KAERI/TR-3355/2007

KALIMER-600 지진해석모델 개발 및 시간이력 지진응답해석

Development of Seismic Analysis Model and Time History Analysis for KALIMER-600

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소소장 귀하

본 보고서를 “KALIMER-600 지진해석모델 개발 및 시간이력 지진응답해석”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

2007년 02월 09일

연 구 기 관 명 : 한국원자력연구소

과　　제　　명 : 액체금속로 기계설계 기술개발

주　　저　　자 : 구 경 회

공 동 저　　자 : 이 재 한

요 약 문

본 보고서에서는 소듐냉각고속로 KALIMER-600에 대한 지진해석모델을 개발하고 시간이력 지진응답해석을 수행하여 주요 기기 및 구조물에서의 지진응답을 분석결과를 기술하였다. 단순지진해석모델을 개발하기 위하여 각 주요 기기, 이차열전달계통 배관시스템, 그리고 원자로 건물에 대한 상세 유한요소해석을 통한 동특성 해석을 수행하여 개발된 단순모델의 정확성을 검증하였다. 단순지진해석모델을 사용하여 면진설계와 비면진설계 조건에 대한 시간이력지진해석을 수행하고 층응답스펙트럼 계산결과를 상호 비교분석하여 KALIMER-600의 면진성능과 지진건전성을 확인하였다.

ABSTRACT

This report describes a simple seismic analysis model of the KALIMER-600 sodium cooled fast reactor and its application to the seismic time history analysis. To develop the simple seismic analysis model, the detailed 3-D finite element analyses for main components, IHTS piping system, and reactor building were carried out to verify the dynamic characteristics of each part of simple seismic analysis models. By using the developed simple model, the seismic time history analyses for both cases of a seismic isolation and non-isolation design of KALIMER-600 were performed. From the comparison of the calculated floor response spectrum, it is verified that the seismically isolated KALIMER-600 reactor building shows a great performance of a seismic isolation and assures a seismic integrity.

목 차

표 목 차

그 림 목 차

1. 서 론

현재 개발중인 KALIMER-600 소듐냉각고속로는 지속성, 경제성, 안전성, 그리고 핵확산저항성을 모두 갖춘 미래형 원자로로 개념설계가 진행 중에 있다. 본 보고서에서는 경제성과 안전성을 확보하기 위해 면진설계(Seismic Isolation Design) 기술이 적용된 KALIMER-600 원자로에 대한 시간이력 지진응답해석을 위한 지진해석모델 개발내용을 상세히 기술하였다. 개발된 해석모델을 사용하여 설계인공지진하중에 대한 시간이력 지진응답해석을 수행하고 비면진설계 해석결과와의 비교검토를 통해 면진성능을 분석하였다.

원자로 시스템에 대한 단순지진 해석모델 개발을 위하여 원자로용기 내의 일차소듐냉각재의 영향을 고려한 단순지진해석모델을 개발할 필요가 있다. 실제로 유체-구조물 상호작용에 의한 유체부가질량에 대한 많은 연구결과들로부터 유체부가질량이 원자로구조물의 동특성에 미치는 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났으며 [1 ~ 6] 본 연구에서 이러한 영향을 고려하기 위하여 상세유한요소 해석모델에서 원자로용기와 일차냉각재의 상호작용을 고려한 모델을 사용하여 상세 고유진동수 해석을 통해 단순해석모델을 개발하였다.

원자로 건물에 대한 면진설계 기술을 개발하기 위하여 핵심기술인 면진장치에 대한 많은 연구들이 수행된 바 있다 [7 – 14]. 그리고 고감쇠 적층고무베어링을 사용한 소듐냉각고속로 면진설계 지침서(안)이 개발되고 [15] 이러한 면진장치를 적용한 KALIMER-150에 대한 원자로시스템의 상세 지진응답평가가 수행된 바 있다 [16 ~ 19]. 본 보고서에서는 용량이 600MWe 급으로 격상된 KALIMER-600의 원자로 건물, 원자로시스템, 격납용기, 이차열전달계통 배관, 증기발생기, 면진장치 등을 고려한 단순지진해석모델을 개발하고 면진설계와 비면진설계의 경우에 대한 시간이력 지진응답해석을 수행하여 비교분석 결과들을 기술하였다. 단순지진해석모델 개발을 위해 상세 유한요소해석모델을 사용한 동특성 해석을 수행하여 단순모델의 정확성을 확인하였다. 이차열전달계통 배관에 대해서는 자중 및 진동특성을 고려한 지지물설계 개념을 제시하고 최적의 배관지지물을 설정하여 시간이력 지진응답해석에 고려하였다.

2. KALIMER-600 구성

개념설계 중인 KALIMER-600 원자로에 대한 주요 기기 및 계통의 구성은 다음과 같다.

1. 원자로시스템 (Reactor System)
2. 격납용기 (Containment Vessel)
3. 중간열교환 배관계통 (IHTS Piping System)
   - 고온관 (Hot Leg)
   - 저온관 (Cold Leg)
   - 흡입관 (Suction Leg)
4. 전자펌프 (Electro Magnetic Pump)
5. 증기발생기 (Steam Generator)
6. 원자로 지지벽 (RX Support Wall)
7. 원자로건물 (Reactor Building)
8. 면진장치 (Seismic Isolators)

Fig. 1은 개념 설계중인 KALIMER-600 원자로 시스템의 형상을 보여 준다. 그림에서와 같이 원자로시스템은 2-루프의 중간열교환 시스템으로 되어 있으며 2개의 증기발생기를 가지고 있다. 풀형인 원자로 시스템의 용기는 냉각재를 비롯한 노심, 중간열교환기(4개), 일차냉각펌프(2개), 노내상부구조물, 그리고 노심지지물을 비롯한 각종 내부구조물을 포함하고 있는 원자로용기와 이를 에워싼 격납용기로 이중용기 구조를 하고 있다. 중간열교환기와 증기발생기를 연결하는 고온배관 형상은 각 중간열교환기에서 나온 2개의 고온배관이 하나의 대형배관으로 합쳐져서 증기발생기로 들어가고 하나의 증기발생기에서 나온 다시 2개의 저온배관은 다시 동축배관을 통해 각 중간열교환기와 연결된다.

KALIMER-600 원자로건물 전체는 Site-independent한 설계와 지진하중을 최소화하기 위하여 면진설계가 적용되어 있다.

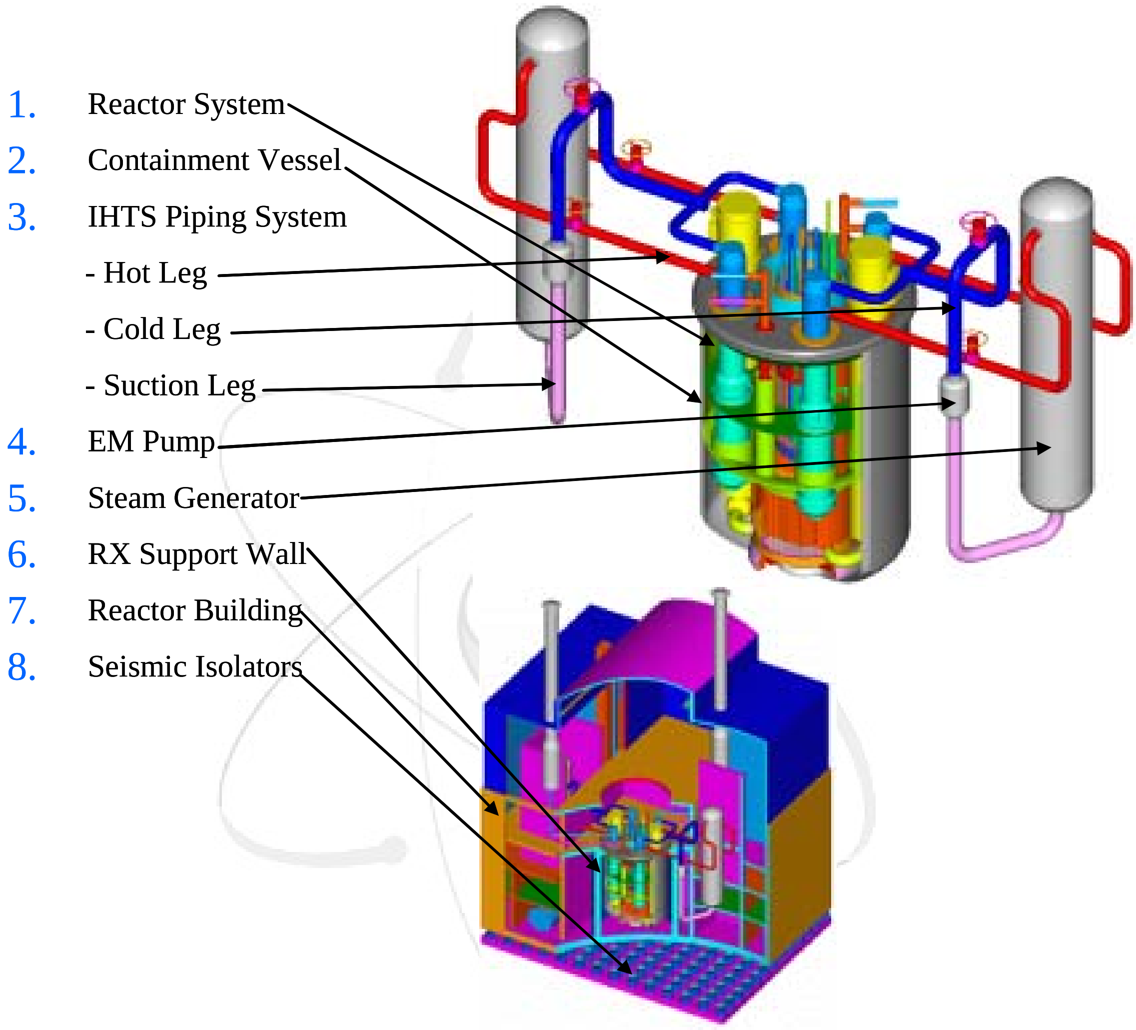


Fig. 1 Concept of KALIMER-600 System

3. 지진해석모델

본 장에서는 KALIMER-600의 주요기기, 이차열전달계통 배관, 원자로 건물 등에 대한 설계지진하중을 생산하고 시스템 전반에 대한 면진설계 평가를 위하여 단순지진해석모델 개발에 대한 세부내용을 기술하고자 한다.

단순지진해석모델 개발과 관련하여 본 연구에서 설정한 기본요건 사항은 다음과 같다.

- 총목표 절점수 = 80개 이하
- 원자로건물 절점은 모든 주요기기 및 지지점 포함
- 주요기기 거동을 고려한 중간열교환계통 배관의 지진해석모델 작성
- 유체-구조물 상호작용을 고려한 원자로시스템 지진해석모델 작성
- 원자로건물 비틀림 및 라킹을 고려한 면진장치 해석모델 작성
- 각 부분의 상세 유한요소 해석결과와 단순해석모델의 고유진동수 일치

Fig. 2는 본 연구에서 설정한 KALIMER-600 전체 시스템에 대해 위의 기본요건을 고려하여 개발하고자 하는 단순지진해석모델 개념을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전체 목표 사용절점은 총 80개이다. 그리고 주요 기기, 배관계통, 그리고 건물과의 연결부위는 상호연계거동을 고려하여 자유도를 연계시키는 연계절점을 사용하였다.

수치해석에는 ANSYS 범용 유한요소해석코드를 사용하였다.

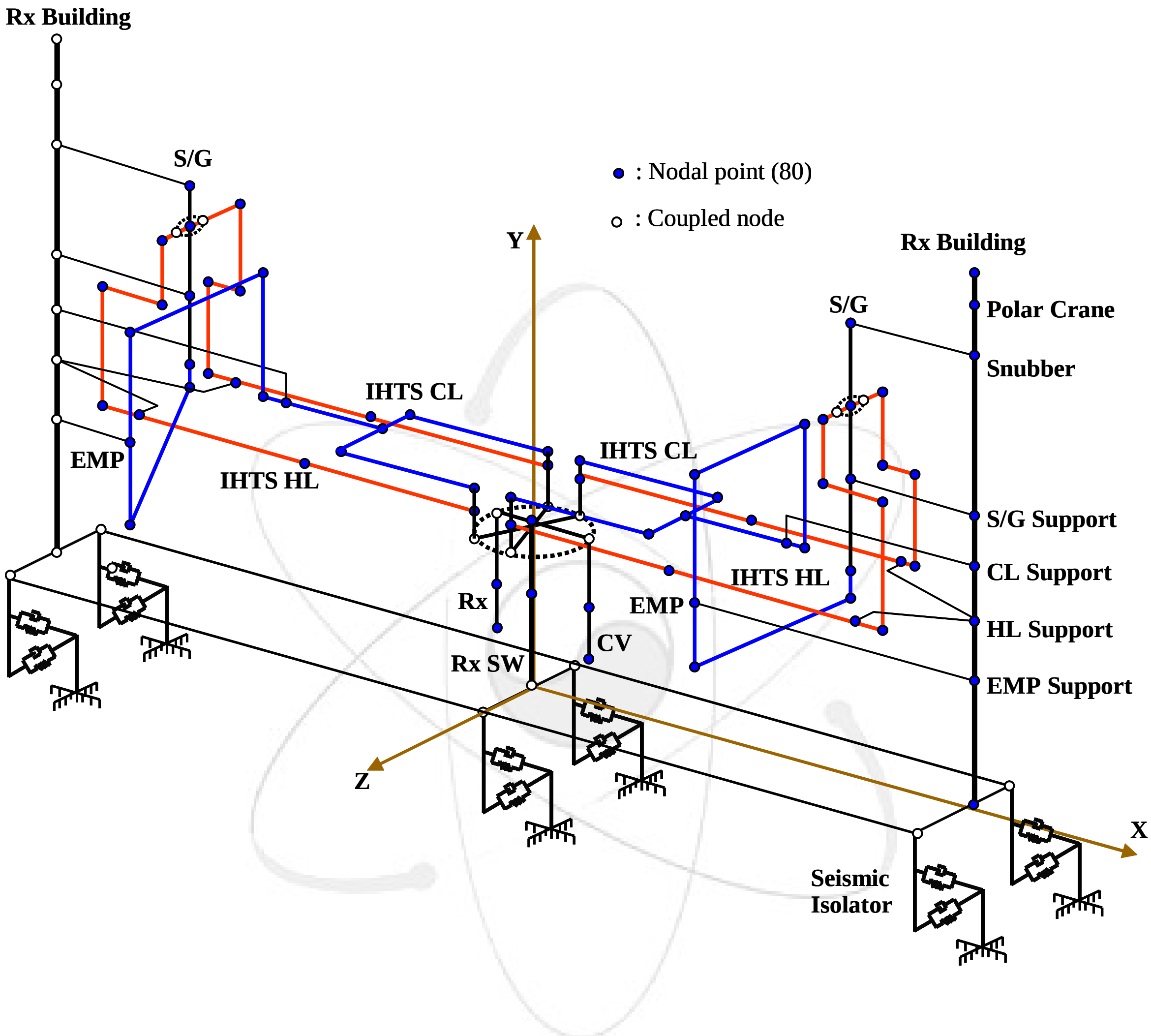


Fig. 2 Concept of KALIMER-600 Seismic Analysis Model

3.1 원자로시스템

KALIMER-600 원자로 시스템은 풀형으로 원자로용기 내에는 냉각재를 비롯한 중간열교환기, 일차펌프, 노심 핵연료, 노내상부구조물 등 각종 주요 기기 및 부품들을 포함하고 있다. 특히, 이러한 원자로용기는 고온 냉각재의 온도구배로 인한 열응력 영향의 최소화를 위하여 기존 가압경수로 원자로에 비하여 훨씬 얇은 용기두께(5cm)로 설계되며 이러한 설계개념은 지진하중에 대한 취약점으로 나타난다.

원자로용기에 대한 재질은 316 스테인레스강이다.

3.1.1 상세 유한요소 해석모델

복잡한 원자로시스템에 대한 단순내진해석모델 개발을 위하여 원자로 내부구조물을 비롯한 노심 핵연료집합체는 단순부가질량으로 고려하고 일차냉각재는 박막원자로용기와의 유체-구조물 상호작용을 고려한 원자로용기에 대한 상세 유한요소 해석모델을 개발하였다. Fig. 3(a)는 원자로시스템에 대한 개념과 주요 부위에서의 높이에 대한 치수를 나타낸 것이며 Fig. 3(b)는 유체-구조물 상호작용을 고려한 상세 유한요소 해석모델을 작성하기 위한 개념을 나타낸 것이다.

해석모델 개발에 사용된 일반적인 가정은 다음과 같다.

- 원자로용기-소듐냉각재 상호작용에 있어 내부기기, 노심 및 원자로내부구조물의 영향은 무시
- 노심을 비롯한 모든 내부구조물은 원자로하부헤드에 균일분포
- 중간열교환기, 일차냉각펌프, 노내상부구조물, 그리고 노내핵연료 교환장치의 관성질량은 모두 원자로헤드에 작용
- 원자로용기 상부 끝단의 변형은 무시

Fig. 4는 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 그림에서 원자로용기 모델에 사용된 유한요소는 ANSYS에서 제공하는 SHELL63 (Elastic Shell Element) 요소를 사용하였고 일차냉각수인 소듐은 FLUID30 (3-D Acoustic Fluid Element) 요소를 사용하였다. 사용된 총 절점 갯수는 3921개이며 요소 수는 3800개이다.

일반가정에서 기술한 바와 같이 원자로 하부헤드에 작용하는 노심핵연료집합체 및 원자로내부구조물의 관성질량은 하부헤드의 모두 균일하게 작용하는 것으로 가

정하고 하부헤드의 등가밀도(Equivalent density)를 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\rho_{eq} &= (M_{core} + M_{RI} + M_{BH}) / V_{BH} \\ &= (330\,tons + 183\,tons + 50\,tons) / 6.39 \\ &= 88.1\ tons/m^3\end{aligned}$$

위의 계산식에서 노심핵연료집합체에 사용된 무게의 상세내용은 Table 1에 나타나 있으며 원자로내부구조물에 대한 무게는 다음과 같다.

M_{RI} = Core Support + Inlet Plenum + Support Barrel +
Reactor Baffle + Baffle Plate + Former Ring +
Core Shield + Inlet Plate
= (24.67 + 72.3 + 65.0 + 109.8 + 8.33 + 3.41 + 7.7 +2.1) tons
= 183 tons

원자로용기 하부헤드 자체의 부피는 Fig. 4의 치수를 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned}V_{BH} &= S \cdot t \\ &= 2\pi r h t \\ &= \pi (a^2 + h^2) t \\ &= \pi (5.68^2 + 2.9^2) \cdot 0.05 \\ &= 6.39\,m^3\end{aligned}$$

해석에 사용된 재료물성치는 ASME 설계규정에서 제시한 자료를 사용하였으며 정상운전 조건에서 원자로용기와 접하는 저온풀의 냉각재 온도인 370℃ 재료물성치를 사용하였다.

3.1.2 단순 내진해석모델

원자로시스템에 대한 시간이력지진해석을 수행하기 위해 Fig. 5와 같은 단순내진해석모델을 설정하였다. 그림에서와 같이 총 절점 개수는 3개이며 절점 N1은 원자로헤드와 주기기의 관성질량을 포함하고 있고 절점 N3은 원자로용기 하부헤드

및 내부구조물과 노심 등의 관성질량을 포함한다. 일차냉각재의 총 무게는 1000 tons으로 가정하였으며 다음과 같이 계산하였다.

$$
\begin{aligned}
M_s &= \rho_s V \\
&= \rho_s \cdot \frac{\pi}{4} D_i^2 \cdot L \\
&= 820 \cdot \frac{\pi}{4} 11.31^2 \cdot 12.25 \\
&\approx 1000\, tons
\end{aligned}
$$

일차냉각재의 무게는 절점 N2에 400 tons 그리고 절점 N3에 600 tons이 각각 작용하는 것으로 가정하였다.

원자로시스템의 단순내진해석 모델에 사용된 총 관성질량은 2236 tons 이며 각 절점에 부여된 관성질량을 다음과 같다.

M_{N1} = M(IHX + Pump + UIS + Rx Head + Insulation Plate + Rotating Plug)
= (30 + 30 + 22.96 + 239.44 + 49.94 + 90.48) tons
= 463 tons

M_{N2} = 40 % Sodium
= 400 tons

M_{N3} = M(Core + Rx Internals + RV Bottom Head + 60 % Sodium)
= (330 + 183.21 + 49.833 + 600) tons
= 1163 tons

Rotary Inertia of RV Head (N1) :

$$
\begin{aligned}
I_y &= M_{node1} \cdot r^2 \\
&= 463 \cdot 5.8675^2 \\
&= 15.94E6\ kg \cdot m^2
\end{aligned}
$$

Rotary Inertia of RV Bottom Head (N2) :

$$
\begin{aligned}
I_x = I_z &= (M_{core} + M_{RVBH}) \cdot r^2 \\
&= (330 + 49.833) \cdot 10^2 \\
&= 37.983E6\ kg \cdot m^2
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
I_y &= (M_{core} + M_{RVBH}) \cdot r^2 \\
&= (330 + 49.833) \cdot 5.68^2 \\
&= 12.15E6\ kg \cdot m^2
\end{aligned}
$$

단순내진해석모델의 각 요소에 대한 보특성 자료는 다음과 같다.

Cross Sectional Area of Shell Side :

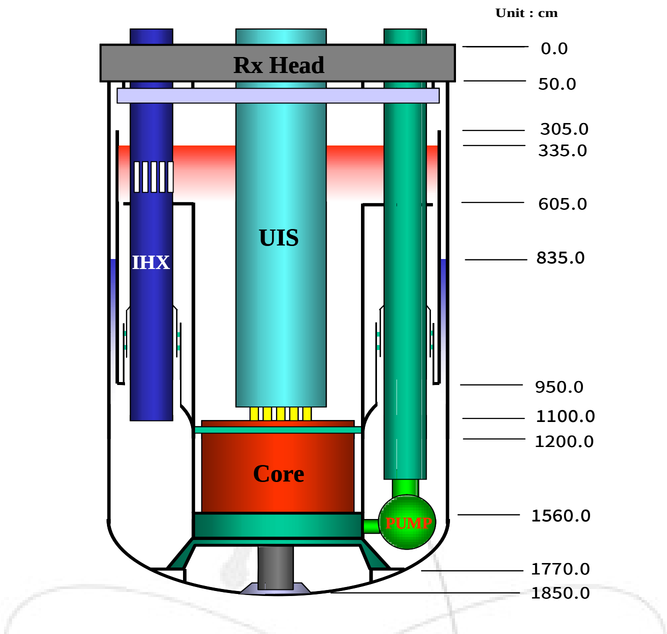
$$A = \frac{\pi}{4}\left(D_o^2 - D_i^2\right) = \frac{\pi}{4}\left(11.41^2 - 11.31^2\right) = 1784.423x10^{-3}\ m^2$$

Area Moment of Inertia of Shell Side :

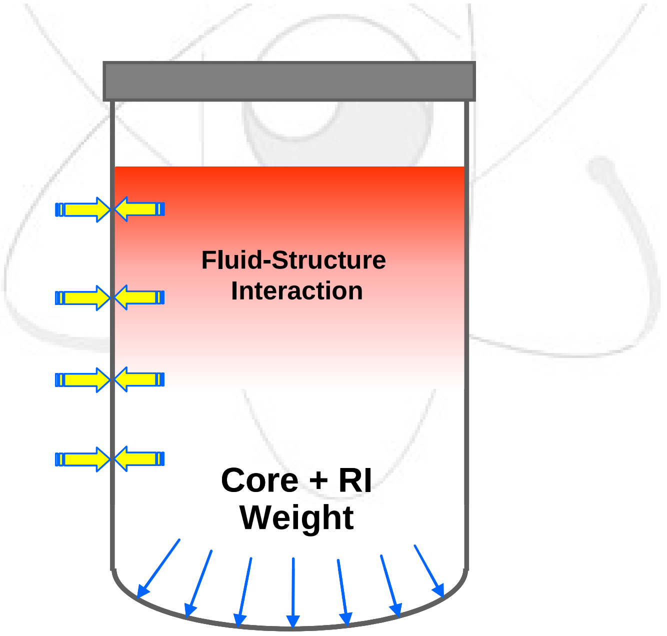
$$I_{zz} = \frac{\pi}{4}\left(D_o^4 - D_i^4\right) = \frac{\pi}{4}\left(11.41^4 - 11.31^4\right) = 28785.4682x10^{-3}\ m^4$$

3.1.3 단순모델 검증

단순내진해석모델의 적합성을 검증하기 위하여 상세 유한요소 해석모델과 제시된 단순모델의 고유진동수 일치성을 비교평가하였다. 해석결과 상세모델에 대한 1차 고유진동수는 6.46 Hz이며 단순모델의 경우는 6.43 Hz로 거의 일치한 결과를 나타나내었다. Fig. 6은 굽힘 진동모우드를 갖는 1차 고유진동수에 대한 상세모델과 단순모델을 비교해 놓은 것으로 두 진동모우드가 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 개발된 원자로시스템의 단순내진해석모델은 시간이력지진해석에 적합한 것으로 검증되었다.



