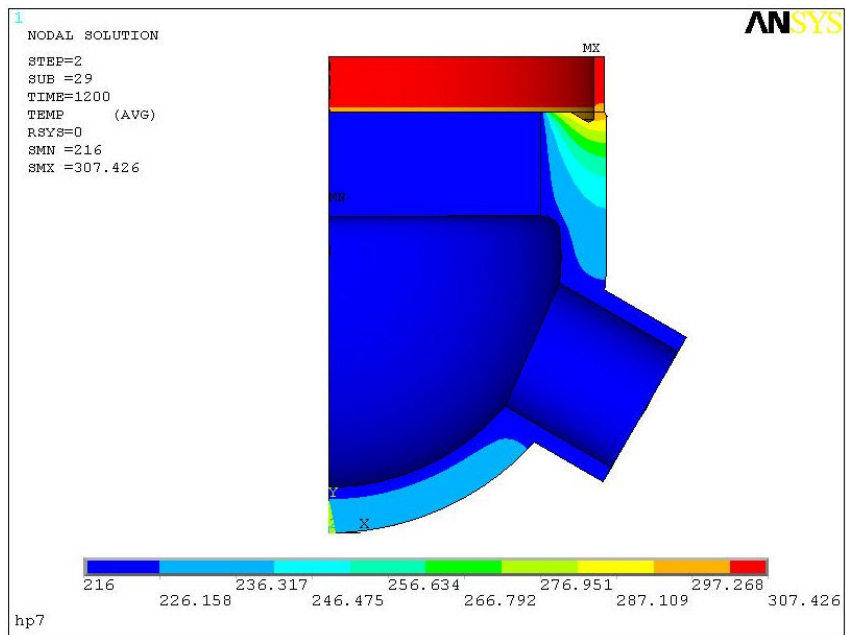
(d) Temperature distribution at 4500 after shut down



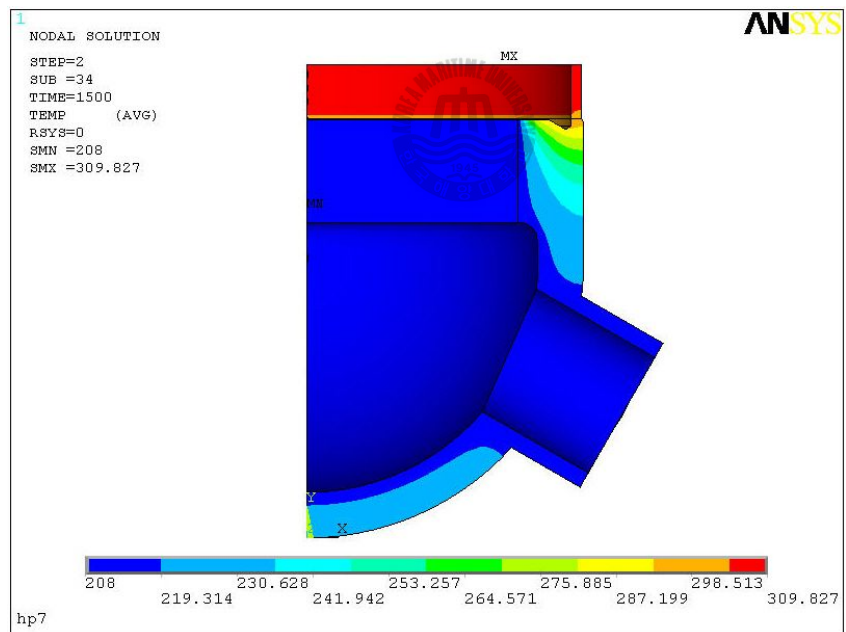
(e) Temperature distribution at 1200 after turbine trip



(f) Temperature distribution at 720 after small load



(g) Temperature distribution at 1200 after medium load



(h) Temperature distribution at 1500 after large load

Fig. 9 Temperature distribution in accordance with time of each event

### 3.1.4 운전조건 시 강도 해석

운전조건 시 하중은 3.1.2절에 있는 Table 2와 Table 3에 의한 열전달에 의한 부하와 작동 시 압력이다.

Primary-plus-secondary stress intensity( $P+P_b+Q$ )의 최대 범위는 ASME Section VIII, Division 2의  $S_{PS}(=3S_m)$ 로 제한한다. 여기서  $S_m$ 는 허용 stress intensity 이다.

응력 최대 범위( $S_n$ )가  $S_{PS}$ 를 초과 할 경우 (3.2)식의  $K_e$ 를 곱한 값이 적용된다.

$S_n > 3S_m$ 이면

$$K_e = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{S_{PS}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$m$ 과  $n$ 은 재료 매개변수의 값들로 탄소강(carbon steel)의 경우  $m=3$ ,  $n=0.2$ 로 주어진다.

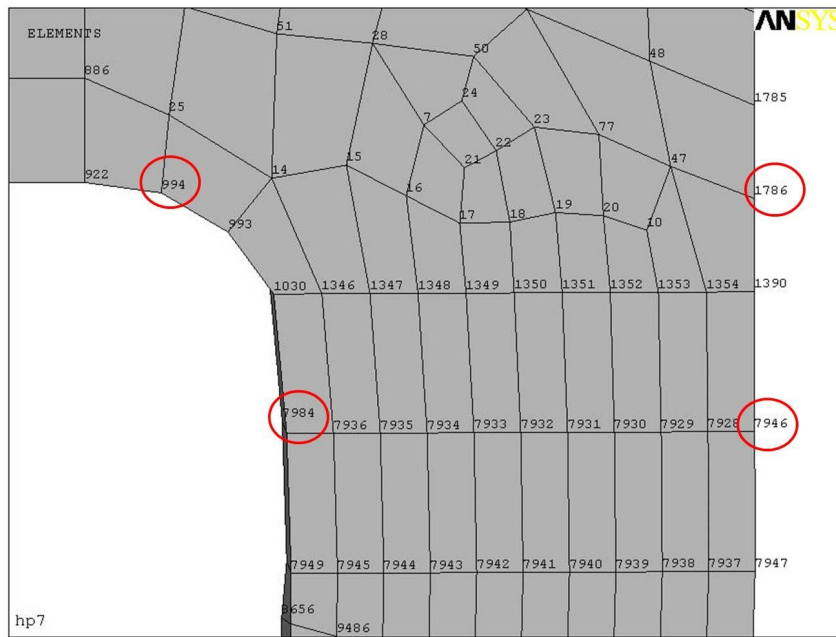
$S_n > 3S_m$ 인 모든 경우 피로 요소는  $K_e=1.0$ 이다.

ANSYS 후처리를 이용한 절단면은 Fig. 10에 나타내었으며 상세 정보는 Table 6에 있다.

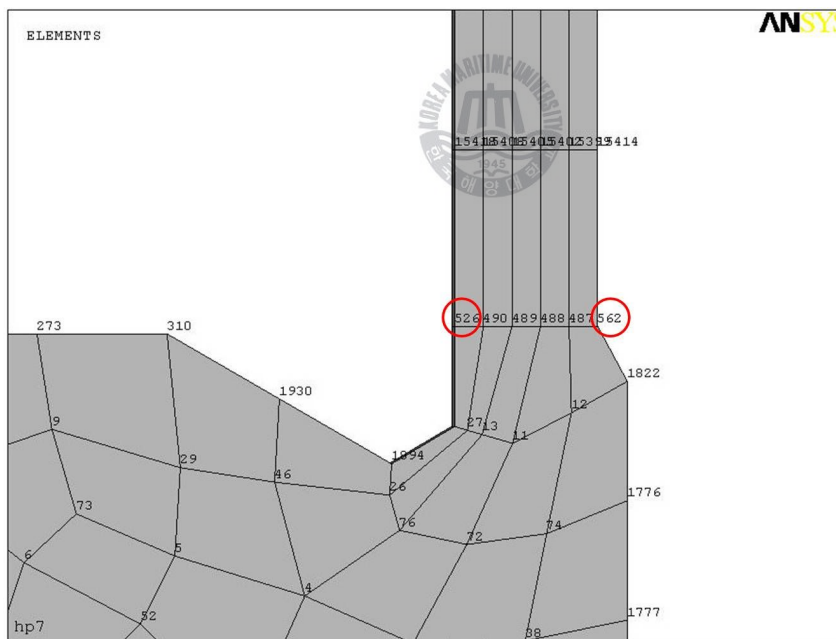
**Table 6 Detail information for section cuts in Fig. 10**

| Cut | Location                    | Nodes  |         | Remarks           |
|-----|-----------------------------|--------|---------|-------------------|
|     |                             | Inside | Outside |                   |
| A   | Head to tubesheet           | 7948   | 7946    | Solid region      |
| B   | Fillet                      | 993    | 1786    |                   |
| C   | Shell to tubesheet          | 526    | 562     |                   |
| D   | Tubesheet solid rim         | 274    | 994     | Solid region      |
| E   | Tubesheet perforated region | 5382   | 5119    | Perforated region |
| F   | Tubesheet perforated region | 5371   | 5108    |                   |
| N   | Near nozzle                 | 9815   | 9201    | Solid region      |

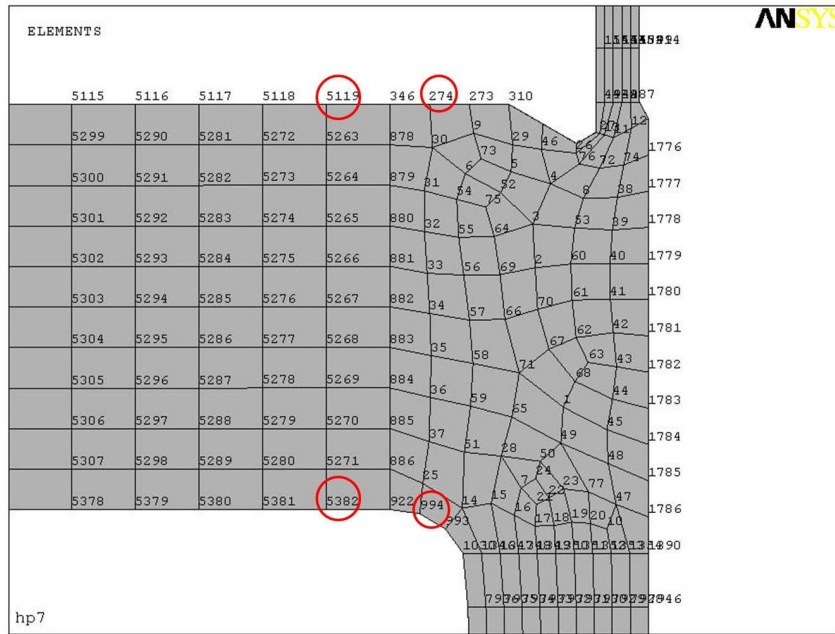




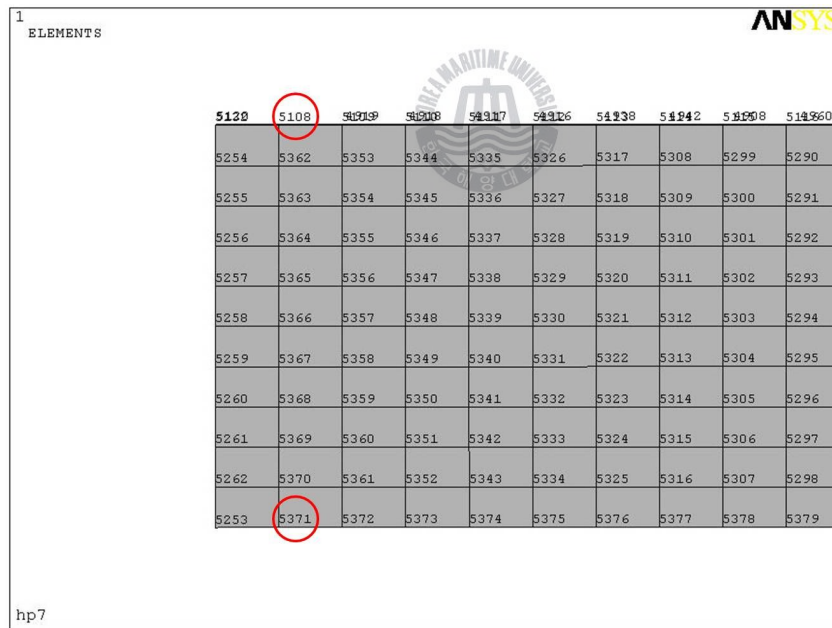
(a) Node numbers around cut A and B



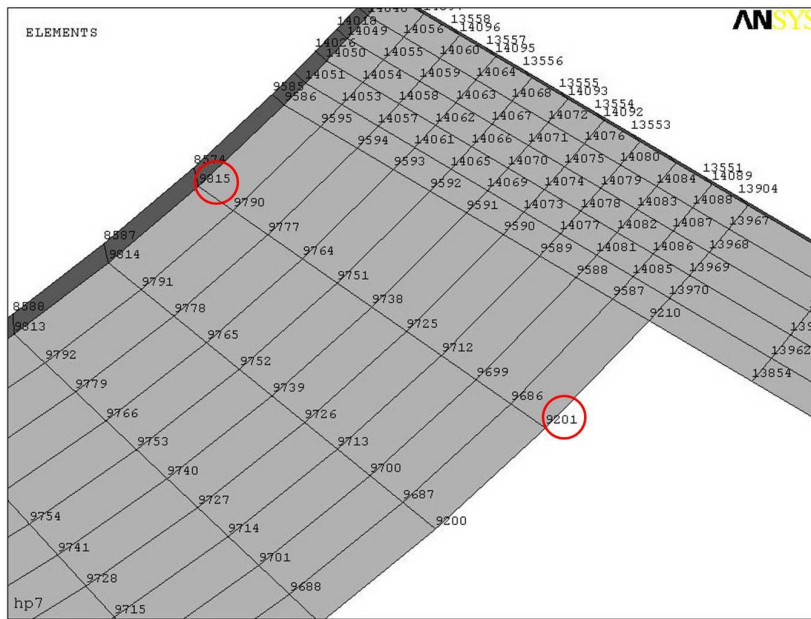
(b) Node numbers around cut C



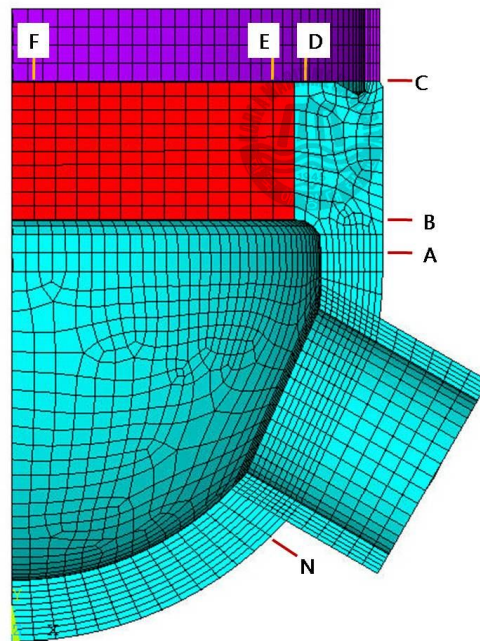
(c) Node numbers around cut D and E



(d) Node numbers around cut F



(f) Node numbers around cut N



(g) Identification of cuts

Fig. 10 Identification of cuts and node numbers near cuts

### 3.1.4.1 솔리드 영역의 결과 값

솔리드 영역의 Primary-plus-secondary stress intensity(Pl+ Pb+ Q)의 범위는 내압과 온도 구배에 의한 각 운전모드의 시간에 따른 최대값과 최소값의 차로 계산한다. 응력의 최대값과 최소값의 운전모드와 시간을 알기위한 값은 Appendix 1에 나타내었고 상세 수치는 Table 7과 Appendix 2에 나타내었다.

