



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

유한요소해석을 이용한 판형열교환기의  
구조건전성 평가에 대한 연구

A Study to Evaluate the Structural Integrity of the  
Plate Type Heat Exchanger using FEM Analysis



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이 승 민

본 논문을 이승민의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장  
위원  
위원

박 권 하  
방 광 현  
조 중 래



2013년 02월 01일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abstract .....	i
Nomenclature .....	ii
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv

## 1. 서론

1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 동향 .....	2
1.3 연구 내용 및 목적 .....	3

## 2. 유한요소해석의 이론적 배경

2.1 탄성유한요소해석 이론 .....	4
2.2 모드해석 이론 .....	6
2.3 응답 스펙트럼 해석이론 .....	9

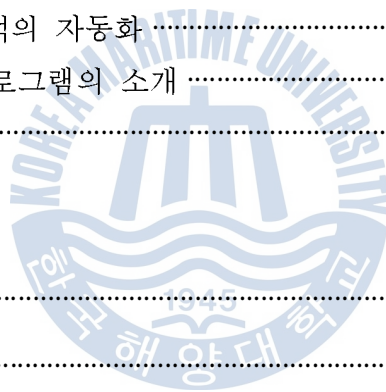
## 3. 해석 대상 판형 열교환기

3.1 형상 .....	11
3.2 설계 조건 .....	13
3.3 재료 물성 및 허용응력 .....	18

## 4. 건전성 평가

4.1 코드 계산 .....	20
4.1.1 고정 프레임 설계 .....	20
4.1.2 앵커 볼트 설계 .....	23
4.2 유한요소해석 .....	26
4.2.1 유한요소모델 및 경계 조건 .....	26

4.2.2	하중 조합 .....	30
4.2.3	각 해석 결과 및 허용치 비교 .....	31
<b>5.</b>	<b>내진해석 평가</b>	
5.1	고유치 해석 .....	40
5.1.1	유효질량 분석 .....	45
5.2	응답 스펙트럼 해석 .....	47
5.2.1	응답 스펙트럼 .....	47
5.2.2	응답 스펙트럼 해석 결과 및 볼트 반력 산출 방법 .....	53
<b>6.</b>	<b>건전성 평가 모듈 개발</b>	
6.1	자동화 프로그램 개발 .....	58
6.1.1	유한요소해석의 자동화 .....	58
6.2	전체 자동화 프로그램의 소개 .....	60
6.2.1	화면구성 .....	61
<b>7.</b>	<b>결론</b>	
	참고문헌 .....	66
	APPENDIX A .....	67



# A Study to Evaluate the Structural Integrity of the Plate Type Heat Exchanger using FEM Analysis

Seung-Min Lee

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University

## Abstract

The purpose of this study is to evaluate a structural integrity of plate type heat exchanger considering the behavior of the global structure and is to perform finite element analysis and code calculation as the way to verify the structural integrity.

Recently, the research on plate type heat exchanger has been focused on performance improvement considering the shape and size, however, this study is going to establish the criteria for the supporting structure of the plate type heat exchanger integrity.

Structures under internal pressure flat plate, fixed frame and maximum bolt load were evaluated a structural integrity by performing code calculation The advantages of the plate type heat exchanger is that it is easy to assemble and disassemble, which is up to 1.5 times the actual weight of the evaluation of the structural integrity in carrying bar of body part. The allowable bending stress of the beam type structures which carrying bar and support column is applied to  $0.66S_y$  and flat type like a base plate is applied to  $0.6S_y$ . In addition, the maximum deformation allows 6 inch per 100ft.

In this study, the pre-processing module using Visual Basic and ANSYS APDL has been proposed to save time in FE modeling and analysis to improve an accuracy.

**KEY WORDS:** FEM; Plate type heat exchanger; ANSYS APDL; Structural integrity.

## Nomenclature

$E$	: 탄성 계수(Young's modulus)
$[M]$	: 질량 행렬(mass matrix)
$[C]$	: 감쇠 행렬(damping matrix)
$[K]$	: 강성 행렬(stiffness matrix)
$x_{\max}$	: 최대 변위(maximum displacement)
$\alpha$	: 선팽창계수(mean linear expansion, $\mu\text{m}/\mu\text{mK}$ )
$\epsilon$	: 인장 변형률(tensile strain)
$i$	: -1의 제곱근(square root of -1)
$f$	: 주파수(imposed frequency, cycle/time)
$\omega$	: 진동수(imposed circular frequency, radians/time)
$\sigma$	: 인장 응력(tensile stress)
$\nu$	: 포아송비(Poisson's ratio)
$\gamma$	: 전단 변형률(shearing strain)
$\tau$	: 전단 응력(shearing stress)
$\phi$	: 변위 위상각(displacement phase shift, radians)
$\psi$	: 가진 위상각(force phase shift, radians)
$\{x(t)\}$	: 절점의 변위 벡터(nodal displacement vector)
$\{\dot{x}(t)\}$	: 절점의 속도 벡터(nodal velocity vector)
$\{\ddot{x}(t)\}$	: 절점의 가속도 벡터(nodal acceleration vector)
$\{F(t)\}$	: 작용하중 벡터(applied load vector)
$\{\Phi\}$	: 자유진동 모드행렬

## List of Tables

Table 1 Design pressure and temperature

Table 2 Dead load

Table 3 Nozzle load

Table 4 Hydrostatic test pressure

Table 5 Wind load

Table 6 Seismic load

Table 7 Material summary

Table 8 Allowable limit for Fixed frame

Table 9 Frame design input data

Table 10 Anchor bolt design input data

Table 11 Tension and shear stress check

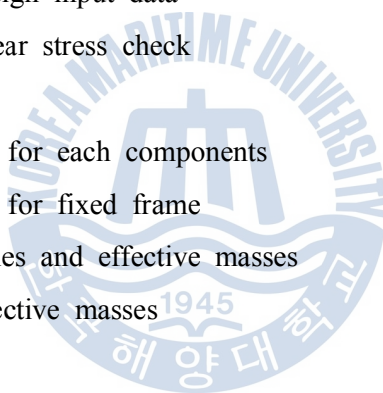
Table 12 Analysis case

Table 13 Analysis results for each components

Table 14 Analysis results for fixed frame

Table 15 Modal frequencies and effective masses

Table 16 Sum of the effective masses

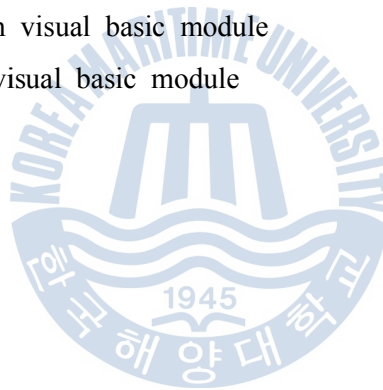




## List of Figures

- Fig 1 Plate type heat exchanger
- Fig 2 Geometry of plate type heat exchanger (2D Drawing)
- Fig 3 Structural shell 181 element in ANSYS
- Fig 4 Structural beam 188 element in ANSYS
- Fig 5 Structural solidl 185 element in ANSYS
- Fig 6 Finite element model for full model
- Fig 7 Applied boundary conditions for full model
- Fig 8 Applied boundary conditions for sub model
- Fig 9 Distribution of stress intensity due to nozzle loads for upper guide bar
- Fig 10 Distribution of stress intensity due to dead weight for upper guide bar
- Fig 11 Distribution of stress intensity due to seismic loads for upper guidebar
- Fig 12 Distribution of stress intensity due to nozzle loads for support column
- Fig 13 Distribution of stress intensity due to dead weight for support column
- Fig 14 Distribution of stress intensity due to seismic loads for support column
- Fig 15 Distribution of stress intensity due to nozzle loads for base plate
- Fig 16 Distribution of stress intensity due to dead weight for base plate
- Fig 17 Distribution of stress intensity due to seismic loads for base plate
- Fig 18 Path location on fixed frame
- Fig 19 Distribution of stress intensity on Fixed frame for design condition
- Fig 20 Finite element model for spectrum analysis
- Fig 21 First mode shape
- Fig 22 Second mode shape
- Fig 23 Effective masses for each direction
- Fig 24 Spectrum curve for E-W direction
- Fig 25 Spectrum curve for N-S direction
- Fig 26 Spectrum curve for V-S direction
- Fig 27 Reaction test for spectrum analysis (1-point support)

- Fig 28 Reaction test for spectrum analysis (1-point support, Input Acc. Y-dir)
- Fig 29 Reaction test for spectrum analysis (1-point support, Input Acc. X-dir)
- Fig 30 Reaction test for spectrum analysis (4-point support)
- Fig 31 Reaction test for spectrum analysis (4-point support, Input Acc. Y-dir)
- Fig 32 Reaction test for spectrum analysis (Suggest B.C)
- Fig 33 Reaction test for spectrum analysis (Suggest B.C , Input Acc. X-dir)
- Fig 34 An example of ANSYS APDL
- Fig 35 Main page in visual basic module
- Fig 36 Front page in visual basic module
- Fig 37 Side page in visual basic module
- Fig 38 Beam section page in visual basic module
- Fig 39 Gasket page in visual basic module
- Fig 40 Base plate page in visual basic module
- Fig 41 Solution page in visual basic module



# 제 1 장 서론

## 1.1 연구 배경

일반적인 판형 열교환기(plate type heat exchanger)는 19세기말에 개발된 이래 열교환기를 필요로 하는 거의 모든 분야에 걸쳐 광범위하게 응용되고 있다. 판형 열교환기는 고효율·고밀도 열교환기로 냉동·공조산업 및 낙농과 식품분야, 화학, 석유, 의약품 산업, 조선 등에 널리 사용되고 있으며, 가격이 종래의 열교환기에 비해 저렴하고, 크기도 1/5이하로 줄어들었으며, 열교환 효율도 높아 사용이 확대되고 있다.<sup>[1]</sup>

판형열교환기의 사용이 확대됨으로서 각각의 사용처에 따른 구조적인 안전성의 확보도 대두되고 있는 실정이다. 여러 부품이 결합되어 만들어지는 특성상 일체형 판형 열교환기에 대한 구조적인 건전성을 평가하는 예는 찾아보기 힘들다. 일반적으로 각각의 부품에 대한 정적 하중이나 동적하중에 대한 간단한 수치적 계산으로 건전성을 평가 하지만, 결합 상태에서의 작동 환경, 극한 상황 등을 고려한 구조적 평가는 잘 이루어 지지 않아 왔다.

본 연구에서는 일체형 판형 열교환기의 입력 하중의 선정법에 대해 제시하고, 전체 구조에서 각 부품에 작용하는 하중에 따른 특성을 평가 하였으며, 또한 유사 형상을 빠른 시간에 구조의 건전성을 평가하기 위한 자동화 프로그램을 개발하여, FEM을 이용한 판형 열교환기의 구조 건전성 평가 모듈을 개발하는데 목적이 있다.

## 1.2 연구 동향

판형 열교환기에 대한 연구는 지속적으로 이어져 왔으며, 주로 열효율을 증가시키기 위한 연구가 이루어 졌다.<sup>[2]~[3]</sup> 열효율에 큰 영향을 미치는 열판의 형태는 1950년대 후반 Herringbone Pattern 개념이 도입되며 현재의 모양으로 바뀌게 되었고, Herringbone 무늬의 방향이 위·아래로 엇갈리게 교대로 배치함으로써, 열판 전체면적에 걸쳐 금속과 금속이 접촉을 이루어지도록 하여, 열판 조립체(plate pack)의 강도를 대폭 상승시키고, 비교적 얇은 두께(0.5mm~0.9mm)로 대략 16bar 정도의 사용압력의 한계치를 높일 수 있었다. 또한 합성고무의 제조기술의 발달에 따라 가스켓의 품질이 향상되면서 사용온도 조건도 170°C 이상으로 확대 되었다. 이와 같이 설계 기술이 발전되면서 Herringbone의 각도를 최적상태로 변화시킴으로써 주어진 허용 압력손실에 대해 열교환기의 열전달 계수를 최대로 할 수 있게 되었으며, 이러한 발전에 힘입어 판형열교환기는 식품산업 뿐만 아니라 화학, 발전 설비, 일반 공업, 등 거의 모든 산업에 활발히 사용되어 지고 있다.<sup>[4]</sup>

구조적인 관점에서의 연구 개발은 주로 열판 조립체의 강도 평가나 새로운 형상의 열판 형상의 제시로 인한 구조적 특징에 관한 연구가 주로 이루어져 왔으며, 열교환기를 이루고 있는 부품들의 구조적 건전성 평가에 대한 연구는 현재 미비한 상태이다. 성능에 관한 연구와 그 성능을 발휘 할 수 있는 구조에 대한 관심이 높은 것은 당연한 것이지만, 실제 설치 환경 조건에서의 극한 상황 및 외부 하중에 의한 열교환기의 건전성 평가 역시 간과할 수 없는 부분이라 고려된다.

### 1.3 연구 내용 및 목적

본 연구에서는 판형 열교환기의 전체 구조에 대한 정적, 동적 특성을 평가하고, 구조적 건전성을 검증하고자 한다. 구조 건전성을 평가하기 위한 코드는 사양서에서 제시하는 기준에 따라 평가 하고, 유한요소법을 이용하여 수행한다.

하중 조건에 대해서는 사양서의 기준에 따라 계산되어 지며, 풍하중(wind load), 내진하중(seismic load)에 대해서는 설치되고자 하는 환경적인 상황을 고려하여 계산되어진다.

하중을 계산하는 코드는 주로 IBC code<sup>[5]</sup>, UBC code, ASCE7-05<sup>[6]</sup>등으로 정해지며, 각 코드에서 제시하는 환경적인 계수를 적용한다. 또한 풍하중과 내진하중의 경우엔 두 하중 값 중 큰 값을 적용하여 하나만 적용한다.

노즐 하중의 경우는 파이프 규격에 따라 정해지는 외력으로 주로 API662<sup>[7]</sup>에 의해 정해지는 것으로 고려하고자 하는 부품에 따라 하중 방향을 정하여 적용한다.

고려대상 부품은 상부 가이드 바(upper guide bar), 지지 기둥 (support column), 베이스 플레이트 (base plate), 고정 프레임(fixed frame)이며 이 중 고정 프레임의 경우 부분 모델을 구성하여 별개 해석을 수행한다.

FE 해석을 위한 하중조합은 자중 조건(dead load condition), 노즐하중조건(nozzle load condition), 지진하중조건(seismic load condition)으로 나누며, 각각 해석을 수행하고, 결과 값을 조합하여 최종 건전성을 평가한다.

건전성을 평가하는 재료 허용응력의 기준은 주로 ASME<sup>[8]~[9]</sup> 코드로 정하며, 굽힘 응력의 기준은 AISI<sup>[10]</sup> 코드에 기준하여 정한다. 바(bar) 형태의 빔 (beam)의 굽힘 허용은  $0.66S_y$ 를 적용하며, 판(plate)형태의 굽힘 허용은  $0.6S_y$ 를 적용한다. 최대 변형은 100ft 당 6inch의 변형을 허용을 한다.

## 제 2 장 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.

유한요소법은 1930년대에 개발된 매트릭스 이론을 사용하여 1960년대에 영국과 미국에서 개발되어 이론화가 시작되었고, 컴퓨터가 크게 발전한 1970년대 이후에 상용화가 이루어 졌다. 이러한 유한요소법은 공학과 물리학에서 많이 사용되었으며 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 급속히 발전하였다. 초기에는 복잡한 구조물의 응력해석을 위해 개발되었으나, 그 후 발전을 거듭하여 연속체 역학(continuum mechanics)분야 등 광범위하게 사용되고 있다.

### 2.1 탄성 유한요소해석 이론

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

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

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

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

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

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

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

위 식들을 선형대수식으로 표현하면 (2)식과 같이 정리할 수 있으며, 이 행렬식의 역은 다음 (3)식과 같다.

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x - \alpha \Delta T \\ \epsilon_y - \alpha \Delta T \\ \epsilon_z - \alpha \Delta T \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

이 식에서  $E, \nu, \alpha$ 는 탄성계수, 포아송비, 선팽창계수와 같은 상수이므로 임의 점에서의 변형률을 구하면 그 점에서의 응력도 계산할 수 있음을 알 수 있다.

## 2.2 모드해석 이론

본 연구에서 사용한 모드 해석 이론을 요약하면 다음과 같다. 외부로부터 외력 벡터  $\{F(t)\}$ 를 받는 다 자유도 시스템(multi degree-of-freedom system)의 운동방정식은 다음과 같다.<sup>(7)</sup>

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

여기서  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 질량행렬 (mass matrix), 감쇠행렬(damping matrix), 강성행렬(stiffness matrix)을 나타내고,  $\{\ddot{x}(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$ ,  $\{F(t)\}$ 는 각각 절점의 가속도, 속도, 변위, 작용 하중 벡터를 나타낸다. 모드 해석을 위하여 식 (4)에서 감쇠행렬과 외력벡터를 제외한 자유진동 시스템으로 나타내면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (5)$$

변위 벡터  $\{x(t)\}$ 는 위치와 시간의 함수로서, 이 변위 벡터를 공간적인 형상 벡터  $\{\Phi\}$ 와 시간적인 변화함수  $q(t)$ 의 곱으로 정의한다. 그리고  $q(t)$ 를 조화함수로 나타내면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있고, 이 식을 (5)에 대입하면 식 (7)를 유도할 수 있다.

$$\{x(t)\} = \{\Phi\}q(t) = \{\Phi\}\sin\omega t \quad (6)$$

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\Phi\} = \{0\} \quad (7)$$

식 (7)에서 모드 형상 벡터인  $\{\Phi\}$ 가 0이 아닌 벡터가 되기 위해서는 고유치(eigenvalue)를 얻기 위한 특성방정식(characteristic equation) 식 (8)를 만족해야 한다.

$$\det(-\omega^2[M] + [K]) = 0 \quad (8)$$

식 (8)를 풀면 자유도  $n$ 개의 서로 다른  $\omega$ 를 구할 수 있고, 크기가 작은 것



부터 정리하여  $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 로 나타내고, 이를 고유진동수(natural frequency)라 정의한다. 그리고  $w_i$ 에 대응하는 형상 벡터를  $\{\Phi\}_i$ 로 나타내고, 이  $n$ 개의 형상 벡터들을 식 (9)과 같이 행렬로 표기하여 자유진동 모드행렬  $[\Phi]$ 라 한다.

$$[\Phi] = [\{\Phi\}_1, \{\Phi\}_2, \dots, \{\Phi\}_n] \quad (9)$$

다음으로 모드 기여도(mode participation factor)와 유효 질량(effective mass)을 정의하였다. 지반 변위를  $x_g(t)$ 라 하고 지반 변위에 대한 구조물의 상대 변위를  $x(t)$ 라고 할 때 구조물의 절대 변위  $x_t(t)$ 는  $x_t(t) = x_g(t) + x(t)$ 이다. 식(5)를 절대 변위  $x_t(t)$ 의향으로 정리하면 식 (10)과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}_t(t)\} + [K]\{x_t(t) - x_g(t)\} = \{0\} \quad (10)$$

그리고 식 (10)을 상대 변위  $x(t)$ 에 관한 식으로 표현하면 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (11)$$

여기서 변위 벡터  $\{x(t)\}$ 를 식 (12)와 같이 자유진동 모드행렬과 각각의 모드에 대응하는 시간변화 함수 벡터  $\{g(t)\}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{g(t)\} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하고 양변에  $[\Phi]^T$ 를 선승하면, 자유진동 모드행렬의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성 (orthogonality) 때문에 식(13)과 같이 각 모드좌표계에 대하여 비 연성된 방정식을 얻을 수 있고, 식(13)의 우변을 식 (14)과 같이 모드 기여도 벡터  $\{\mathcal{L}\}$ 로 정의 할 수 있다.