(a) Elevation of Reactor System



(b) Concept of Fluid-Structure Interaction Model

Fig. 3 Concept of Rx System Detail Modeling

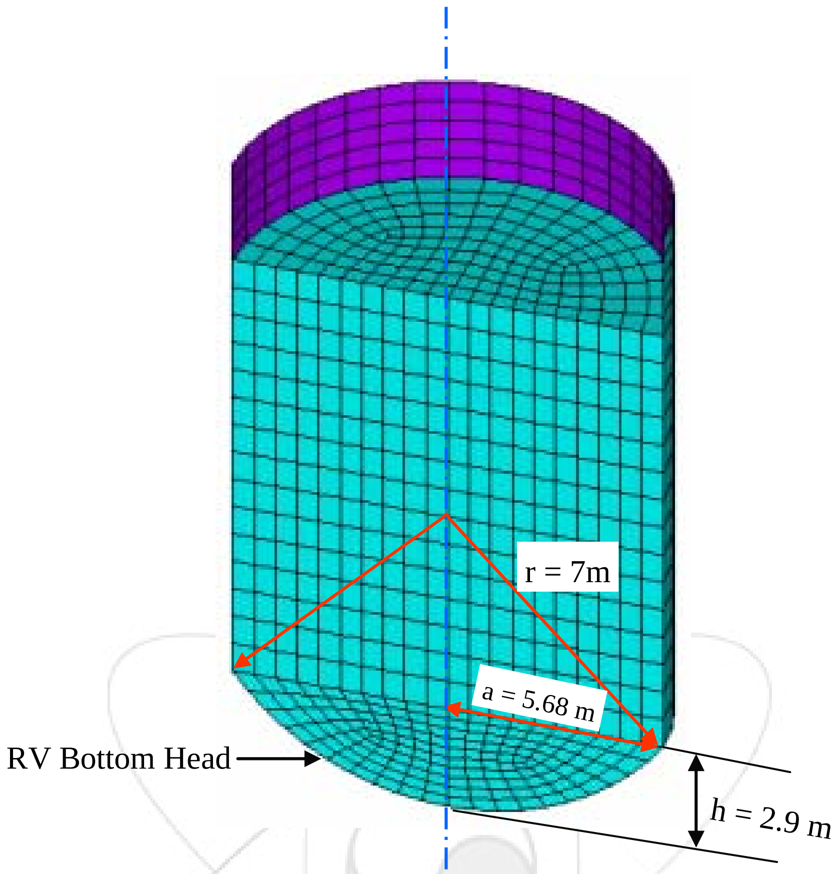


Fig. 4 Detail Finite Element Model for Rx System

Table 1 Summary of Total Weight of the Core System

Type	No. of Duct	Internal mass	Duct mass	Total mass
Driver fuel	336.0	63,036.9	32,088.0	95,124.9
Ctrl rod	12.0	0.0	1146.0	1146.0
USS	1.0	0.0	95.5	0.0
Reflector	72.0	53,640.0	6,876.0	60,516.0
B4C shield	78.0	58,110.0	7,449.0	65,559.0
IVS	114.0	21,387.5	10,887.0	32,274.5
Shield	90.0	67,050.0	8,595.0	75,645.0
Sum (kg)	703.0	263,224.4	67,136.0	330,360.9

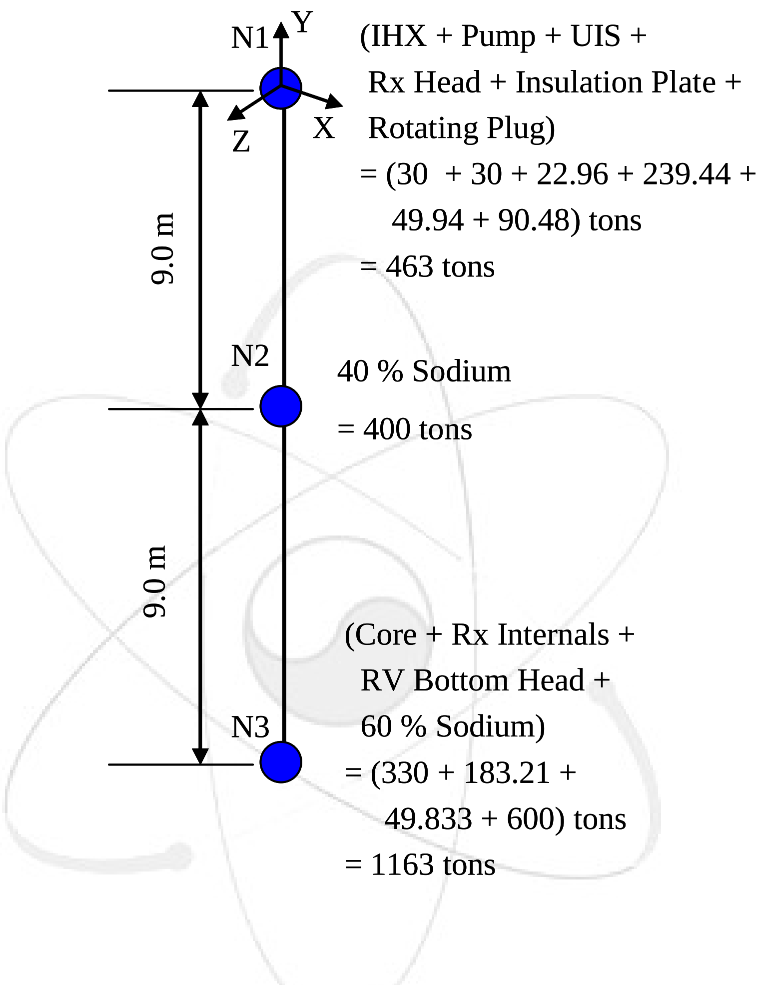
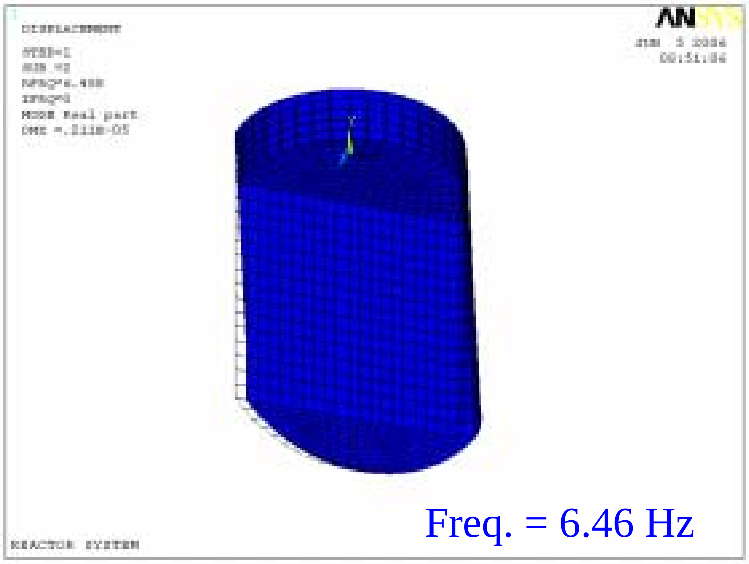
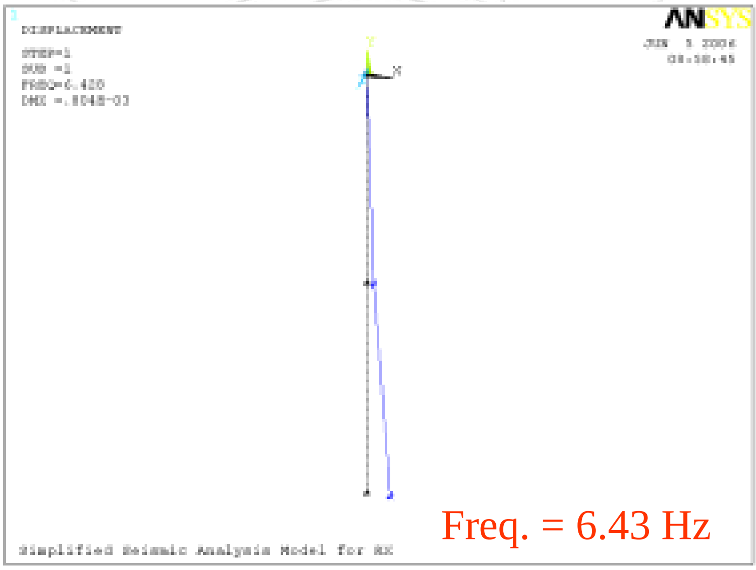


Fig. 5 Simple Seismic Model for Rx System



(a) for Detail Model



(b) for Simple Model

Fig. 6 Mode Shape for Rx System

3.2 격납용기

원자로용기 바깥을 둘러싸고 있는 격납용기는 사고시 원자로용기에서 누출된 일차 소듐냉각재가 외부로 유출되는 것을 차단하는 격납기능을 가지고 있다. 원자로용기와 마찬가지로 원자로헤드에서 지지되며 두께 2.5㎝, 외경 11.76㎝로 원자로용기와의 간격은 약 15㎝이다.

격납용기의 재질은 2(1/4)Cr-1Mo 강이다.

3.2.1 상세 유한요소 해석모델

Fig. 7은 1/2 대칭 상세 유한요소 해석모델은 나타낸 것이다. 해석모델에 사용한 유한요소는 SHELL63 (Elastic Shell Element)이며 총 절점 수는 368개이고 요소수는 336개이다. 격납용기가 지지되는 상단 끝은 강체로 가정하고 해석을 위한 경계조건으로서 끝단에 있는 모든 절점의 자유도를 구속하였다. 해석에 사용된 재료물성치는 ASME 설계규정에서 제시한 자료를 사용하였으며 정상운전 조건에서의 300℃ 재료물성치를 사용하였다.

3.2.2 단순 해석모델

격납용기에 대한 시간이력지진해석을 수행하기 위해 Fig. 8과 같은 단순내진해석모델을 설정하였다. 그림에서와 같이 총 절점 개수는 원자로시스템과 마찬가지로 3개이며 절점 N3은 격납용기 하부헤드의 관성질량을 포함한다. 격납용기의 실린더에 대한 관성질량은 보특성 자료의 단면 값에 따라 재료의 밀도를 고려하여 균일하게 요소에 적용하였다. 절점 N5에는 격납용기 하부헤드의 무게인 25.74 tons의 병진관성질량과 다음과 같은 회전관성질량을 부과하였다.

Rotary Inertia of CV Bottom Head (N5) :

$$I_x = I_z = M_{CVBH} \cdot r^2 = 25.738E3 \cdot 10^2 = 2.574E6\ kg \cdot m^2$$

$$I_y = M_{CVBH} \cdot a^2 = 25.738E3 \cdot 5.8675^2 = 886.1E3\ kg \cdot m^2$$

단순내진해석모델의 각 요소에 대한 보특성 자료는 다음과 같다.

Cross Sectional Area of Shell Side :

$$A = \frac{\pi}{4}\left(D_o^2 - D_i^2\right) = \frac{\pi}{4}\left(11.76^2 - 11.71^2\right) = 921.67x10^{-3}\,m^2$$

Area Moment of Inertia of Shell Side :

$$I_{zz} = \frac{\pi}{64}\left(D_o^4 - D_i^4\right) = \frac{\pi}{64}\left(11.76^4 - 11.71^4\right) = 15865.4x10^{-3}\,m^4$$

3.2.3 단순모델 검증

격납용기의 경우 길이(18.15m) 대비 직경(11.76m) 비가 0.65로 크고 얇은 두께(2.5cm)의 박막 구조로 인하여 일반적으로 쉘진동 모우드가 지배적일 것으로 기대된다. 실제적으로 해석결과 Fig. 9와 같이 격납용기의 1차 고유진동수는 8.44 Hz로 전형적인 쉘모우드로 나타나고 수평지진 하중시 문제가 되는 1차 보굽힘 진동모우드는 21.01 Hz로 13째 진동모우드에서 나타난다. 따라서 단순내진해석모델의 1차 고유진동수는 보굽힘모우드가 나타나는 21.01 Hz가 되어야 한다. Fig. 10은 상세모델과 단순모델에 대한 보굽힘 진동모우드 해석결과를 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 단순모델의 1차 고유진동수는 21.63 Hz로 상세모델의 보굽힘 진동모우드인 21.02 Hz와 거의 일치 한다. 따라서 개발된 격납용기의 단순내진해석모델은 시간이력지진해석에 적합한 것으로 검증되었다.

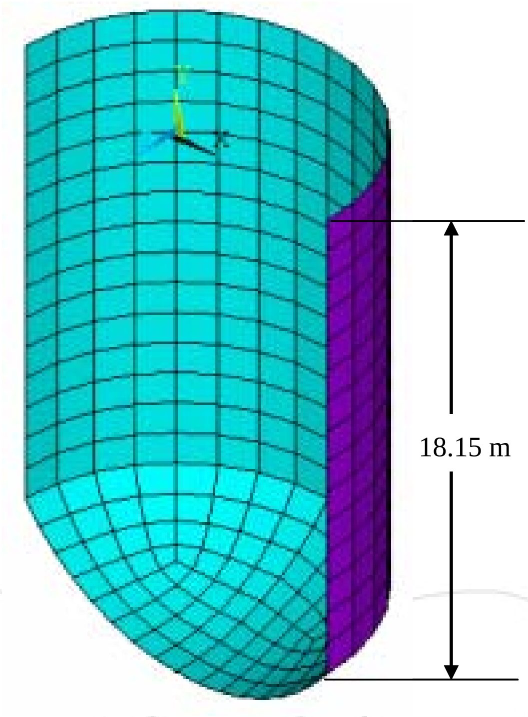


Fig. 7 Detail Finite Element Model of Containment Vessel

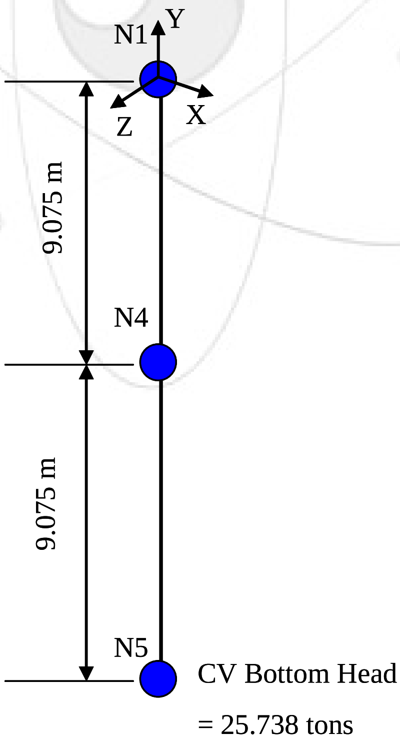


Fig. 8 Simple Model of Containment Vessel

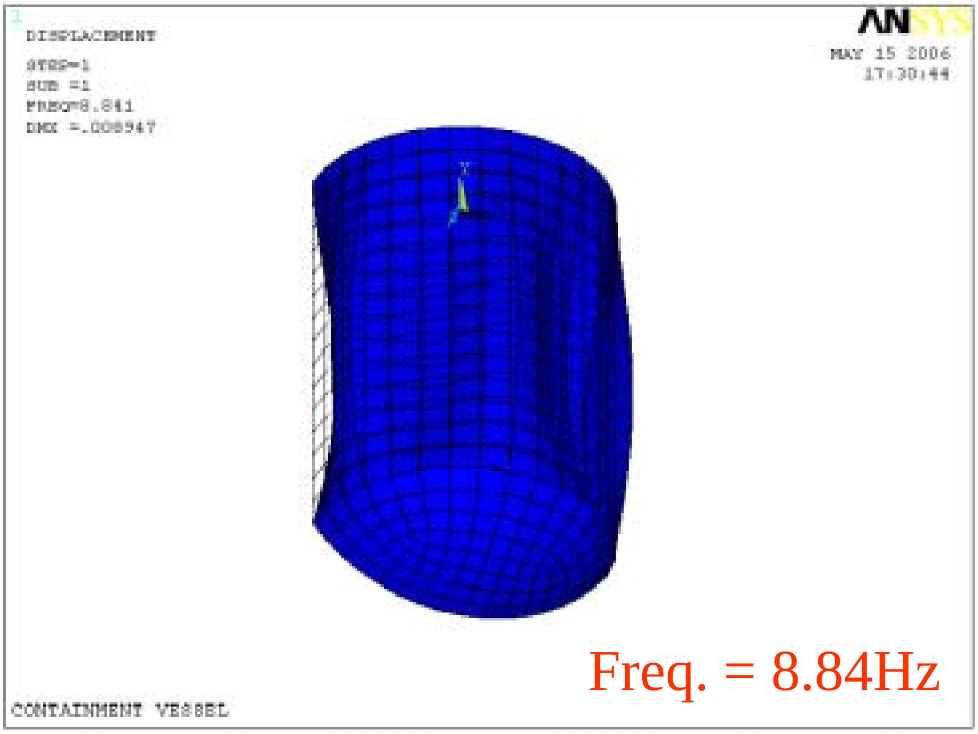
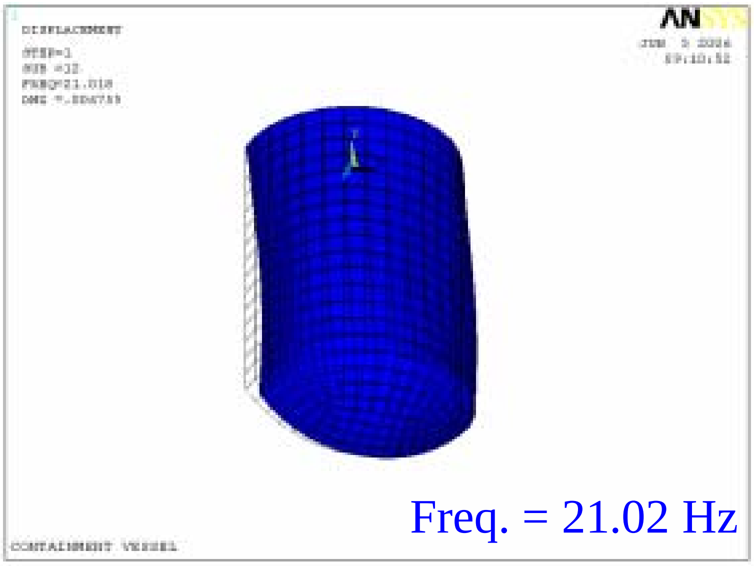
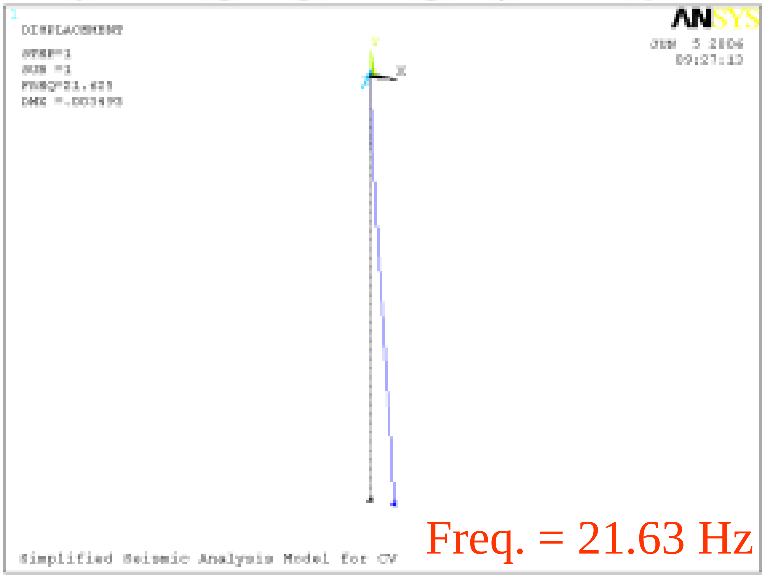


Fig. 9 Shell Vibration Model of Containment Vessel



(a) for Detail Model



(b) for Simple Model

Fig. 10 Model Shape of Containment Vessel

3.3 중간열전달계통 저온배관

KALIMER-600의 중간열전달계통 배관중에서 저온배관의 배치를 보면 증기발생기를 나와서 이차펌프를 지나온 하나의 대구경 배관이 2개의 중간열교환기와 연결되기 전에 2개의 소구경 배관으로 각각 나누어지는 특징을 가지고 있다. 저온배관에 적용된 설계해석 자료는 다음과 같다.

- 배관재료 = Modified 9Cr-1Mo 강
- 대구경 배관 외경 = 82 cm
- 소구경 배관 외경= 60 cm
- 대구경 배관 두께 = 1.25 cm
- 소구경 배관 두께 = 0.95 cm

3.3.1 상세 유한요소 해석모델

Fig. 11은 저온배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 151개, 총 요소수는 150개이다. 해석에 사용된 재료물성치는 ASME 설계규정에서 제시한 자료를 사용하였으며 정상운전 조건에서 2차 소듐냉각재 온도인 390℃ 재료물성치를 사용하였다.

저온배관에 대한 지지물 설계를 위해서 먼저 배관자중에 대한 응력해석을 수행하였다. Fig. 12은 배관자중에 대한 처짐해석을 수행한 결과에 대해 최대 처짐 변위가 발생하는 부위에 강체 수직지지물을 설치하는 개념을 나타낸 것이다. Fig. 13은 순수 배관자중에 의한 응력해석결과를 나타낸 것으로 최대 응력은 소구경 배관과 동축배관이 만나는 연결부위에서 발생하며 지지물이 없는 경우(Fig.13(a))에는 51 MPa로 나타났고 배관지지물을 설치할 경우(Fig. 13(b))에는 9.5 MPa로 크게 줄어 들었다. Fig. 14는 자중과 열팽창에 의한 복합하중에 대한 응력해석 결과를 나타낸 것으로 배관지지물을 설치할 경우 최대 응력이 약 7.3% 감소하는 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 15는 배관재료를 기존의 316SS나 2(1/4)cr-1Mo 강으로 했을 경우의 배관응력 해석결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 배관의 열팽창으로 인해 최대 응력이 크게 증가함을 알 수 있고 (316SS:292MPa, 2(1/4)Cr-1Mo:203MPa) 따라서 상대적으로 열팽창계수가 작은 Mod.9Cr-1Mo 강의 사용이 배관

설계에 매우 유리한 것으로 나타났다.

배관 고유진동수의 경우 배관지지물을 설치할 경우에는 4.3Hz에서 6.3Hz로 높아지며 이는 0.5Hz의 면진설계를 채택하는 KALIMER-600 원자로 배관설계에 유리하게 작용한다.

3.3.2 단순 해석모델

Fig. 16은 저온배관에 대한 단순 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 상세모델과 마찬가지로 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 13개, 총 요소수는 13개 이다. 상세유한요소 모델과의 동특성을 일치시키기 위하여 배관의 엘보우 곡관부위를 고려하여 각 직선배관에 대해 등가길이를 변화시킨 단순 해석모델을 설정하였다.

3.3.3 단순모델 검증

Fig. 17은 중간열전달계통 저온배관에 대한 상세 유한요소 모델과 단순 유한요소모델에 대한 1차 진동모우드 형상을 비교한 것이다. 상세 유한요소 해석모델의 경우 1차 고유진동수가 6.25Hz로 나타났으며 단순해석모델의 경우에는 6.07Hz로 나타나 해석모델 오차가 3% 정도로 잘 일치 하였다.

