

KALIMER-600 지진해석모델 개발 및 시간이력 지진응답해석

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

구경회¹⁾ · 이재한²⁾

Koo, Gyeong-Hoi · Lee, Jae-Han

국문 요약 >> 본 논문에서는 제4세대 소듐냉각고속로(Sodium-Cooled Fast Reactor)의 후보 노형으로 선정된 KALIMER-600에 대한 단순 지진해석모델을 개발하고 시간이력 지진응답해석을 수행하여 수평 면진설계(Seismic Isolation) 기술이 적용된 원자로건물의 주요 기기 및 구조물에서의 지진응답 성능을 분석하였다. 개발된 단순 지진해석모델은 원자로건물, 원자로시스템, 주요 기기, 중간 열전달계통 배관, 그리고 면진장치를 포함하며 각각은 상세 유한요소해석을 통한 동특성 비교검증을 통하여 정확성을 검증하였다. 안전정지기준 0.3g의 설계인공지진 하중에 대한 시간이력 지진응답해석을 수행하여 면진설계와 비면진 설계조건에 따른 원자로 주요 부위에서의 층응답스펙트럼을 비교분석한 결과 KALIMER-600의 면진성능이 우수한 것으로 나타났다.

주요어 소듐냉각고속로, KALIMER-600, 단순지진해석모델, 면진설계, 시간이력 지진응답해석

ABSTRACT >> In this paper, a simple seismic analysis model of the KALIMER-600 sodium-cooled fast reactor selected to be the candidate of the GEN-IV reactor is developed. By using this model, the seismic time history analysis is carried out to investigate the feasibilities of a seismic isolation design. The developed simple seismic analysis model includes the reactor building, reactor system, IHTS piping system, steam generator, and seismic isolators. The dynamic characteristics of the simple seismic model are verified with the detailed 3-dimensional finite element analysis for each part of the KALIMER-600 system. By using the developed simple seismic model, the seismic time history analyses for both cases of a seismic isolation and non-isolation design are performed for the artificial time history of a SSE (Safe Shutdown Earthquake) 0.3g. 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.

Key words Sodium-cooled fast reactor, KALIMER-600, Simple seismic analysis model, Seismic isolation design, Seismic time history analysis

1. 서론

최근 제4세대 후보 노형으로 선정된 KALIMER-600(Korea Advanced Liquid Metal Reactor - 600 MWe) 소듐냉각고속로는 1) 지속성, 2) 경제성, 3) 안전성, 그리고 4) 핵확산 저항성을 모두 갖춘 미래형 원자로 개발을 목표로 개념설계가 진행 중에 있다¹⁾. 제4세대 원자로가 반드시 갖추어야 할 4가지 노형목표 가운데 경제성과 안전성은 제4세대 원자

로를 상용화하기 위한 가장 중요한 현안으로 대두되고 있다.

실제로 원자로 설계에 있어서 지진하중이 차지하는 비중은 다른 설계하중들에 비하여 매우 크다. 따라서 원자로 주요 기기 및 부품 그리고 구조물의 내진설계를 위한 정확한 설계지진하중 생산은 매우 중요하며 이는 원자로설계의 경제성 및 안전성 문제와 직결된다. 이러한 제4세대 원자로의 경제성과 안전성 목표를 달성하기 위해서 원자로건물 전체를 지진으로부터 격리시켜 지진하중을 최소화시킬 수 있는 면진설계(Seismic Isolation Design) 기술의 도입은 세계적인 추세이다²⁻⁵⁾.

개념설계가 진행중인 600 MWe급 KALIMER-600은 제4대 노형목표를 달성하기 위하여 원자로건물과 지반사이에 면진설계가 도입되어 있다. 이에 대한 지진설계 타당성을

¹⁾ 한국원자력연구원 책임연구원, 공학박사
(대표저자: ghkoo@kaeri.re.kr)

²⁾ 정회원 · 한국원자력연구원 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 3. 15 / 심사종료일 : 2007. 5. 7)