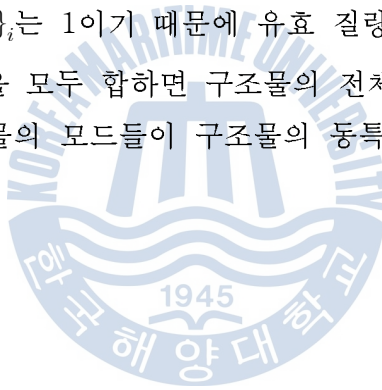
$$[\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{q}(t)\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{q(t)\} = -[\Phi]^T[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (13)$$

$$\{\mathcal{L}\} \equiv [\Phi]^T[M]\{1\} \quad (14)$$

여기서  $\{\mathcal{L}\}$ 의  $i$ 번째 요소  $\mathcal{L}_i$ 를  $i$ 번째 진동 모드에 대한 기여도라 부르고, 유효 질량( $Me$ )은  $i$ 번째 모드 벡터  $\{\Phi\}_i$ 를 이용하여 식 (15) 와 같이 정의 된다.

$$Me = \frac{\mathcal{L}_i^2}{\{\Phi\}_i^T[M]\{\Phi\}_i} \quad (15)$$

여기서 모드 벡터  $\{\Phi\}_i$ 가 질량행렬에 대하여 정규화 된 벡터 (normalized vector)이면,  $\{\Phi\}_i^T[M]\{\Phi\}_i$ 는 1이기 때문에 유효 질량은 모드 기여도의 제곱으로 표현되고 유효 질량을 모두 합하면 구조물의 전체 질량이 된다. 모드 기여도와 유효 질량은 구조물의 모드들이 구조물의 동특성에 미치는 영향 정도를 알 수 있는 인자가 된다.



### 2.3 응답 스펙트럼 해석 이론

지진과 같은 동적 하중에 의한 구조물의 동적거동은 구조물의 고유진동주기와 감쇠비 등의 동적특성에 따라 크게 달라진다. 지진하중이 가해지는 동안 구조물에 발생하는 변위, 속도, 가속도 밀면전단력, 전도모멘트 등의 응답은 시간이력해석법(time history analysis)에 의하여 결정될 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하여 구조물의 지진거동을 알아내는 것은 상당히 번거로울 뿐만 아니라 내진설계를 위하여 합당한 입력 지반운동을 적절히 채택하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 강진지역에서는 실제 내진설계에서 여러 가지의 지반운동에 대하여 시간이력해석법에 의한 구조물의 거동을 해석하고 설계에 반영한다.<sup>[11]</sup>

일반적으로 지진 발생 시 시간에 대해 불규칙적인 하중이 대상 구조물에 가해진다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 시간영역에서 구조물의 과도응답을 구해야한다. 그러나 과도응답을 구하기 위해서는 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 간단하면서도 비교적 정확한 답을 구할 수 있는 응답 스펙트럼 해석 방법이 많이 사용되고 관련 이론은 다음과 같다.

식(11)에 감쇠 항을 고려하면 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (16)$$

그리고 2.2절의 같은 절차에 의하여 식 (17)와 같은 비 연성된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mathcal{L}_i \ddot{x}_g(t) \quad (17)$$

여기서  $\mu_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$  ,  $2\mu_i \xi w_i = \{\Phi\}_i^T [C] \{\Phi\}_i$  ,  $\mu_i w_i^2 = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$  ,  $\mathcal{L}_i = \{\Phi\}_i^T [K] \{1\}$  로 정의하고, 식(17)을 식(18)와 같은 형태로 변형하면 최대값  $q_{i,\max}$  는 식 (19)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mu_i \ddot{x}_g(t) \left( \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} \right) \quad (18)$$

$$q_{i,\max} = \max |q_i(t)| = \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (19)$$

여기서  $S_d$ 는 고유진동수  $w_i$ 와 모드 감쇠비  $\xi_i$ 를 갖는 1 자유도계에서 입력 스펙트럼으로부터 구해진 최대 변위로 스펙트럴 변위(spectral displacement)이고,  $i$ 번째 모드에 관련된 구조물의 최대 변위  $\{x\}_{i,\max}$ 는 식(20)과 같이 구할 수 있다.

$$\{x\}_{i,\max} = \{\Phi\}_{i,\max} = \{\Phi\}_i \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (20)$$

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

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\{x\}_{i,\max})^2} \quad (21)$$

## 제 3 장 판형 열교환기의 구조적 특징

### 3.1 형상



Fig. 1 Plate type Heat Exchanger

판형 열교환기는 위의 Fig. 1과 같이 비교적 단순한 구조를 가지고 있으며, 조립과 분해가 쉬운 장점을 가지고 있으며, 크기도 다양하다. 상부의 가이드 바 와 하부의 가이드 바 사이에 걸쳐있는 얇고 주름진 여러 장의 전열판이 고정 프레임과 이동 프레임 사이에서 타이볼트에 의해 조여진 구조를 가지고 있다. 이렇게 조여진 전열판은 두 종류의 유체가 통과할 수 있는 유로를 만들어 주며, 전열판에 형성된 골의 형상은 유체의 흐름을 난류로 만들어 주고 두 유체간의 압력차로부터 전열판을 지지해 주는 역할을 한다.<sup>[3]</sup>

또한 타이볼트로 압축되어 대용량의 전열면적을 최소 용적으로 집결시킴으로써 효율을 높이고 전열면적의 증감이 가능한 구조로 되어 있다.

전열판에 부착된 가스켓은 유로의 형성과 유체가 외부로 누출되지 않도록 밀봉해주는 역할을 하며, 전열면의 수와 크기는 유량과 유체의 물리적 특성,

압력 손실 및 온도조건에 따라 결정된다.

프레임의 두께는 강도계산에 의해 결정되며 이는 두 유체의 압력차이로 생길 수 있는 판의 휨 현상을 방지해 주는 역할을 한다.

본 연구에 사용된 모델은 아래 Fig.2와 같다.

각 부품별 명칭 및 치수를 나타내고 있으며, 일반적인 판형 열교환기의 형상으로 본 연구의 기준 모델로 선정하였다.

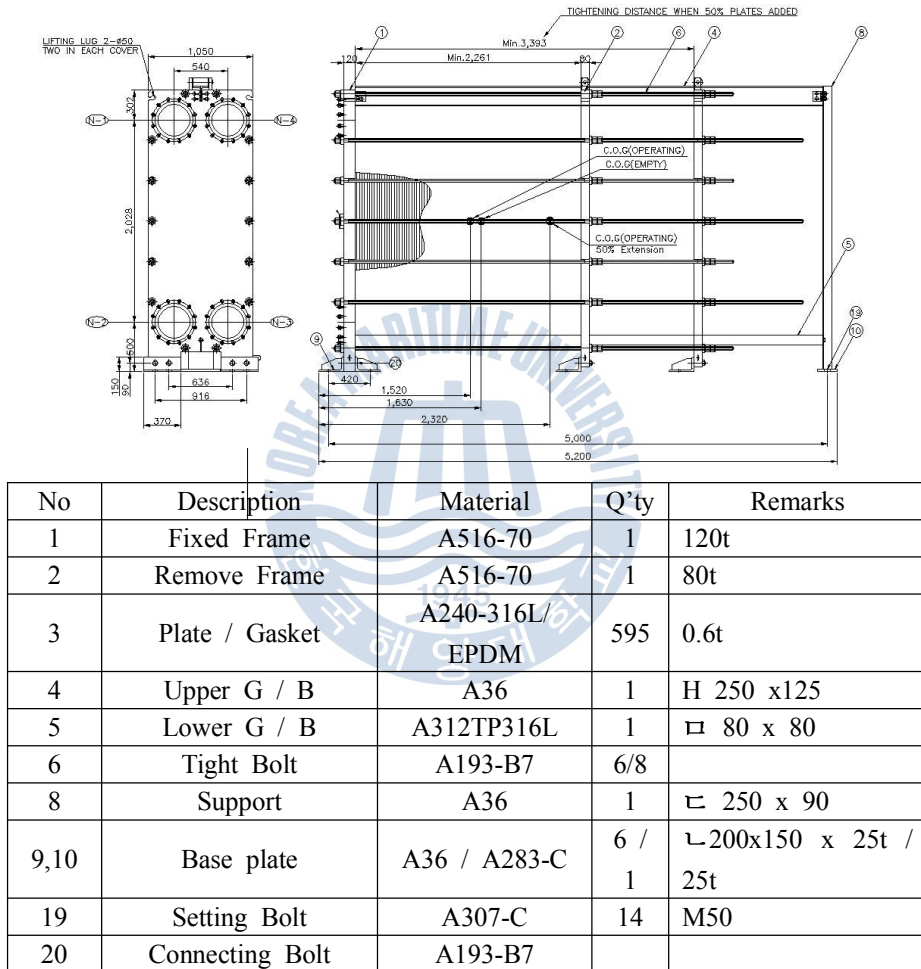


Fig. 2 Geometry of plate type heat exchanger (2D drawing)

### 3.2 설계 조건

설계의 조건은 사용처에 따라 다르다. 하지만, 본 연구에 각각의 부품의 재료 허용응력에 만족하는지 유한요소해석으로 응력 해석을 통해 건전성을 평가하고자 한다. 하중 조건에 대한 기준은 사양서의 제시 사항을 따라 결정되어진다.

설계 압력은 Table 1과 같이 12.0 bar의 압력에 온도는 152°C의 설계 조건을 가지며, 설계 하중은 Table 2 와 같이 작동 유체가 없는 구조물 자체의 하중으로 11,101 kg이며, 작동 하중은 유체의 무게를 더한 14,748 kg 이다. 최종 설계 하중은 가스켓의 무게에 판의 장당 무게(증판 포함), 그리고 유체의 무게를 고려한 하중을 적용한 19,716 kg으로 정하였다.

여기서 특이한 점은 작동하중을 적용하여 건전성을 평가 할 때, 일부 부품에 대해서는 최종 설계 하중보다 큰 하중을 적용하여 검증하고 있다.

상부 가이드 바의 경우 판형 열교환기의 판이 증판 될 수 있으므로 그 증판의 양을 고려한 하중으로 설계 검증을 하여야 한다. 즉, 최대 50% 증판이 될 수 있다고 가정하고, 프레임 설계 하중을 정하고, 그에 따른 상부 가이드 바는 최대 하중의 1.5 배의 하중을 적용하여 설계 검증한다.

노즐에 작용하는 하중은 Table 3에 나타내었으며, 파이프 치수에 따라 API 662(미국석유협회)규격에 맞추어 적용하였다. 이는 외부하중으로 규격에 따라 정해지는 값으로 일반적으로 평가 부위에 따라 하중 방향이 달라지기도 한다. 본 논문에서 노즐 하중의 방향은 길이방향으로  $F_z$  를 적용하고, 반경방향으로  $F_x$ 와  $F_y$  를 적용하였다. 모멘트는 길이방향 비틀림을  $M_z$ 를 적용하고, 반경방향 굽힘을  $M_x$ 와  $M_y$ 를 적용하였다.

수압 테스트에 사용되는 압력은 Table 4와 같이 설계 압력의 1.3배를 적용하여 15.6bar 가 적용되었다. 일반적인 수압 테스트에서는 1차 응력만 평가하고, 국부응력은 평가 하지 않는다.

풍하중에 대한 기준은 ASCE7-05(미국 건축 및 기타 구조물 설계기준)에 따라 정해진 계산법에 의해 결정 되어 졌다. 일반적으로 하중을 계산법에 대한 기준은 사양서의 기준에 따라 정해지고 있으며 ASCE7-05(Table 6-2, Table 6-3, Table 6-4, Figure 6-21)는 그 중 하나이다. 계산에 사용되는 상수는 사양서에서 정해진 설치 환경을 고려한 수치 값으로 관련 코드에 적용가능한 상수로 주어진다. (5)풍하중에서 계산 상수

를 통해 풍하중을 계산하였다.

지진하중에 대한 계산은 IBC 2006 Building Mounted, (ASCE7-05 Table 13.6-1)에 따라 정해진 계산식에 따라 계산 되어졌다. (6)지진하중에서 계산 상수를 통해 지진하중을 계산하였다.

풍하중과 지진하중의 경우에는 두 하중의 값 중 큰 값을 하나만 적용하여도 된다. 본 연구에 사용된 모델의 경우 풍하중이 지진하중에 비해 작아 풍하중을 제외한 지진하중만을 적용한다.

또한 지진하중의 경우 설치 지역의 지진 하중 데이터를 직접 입력하여 수치 해석에 적용하기도 한다. 경우에 따라 달라 질 수 있는 것이므로 타 모델에 적용하였던 지진하중의 데이터를 예제로 해석법을 소개하고 평가법을 제안하였다.

(1) 설계압력과 온도

Table 1 Design pressure and Temperature.

	Pressure (bar)	Temperature (°C)
Design	12.0	152.0

(2) 자중

Table 2 Dead load

	Weight (Kg)
Empty	11,101
Operating	14,748
Frame design weight	19,716

( Plate w/Gasket : 10.57kg/sheet, fluid weight :14,748 -11,101 = 3,647 kg )

( Frame design weight : 14,748 + (10.57+ 3,647/595)\*595\*0.5 = 19,716 kg )



(3) 노즐 하중

Table 3 Nozzle loads

Nozzle name	Nozzle loading					
	F (kg/N)			M (kg-m/N-m)		
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Hot side (12") (N-1, N-2)	1,198/11,734	1,198/11,734	1,198/11,734	1,559/15,280	1,559/15,280	1,559/15,280
Cold side (12") (N-3, N-4)	1,198/11,734	1,198/11,734	1,198/11,734	1,559/15,280	1,559/15,280	1,559/15,280

(4) 수압 테스트 하중

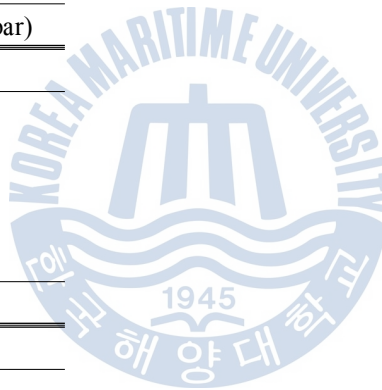
Table 4 Hydrostatic test pressure

Hydrostatic Pressure (bar)
15.6

(5) 풍하중

Table 5 Wind load

Wind load (kg)
827



Basic wind speed  $V$  : 125 km/h (34.72 m/s)

Exposure : D

Importance factor  $I$  : 1.15

Height above ground level  $Z = 16\text{m} + 2.9\text{m} = 18.9\text{ m}$

Wind Directionality Factor  $K_d = 0.9$

Wind Pressure (WP) Calculations

$$\begin{aligned} WP &= qz * G * Cf \\ &= 1.009 * 0.85 * 1.3 \\ &= 1.115 \text{ kPa} (114 \text{ kg/m}^2) \end{aligned}$$

$$\frac{h}{D} = \frac{2.9}{2.5} = 1.16 \Rightarrow Cf = 1.3$$

Velocity Pressure qz

$$\begin{aligned} qz &= \frac{0.613 * Kz * Kzt * kd * V^2 * I}{1000} \\ &= \frac{0.613 * 1.319 * 1.0 * 0.9 * 34.72^2 * 1.15}{1000} \\ &= 1.009 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$a = 11.5, zg = 213.36 \text{ m}$$

$$Kz = 2.01 * \left( \frac{Z}{zg} \right)^{\frac{2}{a}}$$

Therefore Wind force = WP x Area = 114 x 7.25 = **827 kg**

Where, Area = 2.5 x 2.9 = 7.25 m<sup>2</sup>

(6) 지진 하중

Table 6 Seismic load

Seismic acceleration
0.57g (horizontal direction)

Response Factor : 3.0

Fa = 1.0, Fv = 1.3

Importance factor I = 1.25

Site Class : C, Ss = 1.425

ap = 1 , Rp = 2.5

$$S_{MS} = F_a * S_s = 1 * 1.425 = 1.425$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} * S_{MS} = 0.95$$

$$F_p = \left( \frac{0.4 * a_p * S_{DS} * W_p}{\left( \frac{R_p}{I_p} \right)} * \left( 1 + \frac{2 * z}{h} \right) \right)$$

$$= \left( \frac{0.4 * 1 * 0.9 * 14,748}{\left( \frac{2.5}{1.25} \right)} * (1 + 2 * 1) \right) = 8,406kg > \text{Wind Pressure}(827kg)$$

$$F_{p,max} = 1.6 * S_{DS} * I_p * W_p$$

$$= 1.6 * 0.95 * 1.25 * 14,748 = 28,021 kg$$

$$F_{p,min} = 0.3 * S_{DS} * I_p * W_p * 0.7$$

$$= 0.3 * 0.95 * 1.25 * 14,748 = 5254 kg$$

수평방향 지진 등가가속도 = (8,406/ 14,748) = **0.57g**

계수 0.7은 지진에 대한 하중 조합 계수이다.



### 3.3 재료 물성과 허용응력

Table 7은 본 연구에 사용된 각 부품의 다른 재질과 허용응력, 항복강도, 탄성계수를 나타낸다.

재료의 재질은 ASME Section II Boiler and pressure vessel code Part D<sup>[12]</sup>에서 참조하여 선정하였다.

본 연구에는 온도에 따른 구조물의 변형은 고려하지 않으므로, 온도에 따라 변형하는 비선형성은 고려하지 않고, 선형적인 거동을 적용한다.

지지기둥과 상부 가이드 바는 바 형태의 부품에 대해서 AISI 규정을 적용하여 굽힘 허용응력의 경우  $0.66 \cdot S_y$ 를 적용하고, 베이스 플레이트와 같은 평판의 경우  $0.6 \cdot S_y$ 를 굽힘 허용응력으로 적용하여 평가 한다.

전체 모델의 구조해석에 사용되는 재료의 물성과 재료의 허용은 Table. 7에 나타 내었고, 고정 프레임 의 경우 전체 모델에서 해석을 진행하기가 어렵다. 부득이 하게 부분 모델로 구성하여 구조해석을 수행하였다. 고정 프레임의 경우 ASME Section VIII div.1,div.2<sup>[8],[9]</sup> 를 기준으로 응력을 평가한다.

응력을 평가하는 부위로는 총 3가지로 구분한다. 프레임의 중심 (center of fixed frame), 프레임의 모서리 (edge of fixed frame), 노즐 근처의 프레임 (near the nozzle)로 구분한다. 각 부위별 평가 응력의 성분이 다르다. 프레임의 중심의 경우는 일반 1차 막응력 (general membrane stress) 와 일반 1차 굽힘응력 (primary bending stress)로 평가하며, 프레임의 모서리와 노즐 근처의 프레임의 경우에는 국부 1차 막응력 (local membrane stress) 와 2차 응력(secondary stress)로 평가한다.

또한 수압 테스트 조건일 때에 평가는 아래의 기준에 따른다.

각 부위별 평가표를 Table 8에 정리 하였다.

Table 7 Material summary

	Material	Allowable Stress (S <sub>a</sub> ) (MPa)	Yield Strength (S <sub>y</sub> ) (MPa)	Modulus of Elasticity (E) (MPa)
Fixed Frame	A516-70	138	232	194880
Remove Frame	A516-70	138	232	194880
Plate	A240-316L	87.2	131	185880
Tight bolt	A193-B7	172	-	-
Upper G/B	A36	144.5	219	194880

Lower G/B	A312TP304	115	154	185880
Support	A36	144.5	219	194880
Base Plate	A36 / A283-C	109.8	219 / 183	194880
Setting bolt	A307-C	-	-	-
Connecting bolt	A193-B7	-	-	-

Table 8 Allowable limit for Fixed frame

Center of Fixed frame		
Loading	Stress Limit	
	$P_m$	$P_m + P_b$
Internal pressure	1.0 S	1.5S
P <sub>m</sub> : General Membrane stress, P <sub>b</sub> : Primary Bending stress		

Edge of Fixed frame		
Loading	Stress Limit	
	$P_L$	$P_L + Q$
Internal pressure	1.5 S	3S
P <sub>L</sub> : Local Membrane stress, Q : Secondary Bending stress		

Near the nozzle		
Loading	Stress Limit	
	$P_L$	$P_L + Q$
Internal pressure + Nozzle load	1.5 S	3S
P <sub>L</sub> : Local Membrane stress, Q : Secondary Bending stress		

Hydrostatic test condition		
Loading	Stress Limit	
	$P_m$	$P_m + P_b$
Hydrostatic pressure	0.95Sy	1.43 Sy for $P_m < 0.67Sy$
P <sub>m</sub> : General Membrane stress, P <sub>b</sub> : Primary Bending stress		

## 제 4 장 건전성 평가

### 4.1 코드 계산

판형 열교환기의 부품 중 일부는 수 계산을 통한 검증을 하고 수치적 계산이 어려운 복합 하중에 따른 부품의 강도 평가는 전산 수치 해석을 통해 그 건전성을 평가 한다. 수식에 의한 계산은 신뢰 할 수 있는 기관의 관련 코드를 기준으로 식을 수립하고, 계산을 한다.