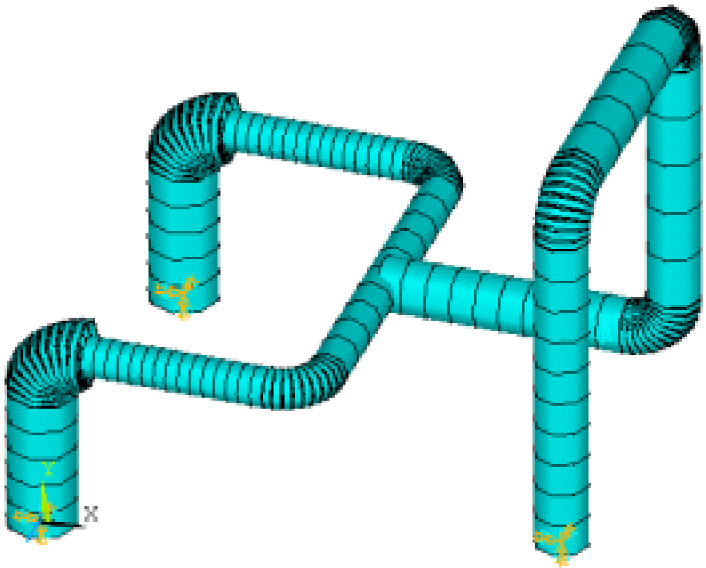


Fig. 11 Detail Finite Element Model of IHTS Cold Pipe System

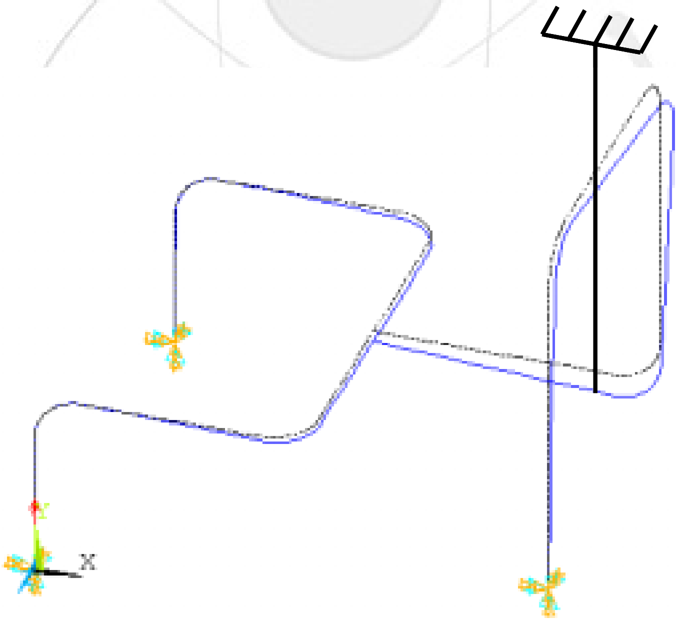
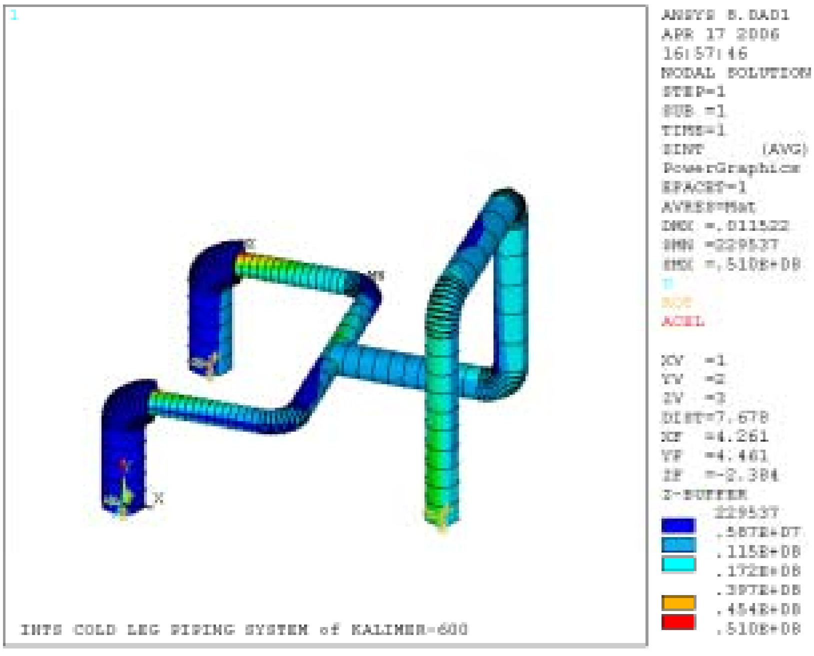
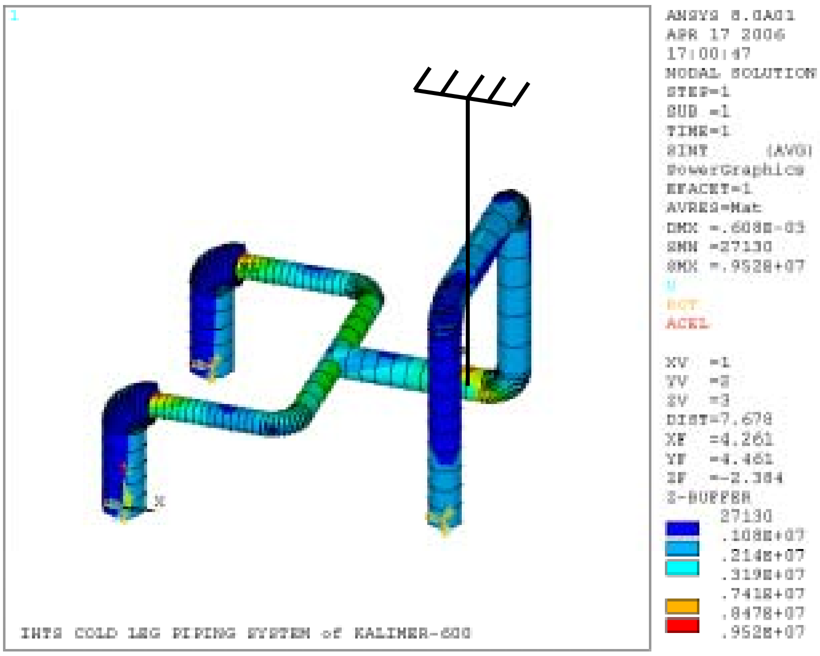


Fig. 12 Deflection Shape Induced by Dead Weight and Support Position

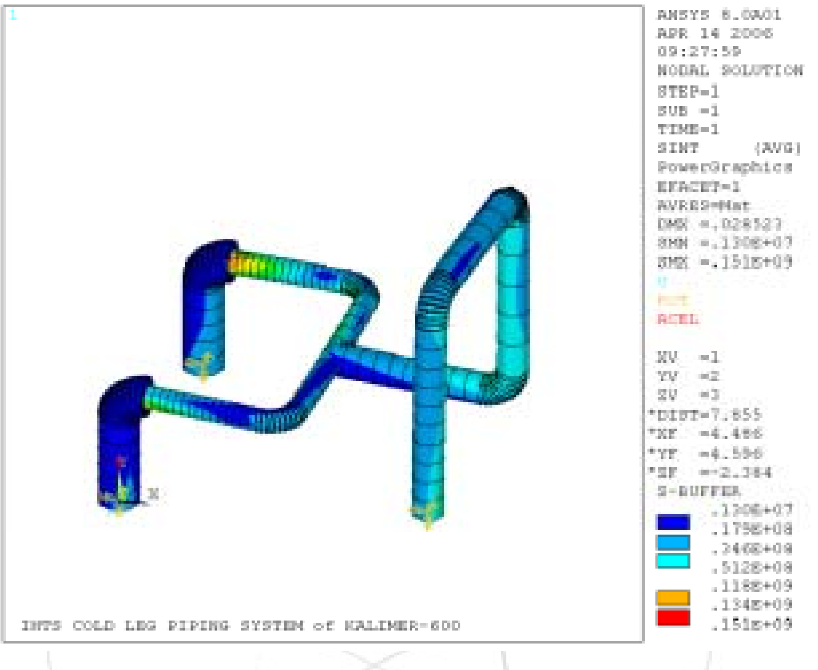


(a) Without Support (S_{max} = 51 MPa)

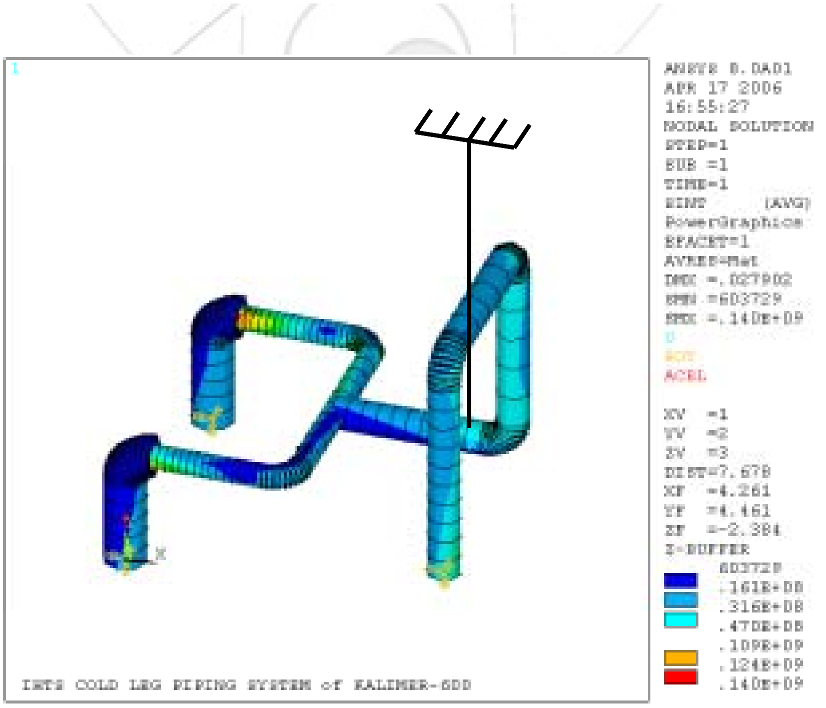


(b) With Support (S_{max} = 9.5 MPa)

Fig. 13 Stress Distribution for Dead Weight of IHTS Cold Piping System

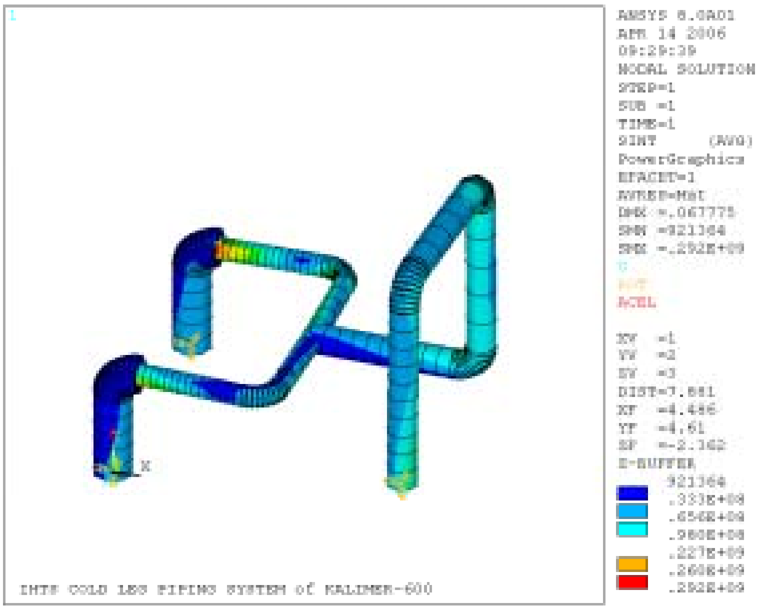


(a) Without Support (S_{max} = 151 MPa)

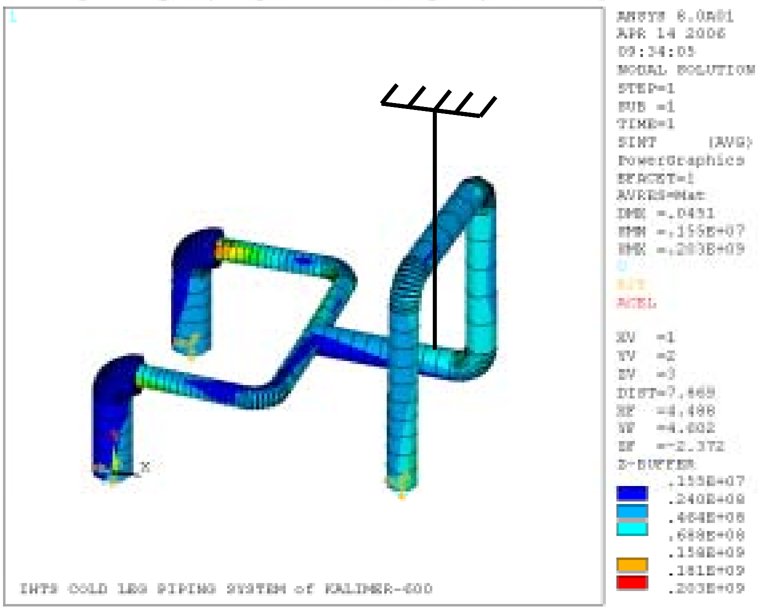


(b) With Support (S_{max} = 140 MPa)

Fig. 14 Stress Distribution for (Dead Weight + Thermal) of IHTS Cold Piping System



(a) For 316 SS Material



(b) For 2 (1/4)Cr-1Mo Material

Fig. 15 Stress Distribution for (Dead Weight + Thermal) of IHTS Cold Piping System in Cases of Different Pipe Material

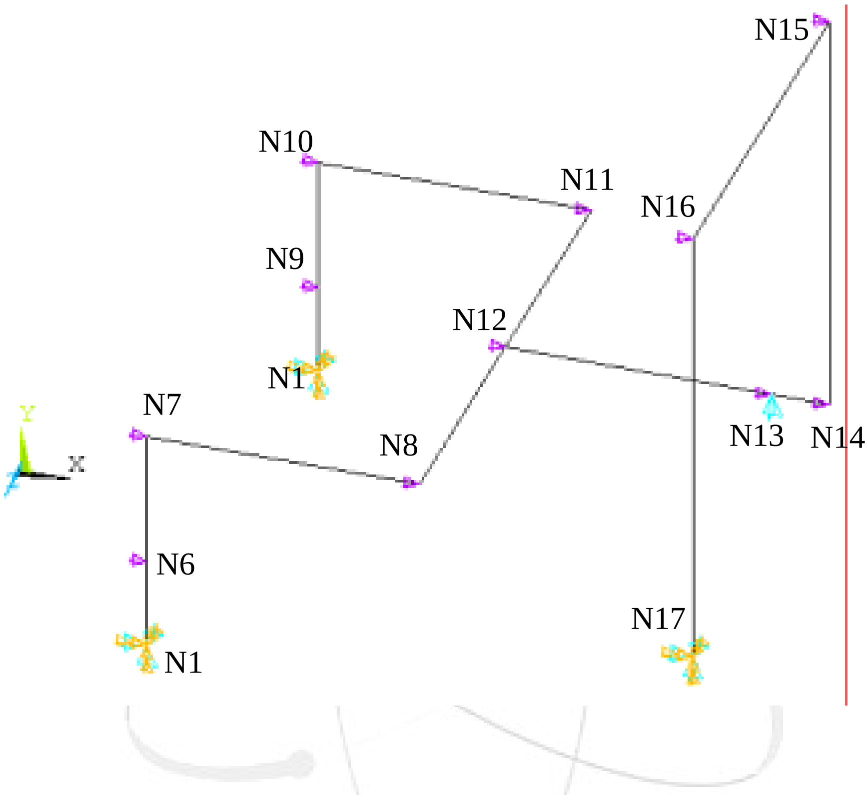
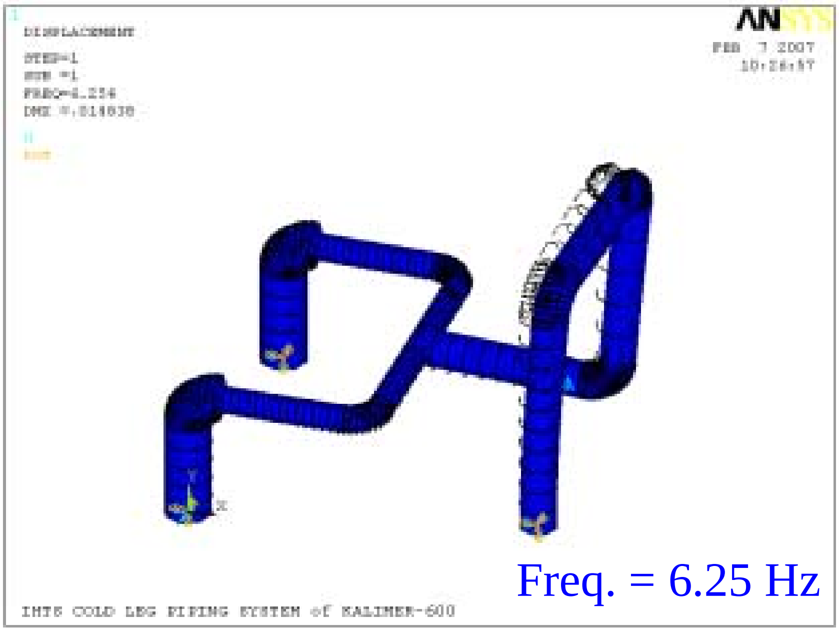
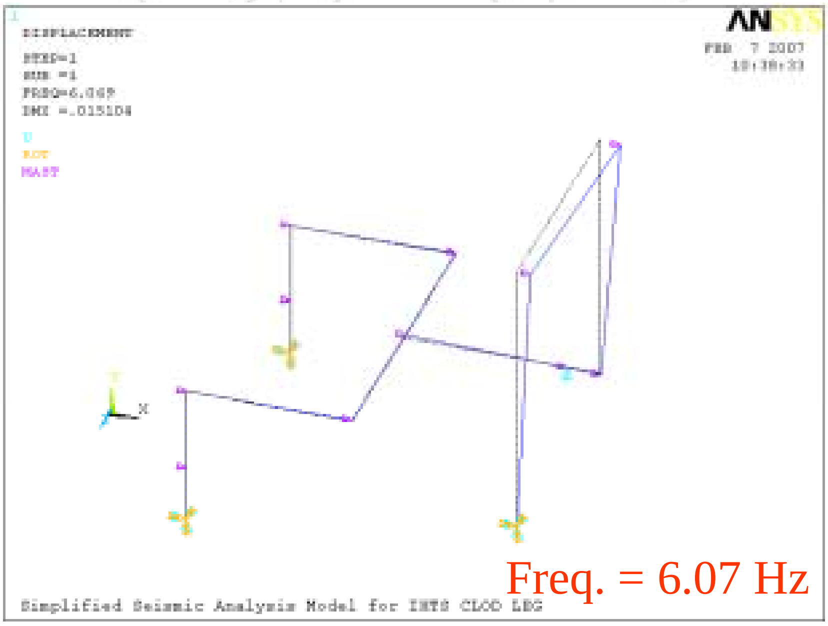


Fig. 16 Simple Seismic Analysis Model for IHTS Cold Piping System



(a) for Detail Model



(b) for Simple Model

Fig. 17 Model Shape of IHTS Cold Piping System

3.4 중간열전달계통 고온배관

각 중간열교환기와 연결된 동축배관을 나온 고온배관은 증기발생기 위치까지 직관으로 나와 있고 엘보우를 이용한 곡관을 형성하여 상단의 입력 노즐부와 연결된다. 고온배관의 재료는 저온배관과 마찬가지로 Mod.9Cr-1Mo 강이며 내경 60cm, 두께 0.95cm의 소구경 배관으로 되어 있다.

3.4.1 상세 유한요소 해석모델

Fig. 18은 고온배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 92개, 총 요소수는 91개이다.

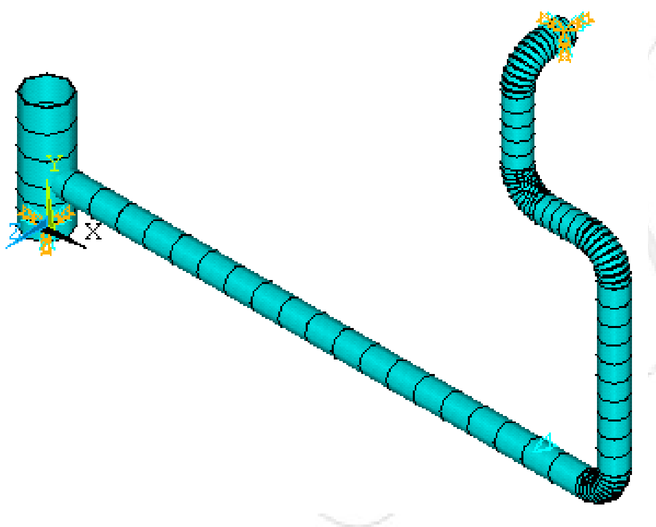


Fig. 18 Detail Finite Element Model for IHTS Hot Piping System

고온배관계의 자중에 대한 지지물 설치 타당성을 검토하기 위하여 순수 자중에 대한 응력해석을 수행하였다. 고온배관의 순수 자중에 의한 응력 및 처짐에 대한 해석결과 최대 응력은 저온배관과 마찬가지로 동축배관과의 연결부위에서 34MPa로 나타났고 최대 처짐은 직관부의 중심부에서 나타났다. 따라서 직관부위의 최대 처짐 부위에 수직 강체 지지물 설치를 고려하였다. Fig. 19는 지지물 설치 전후의 해석결과를 나타낸 것으로 강체 지지물을 설치할 경우 직관부의 수직 처짐이 크게 줄어

들었고 동축배관 연결부에서의 응력이 감소한 반면 최대 응력은 증기발생기 노즐부위에서 19.3MPa로 발생하였다. 그러나 Fig. 20과 같이 배관자중과 열팽창을 동시에 고려할 경우에는 직관부위의 수직 강체 지지물이 고온배관계의 수직방향 열팽창을 구속하기 때문에 그림에서와 같이 배관자중 없는 경우의 최대응력 107MPa에 비해 지지물을 설치할 경우에 최대응력이 129MPa로 오히려 증가하는 결과를 가져온다. 따라서 직관부의 수직 배관지지물 설치를 배제하였다.

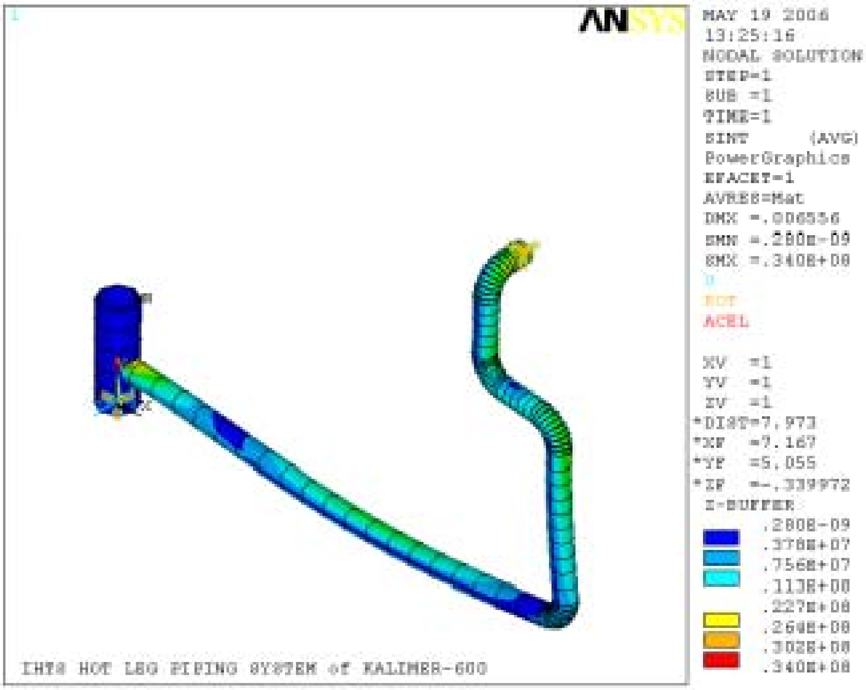
고온배관의 동특성을 고려한 지지물 설계를 검토하였다. Fig. 21의 진동모우드 해석결과에서와 같이 지지물이 없는 경우 고유진동수가 강지진주파수 범위에 속하고 2.7Hz의 수평 측면 진동이 지배적으로 나타났다. 따라서 배관의 수평 측면방향 지진하중에 매우 취약한 배관 동특성을 개선하기 위하여 직관부 끝단 부위에 측면 강체 지지물을 설치할 경우 Fig. 21(b)와 같이 고유진동수가 7.09Hz로 증가하고 수평 측면 진동모우드가 구속되는 효과를 나타냈다. 따라서 본 연구에서는 고온배관에의 직관부위 끝단에 지진동을 억제하기 위한 수평 측면 강체지지물을 설치하기로 하였다.