신속하고 정확하게 평가하여 설계변경에 따른 설계지진하중생산에 능동적으로 대처하기 위해서는 설계 입력지진 파형에 대한 시간이력 지진응답해석을 수행할 수 있는 단순 지진해석모델 개발이 필수적이다. 이전 연구에서 면진설계기술이 적용된 150 MWe급 KALIMER-150 원자로시스템에 대한 단순 지진해석모델 개발연구가 수행된 바 있으나⁽⁶⁾ 원자로건물과 중간 열전달 계통에 대한 세부적인 고려가 포함되지 않았고 주로 원자로용기 내부에 설치된 주기기 및 노심에서의 지진거동 분석에 초점을 두었다. 본 논문에서는 면진설계 기술이 적용된 KALIMER-600의 원자로건물, 원자로용기와 내부구조물을 포함하는 원자로 시스템, 격납용기, 중간 열교환계통 배관, 증기발생기, 그리고 면진장치 등을 포함하는 단순 지진해석모델 개발에 초점을 두었다. 각 계통별 단순모델의 정확성은 상세 유한요소 해석을 통한 동특성 해석결과와의 비교를 통해 검증하고 시간이력 지진응답해석의 신뢰성을 확보하였다. 특히 원자로시스템의 경우에 원자로용기와 일차냉각재와의 유체-구조물 상호 작용은 동특성에 영향을 미치게 된다^(7,8). 본 논문에서는 일차냉각재에 의한 유체-원자로용기 상호작용을 고려한 상세 유한요소 해석모델을 작성하고 동특성 해석을 수행하여 그 결과에 상응하는 단순 해석모델을 개발하였다. 개발된 KALIMER-600 단순 지진해석모델을 사용하여 US NRC R.G. 1.60에 부응하는 안전정지기준 0.3g의 설계인공지진하중에 대해 면진설계와 비면진설계 조건에서의 시간이력 지진응답해석을 각각 수행하고 원자로건물을 비롯한 주요 기기에서의 응답스펙트럼 계산결과를 상호 비교하여 KALIMER-600의 면진성능과 지진안전성을 분석하였다.

2. KALIMER-600 개념구성

단순 지진해석모델에 포함된 개념설계 중인 KALIMER-600 소듐냉각고속로의 주요 기기 및 계통의 구성은 다음과 같다.

- a. 원자로시스템 (Reactor System)
- b. 격납용기 (Containment Vessel)
- c. 중간 열교환계통 배관 (IHTS Piping System)
 - 고온관 (Hot Leg)
 - 저온관 (Cold Leg)
 - 흡입관 (Suction Leg)
- d. 2차계통 전자펌프 (Electro Magnetic Pump)
- e. 증기발생기 (Steam Generator)
- f. 원자로 지지벽 (RX Support Wall)
- g. 원자로건물 (Reactor Building)
- h. 면진장치 (Seismic Isolators)

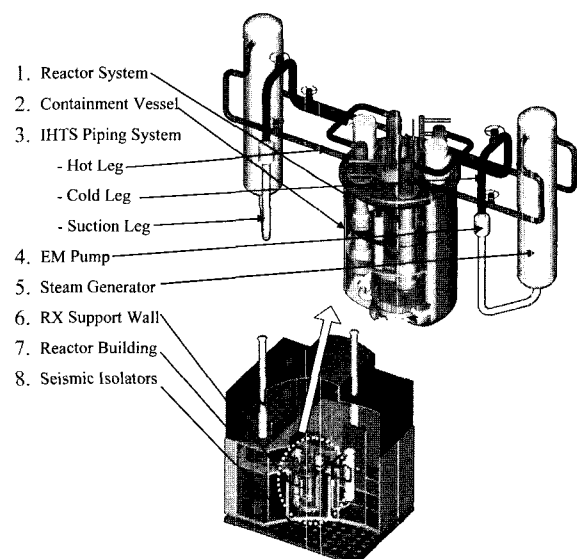
Fig. 1은 개념 설계중인 KALIMER-600 원자로 시스템의 형상 및 각부 명칭을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 원자로시스템은 2-루프의 중간열교환 시스템으로 되어 있으며 2개의 증기발생기를 가지고 있다. 풀형(Pool type)인 원자로 시스템의 용기는 일차냉각재를 비롯한 노심, 중간열교환기(4개), 일차냉각펌프(2개), 노상상부구조물, 그리고 노심 지지물을 비롯한 각종 내부구조물을 담고 있는 원자로용기와 이를 에워싼 격납용기로 구성된 이중용기 구조를 하고 있다. 중간열교환기와 증기발생기를 연결하는 고온배관 형상은 각 중간열교환기에서 나온 2개의 고온배관이 하나의 대형배관으로 합쳐져서 증기발생기로 들어가고 하나의 증기발생기에서 나온 다시 2개의 저온배관은 다시 동축배관을 통해 각 중간열교환기와 연결된다.

KALIMER-600 원자로건물 전체는 입력지진하중을 최소화하고 부지특성의 영향을 최소화할 수 있는 면진설계 기술이 적용되어 있다.

3. 단순 지진해석모델 개발

원자로 주기기 및 구조물들에 대한 내진설계를 위해서는 이들 각 지지점에서의 설계 입력지진응답 스펙트럼을 정의하여야 한다. 이를 위해서는 지반으로부터의 입력지진하중에 대한 시간이력 지진응답 해석이 요구된다. 본 논문에서는 시간이력지진해석시간을 최소화하고 원자로 주기기 및 구조물에서의 설계지진응답 스펙트럼을 생산할 수 있는 단순 지진해석모델을 개발하였다.

단순 지진해석모델 개발과 관련하여 본 논문에서 설정한 기본요건 사항은 다음과 같다.