#### 4.1.1 고정 프레임 설계

프레임 판은 열판사이에 유체가 흐르는 것을 차단하기 위해 맨 처음 설치되는 열판(start plate)은 O-ring으로 이루어진 가스켓으로 밀봉되어 있다. 맨 끝에 있는 blank plate(end plate)는 압축판이 유체와 접촉하지 않도록 막혀있다. 그 사이를 Plate pack을 조임볼트(tightening bolt)로 압축시켜 조립된다.<sup>[1]</sup>

프레임에 적용되는 하중으로는 내측의 압력과 볼트 조임에 의한 하중을 고려하여 설계된다.

Table 9 Frame design input data

Design Pressure		12 bar
Design Temperature		152°C
Ambient Temperature		85°C
FRAME	Material	A516-70N
	Allowable Stress at Design T. ( <b>Sfo</b> )	14.08 $kgf/mm^2$
	Allowable Stress at Ambient T. ( <b>Sfa</b> )	14.08 $kgf/mm^2$
	Ref. ASME SECTION II PART D	
BOLT	Material	A193-B7
	Allowable Stress at Design T. ( <b>So</b> )	17.54 $kgf/mm^2$
	Allowable Stress at Ambient T. ( <b>Sa</b> )	17.54 $kgf/mm^2$
	Effective Diameter ( <b>db</b> )	36.40 mm
	MIN. Number & Size	14 [M39]
Gasket	Material	EPDM
	Design Seating Stress ( <b>y</b> )	0.14 $kgf/mm^2$
	Factor ( <b>m</b> )	1.00
	Normal Width ( <b>N</b> )	12.00 mm
	Effective Width ( <b>b</b> )	6.00 mm

Long span of frame measured perpendicular to short span : D-2358 mm

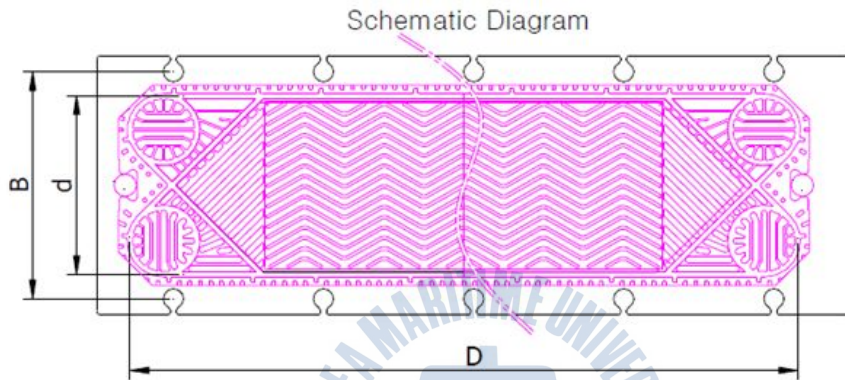
Short span : d-870mm

Perimeter measured along the centers of the bolts holes L-6158.17 mm

Distance across bolt holes B-974 mm

Attachment Factor

(Ref. ASME SEC.VIII, Div.1 FIG.UG-34) C-0.3



#### 1. Calculation of total bolt load

Equation	Calculated value
$H = \frac{(d \times D \times P)}{100}$	246175.20 kgf
$HP = \frac{\{2 \times b \times 2 \times (d + D) \times m \times P\}}{100}$	9296.64 kgf
$W_{m1} = H + HP$	255471.84 kgf
$W_{m2} = \pi \times b \times d \times y$	2294.71 kgf
$A_m = \text{Larger of } \frac{W_{m1}}{S_o} \text{ or } \frac{W_{m2}}{S_a}$	14561.78 mm <sup>2</sup>
$A_b = \frac{\pi \times db^2 \times n}{4}$	14562.91 mm <sup>2</sup>
Total required bolt areas, $A_m < \text{Total Actual bolt areas, } A_b$	
So, Bolt size is adequate.	
$W = \frac{(A_m + A_b) \times S_a}{2}$	255481.77 kgf

## 2. Calculation of Frame thickness

Equation		Calculated value	
<b>Z Factor</b> ( 긴 스패에 대해 짧은 스패의 비로 나타내는 프레임 상수)			
$Z = 3.4 - \left( 2.4 \times \frac{d}{D} \right)$		2.5	
<b>Gasket moment arm</b>			
$hg = \frac{(B-d)}{2}$		52.0 mm	
<b>Minimum Thickness of frame</b>			
<b>Operating condition</b>		<b>Gasket seating condition</b>	
$t = d \sqrt{\frac{Z \times C \times P}{Sfo \times E} + \frac{6 \times W_{m1} \times hg}{Sfo \times E \times L \times d^2}}$		75.88 mm	$t = d \sqrt{\frac{6 \times W \times hg}{Sfa \times E \times L \times d^2}}$ 30.32 mm

본 기준 모델에서는 두께 120mm의 두께를 사용하여 설계에서 나온 76mm 보다 크게 설계됨을 알 수 있다.



### 4.1.2 앵커 볼트 설계

설치 방법에 따라 앵커볼트(anchor bolt), 연결볼트(connecting bolt), 세팅 볼트(setting bolt) 등이 있다. 본 연구의 기본모델은 앵커볼트로 설치되는 조건이므로 설계 식을 앵커볼트 신뢰성 검토만을 하도록 한다.

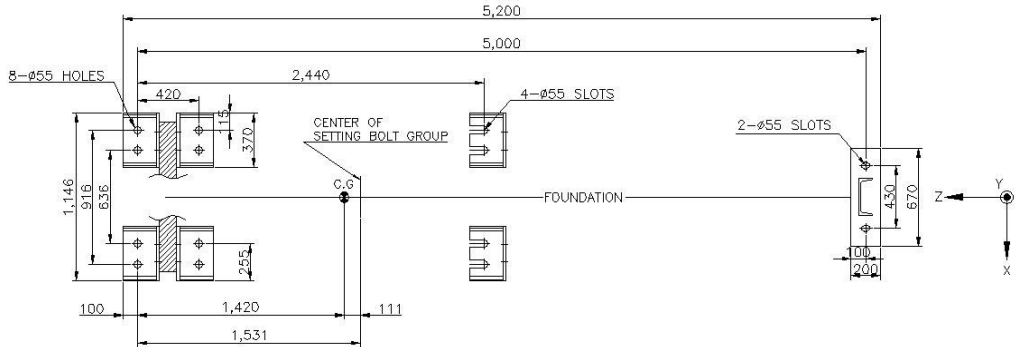


Table 10 Anchor bolt design input data

Bolt size	2.00 inch
Number of bolt(N)	14 EA
Number of threads per inch(n)	4.5
Bolt Material	A307-C
Nominal Tensile stress for bolt ( <b>F<sub>nt</sub></b> )	3,166 $kg/cm^2$ (45 ksi)
Nominal Shear Strength for bolt ( <b>F<sub>nv</sub></b> )	1,689 $kg/cm^2$ (24 ksi)

#### (1) Geometry and properties

Equation	Calculated value
$A_{se} = 0.7854 \times \left[ D - \frac{0.9743}{n} \right]^2 = 2.498 \text{ inch}^2$ <p>( <math>D = \text{Thread diameter} = 2.00 \text{ inch}</math> )            ( <math>n = \text{Number of thread per inch} = 4.5</math> )</p>	16.12 $cm^2$
$L = \frac{(4 \times 0 + 4 \times 420 + 4 \times 2440 + 2 \times 5000)}{14}$	1531 mm
$I_x = 4 \times 16.12 \times 153.1^2 + 4 \times 16.12 \times 111.1^2 + 4 \times 16.12 \times 90.9^2 + 2 \times 16.12 \times 346.9^2$	6718791 $cm^4$
$I_x = 4 \times 16.12 \times 153.1^2 + 4 \times 16.12 \times 111.1^2 + 4 \times 16.12 \times 90.9^2 + 2 \times 16.12 \times 346.9^2$	315546 $cm^4$
$I_y = (I_x + I_z) = (6718791 + 315546)$	7034337 $cm^4$

#### (2) Max. tensile stress of anchor bolt (ft)

Equation	Calculated value
$ft = \frac{Fy}{Ase} + \left( \frac{Mx}{Ix} \times z + \frac{Mz}{Iz} \times x \right)$ $= \frac{-859}{16} + \left( \frac{2714654}{6718791} \times 346.9 + \frac{2240015}{315546} \times 45.8 \right)$	412 kg/cm <sup>2</sup>

(3) Max. shear stress of anchor bolt (ft)

Equation	Calculated value
$fv = \frac{\sqrt{\left( \frac{Fx}{N} \right)^2 + \left( \frac{Fz}{(N-6)^2} \right)}}{Ase} + \left( \frac{My \times \sqrt{x^2 + y^2}}{Iy} \right)$ $= \frac{\sqrt{581564 + 1781041}}{16.12} + \left( \frac{1351150 \times \sqrt{462.3 + 120309.9}}{7034337} \right)$	162 kg/cm <sup>2</sup>

(4) Allowable stress

Equation	Calculated value
Tensile stress (ft)	
$ft_1 = \min(0.6 Fy, 0.33Fu)$	1,347 kg/cm <sup>2</sup>
$ft_2 = \frac{Fnt}{\Omega} (at, \Omega = 2)$	1,583 kg/cm <sup>2</sup>
$ft = \min(ft_1, ft_2)$	1,347 kg/cm <sup>2</sup>
$Fnt = 1.3Fnt - \left( \Omega \times \frac{Fnt}{Fnt} \right) \times fv \leq Fnt, Fnt$	3,166 kg/cm <sup>2</sup>
Shear stress (fv)	
$fv_1 = \min(0.4 Fy, 0.17Fu)$	694 kg/cm <sup>2</sup>
$fv_2 = \frac{Frv}{\Omega} (at, \Omega = 2)$	844 kg/cm <sup>2</sup>
$fv = \min(fv_1, fv_2)$	694 kg/cm <sup>2</sup>

Table 11 Tension and shear stress check

Unit : kg/cm<sup>2</sup>

	Design condition		Judgment
	Calculated	Allowable	
Tensile (ft)	440	1,347	<b>OK</b>
Shear (fv)	173	694	<b>OK</b>

계산된 응력과 허용응력간의 비교를 통해 설계 된 앵커볼트의 건전성을 평가 하였다.



## 4.2 유한요소해석

유한요소해석은 구조물내의 무한개의 미지수 점들을 유한개의 이산화 된 위치들을 절점(node)으로 나타내고, 서로 유기적인 관계를 가진 절점들로 요소(element)를 만든다. 그다음, 전체 구조물이나 실제의 물리적 시스템을 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식으로 나타내고, 이를 계산하여 각 절점에서의 변위를 구함으로써 구조물 내의 임의의 점에서의 변위, 응력, 변형률 등의 결과값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다. 요소라는 것은 절점과 절점들을 연결하는 블록의 형태를 가지고 있지만 실제로는 각 절점들 간의 관계를 나타내는 정보의 집합이라고 할 수 있다.<sup>[13]</sup>

### 4.2.1 유한 요소 모델 및 경계 조건

구조해석은 널리 사용되고 있는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Classic 을 이용하여 모델링 및 경계조건을 적용하였으며, 구조해석에 사용된 요소는 아래 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다.

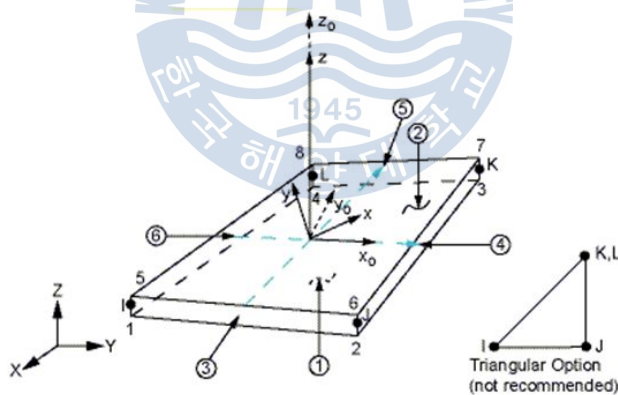


Fig. 3 Structural shell 181 element in ANSYS

Fig. 3 는 판형 열교환기의 베이스 플레이트의 모델링을 위해 사용된 셸 요소 (4node)이다. 두께만 적용하여 주면 두께영향을 고려한 응력 해석이 가능하여 실제 두께를 준 3차원 솔리드 모델의 적용보다 해석시간의 절감 효과를 볼 수 있어 효과적이다.

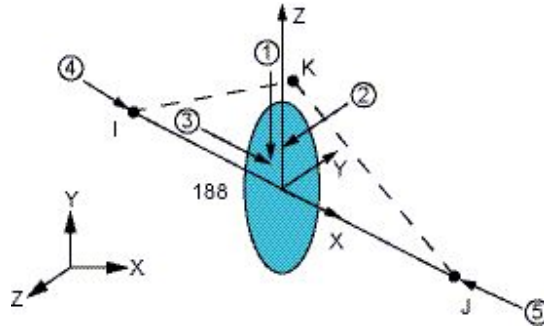


Fig. 4 Structural beam 188 element in ANSYS

Fig. 4은 상부 가이드 바, 중간 가이드 바, 지지기둥 을 모델링하기 위해 사용한 빔 요소 (3-D, 2node)이다. 단면에 대한 정보를 입력 할 수 있다. 빔 형태의 단면 정보를 입력하면 각 단면의 형상에 따른 관성 모멘트가 적용되어 복잡한 모델을 구성하지 않아도 쉽게 모델을 구성하고, 응력 해석을 적용 할 수 있다.

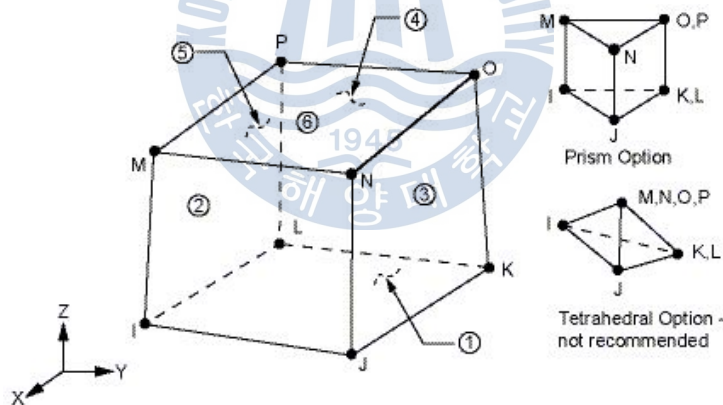


Fig. 5 Structural solid 185 in ANSYS

Fig. 5에 나타난 요소는 고정 프레임, 이동 프레임, 전열판을 구성하는 부분의 등가 모델을 구성하기 위해 사용된 솔리드 요소(3-D, 8node)이다. 전열판이 중첩되어 있는 부분의 강성은 일반적인 두께를 가진 구조물보다는 낮고, 무게 또한 가볍다. 실제 모델과 유사하게 밀도 값을 조절하여 중량을 실제 중량과

맞추어 모사 하였다. 본 건전성 평가는 전열판의 응력은 비관심부 이므로, 등가로 적용한 모델의 응력은 고려하지 않는다.

해석 모델은 이후 자동화 프로그램을 만들기 위해 ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language) 을 이용하여 직접 모델링을 수행 하였다. 해석 모델은 Fig. 6에 나타내었다.



Fig. 6 Finite element model for full - FEM analysis

설계 조건에 따라 경계 조건을 적용하였으며, 입출구부의 노즐 하중과 전체 모델에 중력 가속도를 적용하고, 길이 방향의 움직임을 고려한 베이스 플레이트의 구속 조건 및 전열판의 조립 분해 과정을 고려한 상부 가이드 바의 커플링 경계조건이 적용되었다. 경계조건은 Fig. 6에 나타내었다.

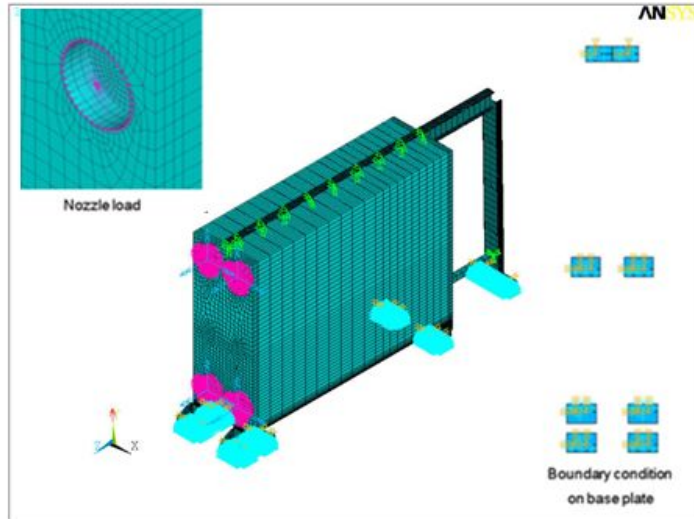


Fig. 7 Applied boundary conditions for full model

또한 고정 프레임의 압력해석은 전체 모델에서 그 경계조건을 구현하기 어렵기 때문에 따로 별도의 해석을 수행한다. 부분 모델의 경계 조건은 아래 Fig. 8과 같다.

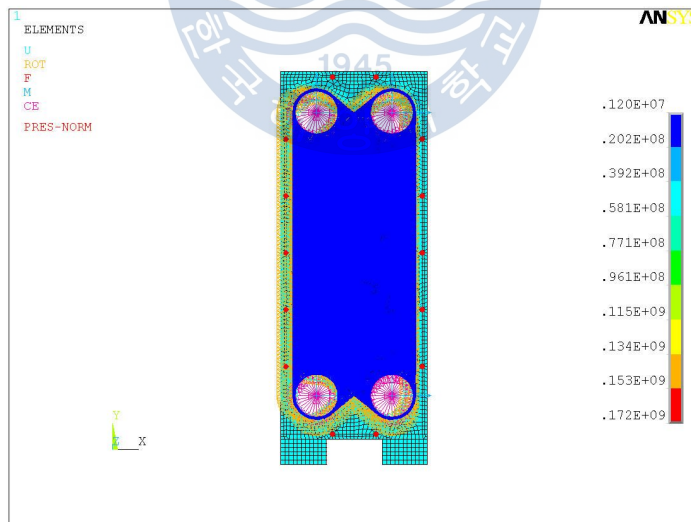


Fig. 8 Applied boundary conditions for sub model

#### 4.2.2 하중 조합

전산 해석에서 더 극한 조건을 구현하기 위해 하중의 결합을 구분하고 있다. 관련 코드에 따라 하중조건을 결합을 제시하기도 하지만, 그렇지 않은 경우 해석상 하중이 상쇄되지 않는 조건으로 하중조건을 구분하여 적용한다.

또한 압력에 의한 고정 프레임의 응력해석은 전체 구조물의 모델에서 수행하기 어렵기 때문에 따로 별도의 해석을 수행한다. 각 하중적용에 따른 구분을 Table 12에 나타내었다.