3.4.2 단순 해석모델

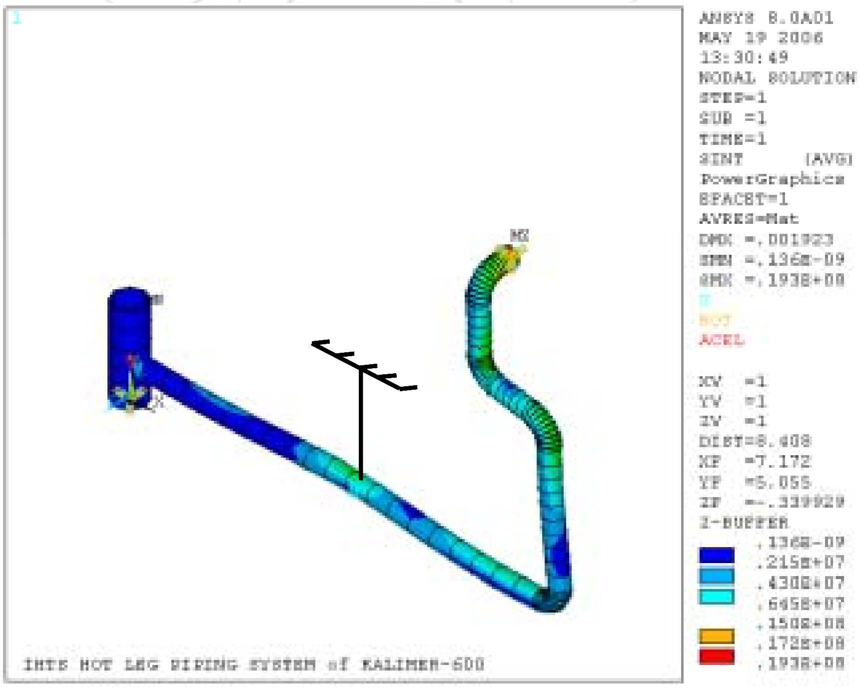
Fig. 22은 고온배관에 대한 단순 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 상세모델과 마찬가지로 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 8개, 총 요소수는 7개 이다. 상세유한요소 모델과의 동특성을 일치시키기 위하여 배관의 엘보우 곡관부위를 고려하여 각 직선배관에 대해 등가길이를 변화시킨 단순 해석모델을 설정하였다.

3.4.3 단순모델 검증

Fig. 23은 중간열전달계통 고온배관에 대한 상세 유한요소 모델과 단순 유한요소모델에 대한 1차 진동모우드 형상을 비교한 것이다. 상세 유한요소 해석모델의 경우 1차 고유진동수가 7.09Hz로 나타났으며 단순해석모델의 경우에는 6.94Hz로 나타나 해석모델 오차가 2.1% 정도로 잘 일치 하였다.

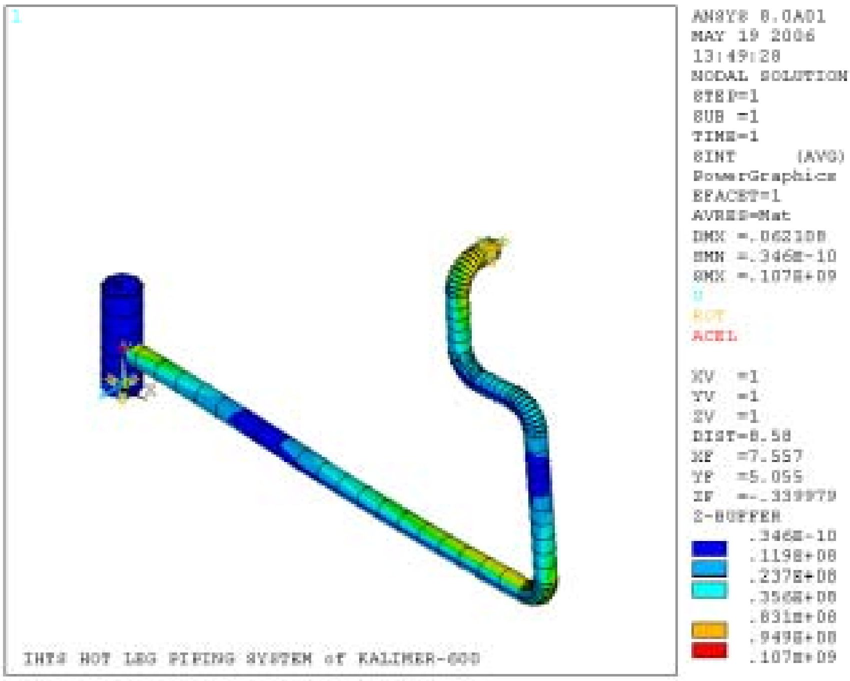


(a) Without Support (S_{max} = 34 MPa)

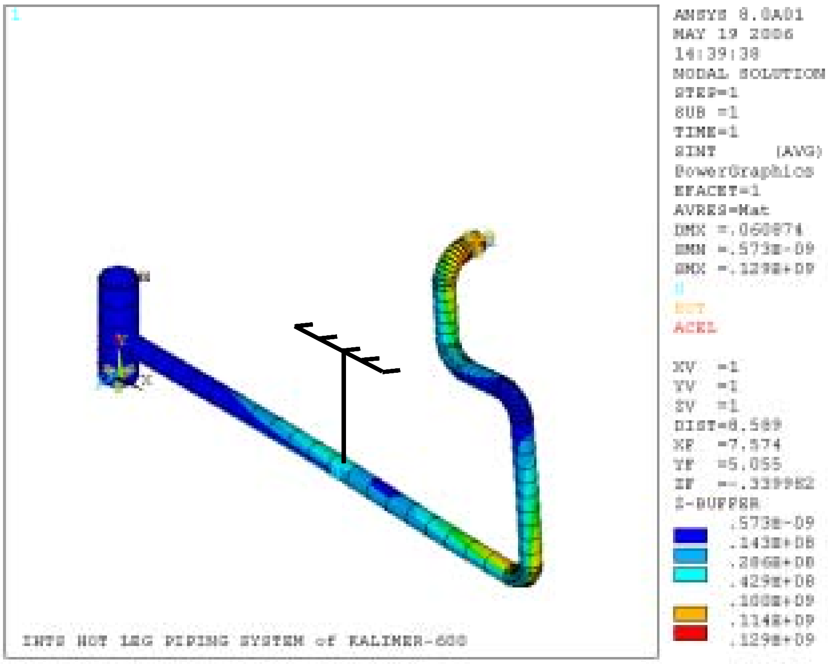


(b) With Support (S_{max} = 19.3 MPa)

Fig. 19 Stress Distribution for Dead Weight of IHTS Hot Piping System

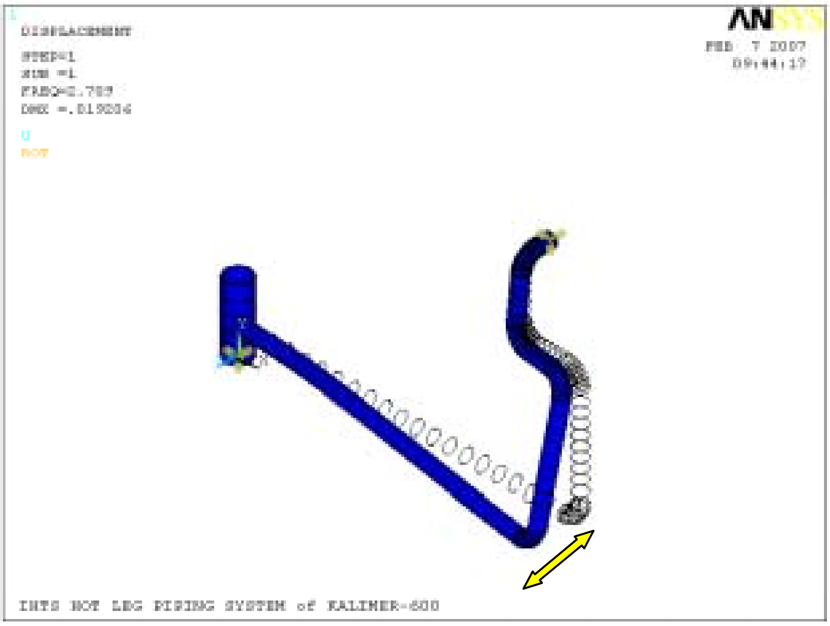


(a) Without Support (S_{max} = 107 MPa)

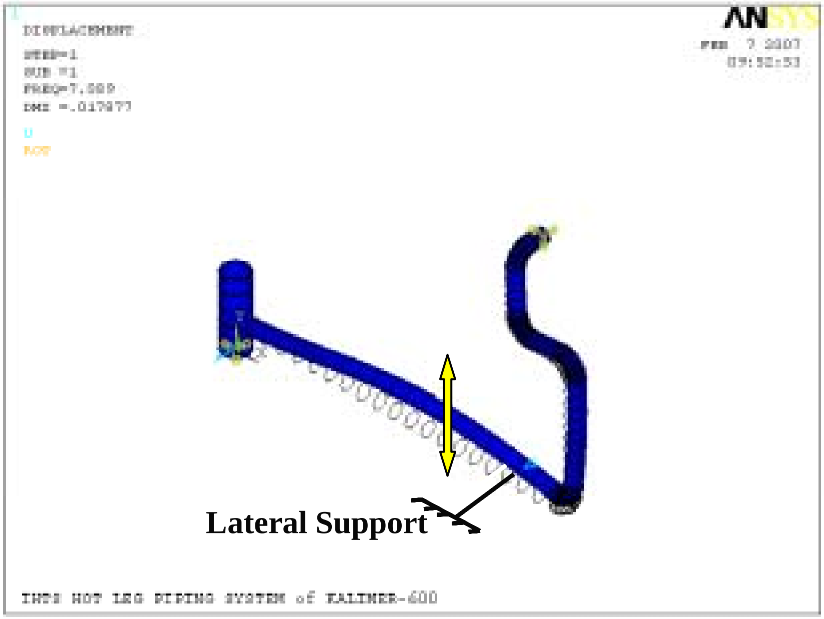


(b) With Support (S_{max} = 129 MPa)

Fig. 20 Stress Distribution for (Dead Weight + Thermal) of IHTS Hot Piping System



(a) Without Support (2.7 Hz)



(b) With Support (7.1 Hz)

Fig. 21 Mode Shape of IHTS Hot Piping System

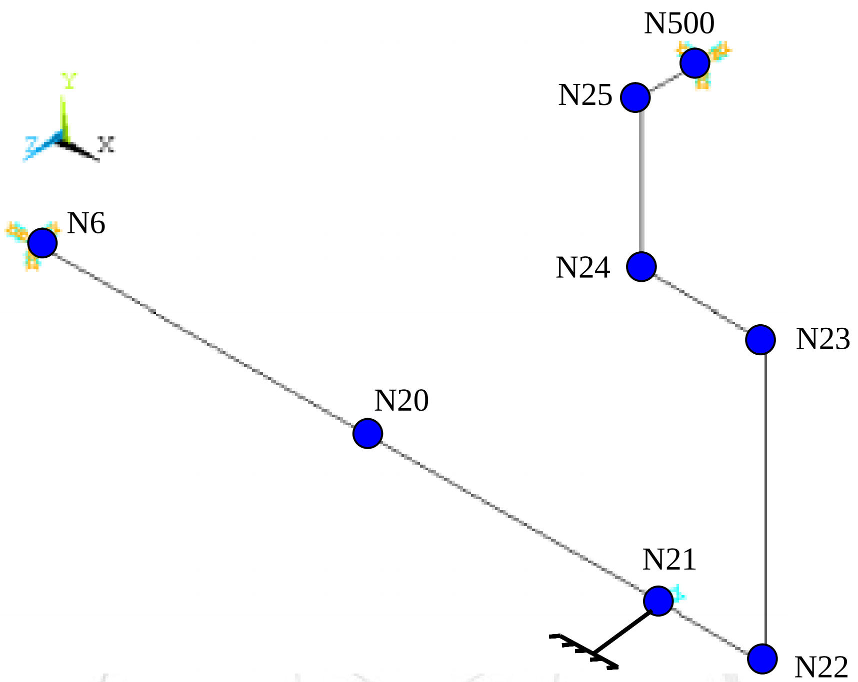
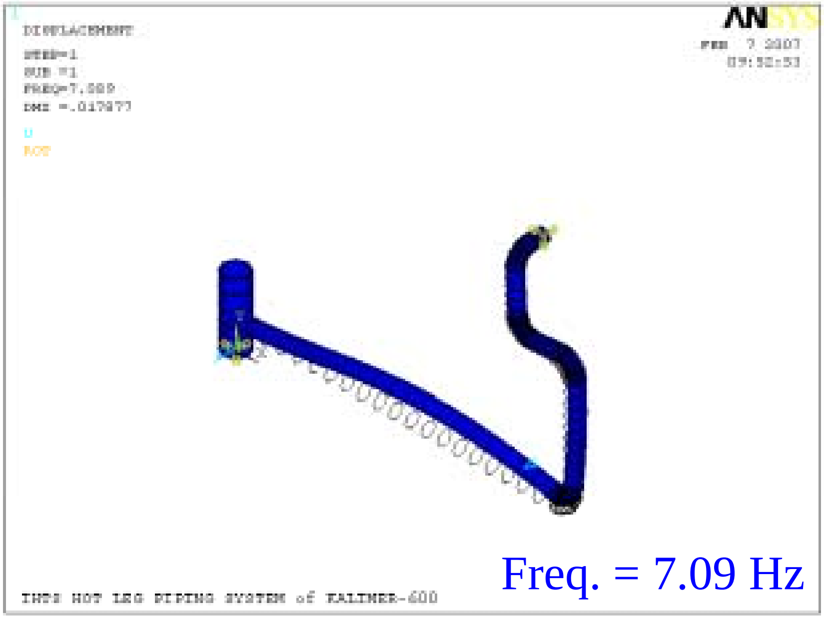
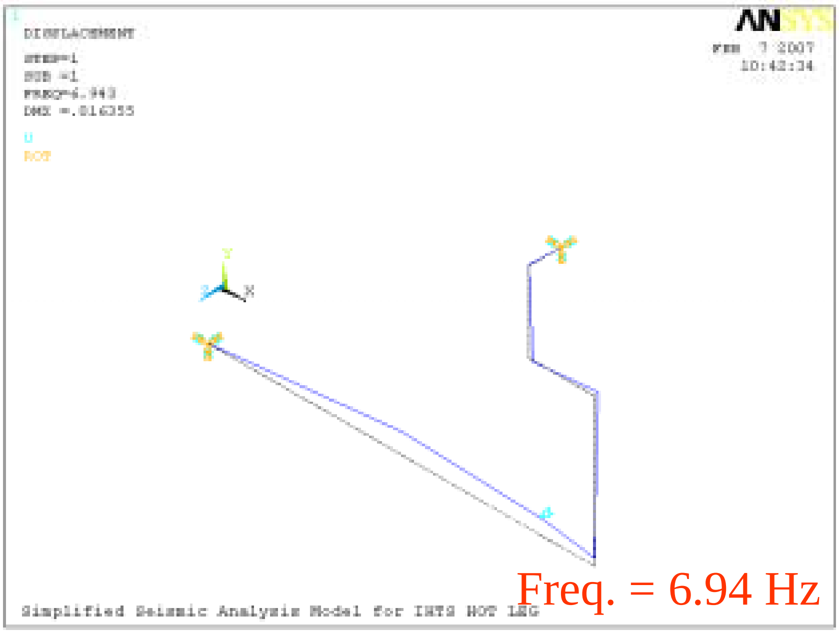


Fig. 22 Simple Seismic Model of IHTS Hot Piping System



(a) for Detail Model



(b) for Simple Model

Fig. 23 Mode Shape of IHTS Hot Piping System

3.5 중간열전달계통 흡입배관

중간열전달계통에 있어서 흡입배관은 증기발생기와 2차펌프 사이에 연결되는 배관이다. 흡입배관의 재료는 저온배관과 마찬가지로 Mod.9Cr-1Mo 강이며 내경 82cm, 두께 1.25Cm의 대구경 배관으로 되어 있다.

3.5.1 상세 유한요소 해석모델

Fig. 24는 흡입배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 56개, 총 요소수는 55개이다.

3.5.2 단순 해석모델

Fig. 25는 흡입배관에 대한 단순 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 상세모델과 마찬가지로 PIPE16 (3D Elastic Pipe)이며 총 절점 개수는 4개, 총 요소수는 3개 이다. 상세유한요소 모델과의 동특성을 일치시키기 위하여 배관의 엘보우 곡관부위를 고려하여 각 직선배관에 대해 등가길이를 변화시킨 단순 해석모델을 설정하였다.

3.5.3 단순모델 검증

Fig. 26은 중간열전달계통 흡입배관에 대한 상세 유한요소 모델과 단순 유한요소모델에 대한 1차 진동모우드 형상을 비교한 것이다. 상세 유한요소 해석모델의 경우 1차 고유진동수가 9.19Hz로 나타났으며 단순해석모델의 경우에는 9.41Hz로 나타나 해석모델 오차가 2.3% 정도로 잘 일치 하였다.

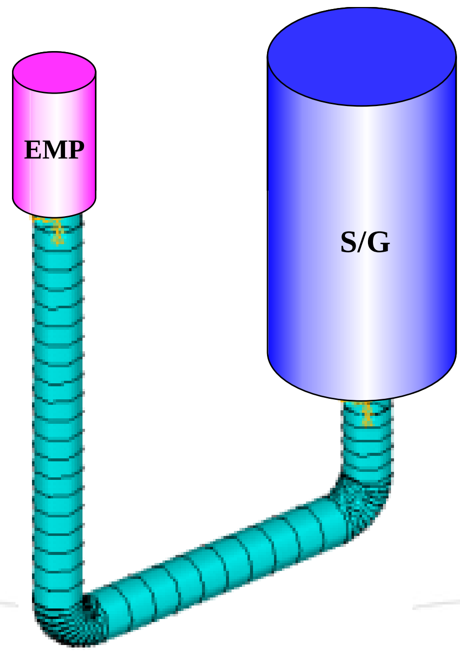


Fig. 24 Detail Finite Element Model of IHTS Suction Piping System

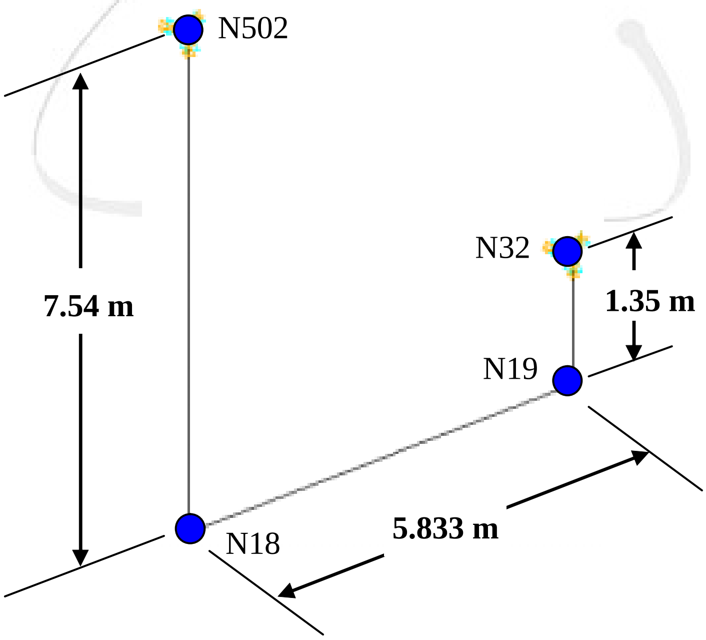
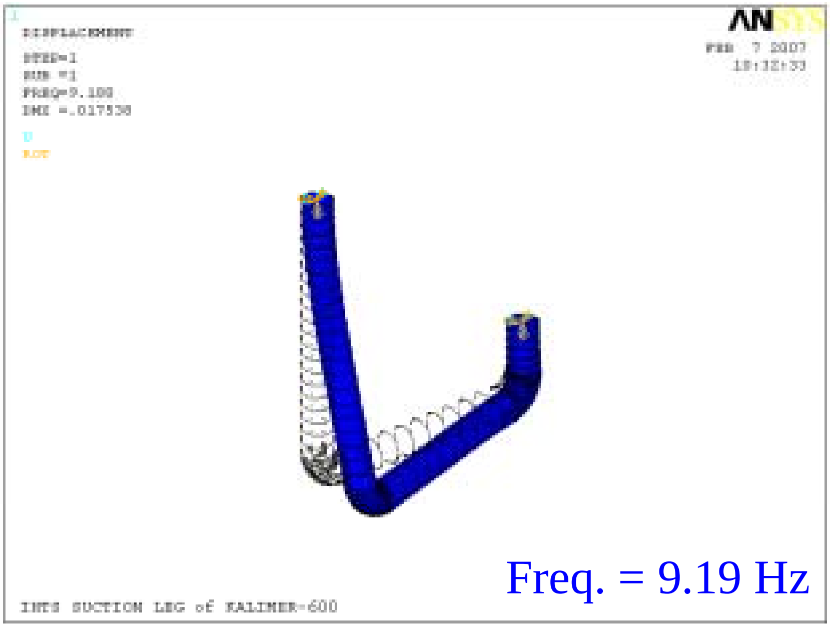
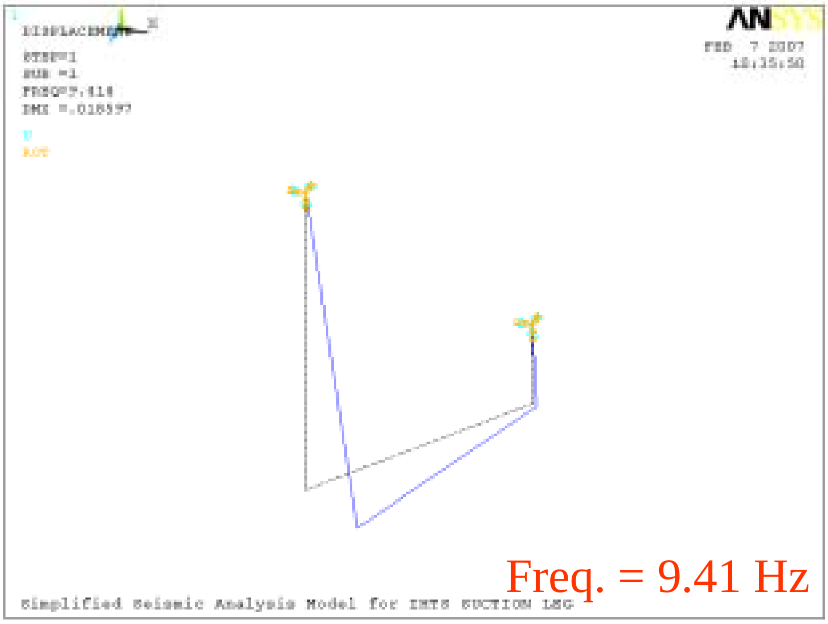


Fig. 25 Simple Model of IHTS Suction Piping System



(a) for Detail Model



(b) for Simple Model

Fig. 26 Mode Shape of IHTS Suction Piping System

3.6 증기발생기

증기발생기의 경우 아직 주기기에 대한 세부 개념설계가 진행되지 않아서 내부 구조물에 대한 설계자료가 미흡하여 실린더 외경 4.1m, 두께 2.5cm를 가정하였다. 따라서 단순해석모델에 사용한 보요소 입력자료는 다음과 같다.

Cross Sectional Area of Shell Side :

$$A = \frac{\pi}{4}\left(D_o^2 - D_i^2\right) = \frac{\pi}{4}\left(4.1^2 - 4.05^2\right) = 320.05x10^{-3}\, m^2$$

Area Moment of Inertia of Shell Side :

$$I_{zz} = \frac{\pi}{64}\left(D_o^4 - D_i^4\right) = \frac{\pi}{64}\left(4.1^4 - 4.05^4\right) = 664.02x10^{-3}\, m^4$$

3.7 원자로 건물

3.7.1 상세 유한요소 해석모델

Fig. 27은 KALIMER-600 원자로 건물에 대한 상세 유한요소 해석모델의 부분들을 나타낸 것으로 Fig. 27(a)는 원자로용기 중심부를 가로지르는 해석단면을 나타낸 것이고 Fig. 27(b)는 원자로용기 중심부에서 13.23m 떨어진 위치에서의 해석단면을 나타낸 것이다. 해석에는 ABAQUS 상용 유한요소 해석프로그램을 사용하였으며 유한요소 종류는3D 쉘요소를 사용하였다.