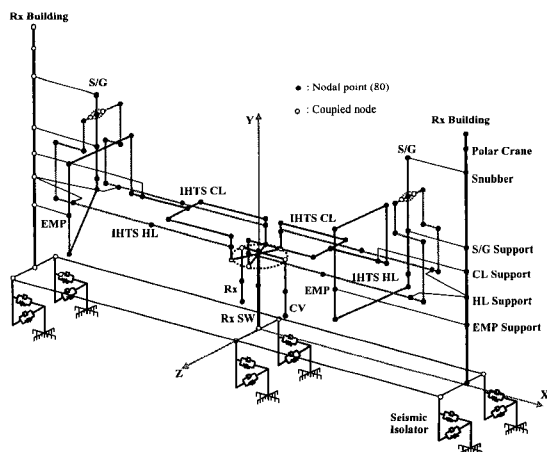
(Fig. 1) Configurations of KALIMER-600 System

- 총 목표 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
- 총 관성질량의 크기 유지

Fig. 2는 위의 기본요건을 고려하여 본 논문에서 설정한 KALIMER-600 전체 시스템에 대한 단순 지진해석모델 개념도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전체 목표 사용절점은 총 80개이며 주요 기기, 배관계통, 그리고 건물과의 연결부위는 상호 연계거동을 고려하여 자유도를 연계시키는 연계절점(Coupling node)을 사용하였다. 해석에 사용된 유한요소 형태는 ANSYS 상용 유한요소 해석코드에서 제공하는 수학적 모델들을 사용하였다.

3.1 원자로 시스템

KALIMER-600 원자로 시스템은 풀형(Pool type)으로 원자로용기 내부에는 일차냉각재를 비롯한 중간 열교환기, 일차펌프, 노심 핵연료, 노내 상부구조물 등 각종 주요 기기 및 부품들이 설치되어 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 취



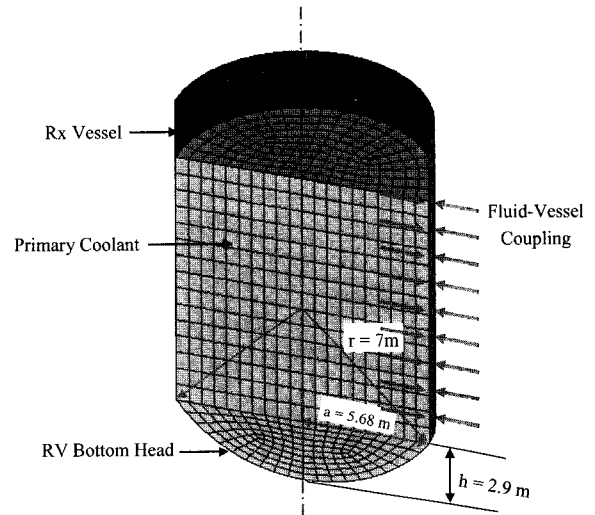
<Fig. 2> Proposed Concept of a Simple Seismic Model of KALIMER-600

약점으로 나타난다. 원자로용기에 대한 재질은 316 스테인레스강이다.

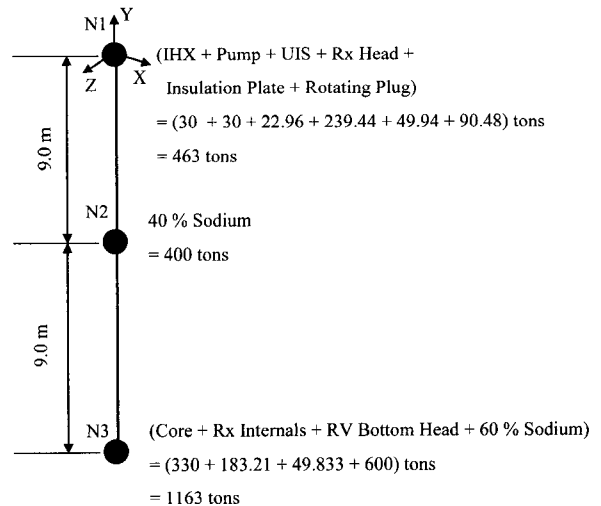
상세 유한요소 해석모델

복잡한 원자로 시스템에 대한 단순 내진해석모델 개발을 위하여 원자로 내부구조물을 비롯한 노심 핵연료집합체는 단순부가질량으로 고려하고 일차냉각재는 박막원자로용기와의 유체-구조물 상호작용을 고려한 원자로용기에 대한 상세 유한요소 해석모델을 사용하였다. Fig. 3(a)은 유체-구조물 상호작용을 고려한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것으로 해석모델 개발에 사용된 일반적인 가정은 다음과 같다.