**Table 7 Maximum stress intensity range in solid region (Unit: MPa)**

| Cut | Node |     | Event /<br>Time(sec) | Primary and secondary stress<br>intensity range |                            |       | Remarks                                   |
|-----|------|-----|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------|-------------------------------------------|
|     |      |     |                      | Value                                           | Range<br>[S <sub>n</sub> ] | Limit |                                           |
| A   | 7948 | Max | TT /<br>732          | 160.1                                           | 118.2                      | 414   | Fatigue<br>factor,<br>K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |      | Min | CS /<br>1355         | 41.9                                            |                            |       |                                           |
| B   | 993  | Max | TT /<br>1200         | 159.8                                           | 113                        | 414   |                                           |
|     |      | Min | CS /<br>3000         | 46.8                                            |                            |       |                                           |
| C   | 526  | Max | SD /<br>3300         | 585.3                                           | 561.4                      | 423   | K <sub>e</sub> =1.65                      |
|     |      | Min | CS /<br>7442         | 23.9                                            |                            |       |                                           |
| D   | 274  | Max | TT /<br>1200         | 141.7                                           | 106.6                      | 414   | K <sub>e</sub> =1.0                       |
|     |      | Min | CS /<br>9000         | 35.09                                           |                            |       |                                           |
| N   | 9815 | Max | TT /<br>1200         | 202                                             | 189                        | 414   |                                           |
|     |      | Min | WS /<br>3979         | 13                                              |                            |       |                                           |

#### 3.1.4.2 튜브 구멍이 있는 영역의 결과 값

물리적인 것과 열적인 것이 복합적으로 응력에 영향을 줄 때 ASME Section VIII, Division 2 Article 4-9에 있는 아래의 (3.3)식을 이용하여 평가한다.

$$S_m = K \frac{p}{h} \sigma_1 \quad (3.3)$$

해양대학교 자체 프로세서인 FATPOST을 사용하여 Appendix 3과 같이 전체 운전모드의 시간에 대한 응력 최대 범위를 찾았다.

Appendix 3에 있는 반경 방향의 응력( $\sigma_r$ , radial stress in the equivalent solid plate)과 접선 방향의 응력( $\sigma_\theta$ , tangential stress in the equivalent solid plate) 중 절대 값이 큰 값을 분모로 하여 두 수를 나눈 값( $\beta$ , biaxiality ratio)을 Fig. 11에 주어진 그래프를 이용하여 K값(stress multiplier for stress intensity)을 구해  $S_m$ 값(SI-r, SI-t)을 계산하였다.  $\sigma_1$ 값은 반경 방향의 응력과 접선 방향의 응력 중 절대값이 큰 값이다.

계산된 값은 Table 8~Table 9과 Appendix 3에 나타내었다.

**Table 8 Maximum primary and secondary stress range of SI-r in perforated region  
(Unit: MPa)**

| Cut | Location     | Event | Time<br>(sec) | Primary and secondary stress<br>intensity |       | Remarks             |
|-----|--------------|-------|---------------|-------------------------------------------|-------|---------------------|
|     |              |       |               | Range<br>[S <sub>n</sub> ]                | Limit |                     |
| E   | Node<br>5382 | TT    | 1200          | 264.8                                     | 414   | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | SD    | 3300          |                                           |       |                     |
| F   | Node<br>5119 | SD    | 3300          | 194.5                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | TT    | 1200          |                                           |       |                     |
| E   | Node<br>5371 | SD    | 3300          | 369.2                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | HS    | 6900          |                                           |       |                     |
| F   | Node<br>5108 | WS    | 8700          | 269.9                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | CS    | 1355          |                                           |       |                     |

**Table 9 Maximum primary and secondary stress range of SI-t in perforated region  
(Unit: MPa)**

| Cut | Location     | Event | Time<br>(sec) | Primary and secondary stress<br>intensity |       | Remarks             |
|-----|--------------|-------|---------------|-------------------------------------------|-------|---------------------|
|     |              |       |               | Range<br>[S <sub>n</sub> ]                | Limit |                     |
| E   | Node<br>5382 | TT    | 732           | 206.6                                     | 414   | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | HS    | 1248          |                                           |       |                     |
| F   | Node<br>5119 | WS    | 8700          | 189.6                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | CS    | 1355          |                                           |       |                     |
| E   | Node<br>5371 | SD    | 3300          | 362.8                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | HS    | 6900          |                                           |       |                     |
| F   | Node<br>5108 | WS    | 8700          | 276.9                                     |       | K <sub>e</sub> =1.0 |
|     |              | CS    | 1355          |                                           |       |                     |

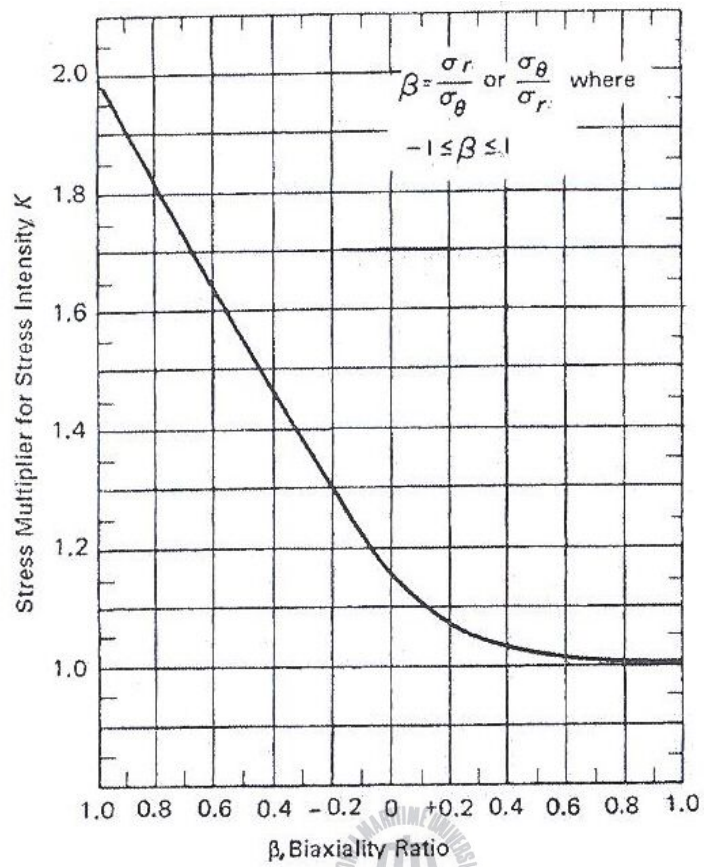


Fig. 11 Stress multiplier for stress intensity (K)

## 3.2 피로 강도 해석

### 3.2.1 솔리드 영역의 피로 누적 계수

솔리드 영역에 누적되는 피로 누적 계수는 ANSYS에 의한 과도 해석 후 각 운전모드의 stress intensity값이 최대가 나오는 시간 값과 최소가 나오는 시간 값의 범위로 대체되는 응력을 계산하는 방법으로 평가하였다.

각 운전모드에 대한 절단면의 stress intensity 최대값과 최소값은 Appendix 1에서 확인 할 수가 있으며 상세 수치는 Table 10 ~ Table 14에 나타내었다.

누적 계수(U)는 식 (3.4)으로 계산되며 누적 계수를 구하기 위해 ASME Section VIII Div. 2.에서 제시되는 탄성계수 값이 기준 탄성계수 보다 적은 값이므로 그에 대한 보상을 해주기 위한 탄성계수의 비( $E_r$ )는 아래의 (3.5)식으로 정의한다. 누적 계수(U) 계산 값은 Table 15 ~ 20에 나타내었다.



$$\text{Usage factor}(U) \quad U = \frac{n}{N} \quad (3.4)$$

$n$  : 요구되는 사이클

$N$  : 허용되는 사이클

$$\text{탄성계수의 비}(E_r) \quad E_r = \frac{E_O}{E_C} = 207000/183800 = 1.13 \quad (3.5)$$

$E_O$  : 기준 탄성계수

$E_C$  : ASME Section VIII Div. 2.에서 제시되는 사용재질의 탄성계수 값

**Table 10 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut A**

| Location  | Node 7948        |                  | Node 7946        |                  | No. of cycles |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Transient | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) |               |
| CS        | 160.1            | 38               | 93               | 15.4             | 180           |
| WS        | 169.5            | 58.4             | 106.1            | 23.6             | 1110          |
| HS        | 165.7            | 47.4             | 104.3            | 23.6             | 1500          |
| SD        | 187.2            | 77.9             | 82.4             | 35.4             | 2430          |
| LL        | 154.7            | 127              | 69.9             | 51.4             | 2625          |
| SL        | 187.2            | 131              | 80.5             | 51.5             | 42000         |
| ML        | 180.1            | 131              | 83.2             | 51.5             | 21000         |
| TT        | 203.9            | 130.8            | 98.5             | 51.5             | 360           |

**Table 11 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut B**

| Location  | Node 993         |                  | Node 1786        |                  | No. of cycles |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Transient | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) |               |
| CS        | 263.7            | 78               | 110              | 18.7             | 180           |
| WS        | 274.8            | 103.5            | 125              | 30.6             | 1110          |
| HS        | 270.4            | 87               | 119.1            | 87               | 1500          |
| SD        | 293              | 107              | 97.6             | 45.5             | 2430          |
| LL        | 234.1            | 178              | 83.7             | 58.3             | 2625          |
| SL        | 293              | 227              | 97.6             | 58.8             | 42000         |
| ML        | 277              | 227              | 97.5             | 58.8             | 21000         |
| TT        | 315.8            | 227.1            | 113.1            | 58.8             | 360           |

**Table 12 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut C**

| Location  | Node 526               |                        | Node 562               |                        | No. of cycles |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------|
| Transient | S <sub>max</sub> (MPa) | S <sub>min</sub> (MPa) | S <sub>max</sub> (MPa) | S <sub>min</sub> (MPa) |               |
| CS        | 339.4                  | 25.3                   | 249.2                  | 11.1                   | 180           |
| WS        | 437.2                  | 59.5                   | 315.5                  | 27.9                   | 1110          |
| HS        | 306.1                  | 41.3                   | 211                    | 22.3                   | 1500          |
| SD        | 552.1                  | 70.8                   | 279.6                  | 63.9                   | 2430          |
| LL        | 275.1                  | 71                     | 180.4                  | 63.8                   | 2625          |
| SL        | 131                    | 71                     | 86.8                   | 63.9                   | 42000         |
| ML        | 187.6                  | 71                     | 129.2                  | 63.9                   | 21000         |
| TT        | 206.5                  | 48.9                   | 136                    | 30                     | 360           |

**Table 13 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut D**

| Location  | Node 274               |                        | Node 994               |                        | No. of cycles |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------|
| Transient | S <sub>max</sub> (MPa) | S <sub>min</sub> (MPa) | S <sub>max</sub> (MPa) | S <sub>min</sub> (MPa) |               |
| CS        | 114.3                  | 20.7                   | 193.4                  | 67.2                   | 180           |
| WS        | 117.8                  | 46.5                   | 197.9                  | 81.5                   | 1110          |
| HS        | 103.6                  | 42.6                   | 195.2                  | 75.7                   | 1500          |
| SD        | 156.8                  | 50                     | 217.2                  | 83.8                   | 2430          |
| LL        | 119.6                  | 46.1                   | 179.3                  | 124.5                  | 2625          |
| SL        | 120                    | 55.7                   | 217.2                  | 179.8                  | 42000         |
| ML        | 120                    | 44.4                   | 203                    | 179.8                  | 21000         |
| TT        | 178.8                  | 49.5                   | 264.3                  | 179.8                  | 360           |

**Table 14 Maximum and minimum stress intensity of each event for cut N**

| Location  | Node 9815        |                  | Node 9201        |                  | No. of cycles |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Transient | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) | $S_{\max}$ (MPa) | $S_{\min}$ (MPa) |               |
| CS        | 66.9             | 17.1             | 110.8            | 37               | 180           |
| WS        | 61.5             | 13.2             | 114.1            | 37               | 1110          |
| HS        | 53.3             | 17.4             | 125.6            | 37               | 1500          |
| SD        | 129.9            | 56.1             | 91.4             | 6.9              | 2430          |
| LL        | 102.7            | 78.1             | 91.4             | 5.4              | 2625          |
| SL        | 129.9            | 102.2            | 91.4             | 59.4             | 42000         |
| ML        | 66.9             | 17.1             | 110.8            | 37               | 21000         |
| TT        | 223.5            | 102.2            | 91.4             | 12.3             | 360           |

**Table 15 Usage factor counting of cut A(node 7948)**

|       | Load combination | Stress range,<br>$K_e * E_r * S_{\text{alt}}$<br>(MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | TT-CS            | 93.2                                                   | 180.               | 500000            | 0.0004            |
| 2     | TT-WS            | 154                                                    | 180                | infinite          | 0.0               |
| Total |                  |                                                        |                    |                   | 0.0004            |