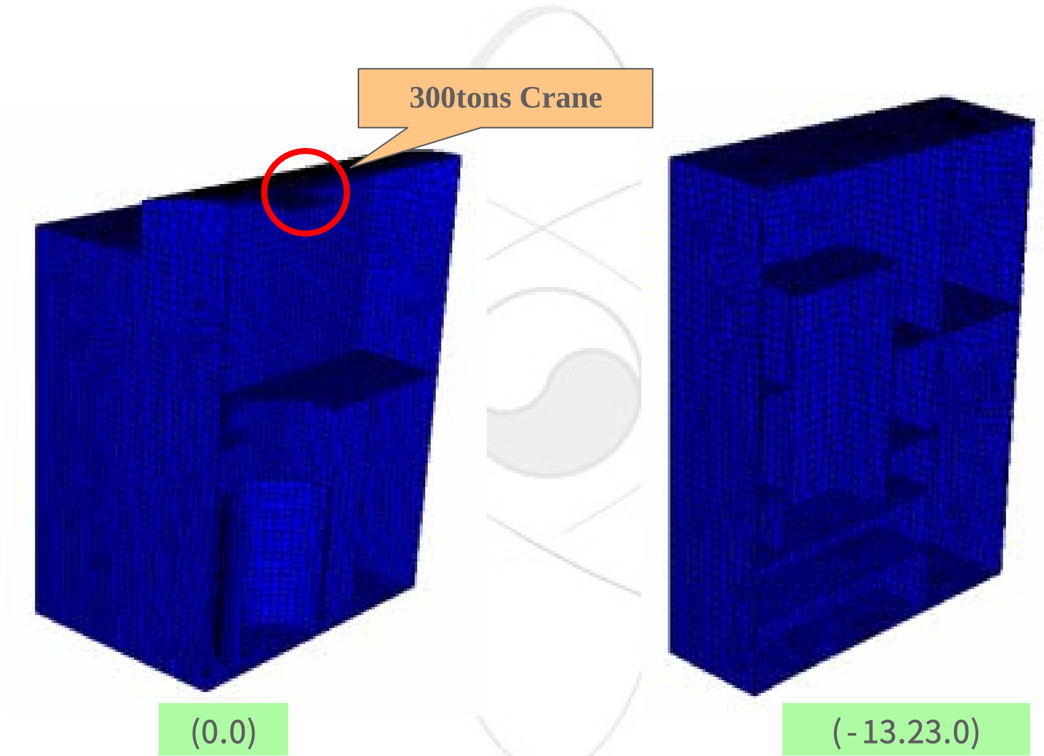
3.7.2 단순 해석모델

Fig. 28은 원자로 건물에 대한 단순지진해석 모델을 나타낸 것으로 총 절점수는 8개이며 요소수는 7개이다. 그림에서와 같이 각 절점은 주요 기기 및 배관의 지지점을 포함하며 이들 각 위치에서 설계 지진하중을 계산할 수 있도록 하였다.

Table 2는 해석모델에 사용된 각 요소의 보특성 자료를 나타낸 것이고 Table 3은 각 절점에서의 집중질량 및 회전관성모멘트에 대한 자료를 나타낸 것이다.

3.7.3 단순모델 검증

Fig. 29는 원자로 건물에 대한 상세 유한요소 모델과 단순 유한요소모델에 대한 수평 X-방향 1차 진동모우드 형상을 비교한 것이다. 상세 유한요소 해석모델의 경우 수평 X-방향의 1차 고유진동수가 4.8Hz로 나타났으며 단순해석모델의 경우에는 4.51Hz로 나타났다. Fig. 30은 수평 Y-방향에 대한 1차 고유진동모우드 해석결과를 나타낸 것으로 상세모델은 4.44Hz, 단순모델은 4.31Hz로 전체적인 해석모델의 오차가 6.0% 정도로 잘 일치 하였다.



(a) **X-plane cutting view** (b) **X-plane cutting view**

Fig. 27 Detail Finite Element Model of Reactor Building

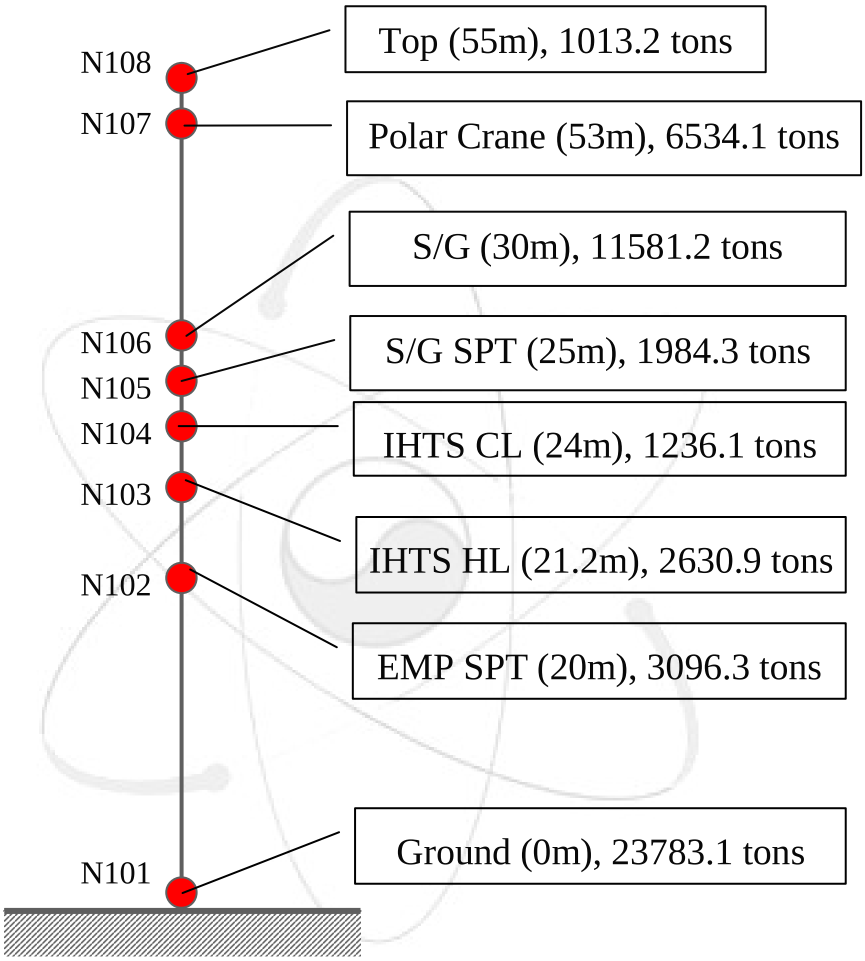


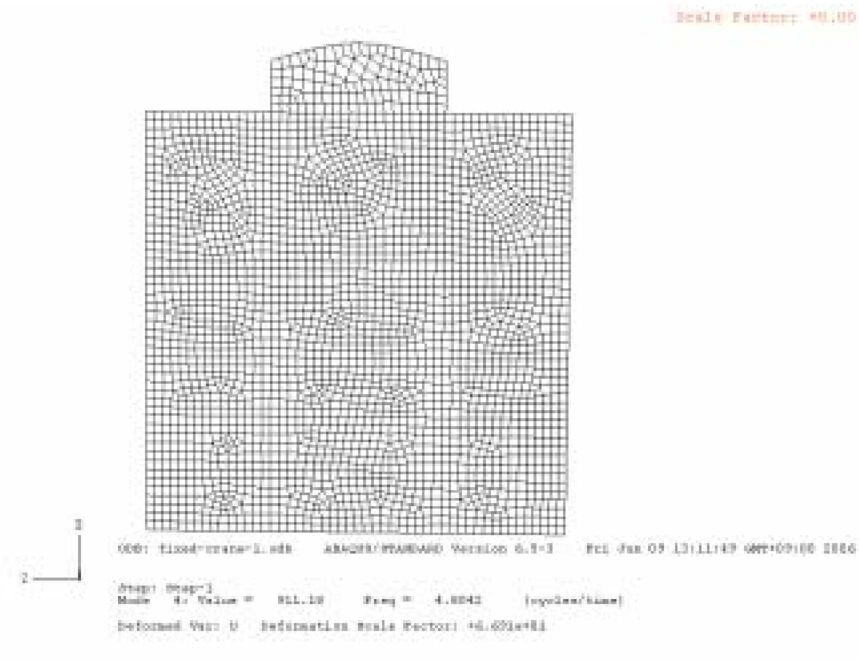
Fig. 28 Simple Seismic Model of Reactor Building

Table 2 Beam Properties for Simple Seismic Model of Reactor Building

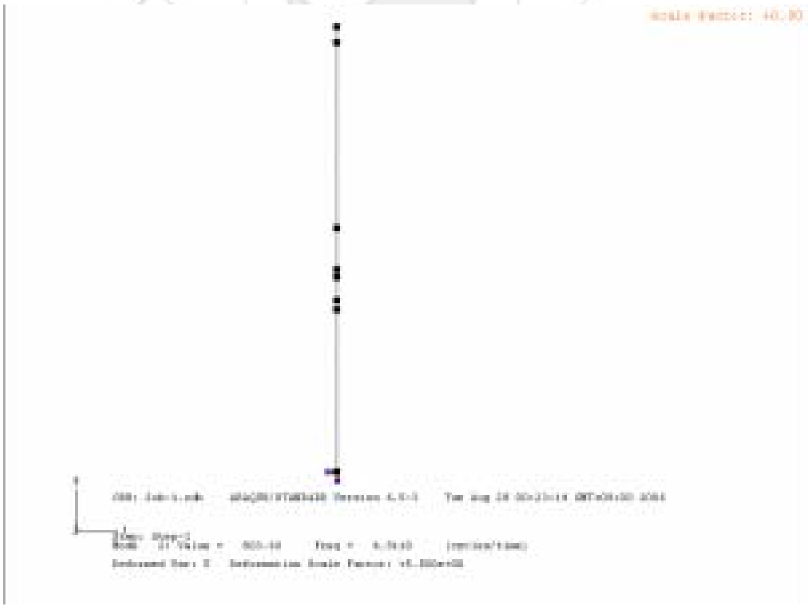
Element No.	Nodes	Area (m^2)	Young's Modulus (GPa)	Shear Modulus (Gpa)	Moment of Inertia of Beam (m^4)		
					I_{xx}	I_{yy}	Torsional Rigidity
1	1 – 2	271.08	33	2.8	50161	80834	.91706720E13
2	2 – 3	271.08	33	2.8	50161	80834	.91706720E13
3	3 – 4	271.08	33	2.8	50161	80834	.91706720E13
4	4 – 5	271.08	33	2.8	50161	80834	.91706720E13
5	5 – 6	271.08	33	2.8	50161	80834	.91706720E13
6	6 – 7	253.89	33	2.8	49898	80311	.14872130E14
7	7 - 8	104.58	33	2.8	21377	8070	.67508280E13

Table 3 Mass Properties for Simple Seismic Model of Reactor Building

Node	Height (m)	Concentrated Mass (tons)	Rotary Inertia of Mass ($Kg.m^2$)		
			I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
1	0	23783.1	.208518E+07	.369961E+07	.550275E+07
2	20	3096.3	.135655E+07	.217648E+07	.339530E+07
3	21.2	2630.9	.404132E+06	.579170E+06	.982176E+06
4	24	1236.1	.229106E+06	.368974E+06	.597335E+06
5	25	1984.3	.368716E+06	.593241E+06	.958881E+06
6	30	11581.2	.215657E+07	.349753E+07	.532277E+07
7	53	6534.1	.122948E+07	.171340E+07	.280475E+07
8	55	1013.2	.134766E+06	.379516E+05	.172655E+06

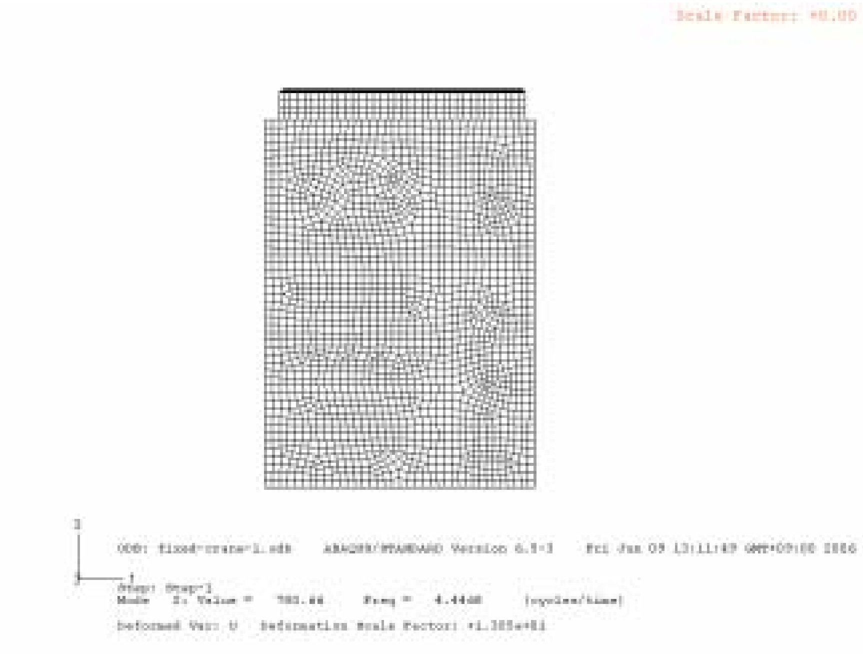


(a) for Detail Model (4.8 Hz)

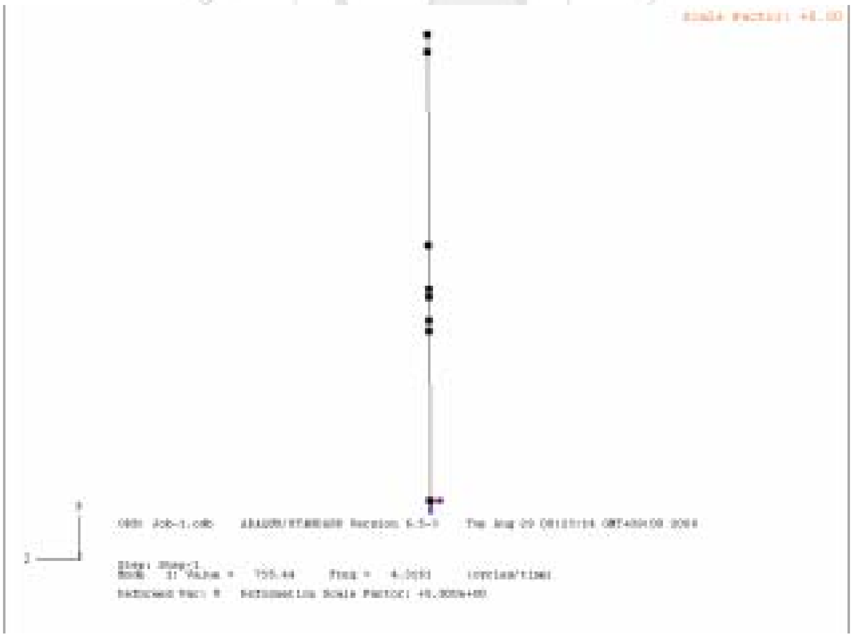


(b) for Simple Model (4.51 Hz)

Fig. 29 Model Shape of Reactor Building (X-Direction)



(a) for Detail Model (4.44 Hz)



(b) for Simple Model (4.31 Hz)

Fig. 30 Model Shape of Reactor Building (Y-Direction)

3.8. 면진장치

원자로 건물과 지반 사이에 작용하는 면진장치의 해석모델에는 ANSYS에서 제공하는 COMBIN14 (Spring-Damper) 요소를 사용하였다. 면진설계된 원자로 건물의 회전, 라킹 등의 거동을 고려할 수 있도록 전체 면진장치 개수는 Fig. 2에서와 같이 모두 6군데를 선정하였다.

원자로 건물을 포함한 전체 KALIMER-600의 무게인 57601 tons을 고려하여 수평 면진 설계주파수가 0.5Hz 되도록 하나의 수평 면진장치에 대한 수평강성값은 다음과 같이 계산하였다.

$$
\begin{aligned}
K_H &= \frac{M_t (2\pi f_H)^2}{6} \\
&= \frac{57601E3(2\pi \,\mathbf{x}\, 0.5)^2}{6} \\
&= 94750\, tons/m
\end{aligned}
$$

일반적으로 고감쇠 면진베어링 면진장치의 경우에 수평주파수가 0.5Hz인 경우 수직 고유진동수는 약 21Hz이다. 따라서 면진장치의 21Hz 수직방향 주파수에 대한 수직강성값은 다음과 같이 결정된다.

$$
\begin{aligned}
K_V &= \frac{M_t (2\pi f_V)^2}{6} \\
&= \frac{57601E3(2\pi \,\mathbf{x}\, 21)^2}{6} \\
&= 1671.4E9\, kg/m
\end{aligned}
$$

면진장치의 수평거동에 대한 설계 감쇠비는 12%로 가정하고 수직 감쇠비는 3%로 가정하였다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 고유진동수 해석

Fig. 31은 앞에서 기술한 원자로시스템을 비롯한 각 부분별 단순해석모델을 합친 KALIMER-600의 통합 내진해석모델을 나타낸 것이다. Fig. 32의 해석모델은 각 기기, 계통 및 원자로 건물 사이의 상호연계 자유도가 존재하는 절점끼리의 연계성을 표시한 해석모델을 나타낸 것이다.

Fig. 33(a)는 비면진의 경우(지반고정)에 대한 KALIMER-600 내진해석모델의 1차 고유진동모우드 해석결과를 나타낸 것으로 수평 Y-방향으로의 원자로건물 진동모우드(4.35Hz)가 나타나고 다음으로 Fig. 33(b)에서와 같이 수평 X-방향으로의 진동모우드(4.54Hz)가 나타난다. Table 4는 상세 유한요소 해석모델과 단순해석모델에 대한 1차 고유진동수 해석결과를 각각 나타낸 것으로 시간이력지진해석을 위한 단순해석모델의 동특성이 상세 유한요소 해석모델 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 34은 면진설계를 적용한 KALIMER-600의 경우에 대한 1차 고유진동모우드 해석결과를 나타낸 것으로 수평 X 또는 Y 방향 모두 설계 면진주파수 0.5Hz의 강체 진동모우드를 보여준다.

4.2 시간이력 지진응답해석

Fig. 35(a)는 시간이력 지진응답해석에 사용된 0.3g 입력지진 파형을 나타낸다. 입력지진은 미국 NRC Regulatory Guide 1.60의 규정에 따라서 만들어진 설계인공지진 파형이다. Fig. 35(b)는 5% 감쇠를 갖는 입력지진에 대한 층응답스펙트럼을 나타낸 것으로 강지진 주파수가 2Hz – 10Hz 범위에 존재한다.

Fig. 36은 비면진 설계의 경우에 대한 원자로건물의 각 절점에서 기기 및 구조물의 지지점에 대한 층응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각 위치에서의 최대 응답은 모두 원자로건물의 고유진동수인 4.5Hz에서 발생하고 첨두가속도 응답을 나타내는 영주기 가속도(Zero period acceleration) 값은 입력하중인 0.3g에 비해 모두 크게 증폭되어 나타남을 알 수 있다. 원자로 건물의 경우 꼭대기에서의 가속도응답은 약 1.33g이며 입력지진 0.3g에 비해 4배 정도 크게 증폭되어 나타났다. Fig. 37은 주요 기기 및 구조물에서의 층응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것으로 모두 입력지진에 비해 첨두 가속도 응답이 크게 증폭됨을 알 수 있고, 특히 중간열전달계통의 저온배관에서 2.0g의 응답증폭이 발생하여 비면진 설계의 경우에

는 중간열전달계통 배관의 내진설계가 매우 불리함을 알 수 있다.

Fig. 38은 면진설계된 KALIMER-600에 대한 원자로 건물 각 위치에서의 층응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 위치에서 최대 응답은 모두 설계 면진주파수인 0.5Hz에서 발생하며 첨두 가속도응답은 입력하중 0.3g 보다 작은 0.23g로 비면진 설계 1.33g에 비해 크게 감소함을 알 수 있다. Fig. 39은 주요기기 및 구조물에서의 층응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것으로 원자로 건물과 마찬 가지로 최대 응답은 모두 설계 면진주파수 0.5Hz에서 발생하며 첨두 가속도응답도 모두 0.23g로 거의 동일하다.

Fig. 40은 원자로용기와 증기발생기에 대해 면진설계와 비면진설계 경우에 대한 가속도 층응답스펙트럼 계산결과를 비교해 놓은 것이다. 그림에서와 같이 면진설계의 경우에는 기존 내진설계(비면진설계)에서 발생하는 가속도 지진응답 증폭현상이 전혀 발생하지 않음을 알 수 있고 따라서 지반과 원자로 건물 사이에 면진장치를 적용하는 면진설계 기술이 지진하중을 원천적으로 줄일 수 있는 매우 유용한 설계기술임을 알 수 있다. Fig. 41은 원자로 건물의 높이에 따른 첨두 가속도 지진응답을 나타낸 것으로 비면진 설계의 경우 위치가 높아짐에 따라서 가속도 응답증폭이 크게 발생하지만 면진설계의 경우에는 응답증폭이 발생하지 않음을 알 수 있다.

면진설계의 경우에 가속도응답의 증폭은 크게 줄일 수 있지만 감쇠를 유발하기 위한 면진장치의 대변형으로 인하여 원자로 건물 전체의 강체 변위응답이 크게 발생할 수 있다. Fig. 42는 0.3g 지진하중시 비면진설계의 경우에 대한 원자로용기 및 격납용기 하부헤드, 그리고 중간열전달계통 저온배관에서의 시간이력 변위응답파형 해석결과를 나타낸 것으로 최대 변위응답는 1cm이하이다. Fig. 43은 면진설계와 비면진설계에 대한 변위응답파형을 비교해 놓은 것으로 면진설계의 경우에 20cm 이상의 변위응답이 발생한다. 따라서 이러한 변위를 수용할 수 있는 적절한 건물배치 및 Interface 설계기술이 요구된다.

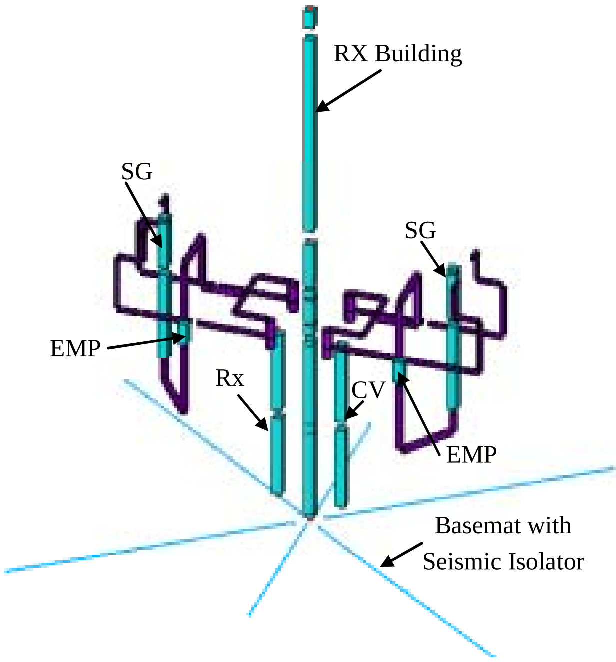


Fig. 31 KALIMER-600 Seismic Analysis Model

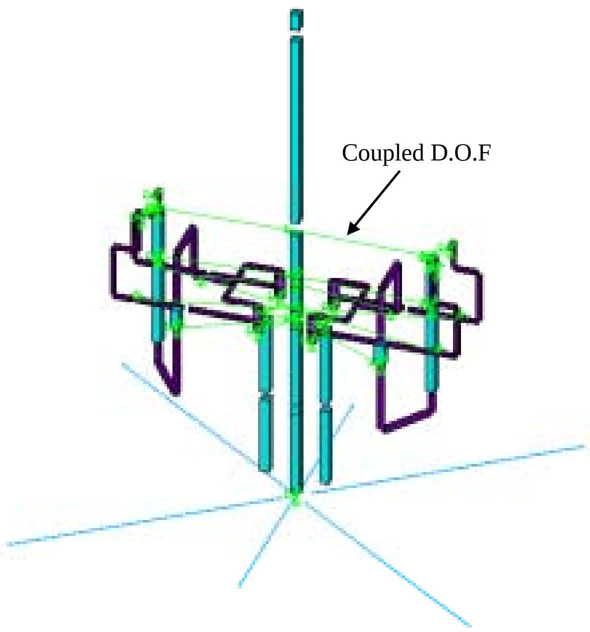
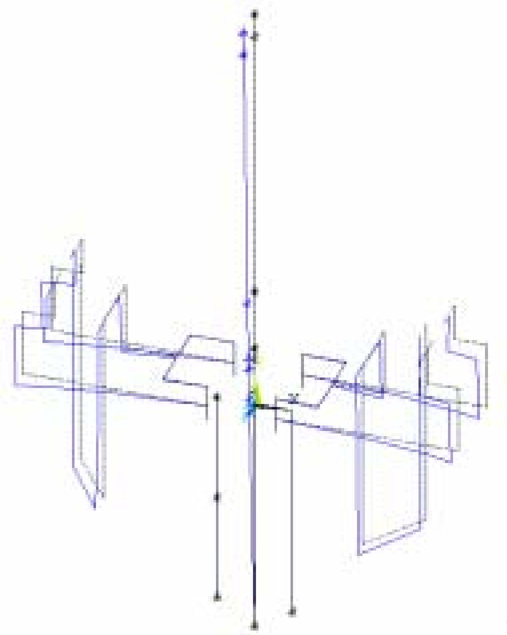
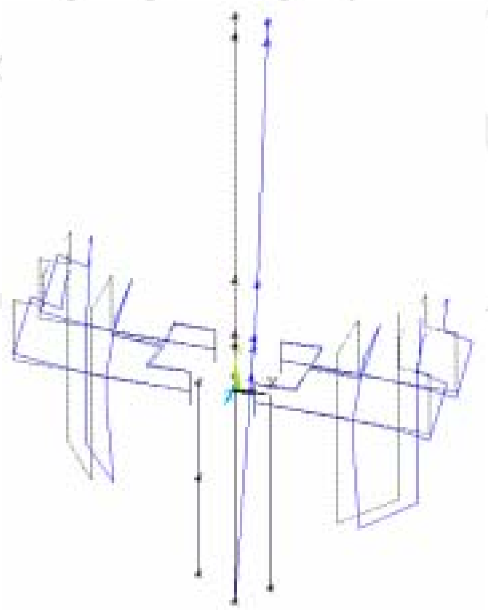


Fig. 32 Seismic Analysis Model with Coupled D.O.F.