- 원자로용기-소듐냉각재 상호작용에 있어 내부기기, 노심 및 원자로내부구조물의 영향은 무시



(a) Detail Finite Element Model



(b) Simple Model

<Fig. 3> Seismic Analysis Model of Reactor System

- 노심을 비롯한 모든 내부구조물은 원자로하부헤드에 균일분포
- 중간열교환기, 일차냉각펌프, 노내상부구조물, 그리고 노내핵연료 교환장치의 관성질량은 모두 원자로헤드에 작용
- 원자로용기 상부 끝단의 변형은 무시

Fig. 3(a)에서 일차냉각재를 담고 있는 원자로용기 모델에 사용된 유한요소 형태는 ANSYS에서 제공하는 SHELL63 (Elastic Shell Element) 요소를 사용하였고 일차냉각수인 소듐은 FLUID30(3-D Acoustic Fluid Element) 요소를 사용하였다. 해석모델에 사용된 총 절점 개수는 3921개이며 요소 수는 3800개이다.

일반가정에서 기술한 바와 같이 원자로 하부헤드에 작용하는 노심핵연료집합체 및 원자로내부구조물의 관성질량은 하부헤드에 모두 균일하게 작용하는 것으로 가정하고 하부헤드의 등가밀도(Equivalent density)는 다음과 같이 결정하였다.

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

위의 계산식에서 노심핵연료집합체에 사용된 무게의 상세 내용은 Table 1에 나타나 있으며 원자로내부구조물에 대한 무게는 다음과 같은 구조물의 무게를 포함한다.

$$\begin{aligned}M_{RI} &= M(\text{Core Support} + \text{Inlet Plenum} + \text{Support Barrel} \\ &\quad + \text{Reactor Baffle} + \text{Baffle Plate} + \text{Former Ring} \\ &\quad + \text{Core Shield} + \text{Inlet Plate}) \\ &= (24.67 + 72.3 + 65.0 + 109.8 + 8.33 + 3.41 + \\ &\quad 7.7 + 2.1)\text{ tons} \\ &= 183\text{ tons}\end{aligned}$$

그리고 원자로용기 하부헤드 자체의 무게인 M_{BH} 는 Fig. 3의 치

수로부터 다음과 같은 체적을 고려하여 계산하였다.

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

해석에 사용된 재료물성치는 ASME 설계규정에서 제시된 재료데이터⁽⁹⁾로부터 정상운전 조건에서 원자로용기와 접하는 저온용의 냉각재 온도인 370°C에 해당하는 값을 사용하였다.

단순 내진해석모델

원자로 시스템에 대한 시간이력 지진해석을 수행하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 총 절점 개수는 3개이고 요소수는 2개인 단순 지진해석모델을 설정하였다. 그림에서와 같이 절점 N1은 원자로헤드와 주기기의 관성질량을 포함하고 있고 절점 N3은 원자로용기 하부헤드 및 내부구조물과 노심 등의 관성질량을 포함한다. 일차냉각재의 총 무게는 1000tons으로 가정하였으며 다음과 같이 계산하였다.

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

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

원자로시스템의 단순내진해석 모델에 사용된 총 관성질량은 2,236tons이며 각 절점에 부여된 관성질량을 다음과 같다.

병진관성질량 :

$$\begin{aligned}M_{N1} &= M(\text{IHx} + \text{Pump} + \text{UIS} + \text{Rx Head} + \text{Insulation} \\ &\quad \text{Plate} + \text{Rotating Plug}) \\ &= (30 + 30 + 22.96 + 239.44 + 49.94 + 90.48)\text{ tons} \\ &= 463\text{ tons}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{N2} &= 40\% \text{ Sodium} \\ &= 400\text{ tons}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{N3} &= M(\text{Core} + \text{Rx Internals} + \text{RV Bottom Head} + \\ &\quad 60\% \text{ Sodium}) \\ &= (330 + 183.21 + 49.833 + 600)\text{ tons} \\ &= 1163\text{ tons}\end{aligned}$$

<Table 1> Summary of Total Weight of the Core System

Type	No. of Duct (kg)	Internalmass (kg)	Duct mass (kg)	Total mass (kg)
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
B ₄ C 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

원자로용기 상부헤드의 회전관성질량 (N1) :

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

원자로용기 하부헤드의 회전관성질량 (N2) :

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

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

단순 지진해석모델의 각 요소에 대한 보특성 자료는 다음과 같다.

셸측 단면적:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (11.41^2 - 11.31^2) = 1784.423 \times 10^{-3} m^2$$

셸측 단면관성모멘트 :

$$I_{zz} = \frac{\pi}{4} (D_o^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{4} (11.41^4 - 11.31^4) = 28785.4682 \times 10^{-3} m^4$$

단순모델 검증

단순내진해석모델의 적합성을 검증하기 위하여 상세 유한요소 해석모델과 제시된 단순모델의 고유진동수 일치성을 비교평가하였다. 해석결과 상세모델에 대한 1차 고유진동수는 6.46Hz이며 단순모델의 경우는 6.43Hz로 거의 일치한 결과를 나타내었다. Fig. 4는 굽힘 진동모우드를 갖는 1차 고유진동수에 대한 상세모델과 단순모델을 비교해

놓은 것으로 두 진동모우드가 매우 유사함을 알 수 있다.