**Table 16 Usage factor counting of cut B(node 803)**

|       | Load combination | Stress range,<br>$K_e * E_r * S_{\text{alt}}$<br>(MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | TT-CS            | 134.4                                                  | 180                | 9.67E+04          | 0.0019            |
| 2     | TT-HS            | 129.3                                                  | 180                | 1.15E+05          | 0.0016            |
| 3     | SD-HS            | 116.4                                                  | 1320               | 1.89E+05          | 0.0070            |
| 4     | SL-WS            | 107.1                                                  | 1110               | 2.82E+05          | 0.0039            |
| 5     | SL-SD            | 105.1                                                  | 2430               | 3.07E+05          | 0.0079            |
| 6     | SL-LL            | 65.0                                                   | 2625               | infinite          | 0.0               |
| Total |                  |                                                        |                    |                   | 0.0223            |

**Table 17 Usage factor counting of cut C(node 838)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | SD-CS            | 297.6                                     | 180                | 6.76E+03          | 0.0150            |
| 2     | SD-HS            | 288.6                                     | 1500               | 7.45E+03          | 0.1197            |
| 3     | SD-TT            | 284.3                                     | 360                | 7.82E+03          | 0.0281            |
| 4     | SD-WS            | 278.3                                     | 390                | 8.37E+03          | 0.0294            |
| 5     | WS-WS            | 213.4                                     | 720                | 2.19E+04          | 0.0329            |
| 6     | WS-SD            | 207.0                                     | 390                | 2.35E+04          | 0.0166            |
| 7     | WS-SD            | 151.8                                     | 180                | 5.92E+04          | 0.0030            |
| 8     | HS-SD            | 132.9                                     | 1500               | 1.02E+05          | 0.0148            |
| 9     | WS-SD            | 115.4                                     | 360                | 1.97E+05          | 0.0018            |
| 10    | LL-LL            | 115.3                                     | 1000               | 1.98E+05          | 0.0051            |
| 11    | TT-LL            | 76.5                                      | 360                | infinite          | 0.0               |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.2664            |

**Table 18 Usage factor counting of cut D(node 801)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | TT-CS            | 89.3                                      | 180                | 6.57E+05          | 0.0003            |
| 2     | TT-HS            | 77.5                                      | 180                | infinite          | 0.0               |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.0003            |

**Table 19 Usage factor counting of cut N(node 9815)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | TT-WS            | 118.8                                     | 360                | 1.71E+05          | 0.0021            |
| 2     | SD-WS            | 65.9                                      | 750                | infinite          | 0.0               |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.0021            |

**Table 20 Summary of evaluation of usage factor at solid region**

| Cut | Location  | Usage factor | Remarks |
|-----|-----------|--------------|---------|
| A   | Node 7948 | 0.0004       | All OK  |
| B   | Node 803  | 0.0223       |         |
| C   | Node 838  | 0.2664       |         |
| D   | Node 801  | 0.0003       |         |
| N   | Node 9815 | 0.0021       |         |



### 3.2.2 튜브 구멍이 있는 영역의 피로 누적 계수

튜브 구멍이 있는 영역에 대한 피로 평가는 FATPOST를 사용하여 수행하였다.

튜브 구멍이 있는 영역에서 각도 방위( $\phi$ )의 최대 stress intensity는 아래 (3.6)식으로 계산된다.

$$S_{\phi} = Y_1 \frac{p}{h} \sigma_1 + Y_2 \frac{p}{h} \sigma_2 \quad (3.6)$$

$Y_1$ 와  $Y_2$ 는 Fig. 12와 같이 주응력의 여러 방위에 따라 주어지는 stress multipliers 이다.

$\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 등가 솔리드 모델로 계산된 응력 값이다.

결과를 요약한 값은 아래 Table 21과 같다.

FATPOST를 이용한 계산은 Appendix 4에 나타나 있으며 각각에 대해 정리한 결과는 Table 22~25에 나타나 있다.

**Table 21 Summary evaluation of usage factor at perforated region**

| Cut | Location  | Usage factor | Remarks |
|-----|-----------|--------------|---------|
| E   | Node 5382 | 0.143        | All OK  |
|     | Node 5119 | 0.037        |         |
| F   | Node 5371 | 0.235        |         |
|     | Node 5108 | 0.077        |         |

**Table 22 Usage factor counting of cut E(node 5382)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | TT-SD            | 243.9                                     | 360                | 12737             | 0.028             |
| 2     | SD-SD            | 209.3                                     | 1980               | 21339             | 0.093             |
| 3     | ML-LL            | 119.0                                     | 2625               | 169995            | 0.015             |
| 4     | ML-CS            | 113.2                                     | 180                | 204865            | 0.001             |
| 5     | ML-HS            | 111.3                                     | 1500               | 220765            | 0.007             |
| 6     | ML-WS            | 111                                       | 1110               | 226031            | 0.005             |
| 7     | ML-ML            | 34.4                                      | 15585              | infinite          | 0.000             |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.149             |

**Table 23 Usage factor counting of cut E(node 5119)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | WS-CS            | 164.3                                     | 180                | 44837             | 0.004             |
| 2     | WS-SD            | 148.7                                     | 930                | 68734             | 0.014             |
| 3     | HS-SD            | 145.9                                     | 1410               | 75619             | 0.019             |
| 4     | HS-HS            | 139.2                                     | 90                 | 95430             | 0.001             |
| 5     | SL-LL            | 63.3                                      | 2625               | infinite          | 0.000             |
| 6     | SL-TT            | 62.7                                      | 360                | infinite          | 0.000             |
| 7     | SL-ML            | 62.7                                      | 21000              | infinite          | 0.000             |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.038             |

**Table 24 Usage factor counting of cut F(node 5371)**

|       | Load combination | Stress range, $K_e * E_r * S_{alt}$ (MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | SD-HS            | 242.1                                     | 1500               | 13064             | 0.115             |
| 2     | SD-TT            | 230.8                                     | 360                | 15377             | 0.023             |
| 3     | SD-SD            | 230.8                                     | 480                | 15377             | 0.031             |
| 4     | LL-ML            | 164.1                                     | 2625               | 44999             | 0.058             |
| 5     | CS-ML            | 121.7                                     | 180                | 156786            | 0.001             |
| 6     | WS-ML            | 114.0                                     | 1110               | 198361            | 0.006             |
| 7     | ML-ML            | 82.9                                      | 17085              | infinite          | 0.000             |
| Total |                  |                                           |                    |                   | 0.234             |

**Table 25 Usage factor counting of cut F(node 5108)**

|       | Load combination | Stress range,<br>$K_e * E_r * S_{alt}$<br>(MPa) | Required cycles, n | Allowed cycles, N | Usage factor, n/N |
|-------|------------------|-------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | WS-CS            | 181.6                                           | 180                | 32957             | 0.005             |
| 2     | WS-SD            | 176.5                                           | 930                | 36006             | 0.026             |
| 3     | HS-SD            | 175.0                                           | 1410               | 36977             | 0.038             |
| 4     | HS-HS            | 160.2                                           | 90                 | 48428             | 0.002             |
| 5     | SL-LL            | 95.1                                            | 2625               | 454188            | 0.006             |
| 6     | SL-TT            | 51.4                                            | 360                | infinite          | 0.000             |
| 7     | SL-ML            | 51.4                                            | 21000              | infinite          | 0.000             |
| Total |                  |                                                 |                    |                   | 0.077             |



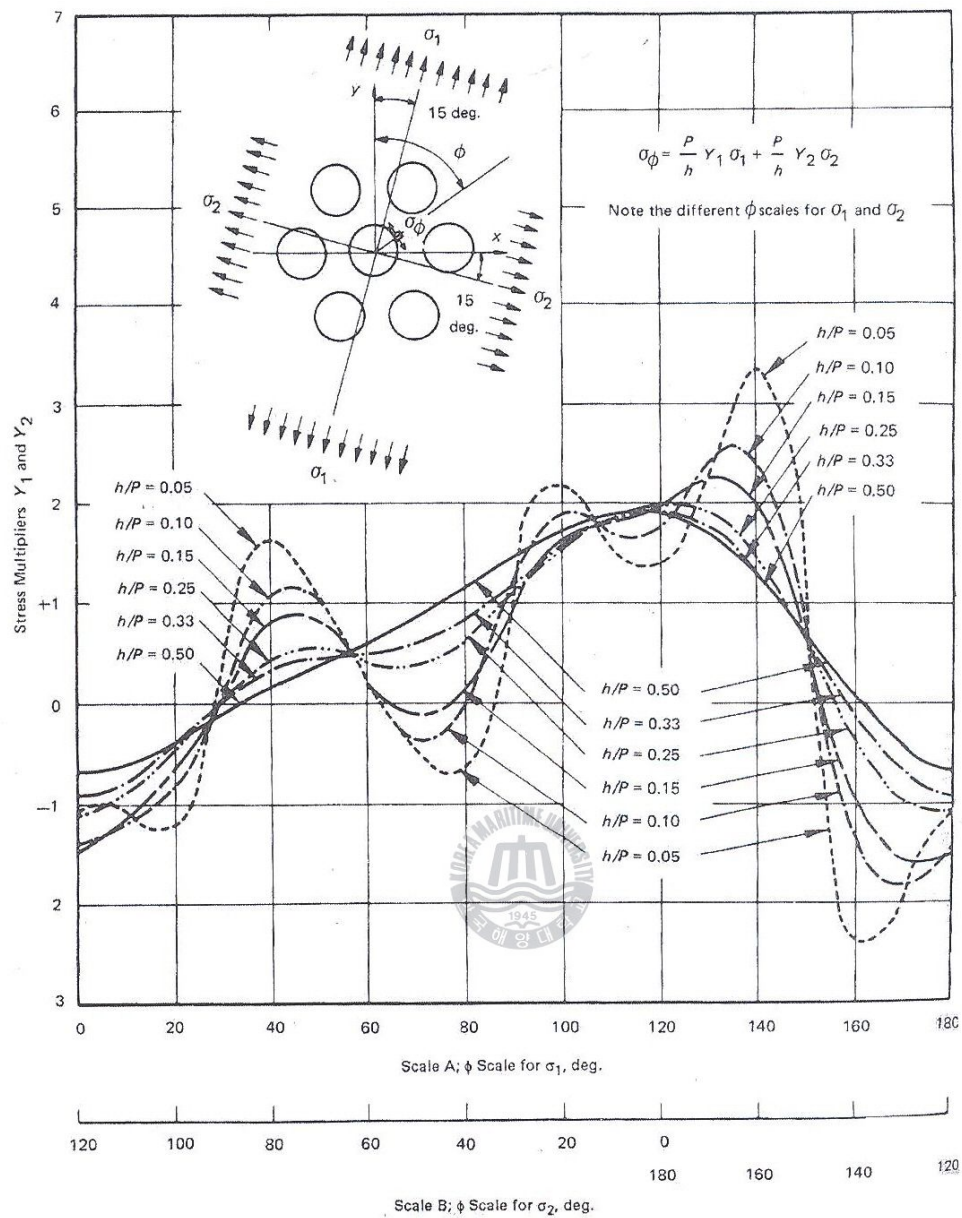


Fig. 12 Stress multipliers  $Y_1$  and  $Y_2$  for various orientation  $\phi$  of  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$

## 4. 결론

본 논문에서는 발전소용 급수가열기의 구조 해석을 위해 유한요소법을 통해 각 이벤트의 작동 환경에서의 열하중과 압력에 의한 열-구조 해석을 통해 급수가열기의 구조 안전성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 튜브시트의 경우 수많은 튜브 구멍을 모두 모델링하는 것은 비효율적이므로 리가먼트 효율을 적용하여 등가 물성치로 솔리드 모델로 표현하였다. 각 운전모드 (상온 기동, 중온 기동, 고온 기동, 정지 상태, 추기증기이동, 하중변화)별로 분류하여 열전달 해석 후 나온 열전달 결과를 내압과 같이 하중으로 적용하여 구조 해석을 수행하였다. 주 관심부를 정해 솔리드 영역과 튜브 구멍이 있는 영역으로 나누었으며 각 평가 방법은 ASME Section VIII Div. 2.에 제시된 방법에 따라 검증을 하여 발전소용 급수가열기의 구조해석에 관한 절차와 해석방법을 확립하였다.

2. 각 운전모드의 조합 중 솔리드 영역에서는 정지 상태와 상온 기동 간에서 최대 응력 범위와 최대 피로 누적 계수가 나왔으며 튜브 구멍이 있는 영역에서는 정지 상태와 고온 시동 간에서 최대 응력 범위와 최대 피로 누적 계수가 나왔다.

3. 최대 피로 누적 지역은 헤드와 튜브시트간, 셸부와 튜브시트간 접합부 필렛 반경 그리고 리가먼트 효율을 이용한 등가로 물성을 준 튜브시트의 솔리드 영역 중 헤드 쪽에서 나왔다.

4. 각 운전모드의 피로 누적 계수의 합은 1.0을 초과하지 않아 피로 강도 값은 허용 값을 만족하였다.

5. 발전소용 급수가열기의 구조해석에 필요한 구조 모델링과 유한요소해석은 상용코드인 ANSYS를 활용하여 해석의 과정과 해석 결과를 이용한 상세 설계 과정을 표준화하여 설계 프로젝트에 활용할 수 있다.