(a) 1st Mode Shape (Y-direction, 4.35Hz)

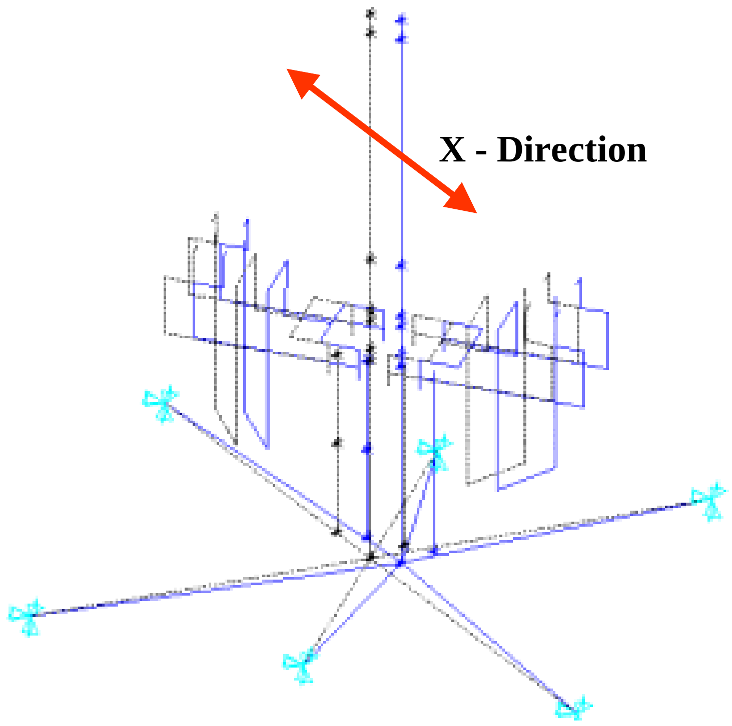


(b) 2st Mode Shape (X-direction, 4.54Hz)

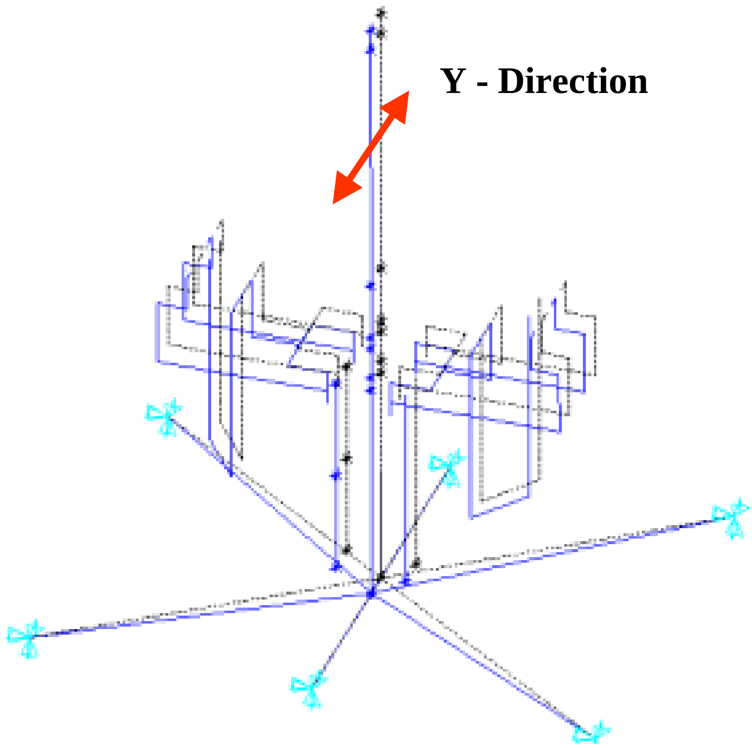
Fig. 33 Model Shape for Non-Isolation Case

Table 4 Summary of Natural Frequencies

Components	3-D Detail Model (Hz)	Simplified Model (Hz)
Reactor System	6.46	6.08
Containment Vessel	21.02	21.02
IHTS Hot Leg	7.09	7.09
IHTS Cold Leg	6.25	6.02
IHTS Suction Leg	9.19	9.23
Steam Generator	-	20.04
Rx Building (X-dir)	4.80	4.54
Rx Building (Y-dir)	4.44	4.35

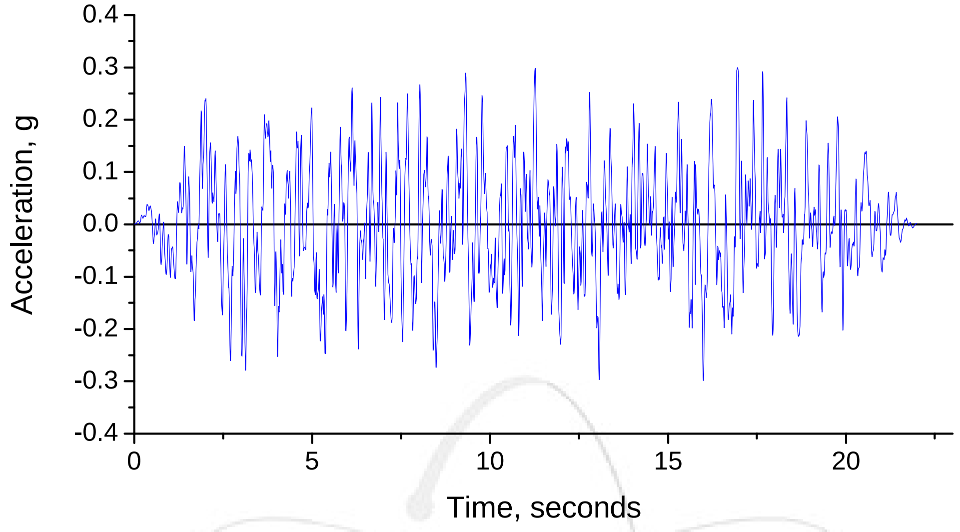


(a) X-Direction

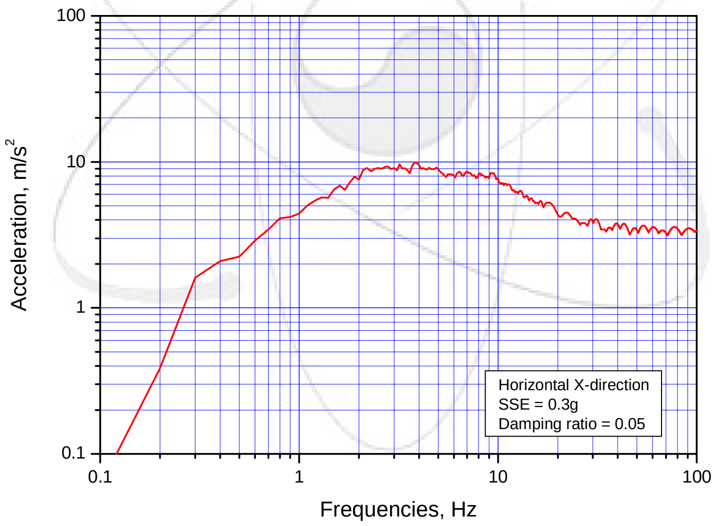


(b) Y-Direction

Fig. 34 Mode Shape for Seismic Isolation Case



(a) Artificial Time History



(b) Floor Response Spectrum

Fig. 35 Input Seismic Load (SSE 0.3g)

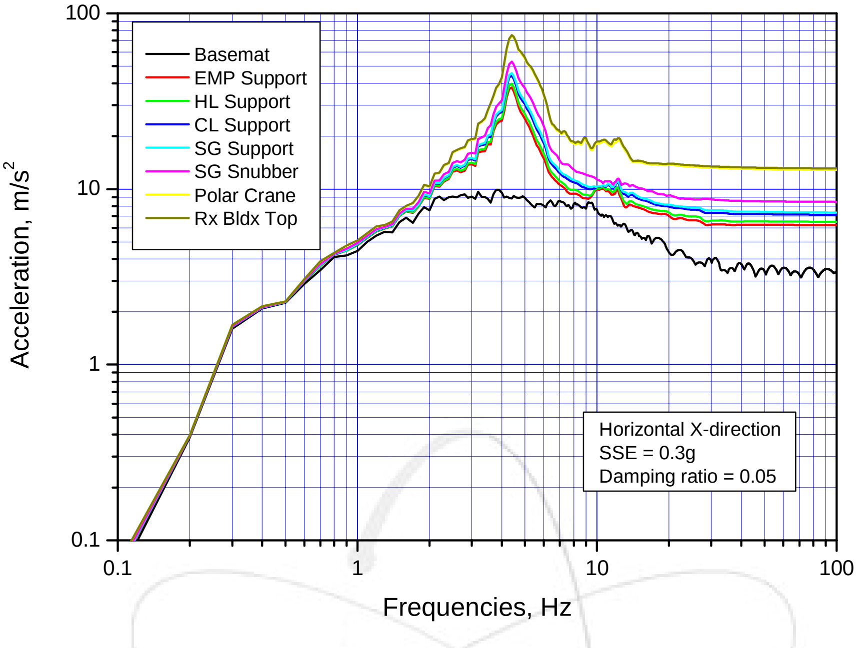


Fig. 36 Calculated FRS for Rx Building (Non-Isolation Case)

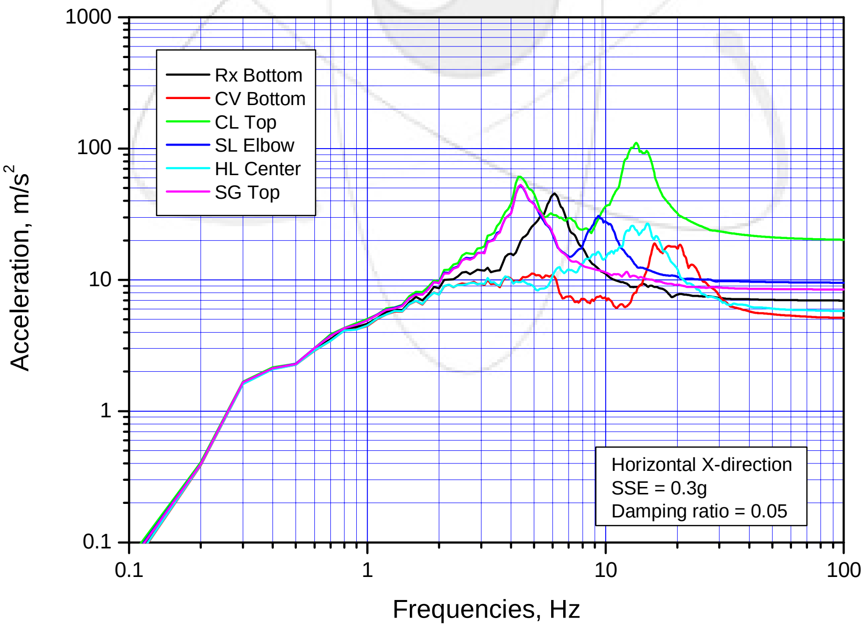


Fig. 37 Calculated FRS for Main Components (Non-Isolation Case)

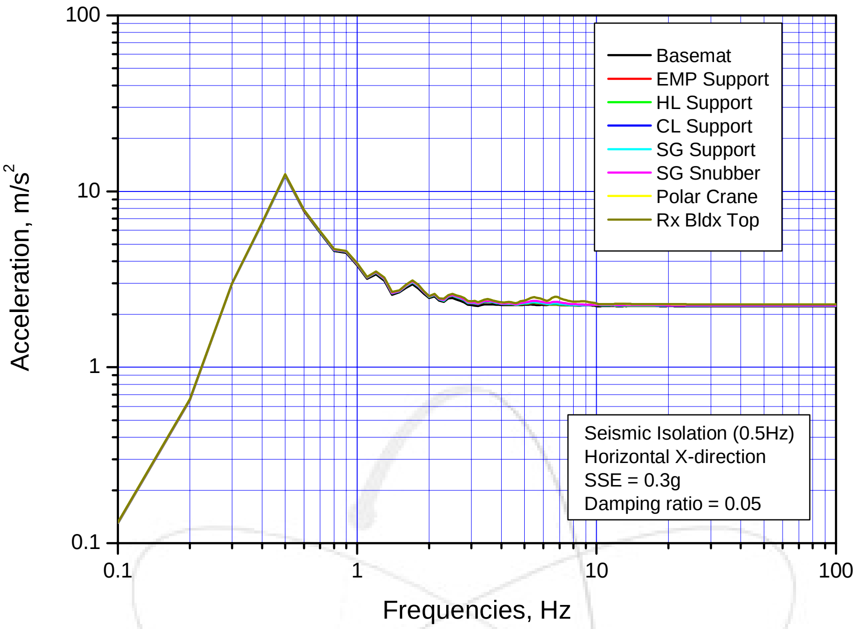


Fig. 38 Calculated FRS for Rx Building (Isolation Case)

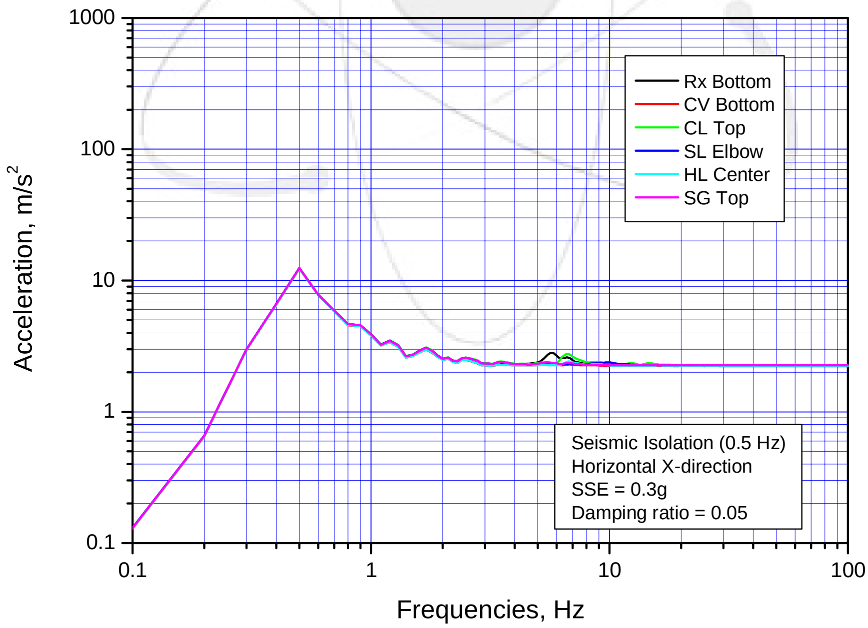


Fig. 39 Calculated FRS for Main Components (Isolation Case)

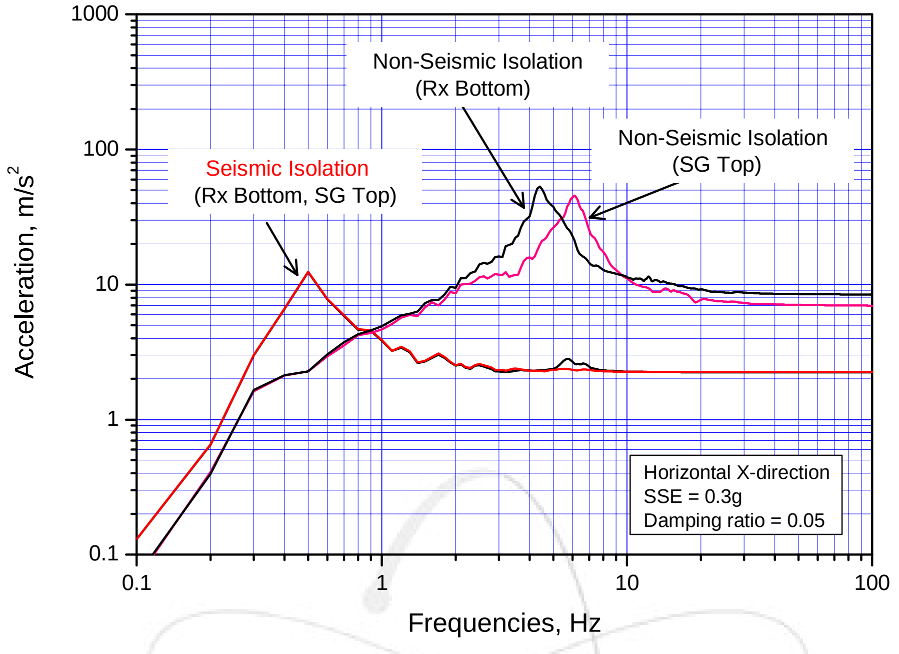


Fig. 40 Comparison of FRS Between Seismic Isolation and Non-Isolation Design

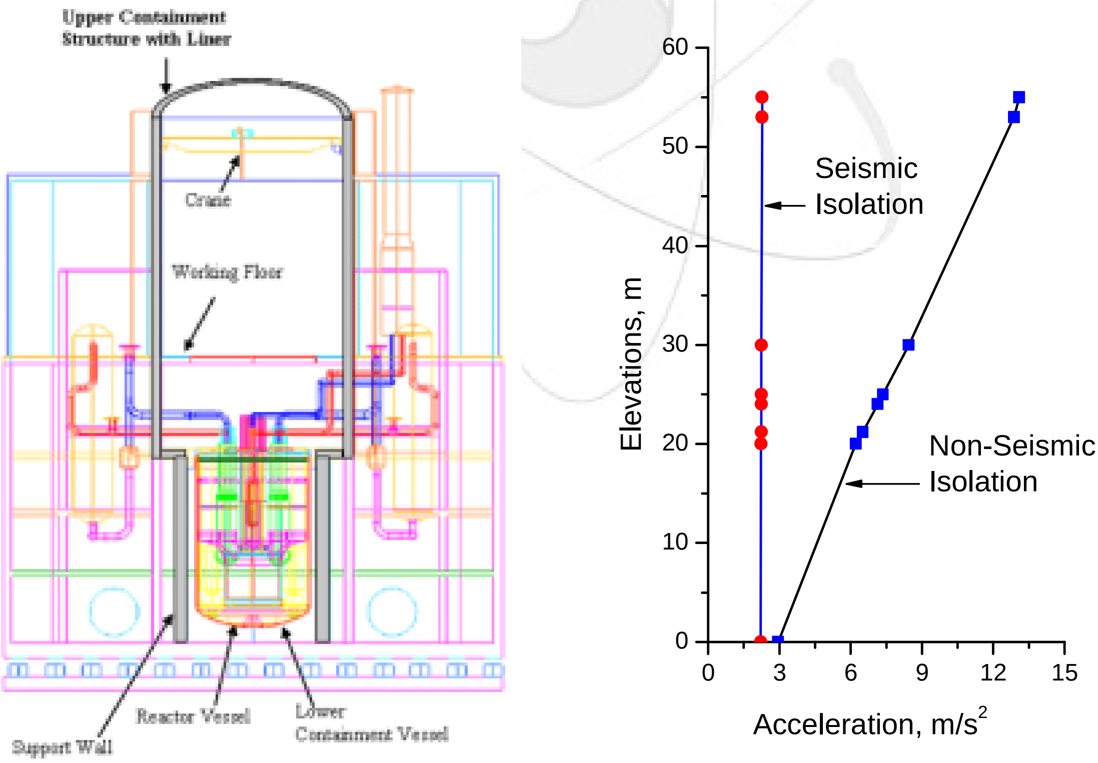


Fig. 41 Maximum Acceleration Responses Along the Rx Building Elevation

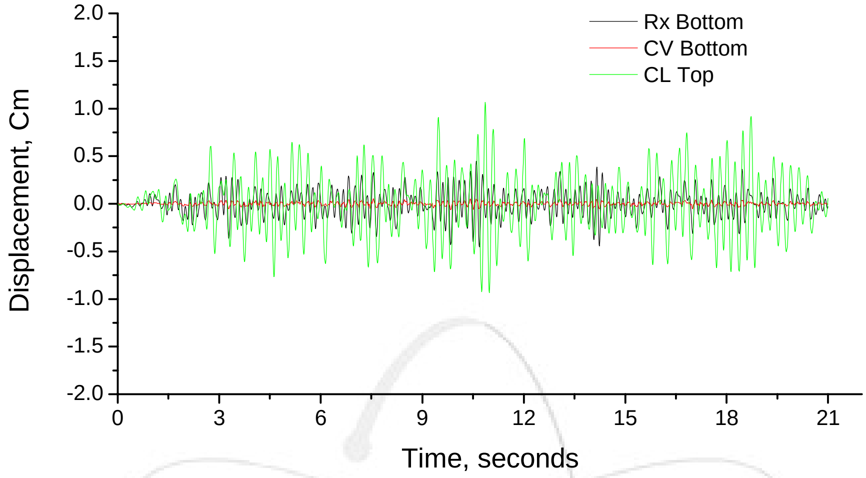


Fig. 42 Displacement Responses for Non-Isolation Design

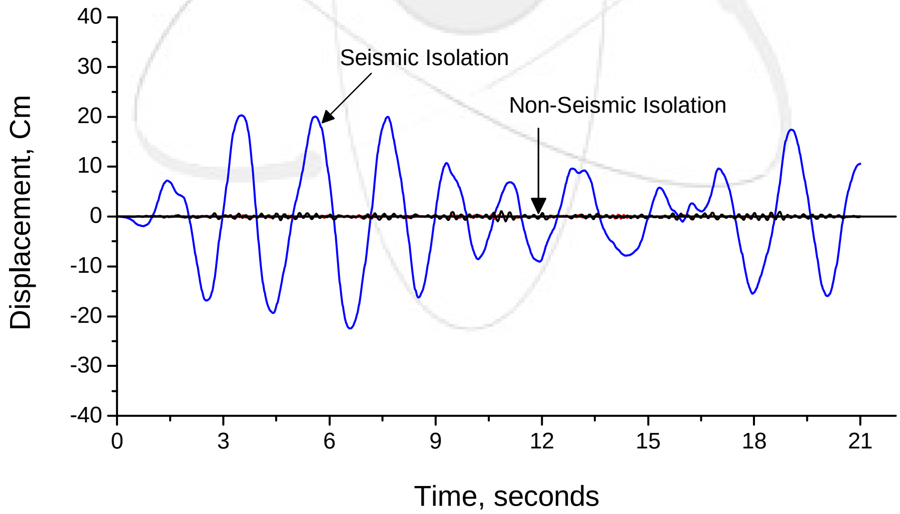


Fig. 43 Comparison of Displacement Responses Between Seismic Isolation and Non-Isolation Design

5. 결 론

본 보고서에서는 KALIMER-600 주요 기기, 이차열전달계통 배관시스템, 그리고 원자로 건물 등을 포함하는 시간이력 지진응답해석용 단순지진해석모델 개발에 대한 상세 내용들을 기술하였다. 개발된 단순지진해석모델은 최소한의 절점수를 가지면서 상세 유한요소해석모델의 동특성 해석결과와 잘 일치하는 결과를 나타내었으며 KALIMER-600에 대한 신속하고 정확한 시간이력 지진응답해석을 수행할 수 있는 기반이 될 것으로 기대한다.