Table 12 Analysis case

		Nozzle load	Dead weight	Seismic load	Design pressure	Hydrostatic pressure
Full model	Carrying bar	Applied	1.5 times	Applied	-	-
	Support Column	Applied	1.0 times	Applied	-	-
	Base plate	Applied	1.0 times	Applied	-	-
Sub model	Fixed frame	Applied	-	-	Applied	-
		Applied	-	-	-	Applied

전체 모델에서는 전체 구조물의 변형 거동을 고려하여 하중이 적용된다. 앞선 3.2장의 설계 조건을 기준으로 상부 가이드 바의 경우 자중의 1.5배를 적용하여 평가하고, 각 하중별로 적용하여 응력을 평가한다.

또한 부분 모델로 고정 프레임의 해석은 설계 압력에 의한 응력 평가와 설계 조건에 따라 수압 테스트를 고려한 설계 압력의 1.3배를 적용한 응력해석을 수행하였다.

특히 노즐 하중의 경우 힘과 모멘트의 적용 방향으로 인한 자중과 상쇄 효과가 크게 발생하는 경향을 보인다. 설계를 검증할 때에는 극한의 조건을 고려하여야 함으로 하중이 서로 상쇄되지 않는 하중 방향을 선정하여 적용하여야 한다. 설계 조건상 노즐 하중의 방향이 제시하는 경우도 있으나 그렇지 않은 경우 해석자의 판단에 의해 극한 조건을 구현하여 적용하는 것이 좋다.



### 4.2.3 각 해석 별 결과 및 허용치 비교

각각의 하중을 적용하여 해석을 수행하고, 각 부품에 작용하는 응력 값을 정리 하면 아래의 Table. 13로 나타낼 수 있다.

Table 13 Analysis Results for each components

	Loading	Max. stress intensity (MPa)	Deformation (mm)	Allowable limit		Status
				Stress (MPa)	Deformation (mm)	
Carrying bar	Nozzle loads	0.39	0.03	-	-	
	Dead weight	0.40	0.02			
	Seismic loads	5.96	0.46	-	-	
	<b>Total</b>	<b>6.75</b>	<b>0.51</b>	<b>144.5</b>	<b>10.4</b>	<b>OK</b>
Support Column	Nozzle loads	4.65	0.09	-	-	
	Dead weight	4.67	0.08			
	Seismic loads	2.09	0.42	-	-	
	<b>Total</b>	<b>11.41</b>	<b>0.59</b>	<b>144.5</b>	<b>13.0</b>	<b>OK</b>
Base Plate	Nozzle loads	10.6	-	-	-	
	Dead weight	11.8	-	-	-	
	Seismic loads	22.3	-	-	-	
	<b>Total</b>	<b>44.7</b>	<b>-</b>	<b>109.8</b>	<b>-</b>	<b>OK</b>

각 부품의 허용응력은 앞선 3.3장에서 언급한 ASME Section II Part D에서 참조한 재료의 허용응력을 사용하였고, 변형 크기에 대한 제한은 최대 변형의 0.5%까지 허용한다. 즉 100ft 당 6inch를 넘어서는 안 된다.

해석 결과에 대한 그림은 아래의 Fig. 9부터 Fig. 17까지 각 부품별 하중에 따른 응력 분포로 나타내었다.

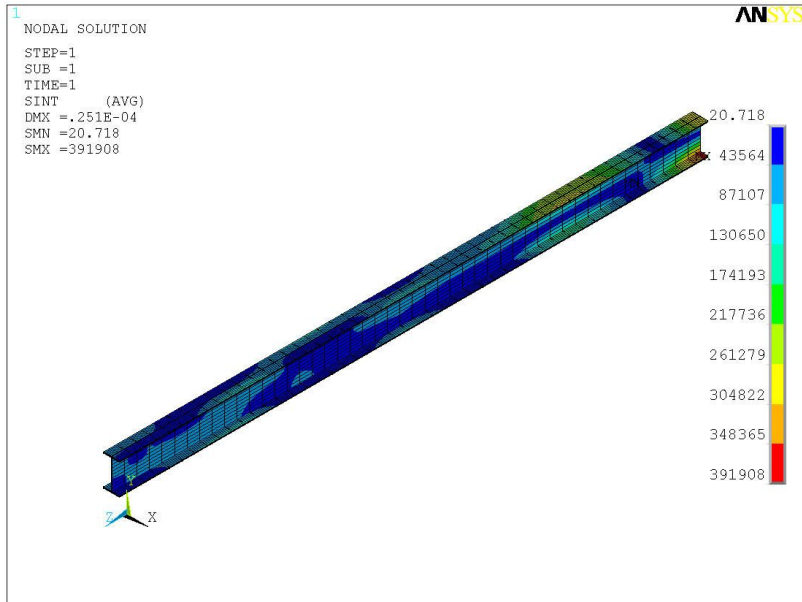


Fig. 9 Distribution of stress intensity due to **nozzle loads** for carrying bar

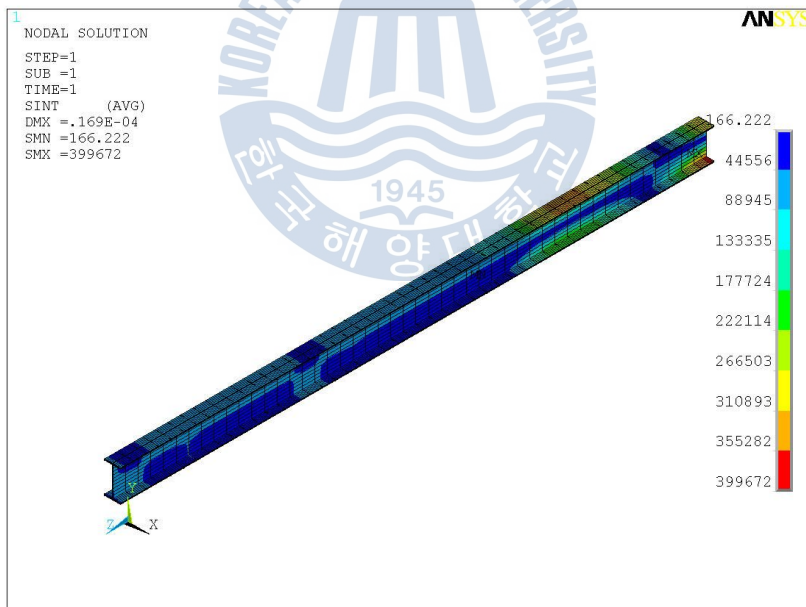


Fig. 10 Distribution of stress intensity due to **dead weight** for carrying bar

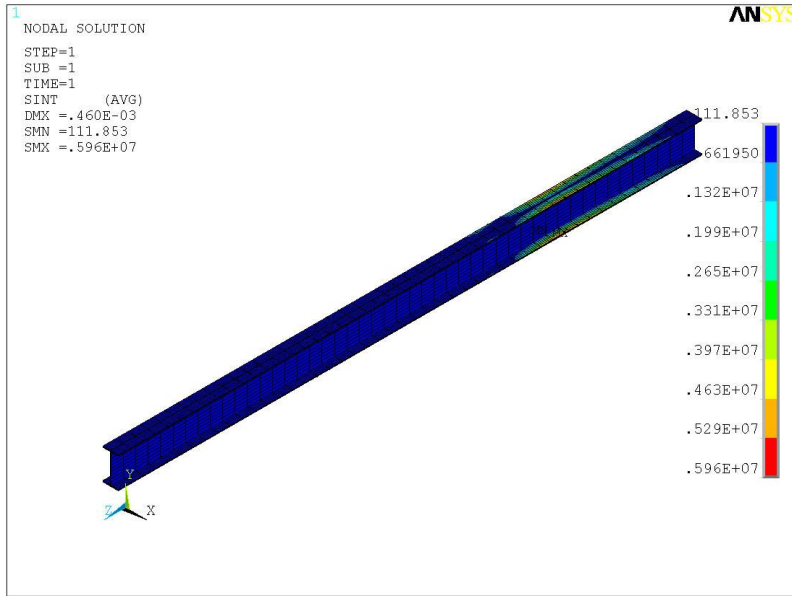


Fig. 11 Distribution of stress intensity due to **seismic loads** for carrying bar

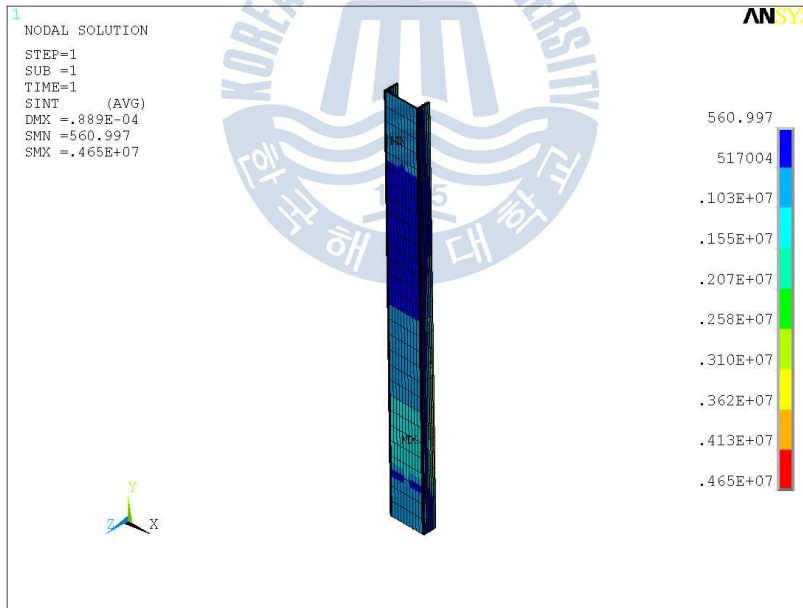


Fig. 12 Distribution of stress intensity due to **nozzle loads** for support column

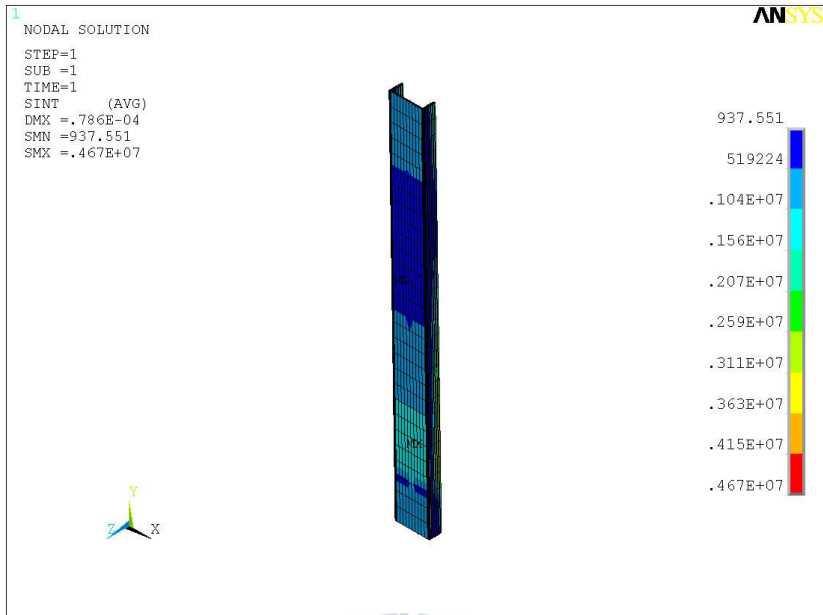


Fig. 13 Distribution of stress intensity due to **dead weight** for support column

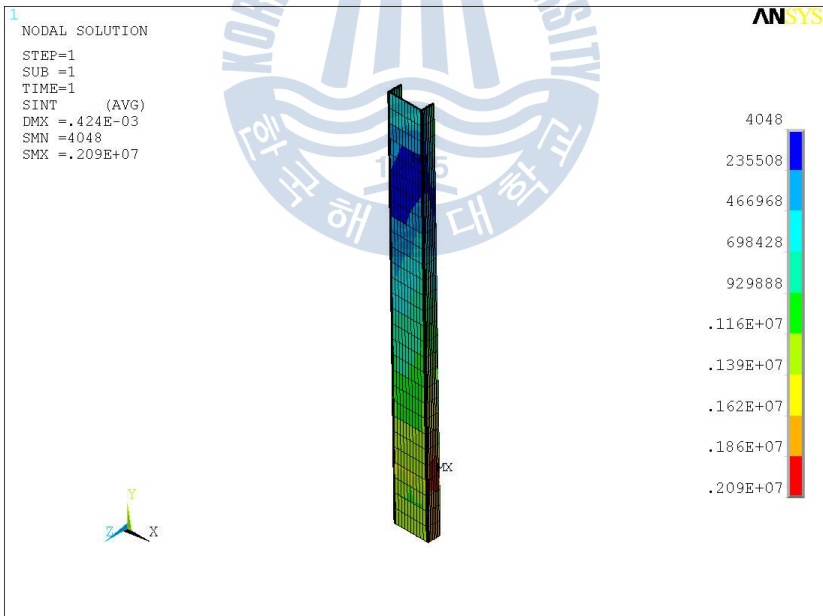


Fig. 14 Distribution of stress intensity due to **seismic loads** for support column

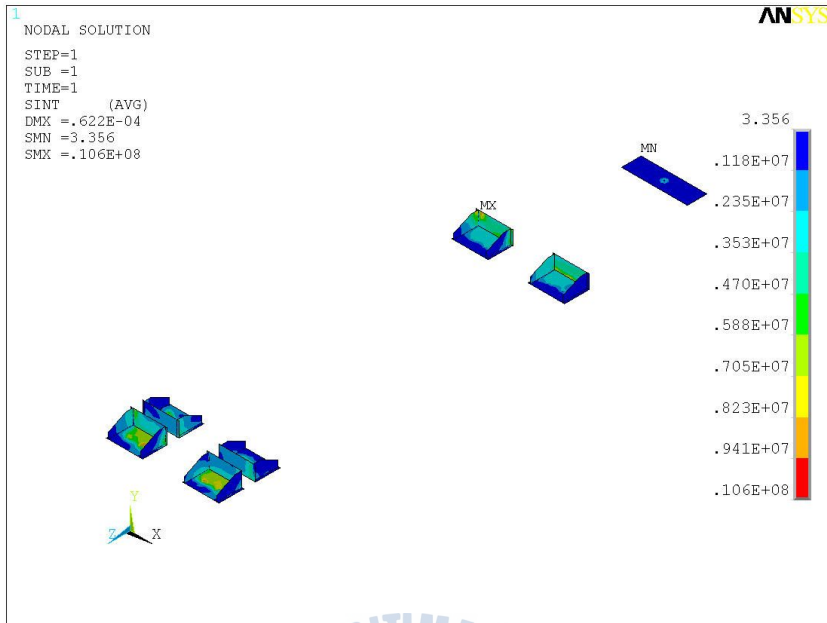


Fig. 15 Distribution of stress intensity due to **nozzle loads** for base plate

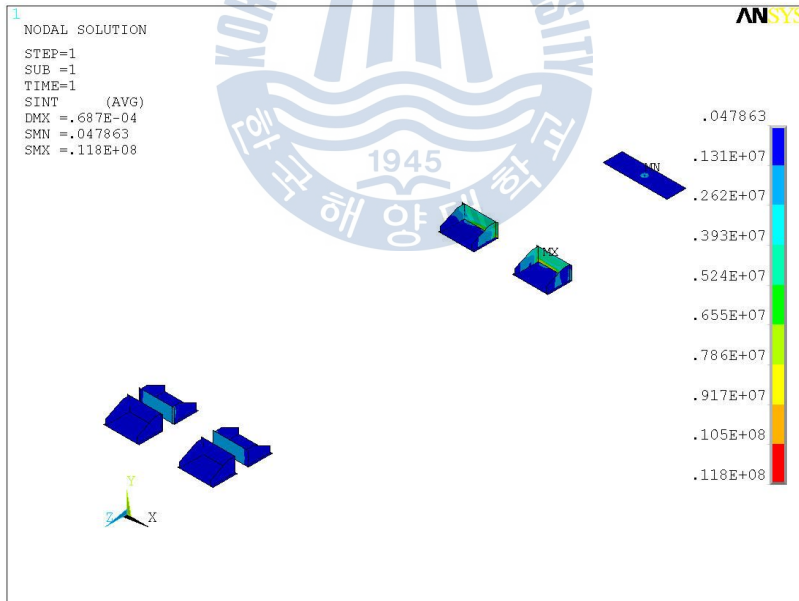


Fig. 16 Distribution of stress intensity due to **dead weight** for base plate

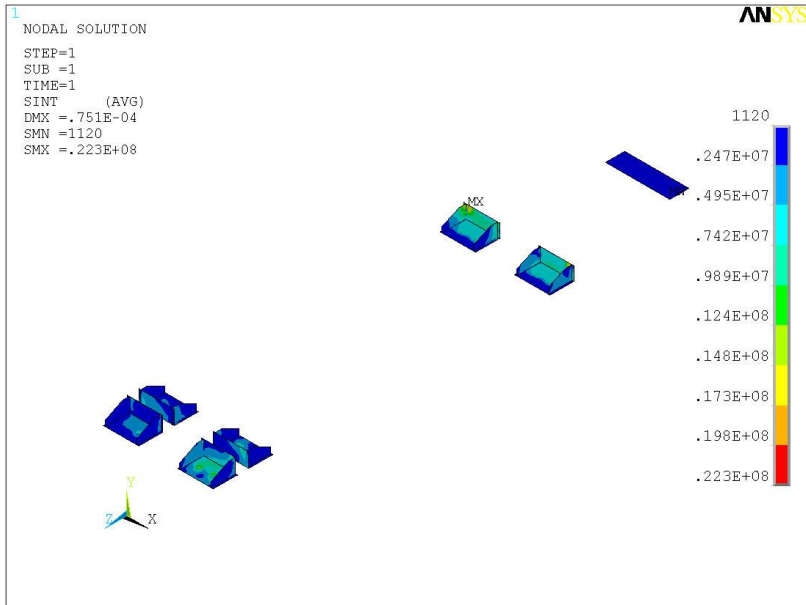


Fig. 17 Distribution of stress intensity due to **seismic loads** for base plate

부분 모델을 이용한 압력에 의한 응력 해석의 결과는 아래의 Fig. 18부터 Fig. 21까지 나타내었다. 부분 모델의 경우 하중의 구분이 설계 압력에 의한 응력 해석과 설계 압력의 1.3배를 적용한 수압테스트 하중으로 구분되고, 결과를 Table 14에 정리 하였다.

Table 14 Analysis results for fixed frame

Location	Stress Intensity (MPa)						Remark	
	Category	P <sub>m</sub>		Status	P <sub>m</sub> + P <sub>b</sub>			Status
		Design	HYD		Design	HYD		
Center of Fixed frame	Actual	9.13	11.4	OK	33.0	41.7	OK	
	Allowable	138	220.4		207	332		
Location	Stress Intensity (MPa)					Remark		
	Category	P <sub>L</sub>	Status	P <sub>L</sub> + Q	Status			
Edge of Fixed frame	Actual	12.1	OK	26.8	OK			
	Allowable	207		414				

Location	Stress Intensity (MPa)					Remark
	Category	$P_L$	Status	$P_L + P_b$	Status	
Near the nozzles	Actual	17.2	OK	53.4	OK	Path 3 of Fig. 17 APPENDIX A
	Allowable	207		414		

Fig. 18은 고정 프레임의 평가부위의 위치를 나타내며, 그 위치의 응력 값은 ANSYS Output 으로 APPENDIX로 본 논문 참고 자료로 첨부 한다.

Fig. 19은 설계압력 하중 조건에서의 고정 프레임의 전면과 후면의 응력상태를 나타낸다.