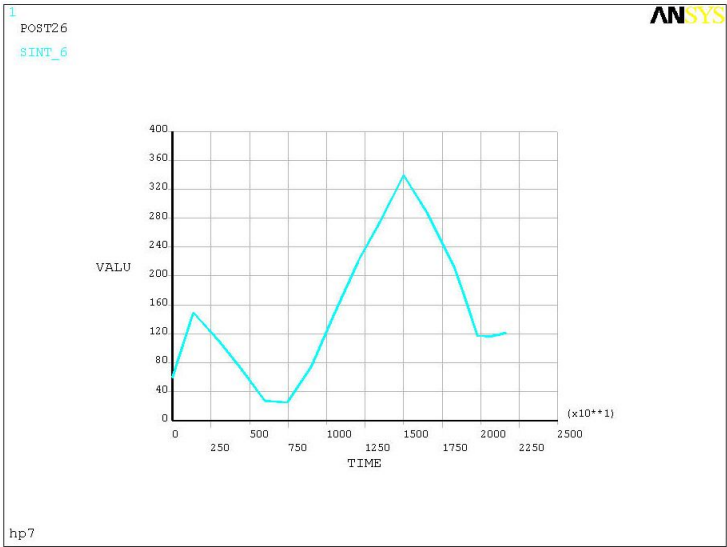


## 참고문헌

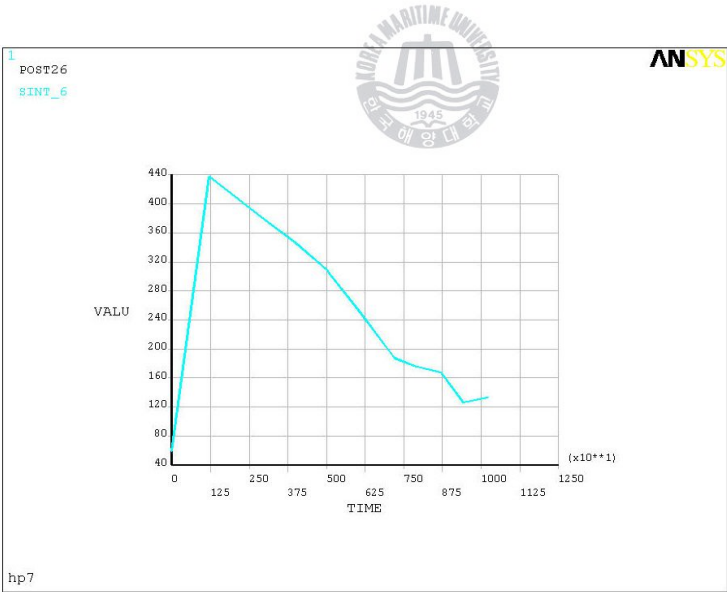
- [1] 김경훈, 황경모, 서혁기, 2008, "저압형 급수가열기 추기노즐에서 동체 감속 완화에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, 제 13권, 제 4호, pp. 173-179.
- [2] 전윤철, 김태완, 정동관, 2002, "고정 튜브시트를 갖는 수평형 열교환기의 등가 모델링을 이용한 튜브 건전성 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제 26권 제 1호, pp. 179~187.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Div. 2 with 2004 edition.
- [4] ANSYS Finite Element Computer Code & Manual.
- [5] Logan의 유한요소법 첫걸음, Daryl L. Logan(신종계, 이용신, 조성욱 공역), 시그마프레스, 2004.
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D.
- [7] Standard specification for Horizontal Closed Feedwater Heaters.
- [8] Heat transfer, 7th edition, S.P. Holman and P.R.S. White, McGraw-Hill Book Company.
- [9] Drawing : H.P #7 F.W HEATER : SDW-815-HP7-010.

Appendix 1. History of Stress intensity in all transient event

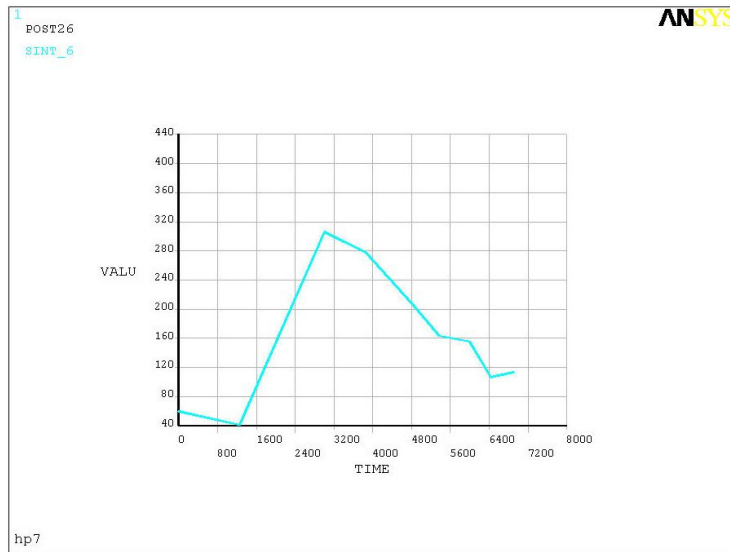
# Stress intensity history in all transient events—CUT C



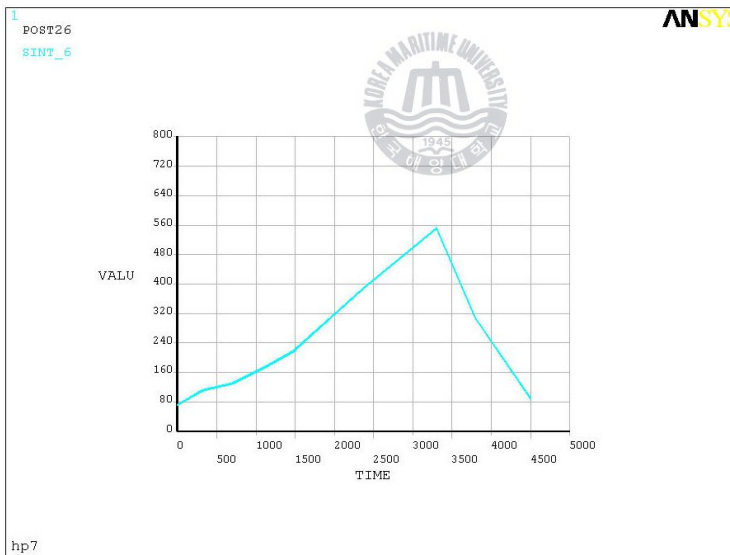
(a) History of stress intensity plot of C node 526 for cold start



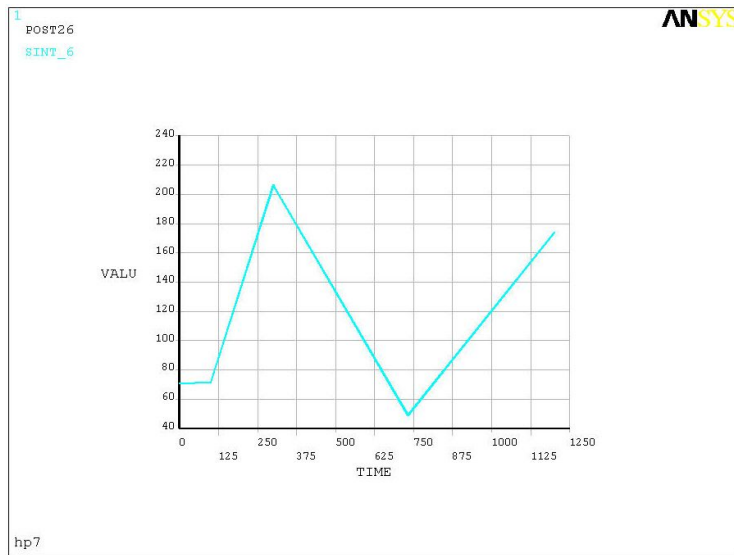
(b) History of stress intensity plot of C node 526 for warm start



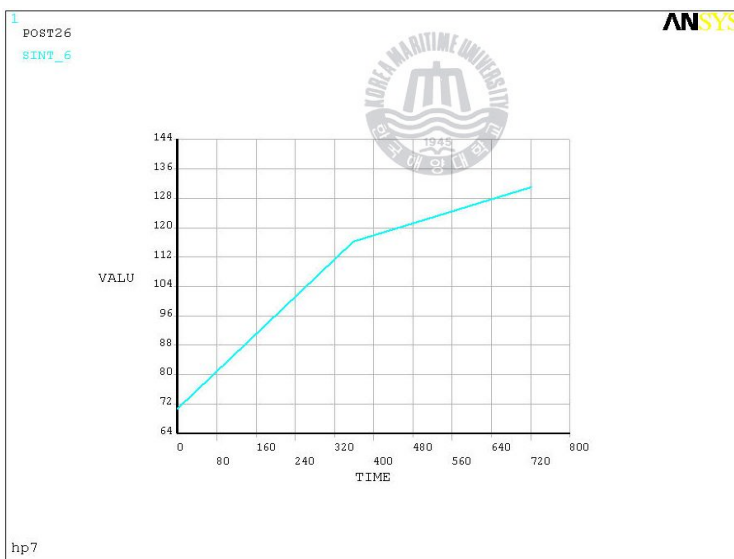
(c) History of stress intensity plot of C node 526 for hot start



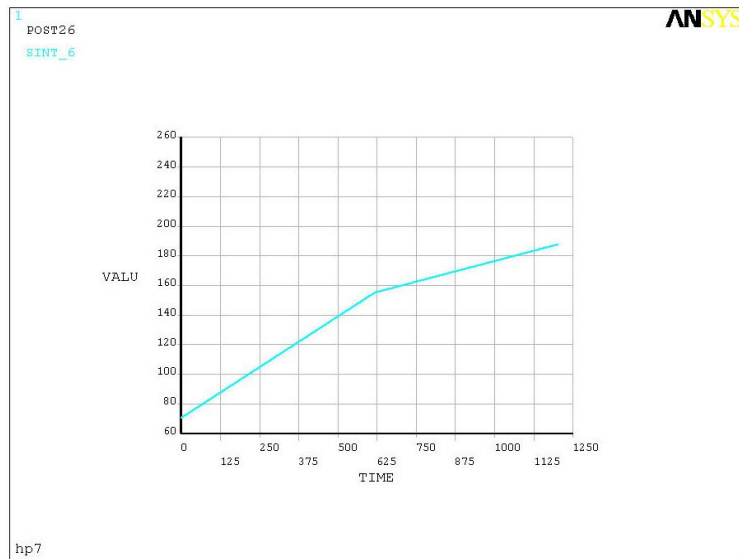
(d) History of stress intensity plot of C node 526 for shut down



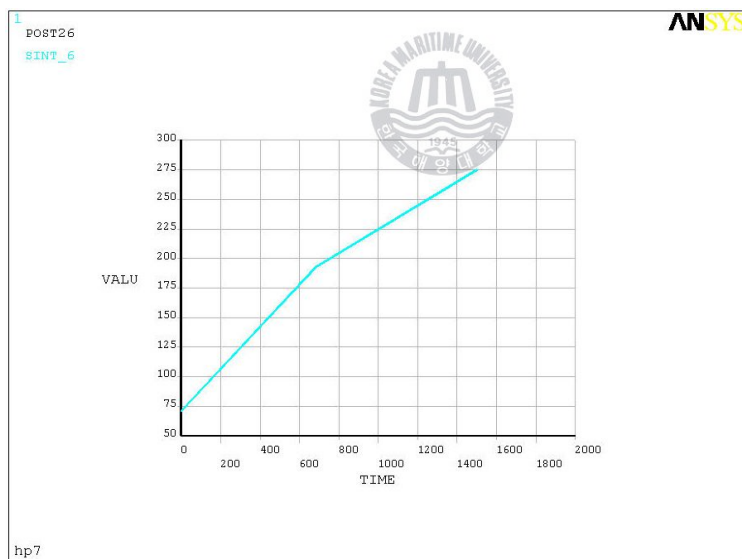
(e) History of stress intensity plot of C node 526 for turbine tripe



(f) History of stress intensity plot of C node 526 for small load

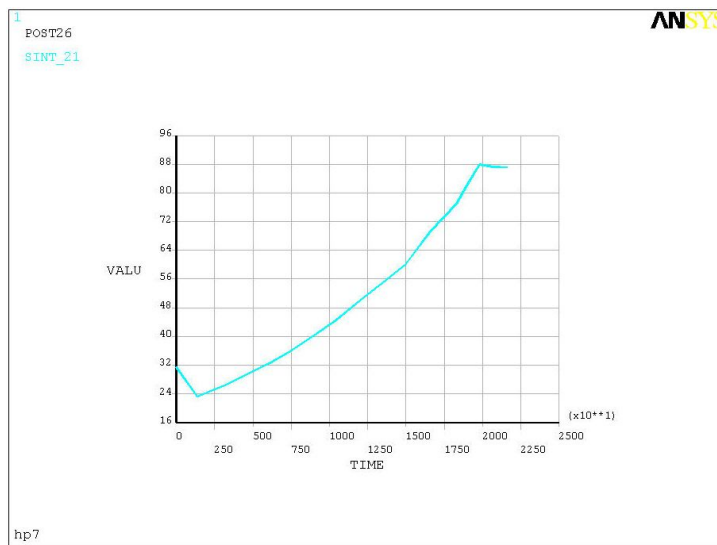


(g) History of stress intensity plot of C node 526 for medium load



(h) History of stress intensity plot of C node 526 for large load

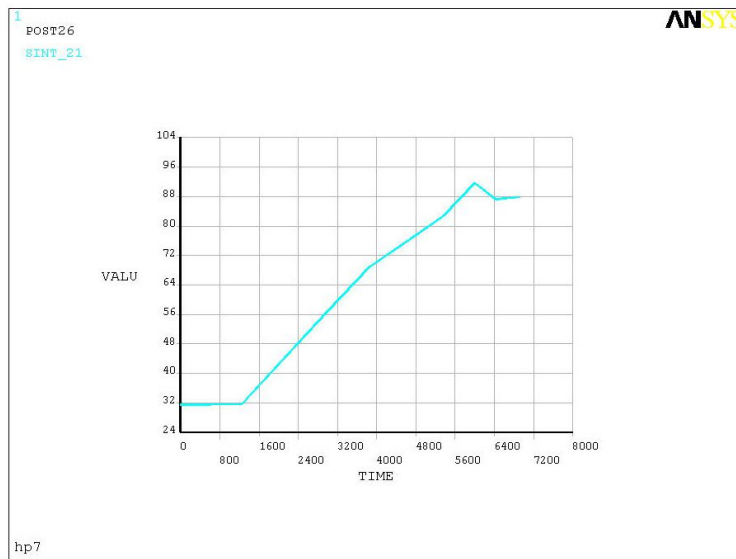
## # Stress intensity history in all transient events—CUT F