3.2 격납용기

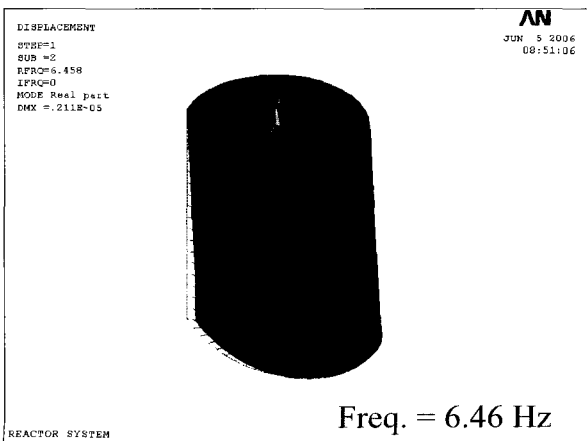
원자로용기 바깥을 둘러싸고 있는 격납용기는 사고시 원자로용기에서 누출된 일차 소듐냉각재가 외부로 유출되는 것을 차단하는 격납기능을 가지고 있다. 원자로용기와 마찬가지로 원자로헤드에서 지지되며 두께 2.5cm, 외경 11.76cm로 원자로용기와의 간격은 약 15cm이다. 격납용기의 재질은 2(1/4)Cr-1Mo 강이다.

상세 유한요소 해석모델

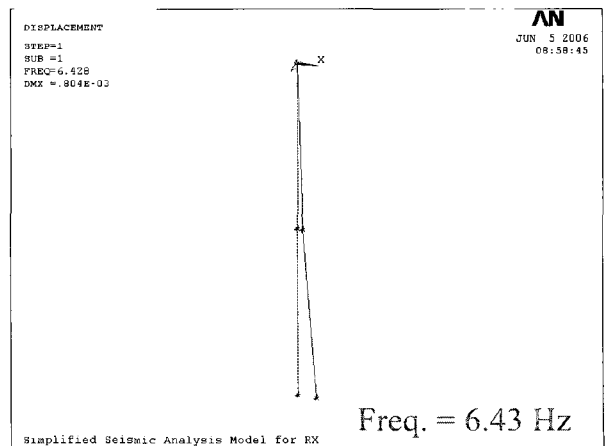
Fig. 5(a)는 1/2 대칭 상세 유한요소 해석모델은 나타낸 것이다. 해석모델에 사용한 유한요소는 SHELL63(Elastic Shell Element)이며 총 절점 수는 368개이고 요소 수는 336개이다. 격납용기가 지지되는 상단 끝은 강체로 가정하고 해석을 위한 경계조건으로서 끝단에 있는 모든 절점의 자유도를 구속하였다. 해석에 사용된 재료물성치는 ASME 설계규정에서 제시한 자료를 사용하였으며 정상운전 조건에서의 300°C 재료물성치를 사용하였다.

단순 해석모델

격납용기에 대한 시간이력지진해석을 수행하기 위해 Fig. 5(b)와 같은 단순 지진해석모델을 설정하였다. 그림에서와 같이 총 절점 개수는 원자로 시스템과 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 25.74tons의 병진관성질량과 다음과 같은 회전관성질량을 부과하였다.