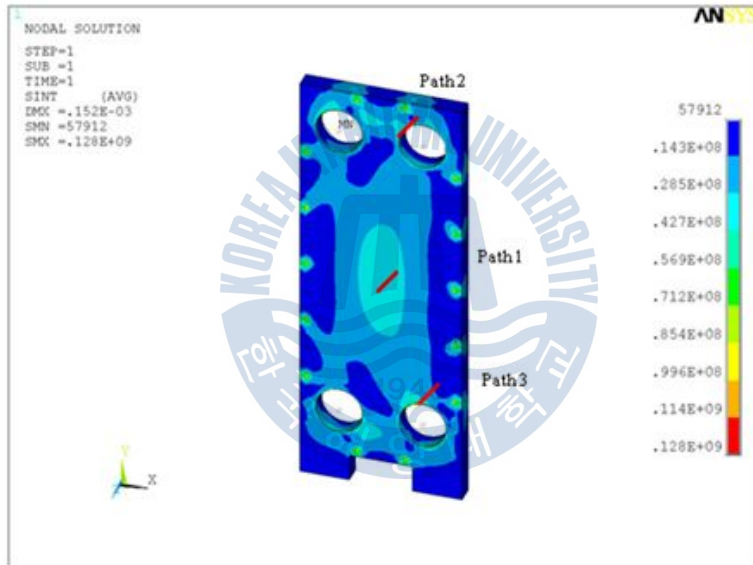
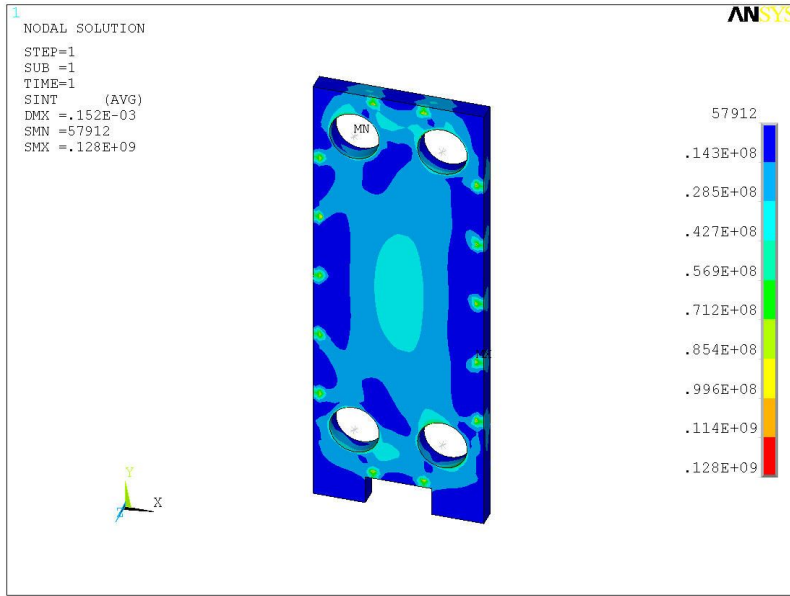
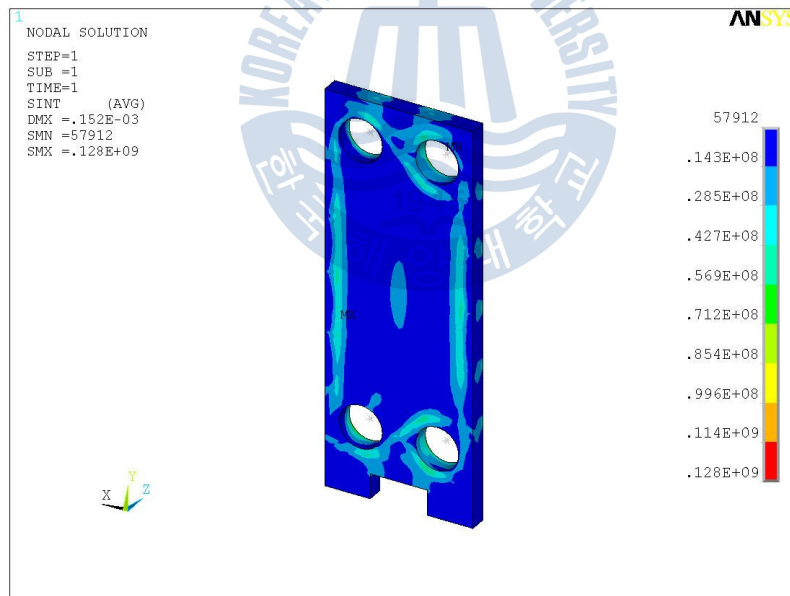


Fig. 18 Path location on fixed frame



(a) Front view



(b) Back view

Fig. 19 Distribution of stress intensity on fixed frame for design condition



## 제 5 장 내진해석 평가

내진해석에는 크게 두 가지의 검증법이 있다. 그 첫 번째로 구조물의 고유진동수가 비교적 큰 경우 설계 조건에 따라 등가 지진하중을 적용하는 등가 내진해석이 있고, 두 번째는 설치 환경에 따른 주파수별 가속도를 직접 입력하여 해석하는 내진해석이 있다.

본 연구의 모델은 등가 지진하중에 의한 내진해석을 하는 경우이지만, 타 공사용 모델을 이용한 스펙트럼 해석법에 대한 소개도 함께 하고자 한다. 먼저 내진해석에 앞서서 고유치 해석을 선행하여야 한다.

본 내용의 설명을 위하여 기존의 예시모델이 아닌 스펙트럼 해석을 고려해야 하는 타 모델을 선정 하였다. 타 모델의 FE 모델은 아래의 Fig. 20에 나타내었다.



Fig. 20 Finite element model for spectrum analysis

## 5.1 고유치 해석

내진해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 모드 수를 고려하게 되는데 그 이유는 내진해석을 수행할 때 수 계산에 의하지 않고 모드계수가 기준 값 이상이 되는 모드들에 대해서 모드조합이 이루어지도록 할 수 있게 하기 위함이다. 그런데 복잡한 구조물에 대한 고유치 해석 결과들은 구조물의 국부모드(local mode)까지 포함하고 있으며 이들 국부모드의 모드계수는 기준 값 이하가 되는 경우, 즉 모드 기여계수가 낮은 경우가 많으므로 국부모드들은 모드조합에서 제외되어야 한다. 따라서 조합되는 모드들의 수가 작을 경우에는 조합된 모드들의 전체모드 기여계수가 크지 않게 되므로 내진해석을 통해 얻어진 부재에 대한 응력이나 변위와 같은 해석 결과들의 정확성을 확보할 수 없게 된다. 따라서 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드계수가 기준 값 이하가 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 조합에 대해서는 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려 할 필요가 있다.<sup>[2]~[3]</sup> 여기서, 모드계수(mode coefficient)는 고유치 해석을 통해 얻어진 모드들 중 최대 모드 기여계수로 각 모드들의 모드 기여계수를 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서는 모드계수를 0.001로 설정하였으며 이것은 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 0.1% 크기의 모드기여계수 값을 갖는 모드들에 한해서 모드조합을 수행한다는 뜻이다. 구조물이 복잡한 경우에는 국부 모드를 제외하기 위해 모드 기여계수의 크기를 조절하여 국부모드를 제외한 모드들에 대한 조합이 가능하다.

고유치 해석은 ANSYS 12.0을 이용하여 수행하였고, 해석기법으로는 Block Lanczos법을 사용하였다. 총 100개의 모드의 고유치 해석을 수행하였고, 각각의 질량 참여율과 함께 Table 15에 나타내었고, 각 모드의 형상 중 대표적으로 1차 모드와 2차 모드의 형상을 Fig. 21과 Fig. 22에 나타내었다.

Table 15 Modal Frequencies and effective masses

mode	Frequency(Hz)	effective mass(X)	effective mass(Y)	effective mass(Z)
1	7.566	0.986674	1.46E-05	4.75E-05
2	9.253	1.02E-05	9.74662	30.6957
3	20.97	4.13E-03	2.41E-08	5.16E-08
4	40.04	9.90E-02	2.35E-07	3.79E-07
5	46.35	3.89E-02	1.30E-06	1.32E-06
6	61.23	41.5557	6.69E-07	2.27E-05
7	62.71	7.90E-02	1.05E-06	6.46E-07
8	64.2	3.04E-03	1.17E-07	4.84E-08
9	70.26	0.176542	2.39E-04	8.47E-05
10	88	8.21E-03	9.98E-05	1.29E-07
11	88.38	8.62E-08	0.123953	1.50E-03
12	99.63	3.63566	1.01E-07	4.26E-05
13	103.5	1.25939	4.08E-03	3.45E-04
14	107.4	0.183442	9.40E-03	1.24E-03
15	113.4	3.74E-03	0.417037	8.37E-02
16	131.7	2.51E-05	4.63E-07	1.11E-05
17	147.2	1.61E-04	7.76E-07	2.27E-06
18	161	2.62E-06	1.01093	0.755312
19	161.4	7.29E-04	1.04E-03	7.93E-04
20	179.2	4.50E-06	6.83E-05	6.66E-05
21	189.4	1.43E-04	8.34E-07	1.06E-06
22	203.4	6.10E-06	7.46317	18.5936
23	221.7	6.00E-05	5.98E-03	6.40E-03
24	222.7	1.09E-07	8.57531	8.27572
25	231.7	3.19E-04	1.07E-06	3.23E-07
26	252.8	1.22E-03	3.09E-05	1.46E-06
27	258.3	1.74E-02	6.46E-05	3.13E-06
28	266	1.64E-03	5.31E-06	6.73E-07
29	271	1.98E-02	2.95E-12	3.44E-06
30	274.5	9.19E-04	2.88E-06	7.32E-07
31	286.7	2.73E-05	0.786123	3.32E-03
32	310	3.68E-03	2.94E-04	1.09E-05
33	314.7	0.119751	9.07E-03	2.05E-04
34	315.4	10.241	3.76E-02	4.11E-04
35	318.9	1.68E-02	26.6336	0.381229
36	322.1	2.86E-03	8.96E-02	1.02E-03
37	347.6	4.82E-05	1.13862	3.63E-03
38	353.8	4.85E-03	2.65E-03	6.80E-06
39	361.2	1.88E-04	9.83E-05	1.65E-07
40	369.8	3.41E-03	2.97E-05	8.70E-08
41	382.9	3.34E-05	0.972132	1.27E-02
42	404.2	7.70E-06	9.27E-07	2.50E-09
43	404.9	1.14E-04	2.44E-06	6.43E-10

44	448.5	9.45E-05	3.84E-07	3.23E-10
45	449.2	8.93E-06	6.65E-07	5.06E-09
46	481.9	2.96E-11	0.396975	1.56E-04
47	492.8	1.65E-04	4.87E-12	3.15E-11
48	494.9	2.42E-05	9.05E-06	1.09E-07
49	513	2.11E-03	1.53E-06	5.90E-08
50	515.9	6.99E-06	1.47E-02	2.66E-04
51	538	3.97E-10	4.39E-05	3.43E-07
52	540.4	3.23E-08	7.17E-05	3.48E-05
53	561.8	1.90E-10	4.54E-03	3.89E-04
54	575	1.69E-05	1.28E-05	4.88E-03
55	582.8	1.69E-09	3.26E-04	1.08E-06
56	584.7	2.78E-12	5.13E-04	1.61E-07
57	607.9	4.68E-10	1.46E-03	1.86E-05
58	627.3	1.67E-09	1.37E-03	7.94E-06
59	635	2.91E-09	2.98E-03	1.13E-05
60	652.3	1.99E-08	3.80E-03	4.48E-05
61	677.2	2.83E-09	3.05E-04	4.56E-06
62	688.3	8.11E-10	5.52E-09	1.05E-06
63	709.6	3.92E-05	2.12E-06	4.34E-02
64	723.9	1.55E-09	6.81E-05	1.35E-06
65	736.3	3.02E-09	2.45E-07	1.67E-06
66	767.1	2.10E-05	1.07E-07	2.97E-03
67	770.2	1.01E-09	9.57E-06	1.32E-07
68	771.8	7.87E-11	2.90E-05	8.75E-08
69	789.7	2.94E-10	1.65E-06	2.37E-07
70	797.3	3.68E-12	4.93E-04	4.29E-08
71	820.3	1.96E-13	4.73E-05	2.70E-09
72	837.4	2.45E-10	9.15E-06	9.18E-08
73	869.6	5.65E-10	7.25E-04	4.55E-09
74	872.4	2.77E-07	0.163678	2.73E-06
75	886	5.00E-09	2.69E-03	6.52E-07
76	910.1	3.46E-09	6.70E-05	4.99E-07
77	920.1	6.42E-11	1.76E-05	2.18E-09
78	925.4	7.11E-06	6.85E-07	1.61E-03
79	930.6	2.11E-05	1.83E-05	2.22E-03
80	933.1	1.28E-06	1.54E-04	5.54E-05
81	952.8	6.66E-08	2.54E-04	8.02E-07
82	970.5	1.40E-09	1.78E-04	5.32E-08
83	993.4	5.70E-09	8.72E-04	2.38E-07
84	1015	5.82E-05	9.01E-05	2.48E-03
85	1020	1.14E-06	1.96E-03	4.76E-05
86	1035	1.51E-07	6.68E-03	5.78E-06
87	1049	1.19E-10	2.87E-06	2.28E-08
88	1077	5.17E-10	2.39E-04	1.03E-08

89	1104	1.34E-10	5.16E-05	6.92E-09
90	1130	7.87E-11	7.02E-05	1.99E-11
91	1147	6.35E-05	3.69E-09	1.90E-03
92	1157	1.62E-10	3.23E-05	2.92E-08
93	1184	1.26E-10	4.01E-05	1.87E-09
94	1209	4.02E-08	1.23E-05	8.79E-07
95	1222	1.23E-02	5.93E-05	0.256213
96	1235	6.96E-06	5.84E-03	1.11E-04
97	1240	1.77E-06	3.54E-03	2.60E-05
98	1244	1.59E-05	4.03E-02	2.16E-04
99	1277	9.18E-10	1.15E-04	9.86E-08
100	1296	3.71E-10	2.35E-05	5.37E-09
Sum of effective mass		58.8301 *386=22708.4186	58.7148 *386=22663.9128	57.7563 *386=22293.9318



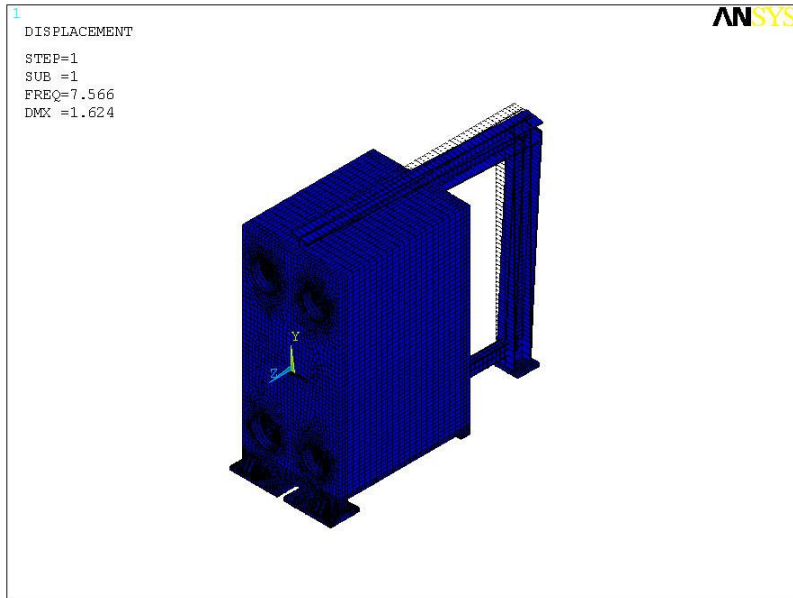


Fig. 21 First mode shape

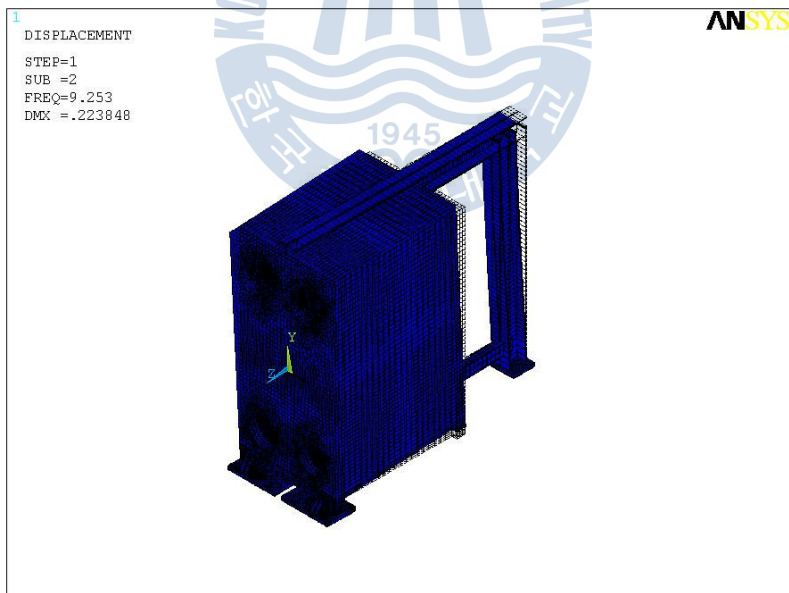


Fig. 22 Second mode shape

### 5.1.1 유효질량 분석

Table 16은 응답스펙트럼 해석 이론을 언급한 2.3장의 질량 참여율의 합이다. 여기서 질량 참여율은 지진하중이 작용할 때 얼마나 많은 질량들이 각 모드에서 각 방향별로 참여를 하고 있는지를 나타내는 수치로서 전체 질량에 약 90%이상을 포함 하고 있을 때 해석의 신뢰도가 높다.

Table 16 Sum of effective masses

	Actual weight	Sum of effective mass (lb)	Ration to total mass (%)
X-direction	22,926	22,708	99.0
Y-direction		22,664	98.8
Z-direction		22,294	97.2

질량 참여율을 살펴보면, 각 방향별 질량 참여율이 97%이상을 차지함을 확인할 수 있다.

각 방향별 질량 참여율을 정리하면 Fig. 23와 같이 나타난다. 그래프를 통해 본 방향별 질량 참여율을 분석하면, X방향은 6차 모드에서 가장 크게 나타나고, Y방향은 35차 모드에서 가장 크며, Z방향은 2차 모드에서 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 방향별 질량 참여율의 합을 통해서 확인 했듯이 본 열교환기는 X(동-서)방향이 99%로 지배적이며, Y(남-북)방향과 수직(상-하)방향은 98%, 97%로 X방향에 비해 비교적 영향이 적은 것을 알 수 있다.

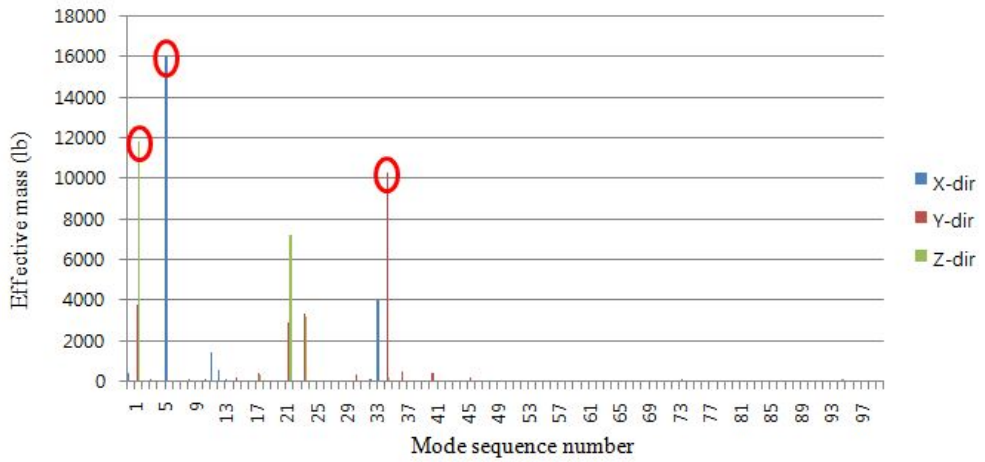


Fig. 23 Effective masses for each direction





## 5.2 응답 스펙트럼 해석

구조물에 대하여 내진설계를 할 경우에는 일반적으로 구조물의 최대응답을 기준으로 필요한 강도를 결정하므로 시간변화에 따른 구조물의 시간이력거동을 모두 필요로 하지는 않는다. 따라서 내진설계를 위하여 간편하고 쉬운 방법으로 구조물의 최대 지진응답을 알아낼 필요가 있으며 이러한 목적으로 흔히 사용하는 것이 응답 스펙트럼 해석(response spectrum)이다.