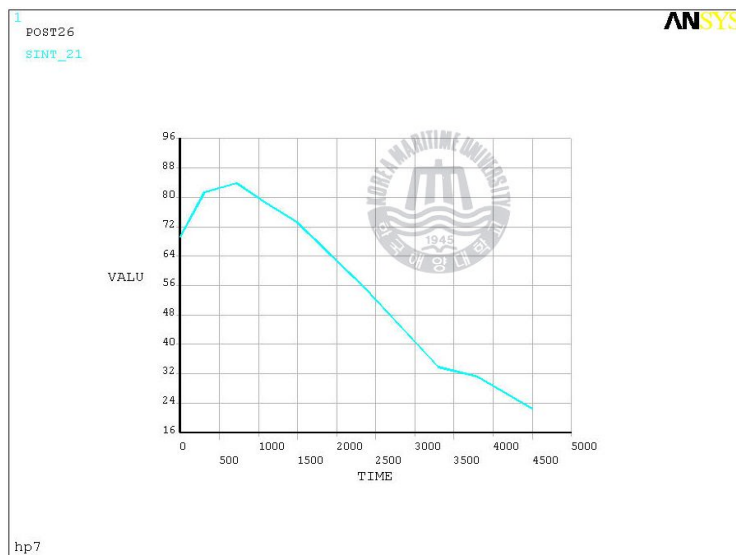
(a) History of stress intensity plot of F node 5108 for cold start



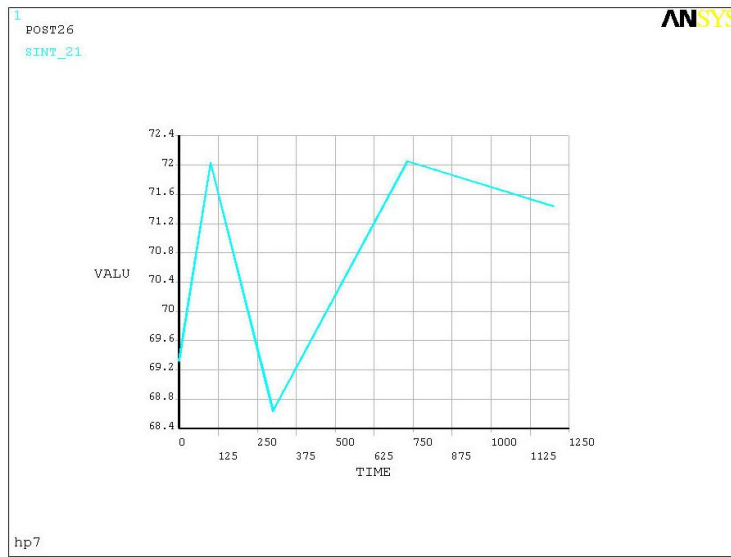
(b) History of stress intensity plot of F node 5108 for warm start



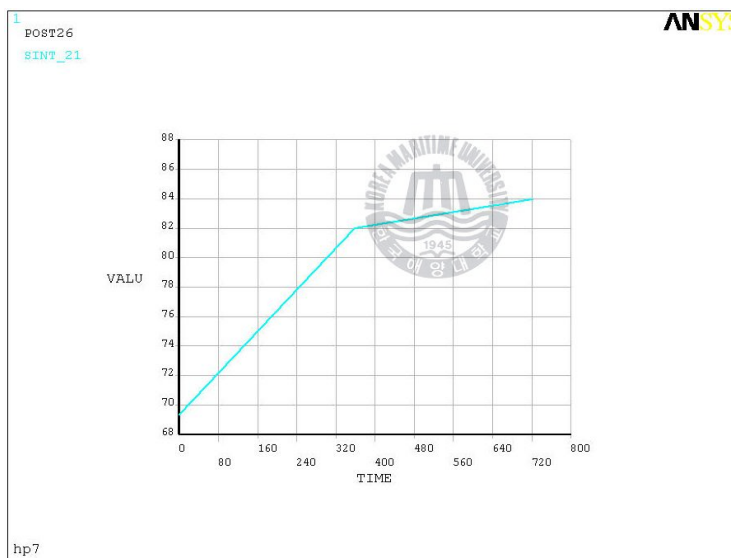
(c) History of stress intensity plot of F node 5108 for hot start



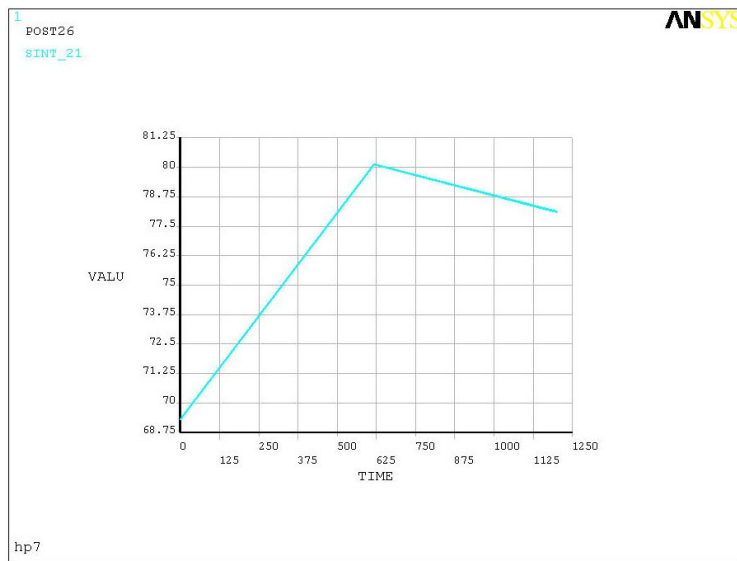
(d) History of stress intensity plot of F node 5108 for shut down



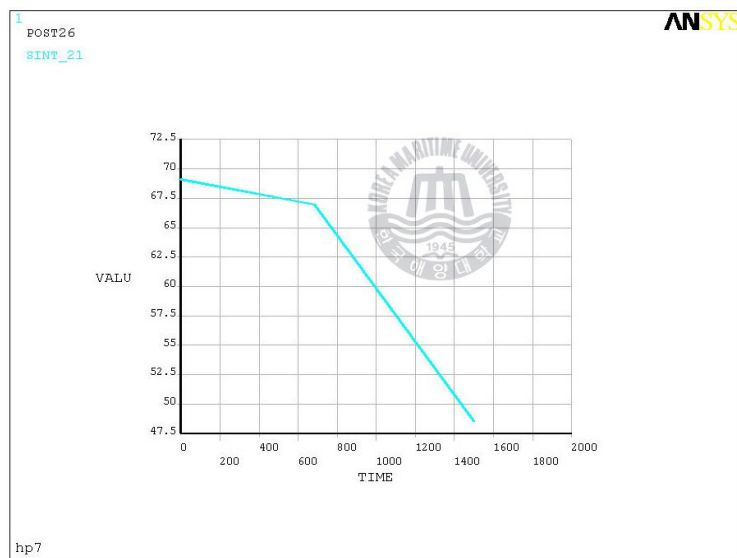
(e) History of stress intensity plot of F node 5108 for turbine tripe



(f) History of stress intensity plot of F node 5108 for small load



(g) History of stress intensity plot of F node 5108 for medium load



(h) History of stress intensity plot of F node 5108 for large load

## Appendix 2. Stress Linearization for Operating Condition at Cut C

### # Maximum stress intensity of operation condition (Solid) CUT C

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= C\_MAX DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
INSIDE NODE = 526 OUTSIDE NODE = 562

LOAD STEP 7 SUBSTEP= 1  
TIME= 3300.0 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

```

** MEMBRANE **
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
    -22.51    154.7   -209.4    47.60    11.73   -2.158
      S1      S2      S3     SINT     SEQV
    167.0    -34.34   -209.8    376.8    326.6

** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -20.62    276.6    56.69   -29.14    0.4572    0.8449
C   0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
O   20.62   -276.6   -56.69    29.14   -0.4572   -0.8449
      S1      S2      S3     SINT     SEQV
I  279.5    56.69   -23.46    302.9    271.9
C   0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
O   23.46   -56.69   -279.5    302.9    271.9

** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -43.13    431.4   -152.7    18.46    12.18   -1.313
C  -22.51    154.7   -209.4    47.60    11.73   -2.158
O  -1.887   -121.9   -266.0    76.74    11.27   -3.003
      S1      S2      S3     SINT     SEQV
I  432.4   -43.82   -153.0    585.3    539.1
C   167.0   -34.34   -209.8    376.8    326.6
O   35.54   -158.1   -267.3    302.8    265.6

** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I   3.382   -60.02   -26.87   -34.16    0.5843   -0.3299
C  -9.787    28.34    9.243    24.58   -0.5296    0.2077
O   23.26   -32.98    22.11   -28.44    0.6644  -0.1253E-01
      S1      S2      S3     SINT     SEQV
I   18.29   -26.87   -74.93    93.22    80.74
C   40.39    9.244   -21.84    62.23    53.89
O   35.13    22.11   -44.86    79.99    74.34

** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -39.75    371.4   -179.5   -15.70    12.77   -1.643
C  -32.30    183.1   -200.1    72.18    11.20   -1.951
O   21.37   -154.9   -243.9    48.30    11.93   -3.016
      S1      S2      S3     SINT     SEQV     TEMP
I   372.3   -40.34   -179.9    552.1    497.3    312.7
C   205.3   -54.07   -200.5    405.8    356.0
O   33.74   -165.3   -245.9    279.6    249.3    305.5

```

# # Minimum stress intensity of operation condition (Solid) CUT C

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= C\_MIN DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 526 OUTSIDE NODE = 562

LOAD STEP 6 SUBSTEP= 1  
 TIME= 7442.5 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

```

** MEMBRANE **
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -5.066    -9.941   -26.15    1.637    2.279   -0.3241
C  -4.562   -10.12   -26.47    21.91    19.73
O
S1          S2          S3      SINT      SEQV
I  -4.562   -10.12   -26.47    21.91    19.73

** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -1.094    0.8884   -3.073   -2.259   0.2066E-01  -0.2359E-01
C   0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
O   1.094   -0.8884    3.073    2.259  -0.2066E-01  0.2359E-01
S1          S2          S3      SINT      SEQV
I   2.364   -2.570   -3.073    5.438    5.204
C   0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
O   3.073    2.570   -2.364    5.438    5.204

** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -6.161   -9.052   -29.22   -0.6223    2.300   -0.3476
C  -5.066   -9.941   -26.15    1.637    2.279   -0.3241
O  -3.972  -10.83   -23.07    3.896    2.258   -0.3005
S1          S2          S3      SINT      SEQV
I  -6.003   -8.948   -29.48    23.48    22.15
C  -4.562  -10.12   -26.47    21.91    19.73
O  -2.190  -12.16   -23.53    21.34    18.49

** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -1.079   -2.874   -2.307   -1.276    0.03063   -0.01417
C  -0.5486  0.9497    0.7685    1.033   -0.02760    0.01485
O   0.9025  -0.3569  -0.07933   -1.320    0.03938   -0.01156
S1          S2          S3      SINT      SEQV
I  -0.4158   -2.307   -3.537    3.121    2.723
C   1.477    0.7684   -1.076    2.553    2.283
O   1.736  -0.07919   -1.191    2.927    2.559

** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -7.240   -11.93   -31.53   -1.898    2.330   -0.3618
C  -5.615   -8.991   -25.38    2.670    2.252   -0.3092
O  -3.070   -11.19   -23.15    2.576    2.298   -0.3120
S1          S2          S3      SINT      SEQV      TEMP
I  -6.516   -12.38   -31.80    25.29    22.92    175.5
C  -4.112   -10.17   -25.70    21.59    19.29
O  -2.315   -11.48   -23.61    21.29    18.50    172.6
  
```

### Appendix 3. Calculation of Stress Range at Perforated Region

# Primary plus secondary stress intensity at node 5371 in cut F

| cond | time    | sig-r  | sig-t  | beta | K    | SI-r    | SI-t    |
|------|---------|--------|--------|------|------|---------|---------|
| CS   | 0.0     | -25.89 | -25.51 | 0.99 | 1.00 | -112.65 | -110.99 |
| CS   | 1355.2  | -30.64 | -30.10 | 0.98 | 1.00 | -133.33 | -130.97 |
| CS   | 3000.0  | -29.50 | -29.01 | 0.98 | 1.00 | -128.37 | -126.22 |
| CS   | 4443.7  | -27.71 | -27.25 | 0.98 | 1.00 | -120.59 | -118.58 |
| CS   | 6000.0  | -25.69 | -25.26 | 0.98 | 1.00 | -111.77 | -109.91 |
| CS   | 7442.5  | -23.89 | -23.50 | 0.98 | 1.00 | -103.96 | -102.26 |
| CS   | 9000.0  | -21.83 | -21.48 | 0.98 | 1.00 | -94.99  | -93.46  |
| CS   | 10420.0 | -19.74 | -19.44 | 0.98 | 1.00 | -85.89  | -84.57  |
| CS   | 12000.0 | -17.18 | -16.93 | 0.99 | 1.00 | -74.74  | -73.67  |
| CS   | 13459.0 | -14.57 | -14.38 | 0.99 | 1.00 | -63.40  | -62.57  |
| CS   | 15000.0 | -11.63 | -11.53 | 0.99 | 1.00 | -50.59  | -50.13  |
| CS   | 16574.0 | -21.48 | -21.11 | 0.98 | 1.00 | -93.49  | -91.88  |
| CS   | 18300.0 | -32.96 | -32.31 | 0.98 | 1.00 | -143.44 | -140.64 |
| CS   | 18970.0 | -41.59 | -40.66 | 0.98 | 1.00 | -181.05 | -176.99 |
| CS   | 19800.0 | -51.24 | -50.10 | 0.98 | 1.00 | -223.05 | -218.08 |
| CS   | 20664.0 | -52.11 | -50.98 | 0.98 | 1.00 | -226.81 | -221.89 |
| CS   | 21600.0 | -52.87 | -51.72 | 0.98 | 1.00 | -230.14 | -225.10 |
| HS   | 0.0     | -25.89 | -25.51 | 0.99 | 1.00 | -112.65 | -110.99 |
| HS   | 1248.2  | -32.27 | -31.52 | 0.98 | 1.00 | -140.45 | -137.22 |
| HS   | 3000.0  | -23.22 | -22.75 | 0.98 | 1.00 | -101.05 | -99.03  |
| HS   | 3864.0  | -27.04 | -26.59 | 0.98 | 1.00 | -117.69 | -115.70 |
| HS   | 4800.0  | -36.82 | -36.04 | 0.98 | 1.00 | -160.24 | -156.85 |
| HS   | 5376.0  | -44.57 | -43.57 | 0.98 | 1.00 | -193.99 | -189.65 |
| HS   | 6000.0  | -51.38 | -50.25 | 0.98 | 1.00 | -223.65 | -218.73 |
| HS   | 6432.0  | -58.12 | -56.65 | 0.97 | 1.00 | -253.03 | -246.62 |
| HS   | 6900.0  | -58.20 | -56.69 | 0.97 | 1.00 | -253.38 | -246.81 |
| WS   | 0.0     | -25.89 | -25.51 | 0.99 | 1.00 | -112.65 | -110.99 |
| WS   | 1206.9  | -16.55 | -16.41 | 0.99 | 1.00 | -71.99  | -71.38  |
| WS   | 3000.0  | -14.32 | -14.12 | 0.99 | 1.00 | -62.32  | -61.45  |
| WS   | 3979.2  | -14.69 | -14.43 | 0.98 | 1.00 | -63.91  | -62.81  |
| WS   | 5040.0  | -15.21 | -14.91 | 0.98 | 1.00 | -66.22  | -64.88  |
| WS   | 6079.8  | -24.80 | -24.31 | 0.98 | 1.00 | -107.91 | -105.78 |
| WS   | 7200.0  | -35.99 | -35.22 | 0.98 | 1.00 | -156.64 | -153.28 |