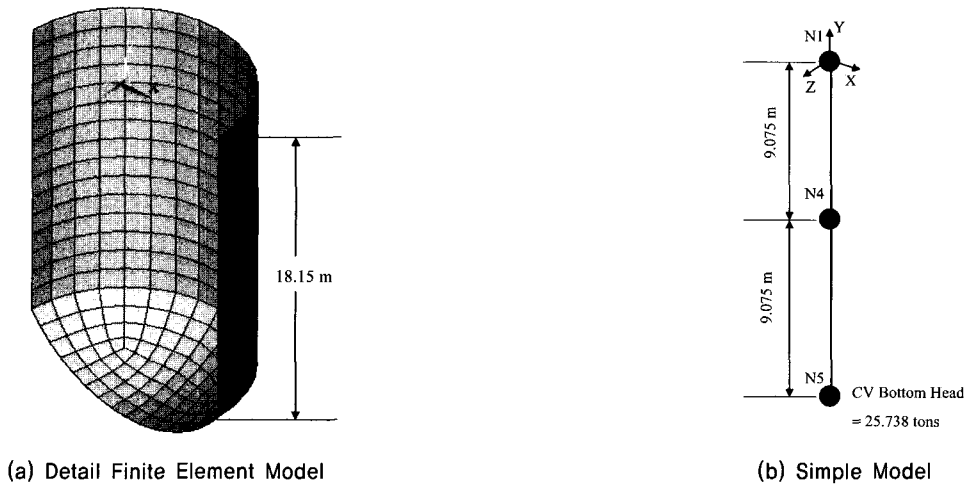


(a) for Detail Model

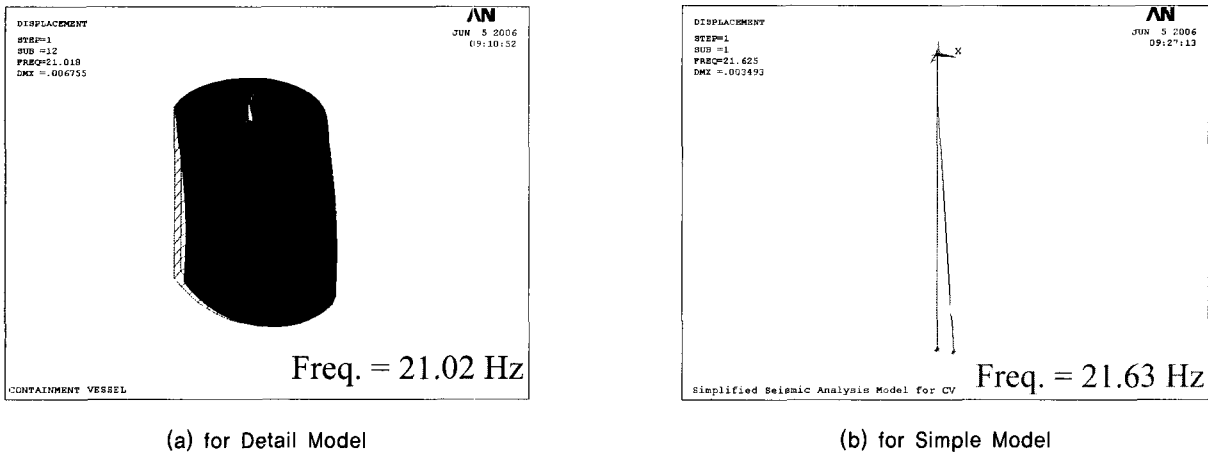


(b) for Simple Model

<Fig. 4> Comparison of Mode Shape for Rx System



〈Fig. 5〉 Seismic Analysis Model of Containment Vessel



〈Fig. 6〉 Comparison of Model Shape for Containment Vessel

격납용기 하부헤드 회전관성질량 (N5) :

$$I_x = I_z = M_{CVBH} \cdot r^2$$

$$= 25.738E3 \cdot 10^2$$

$$= 2.574E6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_y = M_{CVBH} \cdot a^2$$

$$= 25.738E3 \cdot 5.8675^2$$

$$= 886.1E3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

단순내진해석모델의 각 요소에 대한 보특성 자료는 다음과 같다.

셸측 단면적 :

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (11.76^2 - 11.71^2) = 921.67 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

셸측 단면관성모멘트 :

$$I_x = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{64} (11.76^4 - 11.71^4) = 15865.4 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

단순모델 검증

격납용기의 경우 길이(18.15m) 대비 직경(11.76m) 비가 0.65로 크고 얇은 두께(2.5cm)의 박막 구조로 인하여 일반적으로 셸진동 모우드가 지배적일 것으로 기대된다. 실제적으로 고유진동수 해석결과를 살펴보면 격납용기의 1차 고유진동수는 8.44Hz로 전형적인 셸모우드로 나타나고 수평진진 하중시 문제가 되는 1차 보압힘 진동모우드는 21.01Hz로 13째 진동모우드에서 나타난다. 따라서 단순 지진해석모델의 1차 고유진동수는 보압힘모우드가 나타나는 21.01Hz가 되어야 한다. Fig. 6은 상세모델과 단순모델에 대한 보압힘 진동모우드 해석결과를 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 단순모델의 1차 고유진동수는 21.63Hz로 상세모델의 보압힘 진동모우드인 21.02Hz와 거의 일치한다. 따라서 개발된 격납용기의 단순 지진해석모델은 수평방향 시간이력 지진응답을 잘 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 중간 열전달계통 배관

KALIMER-600의 중간 열전달계통 배관은 저온배관(Cold

leg), 고온배관(Hot leg), 그리고 흡입배관(Suction leg)으로 구성되어 있다.

저온배관(Cold leg)의 배치를 보면 Fig. 1에서와 같이 증기발생기를 나와서 이차펌프를 지나온 하나의 대구경 배관이 2개의 중간열교환기와 연결되기 전에 2개의 소구경 배관으로 각각 나누어지는 특징을 가지고 있다. 저온배관 설계에 적용된 재료 및 설계치수는 다음과 같다.