Biot와 Housner는 지진으로 인한 구조물의 영향을 나타내기 위하여 진동주기와 구조물의 최대응답과의 관계를 그래프로 나타낸 응답스펙트럼을 제안하였다. 이러한 응답스펙트럼을 사용하면 지진에 의한 지반운동에 관한 정확한 정보를 가지고 구조물에 대하여 복잡한 시간이력해석을 수행해야 하는 번거로움 없이 쉽게 구조물의 최대응답을 근사적으로 구할 수 있기 때문에 현재 구조물의 지진해석 및 내진설계에 널리 이용되고 있다. [14]

### 5.2.1 응답 스펙트럼

설계용 응답 스펙트럼은 구조물의 내진설계에서 지진의 영향을 고려하여 지진력을 산정하기 위하여 사용된다. 특정한 지반운동에 대하여 작성된 응답스펙트럼은 진동주기에 따라서 급격히 변하므로 들쭉날쭉한 형태를 가지고 있다. 그리고 여러 가지의 지반운동에 대한 응답스펙트럼은 서로 다른 형태를 가지게 된다. 그러나 해당부지에서 예상되는 지반운동은 정확하게 예측하는 것이 불가능하므로 이것으로부터 설계용 응답스펙트럼을 구하기도 어렵다. 미래에 발생할 지반운동에 대하여 정확한 응답스펙트럼을 예측하는 것이 불가능하다면 과거에 발생한 여러 가지의 지진에 의한 응답스펙트럼을 작성할 필요가 있다. 일반적으로 내진설계기준에서는 설계용 응답스펙트럼을 진동주기에 따라서 급격하게 변하지 않는 완만한 곡선으로 규정하고 있다.

지진에 의한 지반가속도의 시간이력을 사용하면 변위응답스펙트럼 뿐만 아니라 속도응답스펙트럼이나 가속도응답스펙트럼을 작성할 수 있다. 그러나 세 가지 응답스펙트럼을 사용하면 여러 가지로 불편하므로 이것을 하나의 그래프로 표현하는 것이 바람직하다. 그래서 구조물의 응답이 조화함수로 표현될 수 있다고 가정하고 유사속도(pseudo velocity:  $V$ )와 유사가속도(pseudo

acceleration A)의 개념을 도입한다. 내진설계기준에서는 유사속도와 유사가속도를 이용하여 설계응답스펙트럼을 설정하는 방법을 채택하고 있다.

구조물에 발생하는 변위는 지반가속도와 구조물의 동적특성에 좌우 되지만 만약 변위를 식(22)과 같이 최대치가  $u_0$ 인 조화운동으로 가정하며 이에 대한 속도 및 가속는 식(23)와 식(24)에서 보는 바와 같이 조화함수로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = u_0 \sin w_n t \quad (22)$$

$$\dot{u}(t) = u_0 w_n \cos w_n t \quad (23)$$

$$\ddot{u}(t) = -u_0 w_n^2 \sin w_n t \quad (24)$$

이 식으로부터 변위, 속도 및 가속도의 최대치는  $u_0$ ,  $\dot{u}_0$ ,  $\ddot{u}_0$  임을 알 수 있으며 이것들을 다음과 같이 각각 최대변위 D, 유사속도 V 및 유사가속도 A로 정의 하는데 유사속도 V 및 유사가속도 A는 D에  $w_n$  및  $w_n^2$ 을 곱하여 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$D \equiv u_0 \quad (25)$$

$$V \equiv \dot{u}_0 = Dw_n = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (26)$$

$$A \equiv \ddot{u}_0 = Dw_n^2 = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (27)$$

구조물에 저장되는 최대 변형에너지( $E_{so}$ )는 최대 운동에너지와 같으므로 식(28)의 마지막에 있는 유사속도 V는 최대속도와 같음을 알 수 있다.

$$E_{so} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k(V/w_n)^2}{2} = \frac{mV^2}{2} \quad (28)$$

식(29)에서 보는 바와 같이 최대밀면전단력( $V_{bo}$ )또는 최대등가적정하중( $f_{so}$ )은 질량  $m$ 과 유사질량  $A$ 의 곱으로 나타낼 수 있는데 구조기술자들이 질량보다는 무게에 친숙하므로 유사가속도를 중력가속도로 나눈  $A/g$ 와 무게의 곱으로 표현하는 방법을 주로 사용한다.

$$V_{bo} = f_{so} = mA = A \frac{W}{g} = \frac{A}{g} W \quad (29)$$

여기서  $A/g$ 는 내진설계기준에서 밀면전단력을 구하기 위하여 사용되는 밀면 전단계수(base shear coefficient) 또는 횡하중계수(lateral force coefficient)이다. 우리나라의 내진설계기준에서는 밀면전단력을 식(30)와 같이 규정하고 있는데 이것은 밀면전단계수의 형태를 이용하여 전체 무게에 비례하는 밀면전단력을 규정하고 있음을 알 수 있다.

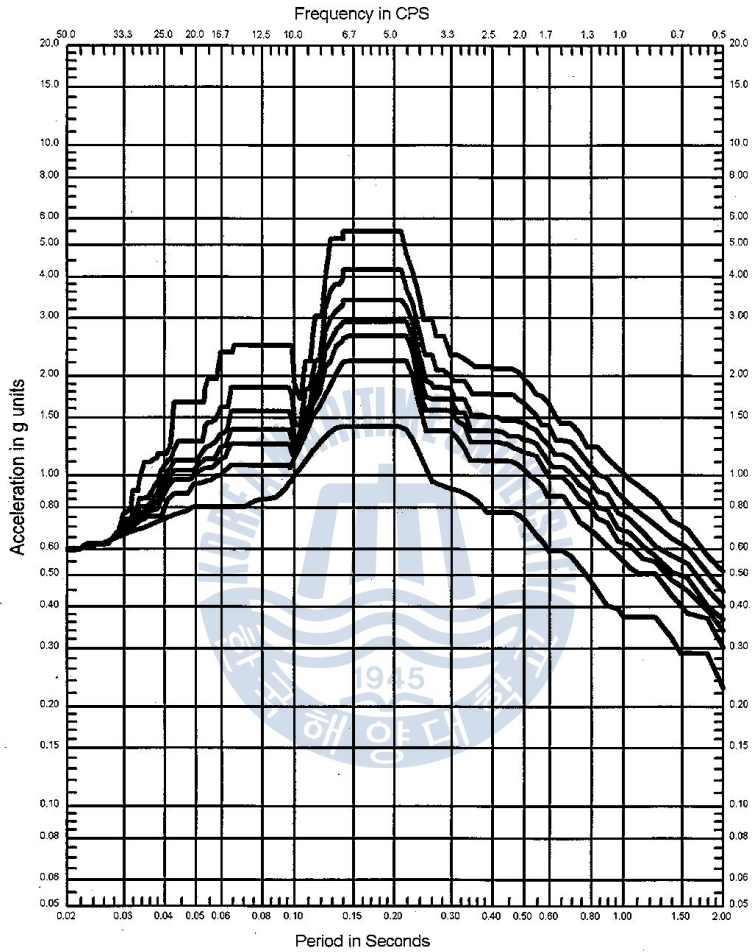
$$V_{bo} = C_s W \quad (30)$$

그러나 식(22)와 같은 조화함수와 지진에 의한 구조물의 변위는 어느 정도 차이가 나게 되는 경우가 많다. 그러므로 변위를 시간에 대해서 미분하여 얻게 되는 속도와 가속은 식(23) 및 식(24)과 어느 정도 차이가 날 수 있다.

그러나 많은 경우에는 진동주기가 매우 길지 않은 경우에는 유사속도 및 유사가속도와 최대속도 및 최대가속도가 큰 차이를 보이지 않는 경향이 있다. 그러므로 최대속도와 관한 연구에 여러 가지로 편리하므로 유사속도 및 유사가속도를 흔히 사용하고 있다.

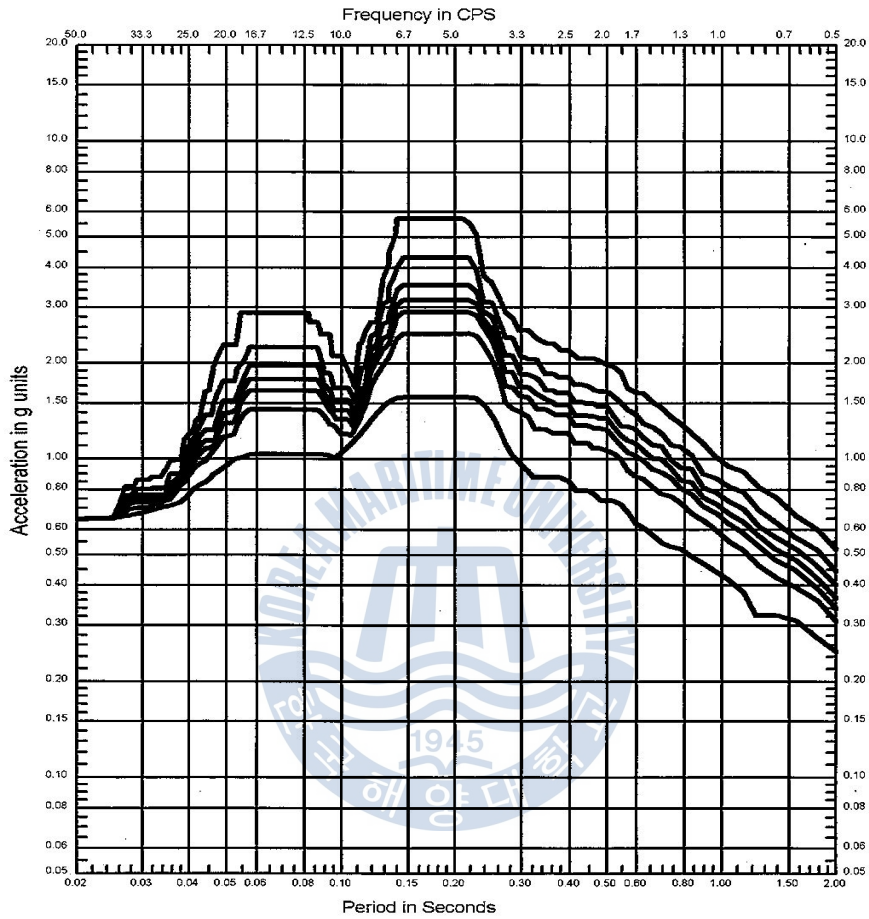
본 연구에 사용된 응답스펙트럼 그래프는 Fig. 24에서 Fig. 26에 나타내었다. OBE(operating basis earthquake)의 경우 2%감쇠비를 적용한 SSE(safe shutdown earthquake)의 값의 50%만을 적용하였고, SSE에서는 3%감쇠비를 적용하여 해석하였다.

본 응답스펙트럼 그래프를 이용한 해석에서는 수직 방향에 대한 그래프는 그대로 적용하여 해석하지만, 수평 방향에 대한 그래프는 두 방향 중 큰 그래프 하나만을 양 방향에 적용하여 해석을 수행하는 경우도 있다.



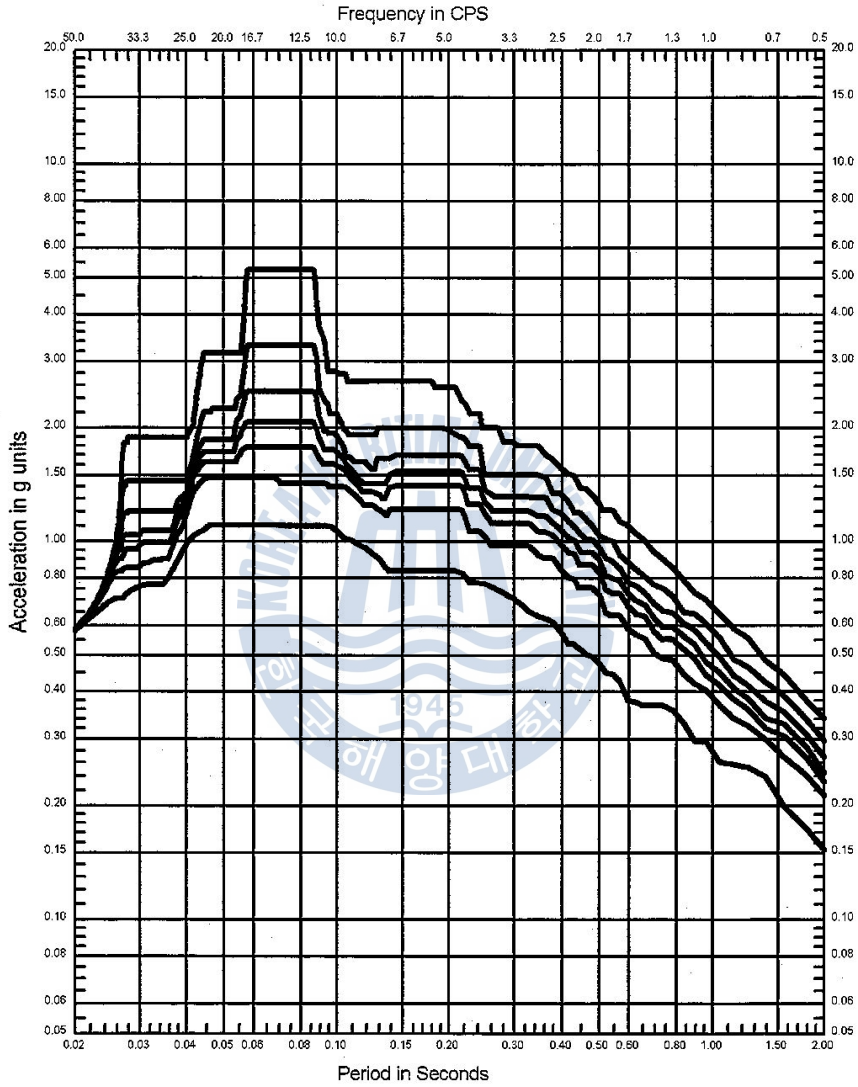
Node	<b>ALL AREAS</b>	Spectra No.	<b>A3F-EW-SSE</b>
Direction	<b>E-W</b>	Elevation	<b>100'-0"</b>
		Location	<b>AUX. BLDG.</b>

Fig. 24 Spectrum curve for E-W direction.



Node	<b>ALL AREAS</b>	Spectra No.	<b>A3F-NS-SSE</b>
Direction	<b>N-S</b>	Elevation	<b>100'-0"</b>
		Location	<b>AUX. BLDG.</b>

Fig. 25 Spectrum curve for N-S direction.



Node	<b>ALL AREAS</b>	Spectra No.	<b>A3F-VS-SSE</b>
Direction	<b>V-S</b>	Elevation	<b>100'-0"</b>
		Location	<b>AUX. BLDG.</b>

Fig. 26 Spectrum curve for V-S direction.

### 5.2.2 응답 스펙트럼 해석의 결과 및 볼트 반력 평가

5장의 설명에 따른 과정을 거쳐 응답스펙트럼 해석을 수행하면 각 부위별 응력을 확인 할 수 있다.

본 논문에서는 부품의 응력의 평가는 4장의 유한요소해석의 평가법과 크게 다르지 않기에 생략하고, 특별히 응답스펙트럼 해석을 통해 지지부의 반력 평가법에 대한 소개를 하려 한다.

해석 조건에 따라 두 가지 (OBE, SSE)조건에서의 반력을 평가한다. 일반적인 반력은 해석 상 적용한 구속 부위에서 나타나는 반력을 사용하지만, 지진 하중과 같이 변화가 있는 하중에 의한 반력은 모드 조합법으로 조합된 반력의 값을 산출해 내고 있다. 아래의 내용은 상용 프로그램인 ANSYS에서 제공하는 모드 조합 방법이다. 주로 사용하는 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares)식(31) 와 DSUM(Double Sum Method)식(32)가 있다.

$$R_a = \left( \sum_{i=1}^N (R_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$R_a = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} |R_i R_j| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

이 두 식을 보면, 고유치 해석에서 추출한 각 모드별 반력을 제곱을 하거나 절대값을 취해 합산하게 되어 있다. 이는 실제 반력이 인장력과 압축력이 반복적으로 발생할 수 있는 볼트에서 모두 양의 값으로만 산출 되어 나타날 수밖에 없다. 그래서 설계상에서 과도하게 설계가 될 수 있는 문제의 소지가 있다고 판단되었다.

위의 설명과 같이 반력의 값이 크게 작용하는 상태를 확인하기 위해 간단한 모델로 비교 분석하였다.



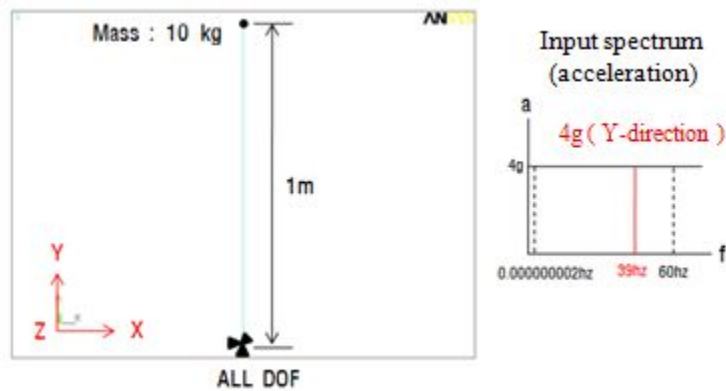


Fig. 27 Reaction test for spectrum analysis (1-point support)

Fig. 27와 같이 하나의 수직 빔이 있고, 이 빔 위쪽 끝에는 10kg이라는 질량이 있다. 중력 가속도를 적용하여 하중이 작용할 때, 반대편 빔 아래에 자유도를 All DOF로 완전 구속하여 스펙트럼 해석을 통해 나타나는 반력을 확인하였다. (가속도 :  $9.8m/s^2$ , 입력 스펙트럼 가진( $9.8m/s^2 * 4 = 39.2m/s^2$ ))

입력된 하중에 의한 수직 반력은 간단한 계산으로 확인 할 수 있다.  $39.2m/s^2 * \text{질량}(10kg) = 392 \text{ N}$ 임을 알 수 있고, 해석 결과를 통해 확인 할 수 있다.

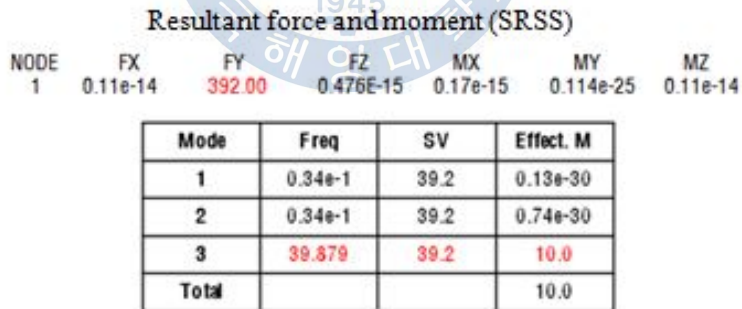


Fig. 28 Reaction test for spectrum analysis results  
(1-point support, Input Acceleration. - Y-dir)

Fig. 28과 같이 결과에서 수직 반력의 합은 계산된 반력 값이 그대로 출력됨으로써 확인 할 수 있고, 3차 고유진동수와 질량 참여율을 통해 가속도 값이



알맞게 적용되었음을 알 수 있다.