KALIMER-600의 최소 고유진동수는 원자로건물에서 4.35Hz로 나타났으며 모든 주기기 및 구조물의 최소 고유진동수는 이보다 높게 나타나 0.5Hz의 설계 면진주파수의 타당성을 확인하였다. 원자로 면진설계의 성능을 분석하기 위하여 0.3g 지진하중에 대한 비면진설계 해석결과와의 비교분석을 수행한 결과 비면진설계의 경우에는 주기기 및 계통 전체에 가속도응답의 큰 증폭이 발생하였으며 이로 인하여 내진설계 비용이 크게 증가할 것으로 나타났다. 그러나 면진설계를 적용한 경우에는 가속도응답 증폭현상이 전혀 발생하지 않았으며 지진설계에 대한 안전성과 경제성을 보장할 수 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. G.H. Koo and J.H. Lee, “Effect of Fluid Added Mass on Vibration Characteristics and Seismic Responses of Immersed Concentric Cylinders,” Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 5, No.5, pp.25-33, 2001.
2. G.H. Koo and B. Yoo, “Dynamic Characteristics of KALIMER IHTS Hot Leg Piping System Conveying Hot Liquid Sodium,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.77, No.11, pp.679-689, 2000.
3. G.H Koo and J.H. Lee, “Development of FAMD Code to Calculate the Fluid Added Mass and Damping of Arbitrary Structures Submerged in Confined Viscous Fluid,” KSME International Journal, Vol.17, No.3, pp.457-466, 2003.

4. G.H. Koo and J.H. Lee, ”Finite Element Analysis for Evaluation of Viscous and Eccentricity Effects on Fluid Added Mass and Damping,” Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 7, No.2, pp.21-27, 2003.
5. G.H. Koo and J.H. Lee, “Fluid Effects on Core Seismic Behavior of Liquid Metal Reactor,” KSME International Journal, Vol.18, No.12, 2004.
6. G.H. Koo, James J. Sienicki and Anton Moisseytsev , “Preliminary Structural Evaluation of the STAR-LM Reactor Vessel and the Support Design,” Nuclear Engineering and Design, in press, 2006.
7. G.H. Koo, J.H. Lee, J.B. Kim, H.Y. Lee, and B. Yoo, “Reduction of the Seismic Responses by Using the Modified Hysteretic Bi-Linear Model of the Seismic Isolator,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 127-134, 1995.
8. G.H. Koo, J.H. Lee and B. Yoo, “Mechanical Characteristics of Laminated Rubber Bearings for Seismic Isolation,” Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 1, No. 2, pp. 79-89, 1997.
9. G.H. Koo, J.H. Lee and B. Yoo, “Performance Experiments and Analysis of Nonlinear Behavior for HDRB Using in Seismic Isolation, ”Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 2, No. 4, pp.73-85, 1998.
10. G.H. Koo, J.H. Lee, and Y. Bong, "Seismic Response Analyses of Seismically Isolated Structures Using the Laminated Rubber Bearings," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 5, pp.387-395, 1998.
11. G.H. Koo and Yasuki Ohtori, "Loading Rate Effects of High Damping Seismic Isolation Bearing on Earthquake Responses," KSME International Journal, Vol. 12, No. 1, pp.58-66, 1998.
12. G.H. Koo, J.H. Lee, and B. Yoo, and Yasuki Ohtori, "Evaluation of Laminated Rubber Bearing for Seismic Isolation Using Modified Macro-Model with Parameter Equations of Instantaneous Apparent Shear Modulus," Engineering Structures, Vol. 21, No. 7, pp.594-602, 1999.
13. G.H. Koo, J.H. Lee, H.Y. Lee, and B. Yoo, “Stability of Laminated Rubber Bearing and its Application to Seismic Isolation,” KSME International Journal, Vol. 13, No. 8, pp. 595-604, 1999.
14. B. Yoo, J.H. Lee, G.H. Koo, et al, “Seismic Base Isolation Technologies for KALIMER,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 199, pp.125-142, 2000.
15. 유봉 구경회, 이재한, 액체금속로 KALIMER 를 위한 면진설계지침서 (Revision A), KAERI/TR-1544/2000, 한국원자력연구소, 2000.

16. G.H. Koo, H.Y. Lee, and B. Yoo, "Seismic Design and Analysis of Seismically Isolated KALIMER Reactor Structures," Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 3, No. 1, pp.75-92, 1999.
17. 유봉, 구경회, 이재한, KALIMER 면진 개념설계/해석, KAERI/TR-697/96, 한국원자력연구소, 1996.
18. 구경회,이재한,유봉, KALIMER 원자로구조물에 대한 3 차원면진설계 적용가능성 분석, KAERI/TR-1065/98, 한국원자력연구소, 1998.
19. 이재한, 유봉, 구경회, KALIMER 원자로건물 면진베어링 배치설계 및 3 차원 입체 모델링, KAERI/TR-1539/00, 한국원자력연구소, 2000.

부록 A : 원자로시스템 상세모델 ANSYS 입력자료

```
/TITLE,REACTOR SYSTEM

/PREP7
ET,1,FLUID30
ET,2,SHELL63

K=2.068E9
M=820.
S=SQRT(K/M)
MP,DENS,1,M
MP,SONC,1,S
MP,MU,1,0.5
MP,EX,2,170.0E9        ! RV for 370 C
MP,DENS,2,7814.0
MP,NUXY,2,0.292
R,2,0.05
MP,EX,3,170.0E9        ! RV BOTTOM HEAD
MP,DENS,3,88113.15     ! equivalent density for RV bottom head with total core + RI mass
MP,NUXY,3,0.292

OD=11.41
RAD=OD/2.-0.025   ! shell center
H1=2.85
H2=15.1
H3=18.
BH_RAD=7.

! SOLID
K,1,RAD
K,2,RAD,-H1
K,3,RAD,-H2
K,4,,-H3

K,5,,-H1
K,6,,-H2

L,1,2
L,2,3
LARC,3,4,6,BH_RAD

L,5,2
L,6,3
L,5,6
L,6,4

N1=5
N2=15
```

```
N3=10

LESIZE,1,,,N1
LESIZE,2,,,N2
LESIZE,3,,,N3

LESIZE,4,,,N3
LESIZE,5,,,N3
LESIZE,6,,,N2
LESIZE,7,,,N3

TYPE,1   ! SODIUM
MAT,1
A,5,2,3,6
A,6,3,4,4
VROTAT,1,2,,,,,6,5,180,2
VMESH,ALL

K,100,,,-RAD
K,101,-RAD
K,1000
L,100,7
L,101,9
LARC,1,100,1000,RAD
LARC,100,101,1000,RAD
LESIZE,20,,,N1
LESIZE,21,,,N1
A,1,2,7,100
A,100,7,9,101
TYPE,2        ! RV SIDE CYLINDER
MAT,2
REAL,2
ASEL,S,AREA,,15,16
ASEL,A,AREA,,4,10,6
MSHKEY,1
AMESH,ALL
MAT,3    ! RV BOTTOM HEAD
ASEL,S,AREA,,7,13,6
MSHKEY,1
AMESH,ALL

ALLSEL

EPLOT
!*GO,:XX
ASEL,S,AREA,,4,13,3
SFA,ALL,1,FSI
SAVE
FINISH

/SOLU
```

```
ANTYPE,MODAL
MODOPT,UNSYMM,3
M,ALL,UX
NSEL,S,LOC,Y,-0.0001,0.0001
D,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
DSYM,SYMM,Z
ALLSEL
SAVE
SOLVE
FINISH

/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,30
SOLVE
FINISH
!:XX
```

부록 B : 격납용기 상세모델 ANSYS 입력자료

```
/TITLE,CONTAINMENT VESSEL

/PREP7
ET,1,SHELL63

! Material 2 : 2(1/4)Cr-1Mo
MP,EX,1,190.0E9       ! for 300 C
MP,DENS,1,7730.
MP,NUXY,1,0.3
R,1,0.025

OD=11.76
RAD=OD/2.-0.025/2   ! shell center
H1=15.25
H2=18.15
BH_RAD=7.+0.15

! SOLID
K,1,RAD
K,2,,,-RAD
K,3,-RAD
K,4,RAD,-H1
K,5,,-H1,-RAD
K,6,-RAD,-H1
K,7,,-H2

K,100,0.,0.,0.
K,101,,-H1

LARC,1,2,100,RAD
LARC,2,3,100,RAD

L,1,4
L,2,5
L,3,6

LARC,4,5,101,RAD
LARC,5,6,101,RAD

LARC,4,7,101,BH_RAD
LARC,5,7,101,BH_RAD
LARC,6,7,101,BH_RAD

N1=8
N2=15

LESIZE,1,,,N1
```

```
LESIZE,2,,,N1

LESIZE,3,,,N2
LESIZE,4,,,N2
LESIZE,5,,,N2

LESIZE,6,,,N1
LESIZE,7,,,N1

LESIZE,8,,,N1
LESIZE,9,,,N1
LESIZE,10,,,N1

A,1,2,5,4
A,2,3,6,5
A,4,5,7,7
A,5,6,7,7
MSHKEY,1
AMESH,ALL

ALLSEL

EPLOT

SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE,MODAL
MODOPT,REDU
M,ALL,UX
NSEL,S,LOC,Y,-0.0001,0.0001
D,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,-0.001,0.001
DSYM,SYMM,Z
ALLSEL
SAVE
SOLVE
FINISH

/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,20
SOLVE
FINISH
```

부록 C : 중간열전달계통 배관 상세모델 ANSYS 입력자료

```
/TITLE, IHTS COLD LEG PIPING SYSTEM of KALIMER-600
/PREP7
ET,1,PIPE16

! BEAM3 REAL PROPERTY
DI_L=0.82
DI_S=0.6
TK_L=1.2506E-2
TK_S=0.95E-2
TK_X=3.E-2
DO_L=DI_L+TK_L*2.
DO_S=DI_S+TK_S*2.
DO_X=1.1

R,1,DO_L,TK_L,,,,860.
R,2,DO_S,TK_S,,,,860.
R,3,DO_X,TK_X,,,,860.

! Material 1 : 316 S.S.
mptemp,1,100,200,300,400,500,600
mptemp,7,700
mpdata,kxx,1,1,15.3,16.8,18.3,19.7,21.2,22.6
mpdata,kxx,1,7,23.9
mpdata,c,1,1,486,508,529,550,571,592
mpdatac,1,7,592.
mpdata,alpx,1,1,16.4e-6,17.0e-6,17.5e-6,17.9e-6,18.3e-6,18.7e-6
mpdata,alpx,1,7,18.7e-6
mpdata,ex,1,1,189.e9,183.e9,176.e9,169.e9,160.e9,151.e9
mpdata,ex,1,7,140.e9
mpdata,dens,1,1,7932.0,7889.0,7846.0,7803.0,7760.0,7717.0
mpdata,dens,1,7,7717.0
mp,nuxy,1,0.306
! Material 2 : 2(1/4)Cr-1Mo
mptemp,1,50,100,200,300,400,500
mpdata,kxx,2,1,36.9,37.2,37.5,35.2,34,32
mpdata,c,2,1,463,484,523,563,610,672
mpdata,alpx,2,1,10.6e-6,10.8e-6,11.2e-6,11.6e-6,11.9e-6,12.2e-6
mpdata,dens,2,1,7723,7710,7680,7650,7610,7580
mpdata,ex,2,1,193.13e9,188.0e9,183.0e9,176.0e9,167.0e9,158.0e9
mp,nuxy,2,0.306
! Material 3 : Mod 9Cr-1Mo
mptemp,1,20,100,150,200,250,300
mptemp,7,350,400,450,500,550,600
mptemp,13,650,700
mpdata,kxx,3,1,22.3,24.4,25.5,26.3,26.9,27.4
mpdata,kxx,3,7,27.7,27.9,27.9,27.9,27.8,27.6
mpdata,kxx,3,13,27.3,27.0
mpdata,alpx,3,1,5.8e-6,6.2e-6,6.5e-6,6.7e-6,6.85e-6,7.05e-6
```

```
mpdata,alpx,3,7,7.22e-6,7.4e-6,7.5e-6,7.65e-6,7.85e-6,8.1e-6
mpdata,alpx,3,13,8.25e-6,8.6e-6
mpdata,ex,3,1,213.e9,208.e9,205.e9,201.e9,198.e9,195.e9
mpdata,ex,3,7,191.e9,187.e9,183.e9,179.e9,174.e9,168.e9
mpdata,ex,3,13,161.e9,153.e9
mp,dens,3,7580
mp,nuxy,3,0.306
! Material 4 : Sodium
mptemp,1,100.,200.,300.,400.,500.,600.
mpdata,kxx,4,1,87.3,81.8,76.6,71.6,66.8,62.3
mpdata,c,4,1,1383.3,1339.1,1304.2,1278.5,1262.1,1255
mpdata,alpx,4,1,68.05e-6,67.61e-6,66.73e-6,65.4e-6,63.63e-6,61.45e-6
mpdata,dens,4,1,926.9,903.6,880.0,856.2,832.2,808.2
mp,ex,4,10.0
mp,nuxy,4,0.306

K,1,0.,3.,0.
K,2,4.18,3.0,0.
K,3,0.,3.,-6.56
K,4,4.18,3.,-6.56
K,5,4.18,3.,-3.28
K,6,8.65,3.,-3.28
K,7,8.65,8.5,-3.28
K,8,8.65,8.5,1.92
K,9,8.65,2.5,1.92

L,1,2
L,2,5
L,3,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
L,7,8
L,8,9

ELB=0.7
LFILLT,1,2,ELB
LFILLT,3,4,ELB
LFILLT,5,6,ELB
LFILLT,6,7,ELB
LFILLT,7,8,ELB

KKK=10
LESIZE,1,,,5
LESIZE,2,,,5
LESIZE,3,,,5
LESIZE,4,,,5
LESIZE,5,,,10
LESIZE,6,,,5
LESIZE,7,,,5
LESIZE,8,,,10
```

```
LESIZE,9,,,KKK
LESIZE,10,,,KKK
LESIZE,11,,,KKK
LESIZE,12,,,KKK
LESIZE,13,,,KKK

K,20,0.,0.,0.,0.
K,21,0.,0.,-6.56
L,1,20
L,3,21
LFILLT,14,1,ELB
LFILLT,15,3,ELB
LESIZE,14,,,5
LESIZE,15,,,5
LESIZE,16,,,10
LESIZE,17,,,10

MAT,3
REAL,2
LMESH,1,4
LMESH,9,10
REAL,1
LMESH,5,8
LMESH,11,13
REAL,3
LMESH,14,17
EPLOT
SAVE
FINISH

*GO,:X
/SOLU
ANTYPE,STATIC
D,123,ALL,0.
D,129,ALL,0.
D,85,ALL,0.    ! EMP Support
!DDEL,85,UY
!D,71,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT -1 (design)
!D,64,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT -2
!D,81,UX,0.    ! HORIZONTAL SUPPORT -3
ACEL,,9.8
!TREF,21.      ! for Thermal Expansion
!TUNIF,390.   ! for Thermal Expansion
ALLSEL
SAVE
SOLVE
FINISH
:X
!*GO,:XX
/SOLU
ANTYPE,MODAL
```

```
MODOPT,SUBSP,20
D,123,ALL,0.
D,129,ALL,0.
D,85,ALL,0.    ! EMP Support
!DDEL,85,UY
D,71,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT (design)
!D,64,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT
!D,81,UX,0.    ! HORIZONTAL SUPPORT
TUNIF,390.
ALLSEL
SAVE
SOLVE
FINISH
/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,20
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST
!:XX
------------------------------------------------------------
/TITLE, IHTS HOT LEG PIPING SYSTEM of KALIMER-600
/PREP7
ET,1,PIPE16

! BEAM3 REAL PROPERTY
DI_L=0.82
DI_S=0.6
TK_L=1.2506E-2
TK_S=0.95E-2
TK_X=3.E-2
DO_L=DI_L+TK_L*2.
DO_S=DI_S+TK_S*2.
DO_X=1.1

R,1,DO_L,TK_L,,,,830.    ! LARGE PIPE
R,2,DO_S,TK_S,,,,830.   ! SMALL PIPE
R,3,DO_X,TK_X,,,,830.   ! CO-PIPE

! STRUCTURAL STEEL(MOD9CR-1Mo, 545 C)
MP,EX,1,174.5E9       ! FOR MODAL ANALYSIS AND DEAD WEIGHT ANALYSIS
MP,DENS,1,7580.0    ! FOR MODAL ANALYSIS AND DEAD WEIGHT ANALYSIS

*GO,:K
! FOR THERMAL EXPANSION ANALYSIS
! Material 3 : Mod 9Cr-1Mo
mptemp,1,20,100,150,200,250,300
mptemp,7,350,400,450,500,550,600
mptemp,13,650,700
mpdata,kxx,1,1,22.3,24.4,25.5,26.3,26.9,27.4
```

```
mpdata,kxx,1,7,27.7,27.9,27.9,27.9,27.8,27.6
mpdata,kxx,1,13,27.3,27.0
mpdata,alpx,1,1,5.8e-6,6.2e-6,6.5e-6,6.7e-6,6.85e-6,7.05e-6
mpdata,alpx,1,7,7.22e-6,7.4e-6,7.5e-6,7.65e-6,7.85e-6,8.1e-6
mpdata,alpx,1,13,8.25e-6,8.6e-6
mpdata,ex,1,1,213.e9,208.e9,205.e9,201.e9,198.e9,195.e9
mpdata,ex,1,7,191.e9,187.e9,183.e9,179.e9,174.e9,168.e9
mpdata,ex,1,13,161.e9,153.e9
mp,dens,1,7580
mp,nuxy,1,0.306
:K

K,1,0.,1.2,0.
K,2,14.65,1.2,0.
K,3,14.65,6.8,0.
K,4,12.15,6.8,0.
K,5,12.15,9.8,0.
K,6,12.15,9.8,-1.23

L,1,2,20
L,2,3,10
L,3,4,10
L,4,5,10
L,5,6,10

ELB=0.7
LFILLT,1,2,ELB
LFILLT,2,3,ELB
LFILLT,3,4,ELB
LFILLT,4,5,ELB

KKK=10
LESIZE,1,,,20
LESIZE,2,,,10
LESIZE,3,,,5
LESIZE,4,,,5
LESIZE,5,,,5
LESIZE,6,,,KKK
LESIZE,7,,,KKK
LESIZE,8,,,KKK
LESIZE,9,,,KKK

K,20,0.,0.,0.,0.
K,21,0.,3.,0.
L,20,1
L,1,21
LESIZE,10,,,3
LESIZE,11,,,3

REAL,2
LMESH,1,9
```

```
REAL,3
LMESH,10,11
EPLOT
SAVE
FINISH

*GO,:X
/SOLU
ANTYPE,STATIC
D,87,ALL,0.
D,46,ALL,0.
!DDEL,46,UY
!D,20,UZ,0.    ! LATERAL SUPPORT-1
D,13,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT-1
ACEL,,9.8
TREF,21.
TUNIF,545.
ALLSEL
SAVE
SOLVE
FINISH
:X

!*GO,:X
/SOLU
ANTYPE,MODAL
MODOPT,SUBSP,20
D,87,ALL,0
D,46,ALL,0
D,20,UZ,0.    ! LATERAL SUPPORT-1
!D,13,UY,0.    ! VERTICAL SUPPORT-1
TUNIF,545.
SAVE
SOLVE
FINISH
/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,20
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST
!:X
-----------------------------------------------------------
/TITLE, IHTS SUCTION LEG of KALIMER-600
/PREP7
ET,1,PIPE16

! BEAM3 REAL PROPERTY
DI_L=0.82
TK_L=1.2506E-2
```

```
DO_L=DI_L+TK_L*2.

R,1,DO_L,TK_L,,,,860.    ! LARGE PIPE

! STRUCTURAL STEEL(MOD9CR-1Mo, 390 C)
MP,EX,1,187.8E9
MP,DENS,1,7580.

K,1,8.65,0.09,1.92
K,2,8.65,-7.8,1.92
K,3,12.15,-7.8,-3.28
K,4,12.15,-5.8,-3.28

L,1,2
L,2,3
L,3,4

ELB=0.7
LFILLT,1,2,ELB
LFILLT,2,3,ELB

KKK=10
LESIZE,1,,,20
LESIZE,2,,,10
LESIZE,3,,,5
LESIZE,4,,,10
LESIZE,5,,,10

REAL,1
LMESH,1,5

EPLOT
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE,MODAL
MODOPT,SUBSP,5
DK,1,ALL,0
DK,4,ALL,0
SAVE
SOLVE
FINISH
/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,5
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST
```

부록 D : 원자로건물 단순모델 ABAQUS 입력자료

```
*Heading
** Job name: kal-fix05 Model name: kal-fix04
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=PART-1-1
*Node
      1,           0.,           0.,           0.
      2,           0.,  3.42285432e-07,          20.
      3,           0.,  3.62822561e-07,  21.2000008
      4,           0.,  4.10742501e-07,          24.
      5,           0.,  4.27856776e-07,          25.
      6,           0.,  5.15139561e-07,  30.1000004
      7,           0.,  9.07056346e-07,          53.
      8,           0.,  9.41284895e-07,          55.
*Element, type=B31
1, 1, 2
2, 2, 3
3, 3, 4
4, 4, 5
5, 5, 6
6, 6, 7
7, 7, 8
*Nset, nset=_PICKEDSET3, internal, generate
 1,  8,  1
*Elset, elset=_PICKEDSET3, internal, generate
 1,  7,  1
*Nset, nset=_PICKEDSET15, internal, generate
 1,  8,  1
*Elset, elset=_PICKEDSET15, internal, generate
 1,  7,  1
*Nset, nset=_PICKEDSET12, internal, generate
 1,  6,  1
*Elset, elset=_PICKEDSET12, internal, generate
 1,  5,  1
*Nset, nset=_PICKEDSET13, internal
 6, 7
*Elset, elset=_PICKEDSET13, internal
 6,
*Nset, nset=_PICKEDSET14, internal
 7, 8
*Elset, elset=_PICKEDSET14, internal
 7,
*Elset, elset=_I1, internal, generate
 1,  5,  1
*Elset, elset=_I2, internal
 6,
```

```
*Elset, elset=_I3, internal
 7,
** Region: (Section-1-_I1:Picked), (Beam Orientation:Picked)
*Elset, elset=_I1, internal, generate
 1,   5,   1
** Section: Section-1-_I1   Profile: Profile-1
*Beam General Section, elset=_I1, section=GENERAL
271.08, 50161., 0., 80834., 66028.8
1.,0.,0.
 3.3e+10, 3.60778e+09,              0.
*Damping, alpha=0.30747, beta=0.0004751
** Region: (Section-2-_I2:Picked), (Beam Orientation:Picked)
*Elset, elset=_I2, internal
 6,
** Section: Section-2-_I2   Profile: Profile-2
*Beam General Section, elset=_I2, section=GENERAL
253.89, 49898., 0., 80311., 112433.
1.,0.,0.
 3.3e+10, 3.60778e+09,              0.
*Damping, alpha=0.30747, beta=0.0004751
** Region: (Section-3-_I3:Picked), (Beam Orientation:Picked)
*Elset, elset=_I3, internal
 7,
** Section: Section-3-_I3   Profile: Profile-3
*Beam General Section, elset=_I3, section=GENERAL
104.58, 21377., 0., 8069.9, 4860.6
1.,0.,0.
 3.3e+10, 3.60778e+09,              0.
*Damping, alpha=0.30747, beta=0.0004751
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=PART-1-1, part=PART-1-1
*End Instance
**
*Nset, nset=_PICKEDSET11, internal, instance=PART-1-1
 1,
*Nset, nset=_PICKEDSET15, internal, instance=PART-1-1
 8,
*Nset, nset=_M5, internal, instance=PART-1-1
 2,
*Nset, nset=_M6, internal, instance=PART-1-1
 2,
*Nset, nset=_M7, internal, instance=PART-1-1
 3,
*Nset, nset=_M8, internal, instance=PART-1-1
 3,
```

```
*Nset, nset=_PICKEDSET9, internal, instance=PART-1-1
 4,
*Nset, nset=_PICKEDSET10, internal, instance=PART-1-1
 6,
*Nset, nset=_PICKEDSET20, internal, instance=PART-1-1
 1,
*Element, type=MASS, elset=_M24_Mass_1_
1, PART-1-1.1
*Mass, elset=_M24_Mass_1_, alpha=0.30747
2.5132e+07,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M25_Mass_1_1_
2, PART-1-1.1
*RotaryI, elset=_M25_Mass_1_1_, alpha=0.30747
660198., 2.08518e+07, 5.55027e+07, 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M26_Mass_2_
3, PART-1-1.2
*Mass, elset=_M26_Mass_2_, alpha=0.3
1.09878e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M27_Mass_2_2_
4, PART-1-1.2
*RotaryI, elset=_M27_Mass_2_2_, alpha=0.3
1.35655e+06, 2.14648e+06, 3.3953e+06, 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M12_Mass_3_
5, PART-1-1.3
*Mass, elset=_M12_Mass_3_
4.1321e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M13_Mass_3_3_
6, PART-1-1.3
*RotaryI, elset=_M13_Mass_3_3_
440132., 579171., 982176., 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M14_Mass_4_
7, PART-1-1.4
*Mass, elset=_M14_Mass_4_
2.9277e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M15_Mass_4_4_
8, PART-1-1.4
*RotaryI, elset=_M15_Mass_4_4_
222911., 368974., 597335., 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M16_Mass_5_
9, PART-1-1.5
*Mass, elset=_M16_Mass_5_
1.6265e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M17_Mass_5_5_
10, PART-1-1.5
*RotaryI, elset=_M17_Mass_5_5_
368710., 593240., 958800., 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M18_Mass_6_
11, PART-1-1.6
*Mass, elset=_M18_Mass_6_
1.6365e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M19_Mass_6_6_
```

```
12, PART-1-1.6
*RotaryI, elset=_M19_Mass_6_6_
2.1567e+06, 3.4975e+06, 5.3227e+06, 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M20_Mass_7_
13, PART-1-1.7
*Mass, elset=_M20_Mass_7_
9.8849e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M21_Mass_7_7_
14, PART-1-1.7
*RotaryI, elset=_M21_Mass_7_7_
1.2294e+06, 1.7134e+06, 2.80475e+06, 0., 0., 0.
*Element, type=MASS, elset=_M22_Mass_8_
15, PART-1-1.8
*Mass, elset=_M22_Mass_8_
5.6506e+06,
*Element, type=ROTARYI, elset=_M23_Mass_8_8_
16, PART-1-1.8
*RotaryI, elset=_M23_Mass_8_8_
134766., 379516., 172655., 0., 0., 0.
*End Assembly
** ----------------------------------------------------------------
**
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1, perturbation
*Frequency, eigensolver=Lanczos, acoustic coupling=on, normalization=displacement,
number interval=1, bias=1.
, , 30., , ,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Disp-BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 1, 1
** Name: Disp-BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 2, 2
** Name: Disp-BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 3, 3
** Name: Disp-BC-4 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 4, 4
** Name: Disp-BC-5 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 5, 5
** Name: Disp-BC-6 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PICKEDSET20, 6, 6
**
** OUTPUT REQUESTS
```

```
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
*End Step
```