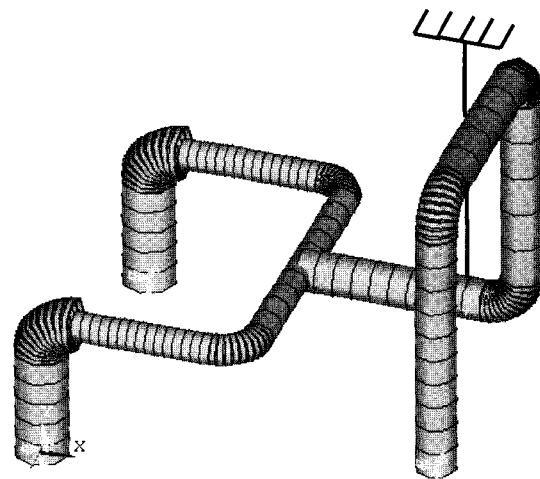
- 배관재료 = Modified 9Cr-1Mo 강
- 대구경 배관 외경 = 82cm
- 소구경 배관 외경 = 60cm
- 대구경 배관 두께 = 1.25cm
- 소구경 배관 두께 = 0.95cm

고온배관(Hot leg)의 배치형상을 살펴보면 각 중간 열교환기와 연결된 동축배관에서부터 증기발생기 위치까지 직관으로 나와 있고 엘보우를 이용한 곡관을 형성하여 증기발생기 상단의 입력 노즐부와 연결된다. 고온배관의 재료는 저온배관과 마찬가지로 Mod.9Cr-1Mo 강이며 내경 60cm, 두께 0.95cm의 소구경 배관으로 되어 있다.

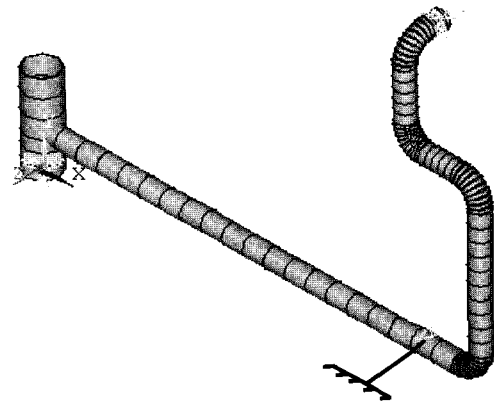
중간 열전달계통에 있어서 흡입배관(Suction leg)은 증기발생기와 2차펌프 사이에 연결되는 배관이다. 흡입배관의 재료는 저온배관과 마찬가지로 Mod.9Cr-1Mo 강이며 내경 82cm, 두께 1.25cm의 대구경 배관으로 되어 있다.

상세 유한요소 해석모델

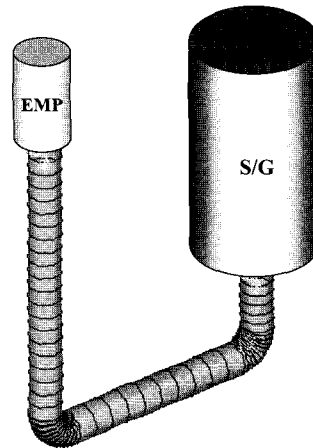
Fig. 7은 중간 열전달계통 배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것으로 해석에 사용된 유한요소 형태는 ANSYS에서 제공하는 PIPE16(3D Elastic Pipe)이다. Fig. 7(a)의 저온배관의 경우 총 절점 개수는 151개, 총 요소수는 150개이며 정상운전 조건에서 2차 소듐냉각재 온도인 390°C에서의 ASME 재료물성치 값을 사용하였다. Fig. 7(b)는 고온배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이며 총 절점 개수는 92개, 총 요소수는 91개이다. 해석에 사용된 재료물성치는 545°C에서의 설계자료를 사용하였다. 주로 직관으로 구성되어 있는 고온배관의 경우에 수평 측면(Lateral) 지지물이 전혀 없는 경우 고유진동수 해석결과 강지진주파수 범위에 속하는 2.7Hz의 고유진동수를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 배관의 수평 측면방향 지진하중에 매우 취약한 고온배관의 동특성을 개선하기 위하여 직관부 끝단 부위에 측면 강체 지지물을 설치하여 고유진동수를 7.09Hz로 증가시키고 수평 측면 진동모우드를 제어하였다. Fig. 7(c)는 흡입배관에 대한 상세 유한요소 해석모델을 나타낸 것이며 총 절점 개수는 56개, 총 요소수는 55개이다. 해석에 사



(a) Cold Leg Pipe



(b) Hot Leg Pipe



(c) Suction Leg Pipe

〈Fig. 7〉 Detail Finite Element Model of IHTS Piping System

용된 재료물성치는 저온배관과 동일하다.

단순 해석모델

단순 해석모델에 사용된 유한요소 형태는 상세모델과 마찬가지로 PIPE16(3D Elastic Pipe)이며 상세 해석모델에 비하여 요소수를 현저히 줄였다(저온배관: 13개, 고온배관: 7개, 흡입배관: 3개). 단순 해석모델에서는 곡관부위의 요소

를 제거하고 직관부위 만으로 상세 유한요소 모델과의 동특성을 일치시키기 위하여 각 직선배관의 등가길이를 사용하였다.