|    |         |        |        |      |      |         |         |
|----|---------|--------|--------|------|------|---------|---------|
| WS | 7920.0  | -43.24 | -42.32 | 0.98 | 1.00 | -188.18 | -184.20 |
| WS | 8700.0  | -50.05 | -49.00 | 0.98 | 1.00 | -217.84 | -213.28 |
| WS | 9420.0  | -52.93 | -51.77 | 0.98 | 1.00 | -230.38 | -225.32 |
| WS | 10200.0 | -53.01 | -51.81 | 0.98 | 1.00 | -230.73 | -225.51 |
| TT | 0.0     | -54.25 | -53.18 | 0.98 | 1.00 | -236.12 | -231.46 |
| TT | 100.1   | -33.74 | -34.53 | 0.98 | 1.00 | -146.88 | -150.32 |
| TT | 300.0   | -5.84  | -8.42  | 0.69 | 1.02 | -25.79  | -37.19  |
| TT | 732.0   | -11.86 | -13.37 | 0.89 | 1.01 | -51.87  | -58.46  |
| TT | 1200.0  | -28.71 | -29.32 | 0.98 | 1.00 | -124.96 | -127.61 |
| SD | 0.0     | -54.25 | -53.18 | 0.98 | 1.00 | -236.12 | -231.46 |
| SD | 312.8   | -44.64 | -44.44 | 1.00 | 1.00 | -194.11 | -193.26 |
| SD | 720.0   | -37.56 | -37.62 | 1.00 | 1.00 | -163.30 | -163.58 |
| SD | 1094.4  | -28.03 | -28.16 | 1.00 | 1.00 | -121.91 | -122.46 |
| SD | 1500.0  | -18.70 | -18.93 | 0.99 | 1.00 | -81.36  | -82.33  |
| SD | 2364.0  | 2.46   | 2.59   | 0.95 | 1.00 | 10.70   | 11.29   |
| SD | 3300.0  | 26.59  | 26.67  | 1.00 | 1.00 | 115.63  | 115.99  |
| SD | 3794.6  | 20.74  | 20.15  | 0.97 | 1.00 | 90.32   | 87.74   |
| SD | 4500.0  | -1.33  | -1.66  | 0.80 | 1.01 | -5.84   | -7.31   |
| LL | 0.0     | -54.00 | -52.93 | 0.98 | 1.00 | -235.02 | -230.35 |
| LL | 683.5   | -22.71 | -22.98 | 0.99 | 1.00 | -98.80  | -99.95  |
| LL | 1500.0  | 3.22   | 2.63   | 0.82 | 1.01 | 14.11   | 11.55   |
| ML | 0.0     | -54.25 | -53.18 | 0.98 | 1.00 | -236.12 | -231.46 |
| ML | 617.7   | -35.39 | -35.47 | 1.00 | 1.00 | -153.88 | -154.21 |
| ML | 1200.0  | -25.23 | -25.43 | 0.99 | 1.00 | -109.73 | -110.62 |
| SL | 0.0     | -54.25 | -53.18 | 0.98 | 1.00 | -236.12 | -231.46 |
| SL | 358.4   | -43.65 | -43.51 | 1.00 | 1.00 | -189.82 | -189.21 |
| SL | 720.0   | -37.56 | -37.62 | 1.00 | 1.00 | -163.30 | -163.58 |

range of SI-r is 369.02 SD 3300.00 - HS 6900.00  
range of SI-t is 362.80 SD 3300.00 - HS 6900.00

## Appendix 4. Fatigue Evaluation at Perforated Region by using FATPOST

### # Fatigue evaluation at node 5371 in cut F

peak stress intensity for hole pattern theta = 1

|    | cond | time     | phi= 1  | phi= 2  | phi= 3  | phi= 4  | phi= 5  | phi= 6  | phi= 7  | phi= 8  | phi= 9  | phi=10  |
|----|------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | CS   | 0.00     | -88.35  | -99.51  | -122.64 | -126.71 | -119.93 | -111.91 | -91.36  | -100.43 | -124.83 | -130.60 |
| 2  | CS   | 1355.20  | -103.70 | -116.93 | -144.44 | -149.62 | -141.96 | -132.63 | -108.31 | -118.95 | -147.73 | -154.55 |
| 3  | CS   | 3000.00  | -100.12 | -112.85 | -139.29 | -144.17 | -136.68 | -127.64 | -104.23 | -114.51 | -142.24 | -148.81 |
| 4  | CS   | 4443.70  | -94.07  | -106.03 | -130.86 | -135.43 | -128.39 | -119.90 | -97.90  | -107.56 | -133.62 | -139.79 |
| 5  | CS   | 6000.00  | -87.20  | -98.28  | -121.30 | -125.53 | -119.00 | -111.13 | -90.75  | -99.70  | -123.85 | -129.57 |
| 6  | CS   | 7442.50  | -81.17  | -91.48  | -112.88 | -116.78 | -110.68 | -103.35 | -84.39  | -92.72  | -115.19 | -120.51 |
| 7  | CS   | 9000.00  | -74.23  | -83.65  | -103.19 | -106.73 | -101.13 | -94.42  | -77.09  | -84.71  | -105.25 | -110.12 |
| 8  | CS   | 10420.00 | -67.25  | -75.76  | -93.41  | -96.56  | -91.44  | -85.35  | -69.68  | -76.59  | -95.17  | -99.57  |
| 9  | CS   | 12000.00 | -58.71  | -66.10  | -81.44  | -84.10  | -79.57  | -74.23  | -60.60  | -66.62  | -82.82  | -86.65  |
| 10 | CS   | 13459.00 | -49.98  | -56.25  | -69.23  | -71.41  | -67.49  | -62.92  | -51.36  | -56.49  | -70.25  | -73.50  |
| 11 | CS   | 15000.00 | -40.35  | -45.33  | -55.61  | -57.16  | -53.84  | -50.11  | -40.89  | -45.03  | -56.05  | -58.66  |
| 12 | CS   | 16574.00 | -72.81  | -82.08  | -101.36 | -104.95 | -99.54  | -92.98  | -75.93  | -83.40  | -103.59 | -108.38 |
| 13 | CS   | 18300.00 | -110.95 | -125.20 | -154.89 | -160.73 | -152.74 | -142.83 | -116.66 | -128.05 | -158.94 | -166.27 |
| 14 | CS   | 18970.00 | -138.86 | -156.88 | -194.54 | -202.40 | -192.80 | -180.53 | -147.48 | -161.73 | -200.61 | -209.83 |
| 15 | CS   | 19800.00 | -171.15 | -193.35 | -239.74 | -249.39 | -237.53 | -222.39 | -181.69 | -199.25 | -247.15 | -258.51 |
| 16 | CS   | 20664.00 | -174.35 | -196.92 | -244.04 | -253.72 | -241.53 | -226.07 | -184.68 | -202.57 | -251.32 | -262.87 |
| 17 | CS   | 21600.00 | -176.78 | -199.68 | -247.52 | -257.39 | -245.08 | -229.42 | -187.42 | -205.56 | -255.01 | -266.73 |
| 18 | HS   | 0.00     | -88.35  | -99.51  | -122.64 | -126.71 | -119.93 | -111.91 | -91.36  | -100.43 | -124.83 | -130.60 |
| 19 | HS   | 1248.20  | -107.54 | -121.53 | -150.77 | -156.94 | -149.57 | -140.08 | -114.45 | -125.48 | -155.62 | -162.77 |
| 20 | HS   | 3000.00  | -78.08  | -88.12  | -109.05 | -113.19 | -107.59 | -100.63 | -82.19  | -90.21  | -111.96 | -117.12 |
| 21 | HS   | 3864.00  | -91.75  | -103.42 | -127.67 | -132.15 | -125.30 | -117.02 | -95.56  | -104.98 | -130.40 | -136.42 |
| 22 | HS   | 4800.00  | -123.36 | -139.30 | -172.56 | -179.32 | -170.64 | -159.68 | -130.44 | -143.10 | -177.56 | -185.73 |
| 23 | HS   | 5376.00  | -148.82 | -168.13 | -208.48 | -216.88 | -206.58 | -193.42 | -158.02 | -173.29 | -214.95 | -224.83 |
| 24 | HS   | 6000.00  | -171.76 | -194.02 | -240.51 | -250.12 | -238.16 | -222.96 | -182.14 | -199.77 | -247.82 | -259.21 |
| 25 | HS   | 6432.00  | -192.40 | -217.64 | -270.54 | -282.22 | -269.48 | -252.66 | -206.47 | -226.21 | -280.37 | -293.22 |
| 26 | HS   | 6900.00  | -192.32 | -217.61 | -270.63 | -282.48 | -269.87 | -253.10 | -206.83 | -226.56 | -280.76 | -293.62 |
| 27 | WS   | 0.00     | -88.35  | -99.51  | -122.64 | -126.71 | -119.93 | -111.91 | -91.36  | -100.43 | -124.83 | -130.60 |
| 28 | WS   | 1206.90  | -57.50  | -64.60  | -79.21  | -81.38  | -76.62  | -71.28  | -58.17  | -64.07  | -79.76  | -83.48  |
| 29 | WS   | 3000.00  | -48.99  | -55.16  | -67.93  | -70.14  | -66.34  | -61.88  | -50.52  | -55.55  | -69.05  | -72.25  |
| 30 | WS   | 3979.20  | -49.77  | -56.11  | -69.28  | -71.74  | -68.05  | -63.57  | -51.91  | -57.02  | -70.82  | -74.09  |
| 31 | WS   | 5040.00  | -51.12  | -57.70  | -71.42  | -74.16  | -70.51  | -65.95  | -53.87  | -59.12  | -73.37  | -76.75  |
| 32 | WS   | 6079.80  | -83.43  | -94.15  | -116.50 | -120.90 | -114.91 | -107.46 | -87.77  | -96.33  | -119.57 | -125.08 |
| 33 | WS   | 7200.00  | -120.50 | -136.08 | -168.61 | -175.25 | -166.80 | -156.11 | -127.52 | -139.89 | -173.56 | -181.54 |
| 34 | WS   | 7920.00  | -144.88 | -163.60 | -202.66 | -210.59 | -200.38 | -187.52 | -153.18 | -168.05 | -208.51 | -218.10 |
| 35 | WS   | 8700.00  | -167.83 | -189.49 | -234.69 | -243.83 | -231.96 | -217.05 | -177.30 | -194.52 | -241.38 | -252.48 |
| 36 | WS   | 9420.00  | -176.94 | -199.87 | -247.75 | -257.65 | -245.33 | -229.67 | -187.62 | -205.78 | -255.28 | -267.01 |
| 37 | WS   | 10200.00 | -176.85 | -199.83 | -247.84 | -257.90 | -245.71 | -230.09 | -187.98 | -206.13 | -255.66 | -267.41 |
| 38 | TT   | 0.00     | -182.54 | -206.01 | -254.90 | -264.54 | -251.42 | -235.13 | -192.05 | -210.78 | -261.64 | -273.69 |
| 39 | TT   | 100.12   | -127.71 | -141.83 | -169.91 | -169.84 | -155.77 | -142.77 | -116.18 | -129.30 | -162.35 | -170.14 |

|    |    |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 40 | TT | 300.00  | -45.88  | -47.54  | -48.49  | -38.31  | -25.97  | -18.91  | -14.65  | -19.39  | -27.49  | -29.33  |
| 41 | TT | 732.00  | -56.85  | -61.42  | -69.32  | -64.19  | -54.26  | -47.27  | -38.09  | -43.95  | -56.76  | -59.75  |
| 42 | TT | 1200.00 | -108.03 | -120.07 | -144.06 | -144.28 | -132.57 | -121.64 | -99.00  | -110.10 | -138.16 | -144.77 |
| 43 | SD | 0.00    | -182.54 | -206.01 | -254.90 | -264.54 | -251.42 | -235.13 | -192.05 | -210.78 | -261.64 | -273.69 |
| 44 | SD | 312.75  | -156.85 | -175.93 | -215.05 | -220.14 | -206.57 | -191.81 | -156.47 | -172.57 | -215.07 | -225.13 |
| 45 | SD | 720.00  | -134.20 | -150.18 | -182.73 | -186.06 | -173.71 | -160.85 | -131.14 | -144.92 | -180.91 | -189.41 |
| 46 | SD | 1094.40 | -100.93 | -112.84 | -137.01 | -139.17 | -129.64 | -119.88 | -97.71  | -108.08 | -135.02 | -141.38 |
| 47 | SD | 1500.00 | -68.70  | -76.59  | -92.49  | -93.35  | -86.42  | -79.63  | -64.87  | -71.92  | -90.03  | -94.30  |
| 48 | SD | 2364.00 | 10.03   | 11.04   | 12.96   | 12.64   | 11.30   | 10.21   | 8.28    | 9.32    | 11.80   | 12.38   |
| 49 | SD | 3300.00 | 95.37   | 106.67  | 129.66  | 131.87  | 122.98  | 113.80  | 92.77   | 102.57  | 128.08  | 134.11  |
| 50 | SD | 3794.60 | 68.00   | 77.03   | 96.02   | 100.48  | 96.21   | 90.34   | 73.85   | 80.82   | 100.09  | 104.66  |
| 51 | SD | 4500.00 | -7.98   | -8.44   | -9.06   | -7.80   | -6.01   | -4.91   | -3.90   | -4.72   | -6.32   | -6.69   |
| 52 | LL | 0.00    | -181.62 | -204.97 | -253.65 | -263.27 | -250.25 | -234.05 | -191.17 | -209.81 | -260.41 | -272.41 |
| 53 | LL | 683.51  | -83.34  | -92.93  | -112.26 | -113.33 | -104.95 | -96.73  | -78.80  | -87.36  | -109.34 | -114.53 |
| 54 | LL | 1500.00 | 5.77    | 7.32    | 11.05   | 13.79   | 15.11   | 15.17   | 12.54   | 13.13   | 15.64   | 16.25   |
| 55 | ML | 0.00    | -182.54 | -206.01 | -254.90 | -264.54 | -251.42 | -235.13 | -192.05 | -210.78 | -261.64 | -273.69 |
| 56 | ML | 617.74  | -126.61 | -141.66 | -172.31 | -175.38 | -163.68 | -151.53 | -123.53 | -136.54 | -170.46 | -178.48 |
| 57 | ML | 1200.00 | -91.71  | -102.39 | -124.00 | -125.57 | -116.62 | -107.66 | -87.73  | -97.15  | -121.48 | -127.22 |
| 58 | SL | 0.00    | -182.54 | -206.01 | -254.90 | -264.54 | -251.42 | -235.13 | -192.05 | -210.78 | -261.64 | -273.69 |
| 59 | SL | 358.38  | -153.89 | -172.54 | -210.72 | -215.47 | -201.99 | -187.46 | -152.90 | -168.70 | -210.32 | -220.16 |
| 60 | SL | 720.00  | -134.20 | -150.18 | -182.73 | -186.06 | -173.71 | -160.85 | -131.14 | -144.92 | -180.91 | -189.41 |