반면에 입력 스펙트럼 가속도를 수평 방향으로 적용 하였을 때의 결과는 예상한 모멘트 값이 커지면서 구속이 한 점일 때와 여러 개 일 때에 발생하는 하중의 차이가 생길 것이라는 예상을 해 볼 수 있다.

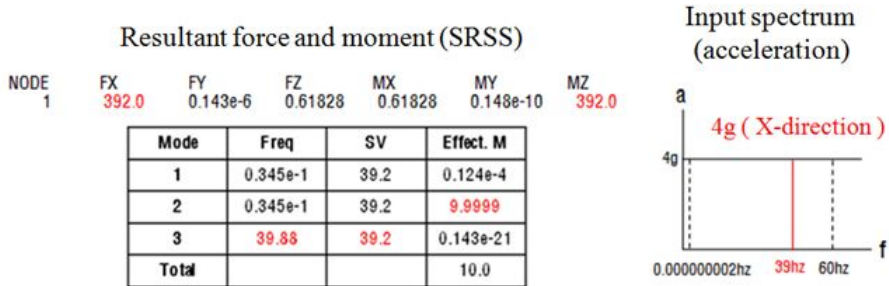
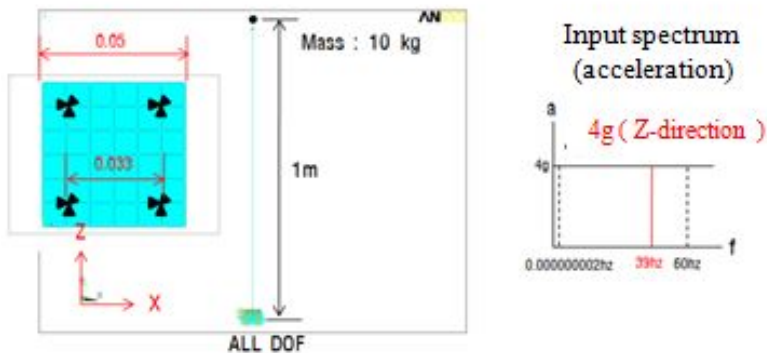


Fig. 29 Reaction test for spectrum analysis results  
(1-point support. Input Acceleration. - X-dir)

위 Fig. 29의 결과를 통해 구속 점의 개수가 많을 경우 발생하는 하중에 대한 시험도 필요하였다. 아래의 Fig. 30은 네 점(앵커 볼트 구속 점)에 자유도를 구속하여 반력을 확인 하였다.



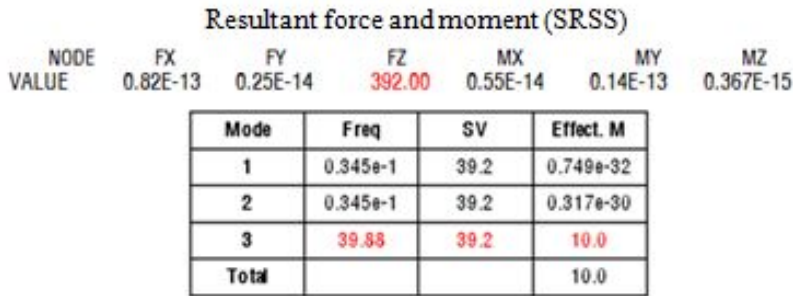


Fig. 30 Reaction test for spectrum analysis (4-point support)

수직 방향에 대한 반력은 위 1point 구속과 유사한 결과를 가지고 있음을 확인 하였다. 즉, 수직 반력에 대한 결과는 수직방향에 작용하는 하중에 의해서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만, 지진하중의 방향이 결코 수직방향으로만 작용하지 않으므로, 수평 방향에 대한 결과를 비교하여 식 5.2.10과 식 5.2.11과 같은 조합법의 문제점을 말하고자 한다. Fig. 31는 4-point 구속 모델에서 수평 방향으로 스펙트럼 가속도가 적용되었을 때의 결과를 나타낸다.

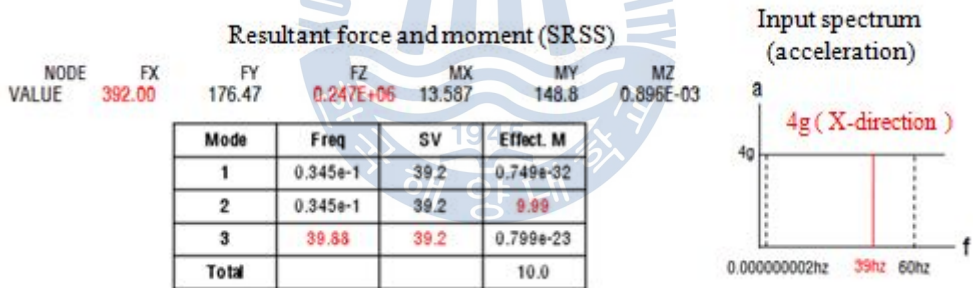


Fig. 31 Reaction test for spectrum analysis results  
(4-point support. Input Acceleration. - Y-dir)

Fig. 31의 결과를 통해, 수평방향의 하중은 Fx 반력값이 입력하중으로 나타남을 확인 할 수 있는 반면에, 수평 방향의 하중이 적용되었지만, 수직(Fz)방향의 반력이 비정상적으로 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 모드조합법의 문제점으로 인식 될 수 있다고 판단된다.

위의 결과를 토대로, 본 연구에서 제안하는 구속조건은 아래의 Fig. 32과 같

이 일반적인 베이스 플레이트의 면 구속 노드들을 한 점에서 커플링으로 연결하여 구속한다.

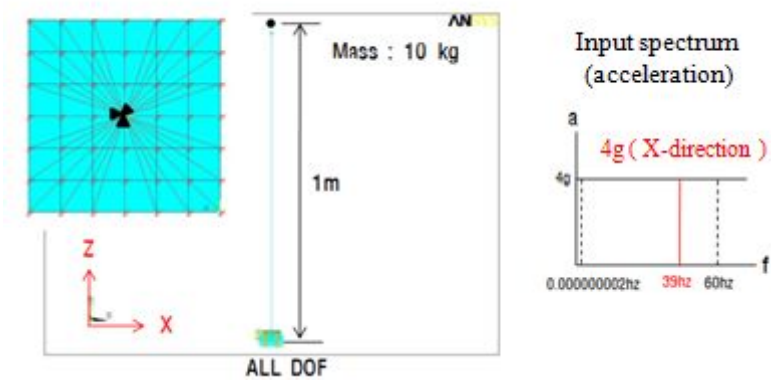


Fig. 32 Reaction test for spectrum analysis (Suggest model)

이 방법은 Fig. 33의 결과와 같이 수직 반력에 대한 불필요하게 작용되는 반력을 발생시키지 않을 뿐만 아니라, 스펙트럼 해석에서 중요한 모드해석의 결과에 영향을 미치지 않음으로써, 불필요한 반력이외에 기타 결과에 영향을 주지 않는다.

1945  
Resultant force and moment (SRSS)

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
VALUE	392.00	0.11164	0.159E-06	0.11164	392.00	0.910E-08

Mode	Freq	SV	Effect. M
1	0.345e-1	39.2	0.749e-32
2	0.345e-1	39.2	9.99
3	39.88	39.2	0.799e-23
<b>Total</b>			10.0

Fig. 33 Reaction test for spectrum analysis results  
(Suggest model. Input Acceleration. - X-dir)

## 제 6 장 건전성 평가 모듈 개발

구조 건전성 평가법을 제시하면서 복잡한 경계 조건 및 해석 조건들이 사용된다. 본 연구에서는 해석자의 편의와 규격화 된 해석 기법을 확립 하고자 모듈화 된 해석 자동화 프로그램을 만들고자 한다.

### 6.1 자동화 프로그램의 개발

전산 해석을 수행하는 데에 있어서 가장 많은 시간을 차지하는 것이 형상을 모델링 하는 것이고 또한 경계 조건을 적용하는 것이다. 3장에서 설명 했듯이 하중 조건은 사양서를 기준으로 한 코드 계산을 통해 정해지며, 상황에 따라 달라지는 값이므로 프로그램화 할 필요는 없으며, 단지 입력 값으로 적용하여 주면 된다. 전산해석에 필요한 치수 및 물성치에 대한 조건들을 Visual Basic 으로 Form을 만들고<sup>[15]~[17]</sup> ANSYS APDL 을 코딩하여 만들었다.

#### 6.1.2 유한 요소 해석의 자동화

ANSYS에서는 APDL이라는 언어를 제공하고 있다. 이를 이용하여 판형열교 환기의 주요 변수들을 선정하고, 필요한 치수 및 물성치, 하중의 크기 등을 미리 변수에 저장하였다가 모델링 및 하중을 자동으로 적용하는 프로그램을 만들 수 있다. 본 예시 형상을 기준으로 APDL을 구성하였다. 하지만, 판형 열교 환기의 형상은 너무나 다양하고, 모든 판형 열교 환기에 적용가능하지는 않지만, 본 예시 형상과 유사한 형상을 적용 할때 본 프로그램을 이용하여 편리하게 정확히 해석을 수행하고, 건전성을 평가 할 수 있다.

아래의 Fig. 34는 APDL의 일부를 보여 주고 있다.

```

fini                                !Nozzle Dim                                !nozzle load
/clear                               N1_OD=0.2191
/prep7                               N2_OD=0.2191                                n1_load_FX= 7800
                                       N3_OD=0.2191                                n1_load_FY= 7800
                                       N4_OD=0.2191                                n1_load_FZ= 7800

!plate Dim
A=0.886                             N1_ID=0.2027                                n1_load_MX= 6178
B=1.928                             N2_ID=0.2027                                n1_load_MY= 6178
C=0.060                             N3_ID=0.2027                                n1_load_MZ= 6178
D=0.025                             N4_ID=0.2027
E=0.728                             nozzle_T=1                                  n2_load_FX= 7800
F=0.050                             n2_T=0.2                                    n2_load_FY= 7800
G=0.160                             n2_T=0.2                                    n2_load_FZ= 7800
H=0.634                             n3_T=0.2                                    n2_load_MX= 6178
I=0.656                             n3_T=0.2                                    n2_load_MY= 6178
J=0.2325                            n4_T=0.2                                    n2_load_MZ= 6178
K=0.2325
L=0.2325
M=0.2325                            !Carrying bar Dim                          n3_load_FX= 7800
O=0.0195                            YU=0.12                                     n3_load_FY= 7800
P=1.750                             YT=0.18                                     n3_load_FZ= 7800
Q=1.788                             YV=0.008
R=1.650                             YW=0.012                                    n3_load_MX= 6178
S=0.172                             n3_load_MY= 6178
                                       n3_load_MZ= 6178

                                       !Column Dim
Base_Wh = 0.1                       CU=0.15
Base_Whd = 0.16                     CT=0.15
Base_w = 0.26                       CV=0.008
Base_dif = 0.566                    CW=0.012
Base_half_d = 0.1
Base_half_h = 0.225                !Mid guiden Dim                            n4_load_MX= 6178
Base_tk = 0.02                      MU=0.040                                    n4_load_MY= 6178
                                       MT=0.125                                    n4_load_MZ= 6178
                                       MV=0.006

bolt_dis = 0.35
bolt_btww = 1.6
bolt_dis_2 = 0.16
bolt_dis_3 = 0.12

!Eq_Plate
eq_E = 199e9                        !Plate_model                               ! N1
eq_prxy = 0.3                       wpoft,_(A/2)                               wpoft,J
eq_dens = 7850                      wpoft,_(B/2)-(D/2))                       wpoft,I
                                       wpoft,,-E                                  CYLIND,N1_OD/2,N1_ID/2,-E,,0,360,
                                       BLOCK,_,A,_(B+(D/2)),E,                   wpoft,J
                                       wpoft,_,C                                  wpoft,-I
!fix plate
fix_E = 199e9                       VSBW,all
fix_prxy = 0.3                      wpoft,_(E-2*C)                             ! N2
fix_dens = 7850                    VSBW,all
                                       wpro,_,90                                  wpoft,-L
!Carrying_bar_Mat                    wpoft,,-F                                  wpoft,-H
car_E = 199e9                       VSBW,all                                    CYLIND,N2_OD/2,N2_ID/2,-E,,0,360,
car_prxy = 0.3                      VDELE,7,,,1                                wpoft,L
car_dens = 7850                    VDELE,8,,,1                                wpoft,H
                                       VSEL,S,,,3
!support_Mat                         wpro,_,90                                  ! N3
sup_E = 199e9                       wpoft,_,G                                  wpoft,M
sup_prxy = 0.3                      VSBW,all                                    wpoft,-H
sup_dens = 7850                    wpoft,_(A-2*G)                             CYLIND,N3_OD/2,N3_ID/2,-E,,0,360,
                                       VSBW,all                                    wpoft,M
                                       VDELE,3,,,1                                wpoft,H
                                       ALLSEL,ALL
                                       /replot
                                       /VIEW,1,1,1,1
                                       /ANG,1
                                       /REP,FAST
                                       wpro,,,90
                                       wpro,,,90
                                       CSYS,0
                                       WPAVE,0,0,0
                                       CSYS,0
                                       wpro,,,90
                                       VSBW,all
                                       wpro,,,90
                                       wpro,,,90
                                       VSBW,all
                                       /replot
                                       wpro,,,90
                                       wpoft,K
                                       wpoft,I
                                       CYLIND,N4_OD/2,N4_ID/2,-E,,0,360,
                                       wpoft,K
                                       wpoft,-I
                                       VOVLAP,all
                                       /replot

```

Fig. 34 An example of ANSYS APDL

## 6.2 전체 자동화 프로그램의 소개

Fig. 35은 Visual Basic을 이용한 건전성 평가 모듈의 메인 화면이다. 화면의 구성은 메뉴탭은 각 단면의 치수를 기입 가능한 탭(A)과 선택적으로 해석 소스를 선정할 수 있는 탭(B)으로 구성 되었다. 또한 한번 입력한 input data를 불러와 수정하여 사용할 수 있는 탭(C)으로 이를 이용하면, 치수가 유사한 모델에 대한 치수 입력 시간 또한 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 입력한 값을 최종 확인하고, 수정할 수 있는 탭(D)으로 구성 되어있다. 마지막으로 ANSYS FEM 입력 소스로 변경시켜 출력 해주는 탭(E)을 만들어 효과적인 건전성 평가 모듈을 만들었다.

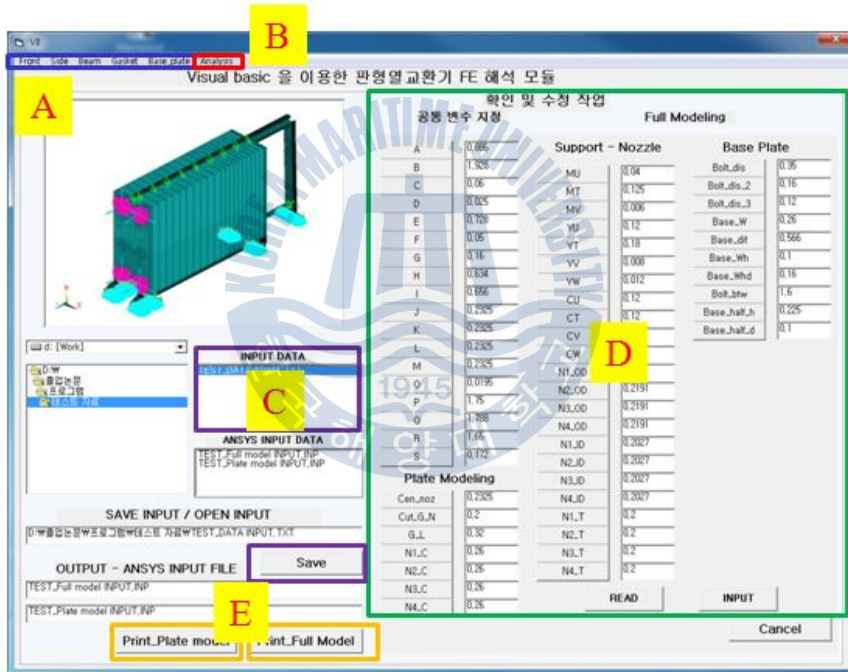


Fig. 35 Main page in visual basic module



## 6.2.1 화면 구성

각 Page별 화면구성은 아래 Fig. 36에서 Fig. 41에 나타내었다.