부록 E : KALIMER-600 시간이력 지진응답해석 ANSYS 입력자료

```
! HORIZONTAL SEISMIC TIME HISTORY ANALYSIS
/INPUT,MODEL,INP

/TITLE, HORIZONTAL SEISMIC TIME HISTORY ANALYSIS OF KALIMER-600

/INPUT,LOAD,INP

/CONFIG,NRES,5000
/SOLU
! Excitation node
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
TIMINT,OFF
OUTRES,ALL,1
PI=ACOS(-1)
!CDR=0.03    ! OBE
CDR=0.05    ! SSE
!STRUCTURAL DAMPING
FREQ1=0.5       ! ISOLATION
FREQ2=10.       ! ISOLATION
!FREQ1=3            ! NON-ISOLATION
!FREQ2=10          ! NON-ISOLATION
BET=CDR/(PI*(FREQ2+FREQ1))
ALP=4.*PI*FREQ1*(CDR-BET*PI*FREQ1)
ALPHAD,ALP
BETAD,BET
TIMINT,ON
SAVE

!D,101,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! NON-ISOLATION
D,101,ROTX,,,,,ROTY,ROTZ                    ! ISOLATION
D,301,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION
D,302,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION
D,303,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION
D,304,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION
D,305,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION
D,306,UY,0,,,,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ ! ISOLATION

*DO,T_STEP,1,N_STEP,1
TIME,DAT_T(T_STEP)
!D,101,UX,DAT_D(T_STEP)                       ! NON-ISOLATION
D,301,UX,DAT_D(T_STEP)
D,302,UX,DAT_D(T_STEP)
D,303,UX,DAT_D(T_STEP)
D,304,UX,DAT_D(T_STEP)
D,305,UX,DAT_D(T_STEP)
D,306,UX,DAT_D(T_STEP)
SOLVE
```

```
*ENDDO

SAVE
FINISH
```

```
! FILE NAME = MODEL.INP

/TITLE, KALIMER-600 SEISMIC TIME HISTORY ANALYSIS
/PREP7
ET,1,BEAM4
ET,2,PIPE16
ET,3,MASS21
ET,4,COMBIN14,,1
ET,5,COMBIN14,,2
ET,6,COMBIN14,,3
!
!! DEMENSIONS
!
RV_RO=11.41/2.
RV_RI=11.31/2.
CV_RO=11.76/2.
CV_RI=11.71/2.
!
!! REAL PROPERTIES
!
! RV
R,200,1.784423,28.78546818,28.78546818,1,1
! CV
R,201,921.664745E-3,15.8654,15.8654,1,1
! IHTS PIPING
PDI_L=0.82       ! LARGE PIPE
PDI_S=0.6        ! SMALL PIPE
PDI_X=1.1        ! CO-PIPE
PTK_L=1.2506E-2
PTK_S=0.95E-2
PTK_X=3.E-2
PDO_L=PDI_L+2.*PTK_L
PDO_S=PDI_S+2.*PTK_S
PDO_X=PDI_X+2.*PTK_X
R,202,PDO_L,PTK_L,,,,860.
R,203,PDO_S,PTK_S,,,,860.
R,204,PDO_X,PTK_X,,,,860.
! SG
SG_DO=4.1
SG_TK=0.025
SG_DI=SG_DO-SG_TK*2.
SG_A=3.14*(SG_DO**2.-SG_DI**2.)/4.
SG_I=3.14*(SG_DO**4.-SG_DI**4.)/64.
R,205,SG_A,SG_I,SG_I,1,1
! RX BUILDING
R,206,271.08,.80834E5,.50161E5,1,1
```

```
RMORE,,.91706720E13,1,1
R,207,271.08,.80834E5,.50161E5,1,1
RMORE,,.91706720E13,1,1
R,208,271.08,.80834E5,.50161E5,1,1
RMORE,,91706720E13,1,1
R,209,271.08,.80834E5,.50161E5,1,1
RMORE,,.91706720E13,1,1
R,210,271.08,.80834E5,.50161E5,1,1
RMORE,,.91706720E13,1,1
R,211,253.89,.80311E5,.49898E5,1,1
RMORE,,.14872130E14,1,1
R,212,104.58,.80699E4,.21377E5,1,1
RMORE,,.67508280E13,1,1
! RX VAULT
RXV_RO=7.606
RXV_TK=1.5
RXV_RI=RXV_RO-RXV_TK
RXV_A=3.14*(RXV_RO**2.-RXV_RI**2.)
RXV_I=3.14*(RXV_RO**4.-RXV_RI**4.)/4.
R,213,RXV_A,RXV_I,RXV_I,1,1
! IHTS PUMP
R,214,SG_A,SG_I,SG_I,1,1
! ISOLATOR
KH=(2.*3.14159*0.5)**2.*57601.E3/6.
KV=(2.*3.14159*21.)**2.*57601.E3/6.
R,301,KH,0.12
R,302,KV,0.03

!! MATERIAL PROPERTIES
!
! (316SS, 370C)
MP,EX,1,170.0E9
MP,DENS,1,7814
!MP,DMPR,1,0.03
! (2(1/4)Cr-1Mo, 300 C)
MP,EX,2,190.0E9
MP,DENS,2,7730.
MP,NUXY,2,0.3
!MP,DMPR,2,0.03
! (MOD9CR-1Mo, 390 C)
MP,EX,3,187.8E9
MP,DENS,3,7580.
!MP,DMPR,3,0.03
! (INTERNAL REINFORCED CONCRETE: RX VAULT)
MP,EX,4,29.2E9
MP,DENS,4,2400.
MP,GXY,4,12.45E9
MP,NUXY,4,0.17
!MP,DMPR,4,0.03
! (REINFORCED CONCRETE: RX BUILDING)
MP,EX,5,33.0E9
```

```
MP,DENS,5,0.
MP,GXY,5,2.7778E9
!MP,NUXY,5,0.17
!MP,DMPR,5,0.03

!! MASS21 REAL PROPERTIES
!
! RV
M1=463.E3
M2=400.E3
M3=1163.E3
M_RVBH=49.833E3+330.E3
IMY1=0.5*M1*(CV_RO**2.+CV_RI**2.)
IMX3=M_RVBH*10.**2.
IMY3=M_RVBH*RV_RI**2.
IMZ3=M_RVBH*10.**2.
R,1,M1,M1,M1,0.,IMY1,0.
R,2,M2,M2,M2,0.,0.,0.
R,3,M3,M3,M3,IMX3,IMY3,IMZ3
! CV
M5=25.7381E3
IMX5=M5*10.**2.
IMY5=0.5*M5*(CV_RO**2.+CV_RI**2.)
IMZ5=IMX5
R,5,M5,M5,M5,IMX5,IMY5,IMZ5
! IHTS PUMP

! SG

! RX BUILDING
R,101,23783.1E3,23783.1E3,23783.1E3,.208518E7,.550275E7,.369961E7
R,102,3096.3E3,3096.3E3,3096.3E3,.135655E7,.339530E7,.217648E7
R,103,2630.9E3,2630.9E3,2630.9E3,.404132E6,.982176E6,.579170E6
R,104,1236.1E3,1236.1E3,1236.1E3,.229106E6,.597335E6,.368974E6
R,105,1984.3E3,1984.3E3,1984.3E3,.368716E6,.958881E6,.593241E6
R,106,11581.2E3,11581.2E3,11581.2E3,.215657E7,.532277E7,.349753E7
R,107,6534.1E3,6534.1E3,6534.1E3,.122948E7,.280475E7,.171340E7
R,108,1013.2E3,1013.2E3,1013.2E3,.134766E6,.172655E6,.379516E5
!
! NODE GENERATION
!
! RX
N,1,-3.,0.0
N,2,-3.,-9.0
N,3,-3.,-18.0

! CV
N,4 ,3.,-9.075
N,5,3.,-18.15
N,500,3.
```

```
! IHTS COLDLEG - R
ELB=0.7
DL=6.56/2.          ! FOR LOCATION CENTERING BETWEEN IHXs
DX=2.7              ! LOCATION CENTERING TO RX CENTER
TL=ELB              ! TUNING LENGTH WITH CONSIDERATION OF ELBOW AT CO-PIPE =
RAD OF ELBOW
N,6 ,0.+DX,1.2,0.+DL
N,7,0.+DX,3.,0.+DL
N,8,4.18+DX-TL,3.0,0.+DL
N,9,0.+DX,1.2,-6.56+DL
N,10,0.+DX,3.,-6.56+DL
N,11,4.18+DX-TL,3.,-6.56+DL
N,12,4.18+DX-TL,3.,-3.28+DL
N,13,7.573+DX-TL,3.,-3.28+DL
N,14,8.65+DX-TL-TL/2.,3.,-3.28+DL
N,15,8.65+DX-TL-TL/2.,8.5,-3.28+DL
N,16,8.65+DX-TL-TL/2,8.5,1.92+DL
N,17,8.65+DX-TL-TL/2.,2.5,1.92+DL
N,501,0.+DX,,0.+DL
N,502,0.+DX,,-6.56+DL

! IHTS SUCTION LEG - R
N,503,8.65+DX-TL-TL/2.,0.09,1.92+DL
N,18,8.65+DX-TL-TL/2.,-7.8+TL/2.,1.92+DL
N,19,12.15+DX-TL-TL/2.,-7.8+TL/2.,-3.28+DL+TL/2.

! IHTS HOTLEG PIPING - R
TL3=0               ! TUNING LENGTH =(RAD OF ELBOW/2.)
N,20,7.325+DX-TL3,1.2,0.+DL
N,21,12.555+DX-TL3,1.2,0.+DL
N,22,14.65+DX-TL3,1.2,0.+DL
N,23,14.65+DX-TL3,6.8,0.+DL
N,24,12.15+DX+TL3,6.8,0.+DL
N,25,12.15+DX+TL3,9.8,0.+DL
N,504,12.15+DX+TL3,9.8,-1.23+DL

N,26,7.325+DX-TL3,1.2,0.-DL
N,27,12.555+DX-TL3,1.2,0.-DL
N,28,14.65+DX-TL3,1.2,0.-DL
N,29,14.65+DX-TL3,6.8,0.-DL
N,30,12.15+DX+TL3,6.8,0.-DL
N,31,12.15+DX+TL3,9.8,0.-DL
N,505,12.15+DX+TL3,9.8,1.23-DL

! S/G - R
N,32,12.15+DX-TL-TL/2.,-5.8+TL/2.,-3.28+DL+TL/2.
N,33,12.15+DX-TL-TL/2.,-5.8+TL/2.+10,-3.28+DL+TL/2.   ! 7.8=(L of SG)/2
N,34,12.15+DX-TL-TL/2.,9.8,-3.28+DL+TL/2.
N,35,12.15+DX-TL-TL/2.,9.8+0.3,-3.28+DL+TL/2.   ! 0.3=ASSUMPTION

! RX BUILDING
```

```
G1=2.
G2=0.   ! DISTANCE RX BUILDING APART FROM RX CENTER
G0=-20.   ! HEIGHT BETWEEN FLOOR BOTTOM TO RX HEAD
N,101,G2,G0.
N,102,G2,G0+20.
N,103,G2,G0+21.2
N,104,G2,G0+24.
N,105,G2,G0+25.
N,106,G2,G0+30.1
N,107,G2,G0+53.
N,108,G2,G0+55.

! RX VAULT
N,109,,-10.
N,508,
N,509,,G0

! ELEMENT GENERATION
!
! RX
REAL,200
E,1,2
E,2,3

! CV
REAL,201 $MAT,2
E,500,4
E,4,5

! IHTS COLD LEG - R
TYPE,2 $REAL,204 $MAT,3
E,501,6
E,6,7
REAL,203
E,7,8
E,8,12
REAL,204
E,502,9
E,9,10
REAL,203
E,10,11
E,11,12
REAL,202
E,12,13
E,13,14
E,14,15
E,15,16
E,16,17

! IHTS SUCTION LEG - R
REAL,202
```

```
E,503,18
E,18,19
E,19,32

! IHTS HOT LEG - R
REAL,203
E,6,20
E,20,21
E,21,22
E,22,23
E,23,24
E,24,25
E,25,504

E,9,26
E,26,27
E,27,28
E,28,29
E,29,30
E,30,31
E,31,505

! SG - R
TYPE,1 $MAT,3 $REAL,205
E,32,33
E,33,34
E,34,35

! RX BUILDING
MAT,5
REAL,206 $E,101,102
REAL,207 $E,102,103
REAL,208 $E,103,104
REAL,209 $E,104,105
REAL,210 $E,105,106
REAL,211 $E,106,107
REAL,212 $E,107,108

! RX VAULT
TYPE,1   $MAT,4   $REAL,213
E,508,109
E,109,509

! IHTS PUMP - R
TYPE,1 $MAT,2 $REAL,214
E,17,503

! CONCENTRATED MASS ELEMENT GENERATION
!
! RX
TYPE,3
```

```
REAL,1 $E,1
REAL,2 $E,2
REAL,3 $E,3
! CV
REAL,5 $E,5

! RX BUILDING
REAL,101 $E,101
REAL,102 $E,102
REAL,103 $E,103
REAL,104 $E,104
REAL,105 $E,105
REAL,106 $E,106
REAL,107 $E,107
REAL,108 $E,108

! IHTS COLDLEG - L
N,36,-(0.+DX),1.2,0.+DL
N,37,-(0.+DX),3.,0.+DL
N,38,-(4.18+DX-TL),3.0,0.+DL
N,39,-(0.+DX),1.2,-6.56+DL
N,40,-(0.+DX),3.,-6.56+DL
N,41,-(4.18+DX-TL),3.,-6.56+DL
N,42,-(4.18+DX-TL),3.,-3.28+DL
N,43,-(7.573+DX-TL),3.,-3.28+DL
N,44,-(8.65+DX-TL-TL/2.),3.,-3.28+DL
N,45,-(8.65+DX-TL-TL/2.),8.5,-3.28+DL
N,46,-(8.65+DX-TL-TL/2.),8.5,1.92+DL
N,47,-(8.65+DX-TL-TL/2.),2.5,1.92+DL
N,506,-(0.+DX),,0.+DL
N,507,-(0.+DX),,-6.56+DL

! IHTS SUCTION LEG - L
N,48,-(8.65+DX-TL-TL/2.),-7.8+TL/2.,1.92+DL
N,49,-(12.15+DX-TL-TL/2.),-7.8+TL/2.,-3.28+DL+TL/2.
N,510,-(8.65+DX-TL-TL/2.),0.09,1.92+DL

! IHTS HOTLEG PIPING - L
TL3=0    ! TUNING LENGTH =(RAD OF ELBOW/2.)
N,50,-(7.325+DX-TL3),1.2,0.+DL
N,51,-(12.555+DX-TL3),1.2,0.+DL
N,52,-(14.65+DX-TL3),1.2,0.+DL
N,53,-(14.65+DX-TL3),6.8,0.+DL
N,54,-(12.15+DX+TL3),6.8,0.+DL
N,55,-(12.15+DX+TL3),9.8,0.+DL
N,511,-(12.15+DX+TL3),9.8,-1.23+DL

N,56,-(7.325+DX-TL3),1.2,0.-DL
N,57,-(12.555+DX-TL3),1.2,0.-DL
N,58,-(14.65+DX-TL3),1.2,0.-DL
N,59,-(14.65+DX-TL3),6.8,0.-DL
```

```
N,60,-(12.15+DX+TL3),6.8,0.-DL
N,61,-(12.15+DX+TL3),9.8,0.-DL
N,512,-(12.15+DX+TL3),9.8,1.23-DL

! S/G - L
N,62,-(12.15+DX-TL-TL/2.),-5.8+TL/2.,-3.28+DL+TL/2.
N,63,-(12.15+DX-TL-TL/2.),-5.8+TL/2.+10,-3.28+DL+TL/2.
N,64,-(12.15+DX-TL-TL/2.),9.8,-3.28+DL+TL/2.
N,65,-(12.15+DX-TL-TL/2.),9.8+0.3,-3.28+DL+TL/2.   ! 0.3=ASSUMPTION

! ELEMENT GENERATION
!
! IHTS COLD LEG - L
TYPE,2 $REAL,204 $MAT,3
E,506,36
E,36,37
REAL,203
E,37,38
E,38,42
REAL,204
E,507,39
E,39,40
REAL,203
E,40,41
E,41,42
REAL,202
E,42,43
E,43,44
E,44,45
E,45,46
E,46,47

! IHTS SUCTION LEG - L
REAL,202
E,510,48
E,48,49
E,49,62

! IHTS HOT LEG - L
REAL,203
E,36,50
E,50,51
E,51,52
E,52,53
E,53,54
E,54,55
E,55,511

E,39,56
E,56,57
E,57,58
```

```
E,58,59
E,59,60
E,60,61
E,61,512

! SG - L
TYPE,1 $MAT,3 $REAL,205
E,62,63
E,63,64
E,64,65

! IHTS PUMP - R
TYPE,1 $MAT,2 $REAL,214
E,47,510

! COUPLING NODES
!
CP,1,ALL,508,1,500,501,502,506,507
CP,7,ALL,34,504,505
CP,13,ALL,64,511,512

CP,19,ALL,101,509
CP,25,ALL,102,503,510

CP,31,UZ,103,21,27,51,57
CP,32,UY,104,13,43

CP,33,ALL,105,33,63
CP,39,UX,106,35,65

!*GO,:XX
!! SEIMSIC ISOLATION

BL_X=49./2.
BL_Z=36./2.

N,301,-BL_X,G0,BL_Z
N,302,,G0,BL_Z
N,303,BL_X,G0,BL_Z
N,304,-BL_X,G0,-BL_Z
N,305,,G0,-BL_Z
N,306,BL_X,G0,-BL_Z

TYPE,4
REAL,301
E,101,301
E,101,302
E,101,303
E,101,304
E,101,305
E,101,306
```

```
TYPE,5
REAL,302
E,101,301
E,101,302
E,101,303
E,101,304
E,101,305
E,101,306
TYPE,6
REAL,301
E,101,301
E,101,302
E,101,303
E,101,304
E,101,305
E,101,306
!:XX

SAVE
eplot
FINISH

*GO,:X
/SOLU
ANTYPE,MODAL
MODOPT,SUBSP,5
!M,ALL,UX
!D,101,ALL      ! FOR NON-ISOLATION
D,101,ROTX,,,,,ROTY,ROTZ
D,301,ALL
D,302,ALL
D,303,ALL
D,304,ALL
D,305,ALL
D,306,ALL
SAVE
SOLVE
FINISH
/SOLU
EXPASS,ON
MXPAND,5
SOLVE
:X
SAVE
FINISH
```

! FILE NAME = LOAD.INP

```
! STORE DISPLACEMENT TIME HISTORY DATA
n_step=2100        ! NUMBER OF TIME STEP
!VFC=2.0/3.0    ! for Vertical
```

```
VFC=1.0                ! for Horizontal
!AMP=1.071428571*VFC              ! OBE
AMP=1.071428571*2.0*VFC        ! SSE
G=9.8
GRAV=AMP*G
*dim,dat_t,array,n_step
*dim,dat_a,array,n_step
*vread,dat_t(1),k_acc,dat
 (3x,e22.5)
*vread,dat_a(1),k_acc,dat
 (27x,e25.5)
*voper,dat_a(1),dat_a(1),mult,GRAV
*dim,dat_v,array,n_step
*voper,dat_v(1),dat_a(1),int1,dat_t(1),0.005
*dim,dat_d,array,n_step
*voper,dat_d(1),dat_v(1),int1,dat_t(1)
*vplot,dat_t(1),dat_d(1)
!*GO,:X1
/output,frs,out
VPUT,DAT_T,2
VPUT,DAT_D,3
FILLDATA,4,1,1000,1,0.1,0.1
RESP,5,4,3,3,0.05,0.01
PRTIME,0.0,100.0
XVAR,4
PLVAR,5
PRVAR,5
/OUTPUT
!:X1
```

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3355/2007			

Title / Subtitle

Development of Seismic Analysis Model and Time History Analysis for KALIMER-600

Project Manager and Dept. (Main Author)	Gyeong-Hoi Koo / Development of LMR Design Technology
Researcher and Dept.	J.H. Lee / Development of LMR Design Technology

Pub. Place	Daejeon, Korea	**Pub. Org.**	KAERI	**Pub. Date**	February, 2007
Page	86P	**Fig. and Tab.**	Yes(o), No( )	**Size**	26 cm
Note					
Classified	Open(o), Outside( ), __Class		**Report Type**		
Sponsoring Org.			**Contract No.**		

Abstract (About 300 Words)

This report describes a simple seismic analysis model of the KALIMER-600 sodium cooled fast reactor and its application to the seismic time history analysis. To develop the simple seismic analysis model, the detailed 3-D finite element analyses for main components, IHTS piping system, and reactor building were carried out to verify the dynamic characteristics of each part of simple seismic analysis models. By using the developed simple model, the seismic time history analyses for both cases of a seismic isolation and non-isolation design of KALIMER-600 were performed. From the comparison of the calculated floor response spectrum, it is verified that the seismically isolated KALIMER-600 reactor building shows a great performance of a seismic isolation and assures a seismic integrity.

Subject Keywords (About 10 Words)

KALIMER-600, Sodium- Cooed Fast Reactor, Seismic Analysis Model, Seismic Time History Analysis, Floor Response Spectrum, Seismic Isolation Design, Fluid-Structure Interaction

서 지 정 보 양 식

수행기관 보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드
KAERI/TR-3355/2007			

제목 /부제	KALIMER-600 지진해석모델 개발 및 시간이력 지진응답해석
연구책임자 및 부서명 (TR일 경우 주저자)	구 경 회 / 액체금속로 설계기술개발
연구자 및 부서명	이재한/ 액체금속로 설계기술개발

발 행 지	한국, 대전	발행기관	한국원자력(연)	발행일	2007. 02
페 이 지	86 P	도 표	유(o), 무( )	크 기	26 cm
참고사항					

비밀여부	공개 (o), 대외비( ), __급비밀	보 고 서 종 류	
연구위탁기관		계 약 번 호	

초록 (300단어 내외)

본 보고서에서는 소듐냉각고속로 KALIMER-600에 대한 지진해석모델을 개발하고 시간이력 지진응답해석을 수행하여 주요 기기 및 구조물에서의 지진응답을 분석결과를 기술하였다. 단순지진해석모델을 개발하기 위하여 각 주요 기기, 이차열전달계통 배관시스템, 그리고 원자로 건물에 대한 상세 유한요소해석을 통한 동특성 해석을 수행하여 개발된 단순모델의 정확성을 검증하였다. 단순지진해석모델을 사용하여 면진설계와 비면진설계 조건에 대한 시간이력지진해석을 수행하고 층응답스펙트럼 계산결과를 상호 비교분석하여 KALIMER-600의 면진성능과 지진건전성을 확인하였다.

주제명 키워드 (10단어 내외)

KALIMER-600, 소듐냉각 고속로, 지진해석모델, 시간이력지진응답해석, 층응답스펙트럼, 면진설계, 유체-구조물 상호작용