peak stress intensity for hole pattern theta = 2

| cond  | time     | phi= 1  | phi= 2  | phi= 3  | phi= 4  | phi= 5  | phi= 6  | phi= 7  | phi= 8  | phi= 9  | phi=10  |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 CS  | 0.00     | -94.45  | -105.19 | -126.76 | -127.61 | -117.84 | -108.44 | -88.31  | -98.01  | -122.78 | -128.63 |
| 2 CS  | 1355.20  | -112.30 | -124.95 | -150.26 | -150.89 | -139.01 | -127.74 | -104.00 | -115.53 | -144.85 | -151.76 |
| 3 CS  | 3000.00  | -107.97 | -120.17 | -144.60 | -145.32 | -133.99 | -123.18 | -100.30 | -111.39 | -139.61 | -146.27 |
| 4 CS  | 4443.70  | -101.40 | -112.87 | -135.82 | -136.51 | -125.88 | -115.73 | -94.23  | -104.65 | -131.16 | 137.41  |
| 5 CS  | 6000.00  | -93.99  | -104.62 | -125.90 | -126.53 | -116.67 | -107.27 | -87.34  | -97.00  | -121.57 | -127.37 |
| 6 CS  | 7442.50  | -87.38  | -97.26  | -117.07 | -117.70 | -108.55 | -99.82  | -81.28  | -90.25  | -113.11 | -118.50 |
| 7 CS  | 9000.00  | -79.80  | -88.84  | -106.96 | -107.55 | -99.22  | -91.25  | -74.30  | -82.50  | -103.39 | -108.31 |
| 8 CS  | 10420.00 | -72.08  | -80.26  | -96.68  | -97.27  | -89.79  | -82.60  | -67.26  | -74.67  | -93.55  | -98.01  |
| 9 CS  | 12000.00 | -62.61  | -69.75  | -84.08  | -84.67  | -78.23  | -72.01  | -58.64  | -65.07  | -81.51  | -85.39  |
| 10 CS | 13459.00 | -52.99  | -59.06  | -71.26  | -71.85  | -66.46  | -61.21  | -49.85  | -55.30  | -69.24  | -72.53  |
| 11 CS | 15000.00 | -42.01  | -46.88  | -56.74  | -57.41  | -53.27  | -49.16  | -40.06  | -44.37  | -55.50  | -58.12  |
| 12 CS | 16574.00 | -78.70  | -87.57  | -105.34 | -105.82 | -97.52  | -89.63  | -72.98  | -81.06  | -101.62 | -106.47 |
| 13 CS | 18300.00 | -121.20 | -134.76 | -161.83 | -162.24 | -149.23 | -137.00 | -111.52 | -123.97 | -155.51 | -162.94 |
| 14 CS | 18970.00 | -153.68 | -170.71 | -204.57 | -204.58 | -187.72 | -172.10 | -140.05 | -155.84 | -195.65 | -205.02 |
| 15 CS | 19800.00 | -189.29 | -210.27 | -252.01 | -252.06 | -231.31 | -212.08 | -172.59 | -192.04 | -241.08 | -252.63 |
| 16 CS | 20664.00 | -192.29 | -213.65 | -256.18 | -256.36 | -235.38 | -215.87 | -175.69 | -195.44 | -245.31 | -257.06 |
| 17 CS | 21600.00 | -195.20 | -216.86 | -259.97 | -260.10 | -238.77 | -218.95 | -178.19 | -198.25 | -248.84 | -260.77 |
| 18 HS | 0.00     | -94.45  | -105.19 | -126.76 | -127.61 | -117.84 | -108.44 | -88.31  | -98.01  | -122.78 | -128.63 |
| 19 HS | 1248.20  | -119.33 | -132.52 | -158.75 | -158.68 | -145.53 | -133.38 | -108.54 | -120.80 | -151.68 | -158.95 |
| 20 HS | 3000.00  | -85.43  | -94.97  | -114.02 | -114.27 | -105.08 | -96.45  | -78.51  | -87.29  | -109.50 | -114.74 |
| 21 HS | 3864.00  | -99.00  | -110.18 | -132.57 | -133.22 | -122.82 | -112.90 | -91.93  | -102.10 | -127.97 | -134.08 |
| 22 HS | 4800.00  | -135.75 | -150.85 | -180.94 | -181.15 | -166.39 | -152.64 | -124.23 | -138.18 | -173.41 | -181.71 |
| 23 HS | 5376.00  | -164.65 | -182.89 | -219.19 | -219.21 | -201.16 | -184.42 | -150.08 | -167.00 | -209.65 | -219.70 |

|    |    |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----|----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 24 | HS | 6000.00  | -189.71 | -210.76 | -252.65 | -252.76 | -232.01 | -212.75 | -173.14 | -192.64 | -241.80 | -253.39 |
| 25 | HS | 6432.00  | -215.79 | -239.45 | -286.36 | -285.66 | -261.47 | -239.36 | -194.74 | -216.92 | -272.54 | -285.64 |
| 26 | HS | 6900.00  | -216.30 | -239.98 | -286.86 | -286.01 | -261.65 | -239.46 | -194.81 | -217.03 | -272.73 | -285.85 |
| 27 | WS | 0.00     | -94.45  | -105.19 | -126.76 | -127.61 | -117.84 | -108.44 | -88.31  | -98.01  | -122.78 | -128.63 |
| 28 | WS | 1206.90  | -59.73  | -66.67  | -80.72  | -81.70  | -75.86  | -70.02  | -57.05  | -63.18  | -79.02  | -82.76  |
| 29 | WS | 3000.00  | -52.18  | -58.13  | -70.09  | -70.61  | -65.25  | -60.07  | -48.92  | -54.28  | -67.98  | -71.22  |
| 30 | WS | 3979.20  | -53.80  | -59.87  | -72.01  | -72.34  | -66.67  | -61.27  | -49.89  | -55.41  | -69.47  | -72.78  |
| 31 | WS | 5040.00  | -56.01  | -62.26  | -74.73  | -74.88  | -68.83  | -63.17  | -51.42  | -57.18  | -71.73  | -75.17  |
| 32 | WS | 6079.80  | -91.20  | -101.40 | -121.75 | -122.04 | -112.24 | -103.04 | -83.87  | -93.24  | -116.97 | -122.56 |
| 33 | WS | 7200.00  | -132.74 | -147.50 | -176.89 | -177.06 | -162.60 | -149.14 | -121.38 | -135.02 | -169.46 | -177.58 |
| 34 | WS | 7920.00  | -159.40 | -177.14 | -212.48 | -212.73 | -195.41 | -179.26 | -145.90 | -162.28 | -203.65 | -213.40 |
| 35 | WS | 8700.00  | -184.46 | -205.00 | -245.94 | -246.27 | -226.27 | -207.59 | -168.96 | -187.91 | -235.80 | -247.09 |
| 36 | WS | 9420.00  | -195.42 | -217.10 | -260.25 | -260.37 | -239.00 | -219.16 | -178.36 | -198.44 | -249.09 | -261.02 |
| 37 | WS | 10200.00 | -195.93 | -217.61 | -260.74 | -260.71 | -239.18 | -219.25 | -178.42 | -198.55 | -249.28 | -261.23 |
| 38 | TT | 0.00     | -199.56 | -221.88 | -266.41 | -267.05 | -245.59 | -225.45 | -183.52 | -204.02 | -255.94 | -268.17 |
| 39 | TT | 100.12   | -115.12 | -130.09 | -161.39 | -167.99 | -160.09 | -149.93 | -122.49 | -134.31 | -166.57 | -174.22 |
| 40 | TT | 300.00   | -4.85   | -9.27   | -20.73  | -32.27  | -40.02  | -42.24  | -35.22  | -35.69  | -41.23  | -42.62  |
| 41 | TT | 732.00   | -32.89  | -39.07  | -53.11  | -60.66  | -62.47  | -60.90  | -50.11  | -53.47  | -64.79  | -67.51  |
| 42 | TT | 1200.00  | -98.36  | -111.05 | -137.52 | -142.85 | -135.89 | -127.14 | -103.85 | -113.95 | -141.40 | -147.91 |
| 43 | SD | 0.00     | -199.56 | -221.88 | -266.41 | -267.05 | -245.59 | -225.45 | -183.52 | -204.02 | -255.94 | -268.17 |
| 44 | SD | 312.75   | -159.95 | -178.82 | -217.15 | -220.59 | -205.50 | -190.05 | -154.91 | -171.34 | -214.03 | -224.12 |
| 45 | SD | 720.00   | -133.17 | -149.22 | -182.04 | -185.90 | -174.06 | -161.43 | -131.65 | -145.33 | -181.25 | -189.74 |
| 46 | SD | 1094.40  | -98.92  | -110.96 | -135.65 | -138.87 | -130.32 | -121.02 | -98.72  | -108.88 | -135.69 | -142.03 |
| 47 | SD | 1500.00  | -65.12  | -73.26  | -90.08  | -92.82  | -87.64  | -81.67  | -66.66  | -73.35  | -91.23  | -95.46  |
| 48 | SD | 2364.00  | 7.91    | 9.06    | 11.52   | 12.32   | 12.03   | 11.42   | 9.35    | 10.16   | 12.51   | 13.07   |
| 49 | SD | 3300.00  | 94.07   | 105.46  | 128.78  | 131.68  | 123.43  | 114.54  | 93.42   | 103.08  | 128.52  | 134.53  |
| 50 | SD | 3794.60  | 77.45   | 85.84   | 102.41  | 101.87  | 92.97   | 84.97   | 69.11   | 77.07   | 96.92   | 101.60  |
| 51 | SD | 4500.00  | -2.67   | -3.48   | -5.46   | -7.01   | -7.84   | -7.93   | -6.57   | -6.84   | -8.10   | -8.41   |
| 52 | LL | 0.00     | -198.68 | -220.88 | -265.19 | -265.79 | -244.41 | -224.35 | -182.62 | -203.03 | -254.70 | -266.88 |
| 53 | LL | 683.51   | -79.14  | -89.02  | -109.42 | -112.71 | -106.39 | -99.12  | -80.90  | -89.03  | -110.75 | -115.89 |
| 54 | LL | 1500.00  | 15.03   | 15.97   | 17.32   | 15.15   | 11.94   | 9.90    | 7.90    | 9.45    | 12.53   | 13.25   |
| 55 | ML | 0.00     | -199.56 | -221.88 | -266.41 | -267.05 | -245.59 | -225.45 | -183.52 | -204.02 | -255.94 | -268.17 |
| 56 | ML | 617.74   | -125.39 | -140.52 | -171.48 | -175.20 | -164.10 | -152.22 | -124.15 | -137.02 | -170.87 | -178.87 |
| 57 | ML | 1200.00  | -88.46  | -99.36  | -121.81 | -125.09 | -117.73 | -109.51 | -89.36  | -98.44  | -122.57 | -128.28 |
| 58 | SL | 0.00     | -199.56 | -221.88 | -266.41 | -267.05 | -245.59 | -225.45 | -183.52 | -204.02 | -255.94 | -268.17 |
| 59 | SL | 358.38   | -156.11 | -174.60 | -212.22 | -215.80 | -201.23 | -186.20 | -151.79 | -167.82 | -209.58 | -219.45 |
| 60 | SL | 720.00   | -133.17 | -149.22 | -182.04 | -185.90 | -174.06 | -161.43 | -131.65 | -145.33 | -181.25 | -189.74 |

peak stress intensity for hole pattern theta = 3

| cond | time    | phi= 1 | phi= 2  | phi= 3  | phi= 4 | phi= 5  | phi= 6  | phi= 7  | phi= 8  | phi= 9  | phi=10 |
|------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1 CS | 0.00    | -83.86 | -119.26 | -110.59 | -79.56 | -110.64 | -122.54 | -89.11  | -113.88 | -110.49 | -83.86 |
| 2 CS | 1355.20 | -98.49 | -140.54 | -130.68 | -94.01 | -130.75 | -145.17 | -105.90 | -134.96 | -130.16 | -98.49 |
| 3 CS | 3000.00 | -95.07 | -135.51 | -125.89 | -90.56 | -125.95 | -139.73 | -101.83 | -129.89 | -125.51 | -95.07 |
| 4 CS | 4443.70 | -89.32 | -127.31 | -118.26 | -85.07 | -118.32 | -131.25 | -95.64  | -122.00 | -117.92 | -89.32 |
| 5 CS | 6000.00 | -82.80 | -118.00 | -109.61 | -78.85 | -109.67 | -121.66 | -88.65  | -113.09 | -109.30 | -82.80 |
| 6 CS | 7442.50 | -77.07 | -109.80 | -101.97 | -73.35 | -102.02 | -113.14 | -82.41  | -105.16 | -101.71 | -77.07 |
| 7 CS | 9000.00 | -70.48 | -100.37 | -93.19  | -67.04 | -93.23  | -103.37 | -75.27  | -96.08  | -92.98  | -70.48 |