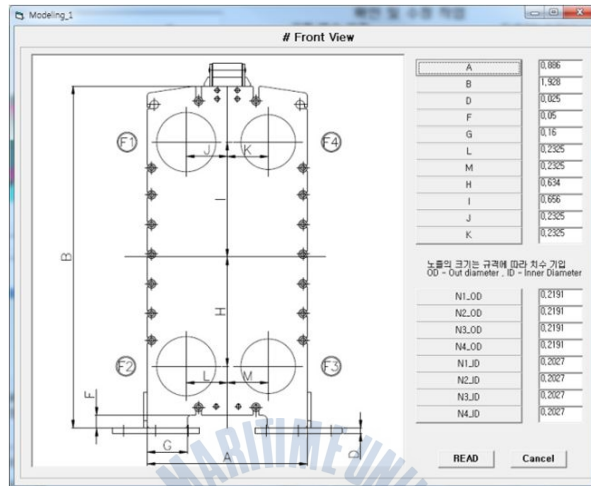


Fig. 36 Front page in visual basic module

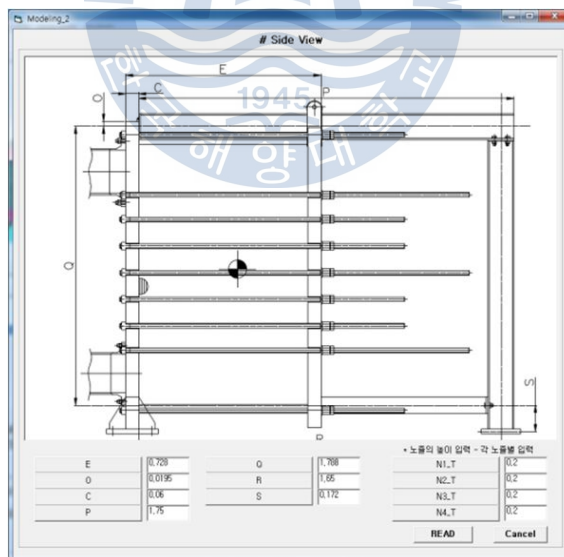


Fig. 37 Side page in visual basic module

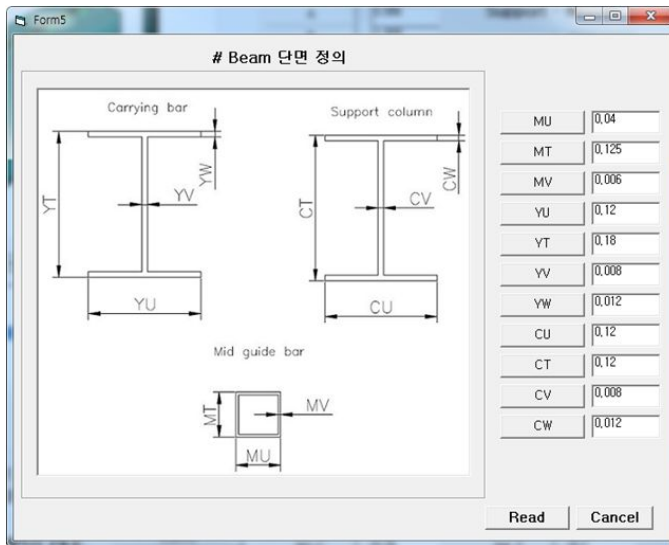


Fig. 38 Beam section page in visual basic module

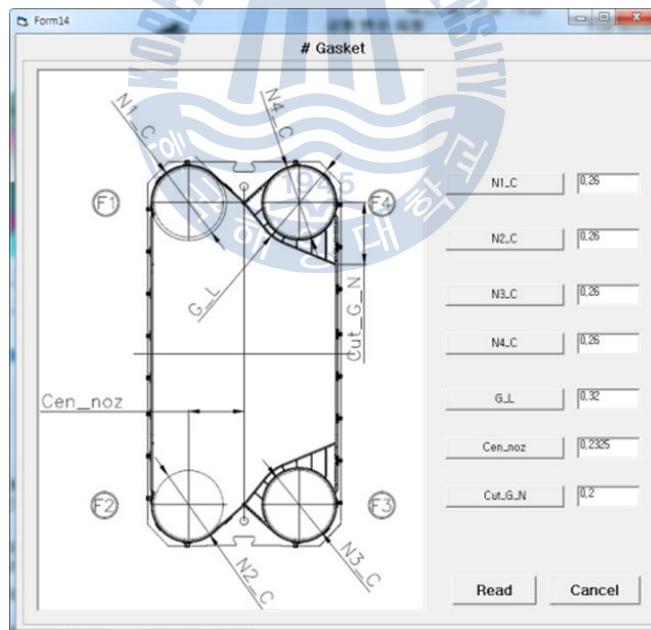


Fig. 39 Gasket page in visual basic module



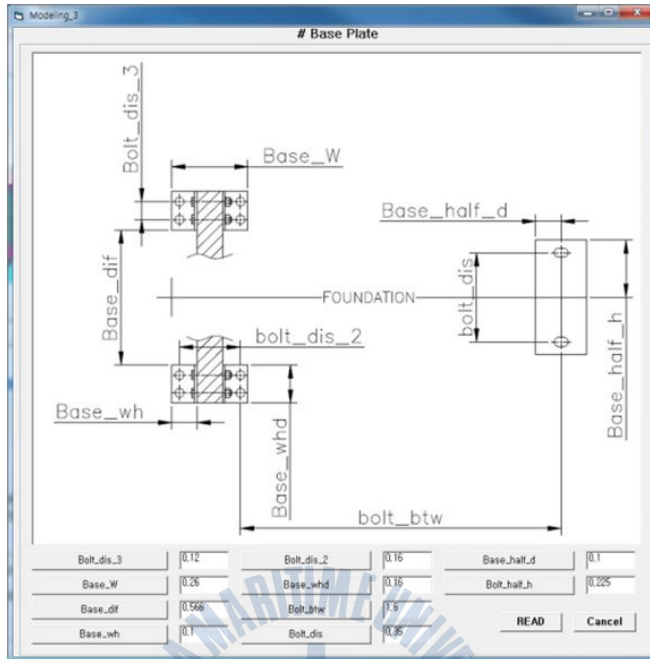


Fig. 40 Base plate page in visual basic module

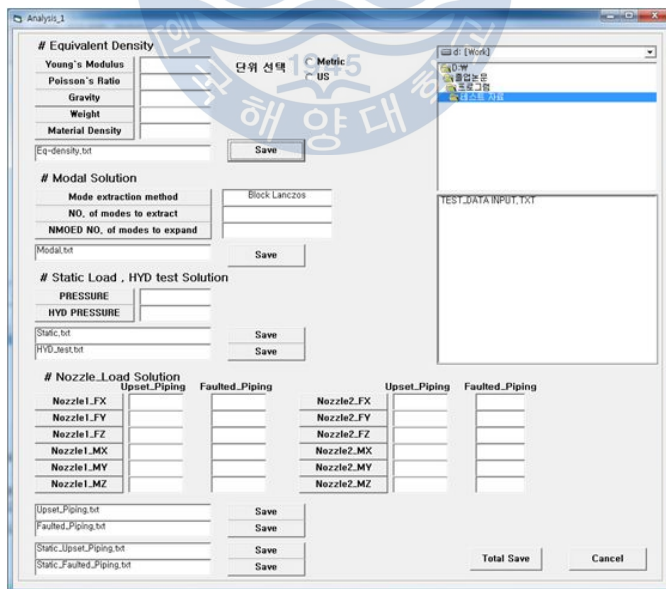


Fig. 41 Solution page in visual basic module

## 제 7 장 결론

본 연구를 통해 판형 열교환기의 구조해석을 수행하고, 건전성을 평가하는 방법을 제시 하였다. 일반적으로 사양서의 기준에 의한 하중을 적용하고 관련 코드에 의해 정해진 허용응력을 적용하여 FEM을 통해 계산된 하중과의 비교로 그 건전성을 평가 할 수 있다.

### 1. 하중을 적용함에 있어서

- (1) 상부 가이드 바의 평가에서는 용량 증대를 위한 증판 상황을 고려하여 자중의 1.5배의 무게를 적용하여 건전성을 평가한다.
- (2) 풍하중과 지진하중의 계산은 관련 코드에 의해 계산되어 진다. 또한 계산에 사용되는 여러 가지 계수들은 설치 지역과 환경에 따라 정해지는 값으로 관련 코드에 맞추어 선정한다.

### 2. 허용 값을 선정하는데 있어서

- (1) 최대 허용응력은 재료에 따라 정해지며, 이는 ASME Section II Part D에 의해 정해지며, 재료 항복과 인장강도를 선정한다.
- (2) 빔 형태의 지지물인 상부 가이드 바와 지지 기둥의 굽힘 허용응력의 경우는  $0.66S_y$ 를 적용하며, 판형태의 Base plate의 굽힘 허용응력은  $0.6S_y$ 를 적용한다.
- (3) 빔의 최대 변형에 대한 허용치는 전체 길이에 따라 정해지며, AISI에 의해 100ft당 6inch의 변형을 허용하고 있다.

### 3. 자동화 프로그램 개발

- (1) 자동화 프로그램의 개발로 인해, 해석에 필요한 정보를 입력하여 신속하고, 정확하게 건전성을 확인 할 수 있다.
- (2) 유사 모델의 경우 이전의 모델 및 하중 조건의 입력 값을 불러오기 하여 일부 수정하여 적용 가능하다.

위와 같은 건전성을 평가하는 기준을 제시 하였으며, FEM을 통해 해석적 기법을 확립하였다. 또한 건전성을 효과적으로 수행하기 위한 건전성 평가 모듈을 개발하였다.



## 참고문헌

- [1] 박재홍, “판형 열교환기의 특징과 적용” , 한국 마린엔지니어링 학회 제33권 제6호 2009.9 801p~811p
- [2] Weiya jin, "Comparison of two FEA models for calculating stresses in shell-and tube heat exchanger" , International Journal of Pressure Vessels and Piping 81 (2004) pp.563-567
- [3] 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 한국지진공학회 제10권 제3호 2006.06.pp.21~33P
- [4] 류해성, “판형열교환기” , 대한기계학회지 제35권 제 9호, 1995 , 794p~804p
- [5] IBC2006, ICC, International Building Code, International Code Council, January 2006.
- [6] ASCE7-05, SEI, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers.
- [7] API 662, Latest Edition, American Petroleum Institute.
- [8] ASME CODE Section VIII Div1, 2010 Edition.
- [9] ASME CODE Section VIII Div2, 2010 Edition.
- [10] AISI, American iron and steel institute.
- [11] 신수철, “응답 스펙트럼 해석 기술 소개” , 태성에스엔이
- [12] ASME CODE Section II, Part D, 2010 Edition.
- [13] (주) 태성에스엔이 “유한요소해석 입문과 선형해석”, 제5판.
- [14] 김영환, “원자력 발전소 핵연료 재충전 기계의 내진설계에 관한 연구”, 2008, 한국해양대학교 대학원.
- [15] 비주얼 베이직 실전 노하우 , 동일출판사, [www.vbbank.net](http://www.vbbank.net) 멤버 공저.
- [16] Visual basic for windows, 삼원출판사, 김웅식, 유원희 공저.
- [17] Visual basic 6.0, 가메출판사, 정수형 지음.

## APPENDIX A : Design Pressure

Linearized Stress Intensity for **Path 1** of fixed frame each load cases

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 1      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*

INSIDE NODE =1000301      OUTSIDE NODE =1002699

LOAD STEP    1    SUBSTEP=    1  
 TIME=    1.0000      LOAD CASE= 0

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

\*\* MEMBRANE \*\*

SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
0.8475E+07	0.2305E+07	-0.6010E+06	3106.	2488.	-0.5147E+06
S1	S2	S3	SINT	SEQV	
0.8504E+07	0.2305E+07	-0.6301E+06	<u>0.9134E+07</u>	0.8077E+07	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.2346E+08	0.8169E+07	-0.4567E+06	-8265.	257.2	-319.8
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-0.2346E+08	-0.8169E+07	0.4567E+06	8265.	-257.2	319.8
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.2346E+08	0.8169E+07	-0.4567E+06	0.2392E+08	0.2098E+08	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.4567E+06	-0.8169E+07	-0.2346E+08	0.2392E+08	0.2098E+08	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.3194E+08	0.1047E+08	-0.1058E+07	-5159.	2746.	-0.5150E+06
C	0.8475E+07	0.2305E+07	-0.6010E+06	3106.	2488.	-0.5147E+06
O	-0.1499E+08	-0.5864E+07	-0.1442E+06	0.1137E+05	2231.	-0.5144E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.3195E+08	0.1047E+08	-0.1066E+07	<u>0.3301E+08</u>	0.2902E+08
C	0.8504E+07	0.2305E+07	-0.6301E+06	0.9134E+07	0.8077E+07
O	-0.1264E+06	-0.5864E+07	-0.1501E+08	0.1488E+08	0.1300E+08

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1280E+07	-0.1424E+07	-0.7314E+06	1932.	2363.	0.2505E+06
C	-1447.	1470.	1.734	-63.00	-2049.	-0.2224E+06
O	0.1285E+07	0.1419E+07	0.7314E+06	-1720.	2092.	0.2509E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	-0.6342E+06	-0.1377E+07	-0.1424E+07	0.7899E+06	0.7675E+06
C	0.2217E+06	1471.	-0.2232E+06	0.4449E+06	0.3853E+06
O	0.1419E+07	0.1381E+07	0.6346E+06	0.7847E+06	0.7665E+06

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.3066E+08	0.9049E+07	-0.1789E+07	-3226.	5109.	-0.2646E+06
C	0.8474E+07	0.2306E+07	-0.6010E+06	3043.	439.3	-0.7371E+06
O	-0.1370E+08	-0.4445E+07	0.5871E+06	9652.	4323.	-0.2635E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	0.3066E+08	0.9049E+07	-0.1791E+07	0.3245E+08	0.2862E+08	0.000
C	0.8533E+07	0.2306E+07	-0.6604E+06	0.9194E+07	0.8127E+07	
O	0.5920E+06	-0.4445E+07	-0.1371E+08	0.1430E+08	0.1256E+08	0.000

## APPENDIX A : Test Pressure

Linearized Stress Intensity for **Path 1** of fixed frame each load cases

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 1      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*

INSIDE NODE =1000301      OUTSIDE NODE =1002699

LOAD STEP    1    SUBSTEP=    1  
 TIME=    1.0000      LOAD CASE= 0

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

\*\* MEMBRANE \*\*

SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
0.1049E+08	0.2663E+07	-0.7811E+06	5243.	2320.	-0.6758E+06
S1	S2	S3	SINT	SEQV	
0.1053E+08	0.2663E+07	-0.8215E+06	<u>0.1135E+08</u>	0.1007E+08	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.2983E+08	0.1047E+08	-0.5663E+06	-8954.	275.3	-455.2
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-0.2983E+08	-0.1047E+08	0.5663E+06	8954.	-275.3	455.2
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.2983E+08	0.1047E+08	-0.5663E+06	0.3039E+08	0.2665E+08	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.5663E+06	-0.1047E+08	-0.2983E+08	0.3039E+08	0.2665E+08	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.4031E+08	0.1313E+08	-0.1347E+07	-3712.	2596.	-0.6762E+06
C	0.1049E+08	0.2663E+07	-0.7811E+06	5243.	2320.	-0.6758E+06
O	-0.1934E+08	-0.7802E+07	-0.2148E+06	0.1420E+05	2045.	-0.6753E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.4032E+08	0.1313E+08	-0.1358E+07	<u>0.4168E+08</u>	0.3665E+08
C	0.1053E+08	0.2663E+07	-0.8215E+06	0.1135E+08	0.1007E+08
O	-0.1910E+06	-0.7802E+07	-0.1936E+08	0.1917E+08	0.1672E+08

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1628E+07	-0.1815E+07	-0.9344E+06	2456.	3426.	0.3290E+06
C	-1954.	1994.	-1.234	-73.33	-3005.	-0.2921E+06
O	0.1634E+07	0.1808E+07	0.9344E+06	-2207.	3140.	0.3296E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	-0.8031E+06	-0.1759E+07	-0.1815E+07	0.1012E+07	0.9851E+06
C	0.2912E+06	1995.	-0.2931E+06	0.5843E+06	0.5060E+06
O	0.1808E+07	0.1765E+07	0.8036E+06	0.1005E+07	0.9838E+06

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.3869E+08	0.1131E+08	-0.2282E+07	-1256.	6021.	-0.3472E+06
C	0.1049E+08	0.2665E+07	-0.7811E+06	5169.	-684.9	-0.9679E+06
O	-0.1770E+08	-0.5994E+07	0.7196E+06	0.1199E+05	5185.	-0.3458E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	0.3869E+08	0.1131E+08	-0.2285E+07	0.4097E+08	0.3615E+08	0.000
C	0.1057E+08	0.2665E+07	-0.8637E+06	0.1143E+08	0.1014E+08	
O	0.7261E+06	-0.5994E+07	-0.1771E+08	0.1844E+08	0.1616E+08	0.000



## APPENDIX A : Design Pressure

Linearized Stress Intensity for **Path 2** of fixed frame each load cases

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 2      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*

INSIDE NODE =1004623      OUTSIDE NODE =1006741

LOAD STEP    1    SUBSTEP=    1  
TIME=    1.0000      LOAD CASE= 0

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

\*\* MEMBRANE \*\*

SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
0.2399E+07	0.3156E+07	0.8089E+07	0.5092E+06	-0.2164E+07	0.4815E+07
S1	S2	S3	SINT	SEQV	
0.1118E+08	0.3410E+07	-0.9413E+06	<u>0.1212E+08</u>	0.1063E+08	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE    C=CENTER    O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.5176E+07	0.6605E+07	0.1258E+08	-0.8074E+06	-0.3742E+07	0.5444E+07
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-0.5176E+07	-0.6605E+07	-0.1258E+08	0.8074E+06	0.3742E+07	-0.5444E+07
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.1680E+08	0.5562E+07	0.1994E+07	0.1481E+08	0.1338E+08	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	-0.1994E+07	-0.5562E+07	-0.1680E+08	0.1481E+08	0.1338E+08	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*    I=INSIDE    C=CENTER    O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.7575E+07	0.9761E+07	0.2067E+08	-0.2982E+06	-0.5907E+07	0.1026E+08
C	0.2399E+07	0.3156E+07	0.8089E+07	0.5092E+06	-0.2164E+07	0.4815E+07
O	-0.2776E+07	-0.3449E+07	-0.4487E+07	0.1317E+07	0.1578E+07	-0.6289E+06

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.2788E+08	0.9053E+07	0.1072E+07	<u>0.2680E+08</u>	0.2384E+08
C	0.1118E+08	0.3410E+07	-0.9413E+06	0.1212E+08	0.1063E+08
O	-0.1638E+07	-0.2938E+07	-0.6137E+07	0.4499E+07	0.4011E+07

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.2522E+07	0.2811E+07	0.8697E+06	-0.7839E+07	-0.3457E+07	0.4010E+07
C	-0.1258E+07	-0.1951E+07	-0.4690E+07	0.1440E+07	0.1980E+07	-0.1962E+07
O	0.1958E+07	0.3262E+07	0.4375E+07	-0.4274E+07	-0.2172E+07	0.2275E+07

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.1284E+08	-0.1414E+07	-0.5219E+07	0.1805E+08	0.1648E+08
C	-0.7512E+05	-0.1042E+07	-0.6781E+07	0.6706E+07	0.6279E+07
O	0.9038E+07	0.2290E+07	-0.1733E+07	0.1077E+08	0.9427E+07

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.1010E+08	0.1257E+08	0.2153E+08	-0.8137E+07	-0.9364E+07	0.1427E+08
C	0.1142E+07	0.1205E+07	0.3399E+07	0.1949E+07	-0.1838E+06	0.2853E+07
O	-0.8180E+06	-0.1876E+06	-0.1115E+06	-0.2957E+07	-0.5939E+06	0.1646E+07

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	0.3733E+08	0.6727E+07	0.1476E+06	0.3718E+08	0.3437E+08	0.000
C	0.5567E+07	0.1993E+07	-0.1814E+07	0.7381E+07	0.6393E+07	
O	0.3210E+07	-0.6361E+06	-0.3691E+07	0.6901E+07	0.5990E+07	0.000

## APPENDIX A : Design Pressure

Linearized Stress Intensity for **Path 3** of fixed frame each load cases

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 3      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*

INSIDE NODE =1011413      OUTSIDE NODE =1007466

LOAD STEP      1    SUBSTEP=      1  
TIME=      1.0000      LOAD CASE=    0

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

\*\* MEMBRANE \*\*

SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
0.9961E+07	0.4187E+07	0.9861E+07	0.7527E+07	-0.3142E+07	0.9212E+06
S1	S2	S3	SINT	SEQV	
0.1535E+08	0.1048E+08	-0.1820E+07	<u>0.1717E+08</u>	0.1533E+08	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1888E+08	-0.7795E+07	-0.1477E+08	-0.1622E+08	0.5940E+07	-0.1513E+07
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	0.1888E+08	0.7795E+07	0.1477E+08	0.1622E+08	-0.5940E+07	0.1513E+07
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.5425E+07	-0.1607E+08	-0.3080E+08	0.3623E+08	0.3156E+08	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.3080E+08	0.1607E+08	-0.5425E+07	0.3623E+08	0.3156E+08	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.8923E+07	-0.3608E+07	-0.4906E+07	-0.8689E+07	0.2798E+07	-0.5916E+06
C	0.9961E+07	0.4187E+07	0.9861E+07	0.7527E+07	-0.3142E+07	0.9212E+06
O	0.2884E+08	0.1198E+08	0.2463E+08	0.2374E+08	-0.9082E+07	0.2434E+07

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.3621E+07	-0.5568E+07	-0.1549E+08	0.1911E+08	0.1655E+08
C	0.1535E+08	0.1048E+08	-0.1820E+07	0.1717E+08	0.1533E+08
O	0.4614E+08	0.2656E+08	-0.7239E+07	<u>0.5338E+08</u>	0.4677E+08

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	9255.	0.1030E+07	0.6341E+07	0.2124E+07	-0.3568E+07	0.9596E+06
C	0.5204E+06	0.1002E+06	-0.3815E+07	-0.4382E+06	0.2046E+07	-0.7498E+05
O	-0.5372E+07	0.8568E+06	0.3524E+07	0.5595E+07	-0.1261E+08	0.6969E+07

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.8134E+07	0.1983E+07	-0.2737E+07	0.1087E+08	0.9442E+07
C	0.1236E+07	0.2605E+06	-0.4691E+07	0.5927E+07	0.5505E+07
O	0.1499E+08	0.1158E+07	-0.1714E+08	0.3213E+08	0.2791E+08

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.8913E+07	-0.2578E+07	0.1434E+07	-0.6565E+07	-0.7704E+06	0.3680E+06
C	0.1048E+08	0.4288E+07	0.6046E+07	0.7088E+07	-0.1096E+07	0.8462E+06
O	0.2347E+08	0.1284E+08	0.2815E+08	0.2934E+08	-0.2169E+08	0.9403E+07

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	0.2339E+07	0.6394E+06	-0.1304E+08	0.1537E+08	0.1460E+08	0.000
C	0.1512E+08	0.6330E+07	-0.6363E+06	0.1576E+08	0.1368E+08	
O	0.5102E+08	0.3548E+08	-0.2204E+08	0.7305E+08	0.6666E+08	0.000