|    |    |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----|----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8  | CS | 10420.00 | -63.84  | -90.85  | -84.29  | -60.64  | -84.33  | -93.45  | -68.00  | -86.85  | -84.16  | -63.84  |
| 9  | CS | 12000.00 | -55.71  | -79.18  | -73.40  | -52.80  | -73.43  | -81.28  | -59.08  | -75.54  | -73.36  | -55.71  |
| 10 | CS | 13459.00 | -47.42  | -67.30  | -62.30  | -44.82  | -62.33  | -68.91  | -50.01  | -64.03  | -62.36  | -47.42  |
| 11 | CS | 15000.00 | -38.25  | -54.02  | -49.83  | -35.84  | -49.84  | -54.91  | -39.68  | -51.00  | -50.08  | -38.25  |
| 12 | CS | 16574.00 | -69.14  | -98.61  | -91.65  | -65.93  | -91.70  | -101.78 | -74.21  | -94.62  | -91.33  | -69.14  |
| 13 | CS | 18300.00 | -105.42 | -150.78 | -140.44 | -101.03 | -140.52 | -156.30 | -114.25 | -145.33 | -139.61 | -105.42 |
| 14 | CS | 18970.00 | -132.02 | -189.49 | -176.97 | -127.32 | -177.09 | -197.47 | -144.78 | -183.66 | -175.40 | -132.02 |
| 15 | CS | 19800.00 | -162.72 | -233.51 | -218.04 | -156.87 | -218.19 | -243.27 | -178.34 | -226.26 | -216.15 | -162.72 |
| 16 | CS | 20664.00 | -165.74 | -237.66 | -221.80 | -159.57 | -221.94 | -247.31 | -181.19 | -230.01 | -220.01 | -165.74 |
| 17 | CS | 21600.00 | -168.06 | -241.06 | -225.02 | -161.89 | -225.17 | -250.97 | -183.91 | -233.41 | -223.15 | -168.06 |
| 18 | HS | 0.00     | -83.86  | -119.26 | -110.59 | -79.56  | -110.64 | -122.54 | -89.11  | -113.88 | -110.49 | -83.86  |
| 19 | HS | 1248.20  | -102.26 | -146.88 | -137.24 | -98.74  | -137.34 | -153.22 | -112.41 | -142.51 | -135.95 | -102.26 |
| 20 | HS | 3000.00  | -74.19  | -106.16 | -98.91  | -71.16  | -98.97  | -110.11 | -80.52  | -102.39 | -98.29  | -74.19  |
| 21 | HS | 3864.00  | -87.13  | -124.21 | -115.40 | -83.02  | -115.46 | -128.11 | -93.36  | -119.08 | -115.04 | -87.13  |
| 22 | HS | 4800.00  | -117.25 | -168.03 | -156.74 | -112.77 | -156.84 | -174.70 | -127.92 | -162.46 | -155.56 | -117.25 |
| 23 | HS | 5376.00  | -141.49 | -203.06 | -189.63 | -136.42 | -189.76 | -211.58 | -155.12 | -196.78 | -187.96 | -141.49 |
| 24 | HS | 6000.00  | -163.29 | -234.24 | -218.67 | -157.32 | -218.81 | -243.90 | -178.74 | -226.83 | -216.83 | -163.29 |
| 25 | HS | 6432.00  | -183.05 | -263.68 | -246.92 | -177.65 | -247.11 | -276.26 | -203.19 | -257.02 | -243.99 | -183.05 |
| 26 | HS | 6900.00  | -183.00 | -263.80 | -247.18 | -177.84 | -247.37 | -276.71 | -203.65 | -257.45 | -244.09 | -183.00 |
| 27 | WS | 0.00     | -83.86  | -119.26 | -110.59 | -79.56  | -110.64 | -122.54 | -89.11  | -113.88 | -110.49 | -83.86  |
| 28 | WS | 1206.90  | -54.50  | -76.93  | -70.93  | -51.02  | -70.95  | -78.13  | -56.42  | -72.56  | -71.32  | -54.50  |
| 29 | WS | 3000.00  | -46.49  | -66.05  | -61.21  | -44.03  | -61.23  | -67.77  | -49.23  | -62.97  | -61.20  | -46.49  |
| 30 | WS | 3979.20  | -47.26  | -67.41  | -62.66  | -45.07  | -62.69  | -69.58  | -50.73  | -64.68  | -62.43  | -47.26  |
| 31 | WS | 5040.00  | -48.58  | -69.54  | -64.81  | -46.62  | -64.85  | -72.16  | -52.79  | -67.10  | -64.38  | -48.58  |
| 32 | WS | 6079.80  | -79.27  | -113.40 | -105.64 | -76.00  | -105.71 | -117.59 | -85.96  | -109.33 | -105.00 | -79.27  |
| 33 | WS | 7200.00  | -114.54 | -164.19 | -153.20 | -110.21 | -153.30 | -170.78 | -125.08 | -158.82 | -152.00 | -114.54 |
| 34 | WS | 7920.00  | -137.71 | -197.34 | -184.07 | -132.43 | -184.19 | -205.15 | -150.21 | -190.78 | -182.69 | -137.71 |
| 35 | WS | 8700.00  | -159.51 | -228.52 | -213.11 | -153.32 | -213.25 | -237.47 | -173.83 | -220.83 | -211.56 | -159.51 |
| 36 | WS | 9420.00  | -168.21 | -241.29 | -225.25 | -162.05 | -225.40 | -251.24 | -184.12 | -233.66 | -223.36 | -168.21 |
| 37 | WS | 10200.00 | -168.15 | -241.41 | -225.50 | -162.24 | -225.66 | -251.68 | -184.57 | -234.08 | -223.46 | -168.15 |
| 38 | TT | 0.00     | -173.45 | -248.14 | -231.16 | -166.30 | -231.30 | -257.29 | -188.10 | -239.24 | -229.75 | -173.45 |
| 39 | TT | 100.12   | -120.30 | -163.99 | -147.00 | -105.68 | -146.89 | -157.21 | -109.47 | -145.52 | -152.53 | -120.30 |
| 40 | TT | 300.00   | -41.67  | -44.59  | -30.87  | -22.08  | -30.53  | -22.52  | -6.34   | -19.70  | -42.57  | -41.67  |
| 41 | TT | 732.00   | -52.77  | -65.80  | -54.40  | -39.06  | -54.21  | -52.90  | -32.14  | -48.40  | -61.75  | -52.77  |
| 42 | TT | 1200.00  | -101.81 | -139.10 | -124.93 | -89.82  | -124.85 | -133.90 | -93.48  | -123.96 | -129.36 | -101.81 |
| 43 | SD | 0.00     | -173.45 | -248.14 | -231.16 | -166.30 | -231.30 | -257.29 | -188.10 | -239.24 | -229.75 | -173.45 |
| 44 | SD | 312.75   | -148.54 | -208.68 | -191.69 | -137.87 | -191.72 | -210.35 | -151.21 | -195.28 | -193.55 | -148.54 |
| 45 | SD | 720.00   | -126.93 | -177.10 | -161.80 | -116.36 | -161.79 | -176.55 | -126.05 | -163.79 | -164.37 | -126.93 |
| 46 | SD | 1094.40  | -95.42  | -132.72 | -120.95 | -86.98  | -120.93 | -131.64 | -93.69  | -122.09 | -123.21 | -95.42  |
| 47 | SD | 1500.00  | -64.85  | -89.46  | -80.99  | -58.24  | -80.96  | -87.54  | -61.77  | -81.13  | -83.12  | -64.85  |
| 48 | SD | 2364.00  | 9.40    | 12.44   | 10.87   | 7.81    | 10.85   | 11.29   | 7.57    | 10.42   | 11.60   | 9.40    |
| 49 | SD | 3300.00  | 90.18   | 125.64  | 114.64  | 82.44   | 114.63  | 124.94  | 89.06   | 115.89  | 116.62  | 90.18   |
| 50 | SD | 3794.60  | 64.74   | 93.65   | 87.98   | 63.30   | 88.05   | 98.73   | 72.88   | 91.89   | 86.63   | 64.74   |
| 51 | SD | 4500.00  | -7.33   | -8.47   | -6.46   | -4.63   | -6.42   | -5.61   | -2.75   | -5.05   | -8.02   | -7.33   |
| 52 | LL | 0.00     | -172.57 | -246.92 | -230.06 | -165.51 | -230.20 | -256.10 | -187.26 | -238.13 | -228.63 | -172.57 |
| 53 | LL | 683.51   | -78.68  | -108.59 | -98.34  | -70.71  | -98.31  | -106.33 | -75.06  | -98.54  | -100.89 | -78.68  |
| 54 | LL | 1500.00  | 5.85    | 11.26   | 12.55   | 9.05    | 12.62   | 16.25   | 13.83   | 15.35   | 10.18   | 5.85    |
| 55 | ML | 0.00     | -173.45 | -248.14 | -231.16 | -166.30 | -231.30 | -257.29 | -188.10 | -239.24 | -229.75 | -173.45 |
| 56 | ML | 617.74   | -119.74 | -166.99 | -152.49 | -109.67 | -152.48 | -166.33 | -118.69 | -154.31 | -154.99 | -119.74 |
| 57 | ML | 1200.00  | -86.64  | -120.03 | -109.04 | -78.41  | -109.01 | -118.29 | -83.84  | -109.66 | -111.48 | -86.64  |
| 58 | SL | 0.00     | -173.45 | -248.14 | -231.16 | -166.30 | -231.30 | -257.29 | -188.10 | -239.24 | -229.75 | -173.45 |

|    |    |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----|----|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 59 | SL | 358.38 | -145.71 | -204.43 | -187.58 | -134.91 | -187.60 | -205.62 | -147.62 | -190.86 | -189.63 | -145.71 |
| 60 | SL | 720.00 | -126.93 | -177.10 | -161.80 | -116.36 | -161.79 | -176.55 | -126.05 | -163.79 | -164.37 | -126.93 |

max. cumulative usage factor on the point 1 is 0.2632, and occurs when theta= 1 and phi=10

peak SI causing the max. cumulative usage factor

| cond | time     | peak SI |
|------|----------|---------|
| CS   | 0.00     | -18.94  |
| CS   | 1355.20  | -22.42  |
| CS   | 3000.00  | -21.58  |
| CS   | 4443.70  | -20.28  |
| CS   | 6000.00  | -18.79  |
| CS   | 7442.50  | -17.48  |
| CS   | 9000.00  | -15.97  |
| CS   | 10420.00 | -14.44  |
| CS   | 12000.00 | -12.57  |
| CS   | 13459.00 | -10.66  |
| CS   | 15000.00 | -8.51   |
| CS   | 16574.00 | -15.72  |
| CS   | 18300.00 | -24.12  |
| CS   | 18970.00 | -30.43  |
| CS   | 19800.00 | -37.49  |
| CS   | 20664.00 | -38.13  |
| CS   | 21600.00 | -38.69  |
| HS   | 0.00     | -18.94  |
| HS   | 1248.20  | -23.61  |
| HS   | 3000.00  | -16.99  |
| HS   | 3864.00  | -19.79  |
| HS   | 4800.00  | -26.94  |
| HS   | 5376.00  | -32.61  |
| HS   | 6000.00  | -37.60  |
| HS   | 6432.00  | -42.53  |
| HS   | 6900.00  | -42.59  |
| WS   | 0.00     | -18.94  |
| WS   | 1206.90  | -12.11  |
| WS   | 3000.00  | -10.48  |
| WS   | 3979.20  | -10.75  |
| WS   | 5040.00  | -11.13  |
| WS   | 6079.80  | -18.14  |
| WS   | 7200.00  | -26.33  |
| WS   | 7920.00  | -31.63  |
| WS   | 8700.00  | -36.62  |
| WS   | 9420.00  | -38.73  |
| WS   | 10200.00 | -38.78  |
| TT   | 0.00     | -39.70  |
| TT   | 100.12   | -24.68  |
| TT   | 300.00   | -4.25   |
| TT   | 732.00   | -8.67   |
| TT   | 1200.00  | -21.00  |
| SD   | 0.00     | -39.70  |



|    |         |        |
|----|---------|--------|
| SD | 312.75  | -32.65 |
| SD | 720.00  | -27.47 |
| SD | 1094.40 | -20.51 |
| SD | 1500.00 | -13.68 |
| SD | 2364.00 | 1.80   |
| SD | 3300.00 | 19.45  |
| SD | 3794.60 | 15.18  |
| SD | 4500.00 | -0.97  |
| LL | 0.00    | -39.51 |
| LL | 683.51  | -16.61 |
| LL | 1500.00 | 2.36   |
| ML | 0.00    | -39.70 |
| ML | 617.74  | -25.89 |
| ML | 1200.00 | -18.45 |
| SL | 0.00    | -39.70 |
| SL | 358.38  | -31.93 |
| SL | 720.00  | -27.47 |

breakdown of calculation of max. cumulative usage factor

maximum occurs when theta= 1 and phi=10

modulus of elasticity taken to be 26500.000 ksi

Er = 30000. ksi divided by mod. of elas. = 1.132

| cond & time |             | SImax | SImin  | Salt    | Ke*Er*Salt | required<br>cycles | allowed<br>cycles | usage<br>factor |       |
|-------------|-------------|-------|--------|---------|------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------|
| SD          | 3300. - HS  | 6432. | 134.11 | -293.62 | 213.87     | 242.11             | 1500              | 13064.          | 0.115 |
| SD          | 3300. - TT  | 0.    | 134.11 | -273.69 | 203.90     | 230.83             | 360               | 15377.          | 0.023 |
| SD          | 3300. - SD  | 0.    | 134.11 | -273.69 | 203.90     | 230.83             | 90                | 15377.          | 0.006 |
| LL          | 1500. - ML  | 0.    | 16.25  | -273.69 | 144.97     | 164.11             | 5250              | 44999.          | 0.117 |
| CS          | 15000. - SL | 0.    | -58.66 | -273.69 | 107.51     | 121.71             | 150               | 156786.         | 0.001 |
| WS          | 3000. - SL  | 0.    | -72.25 | -273.69 | 100.72     | 114.02             | 300               | 198361.         | 0.002 |
| total       |             |       |        |         |            |                    |                   | 0.2632          |       |