단순모델 검증

Fig. 8은 중간 열전달계통 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 일치하였다.

Fig. 9는 중간 열전달계통 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 일치하였다.

Fig. 10은 중간열전달계통 흡입배관에 대한 상세 유한요소 모델과 단순 유한요소모델에 대한 1차 진동모우드 형상을 비

교한 것이다. 상세 유한요소 해석모델의 경우 1차 고유진동수가 9.19Hz로 나타났으며 단순해석모델의 경우에는 9.41Hz로 나타나 해석모델 오차가 2.3% 정도로 잘 일치하였다.

3.4 증기발생기

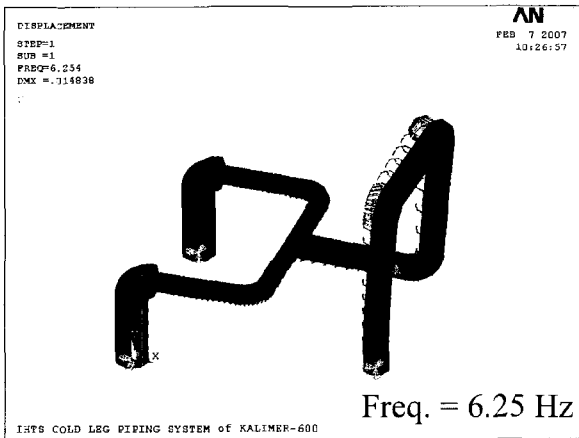
KALIMER-600 증기발생기의 경우 아직 주기기에 대한 세부 개념설계가 미흡한 상태이며 본 논문에서는 외경 4.1m, 두께 2.5cm의 단순 실린더로 가정하고 지진해석모델을 설정하였다. 단순해석모델에 사용한 보요소 입력자료는 다음과 같다.

셸측 단면적 :

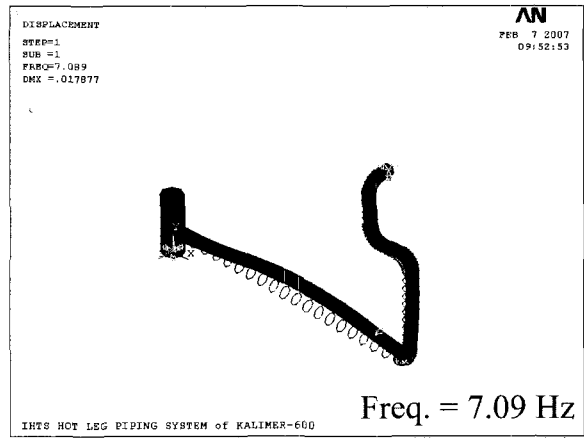
$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (4.1^2 - 4.05^2) = 320.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

셸측 단면관성모멘트 :

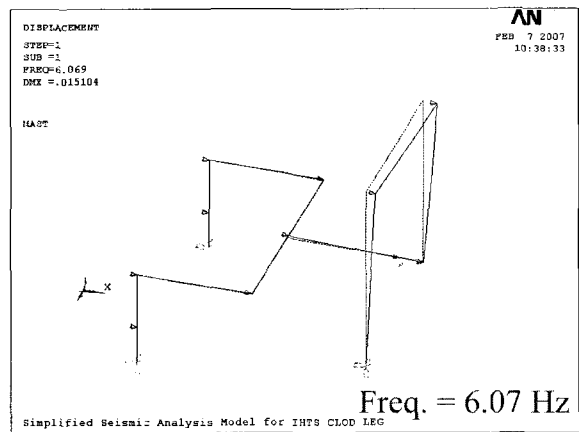
$$I_{zz} = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{64} (4.1^4 - 4.05^4) = 664.02 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$



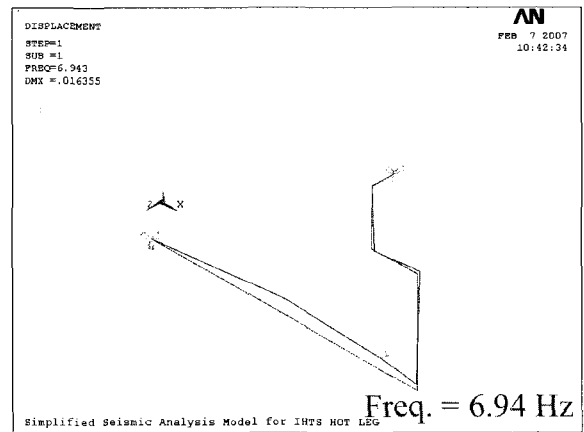
(a) for Detail Model



(a) for Detail Model



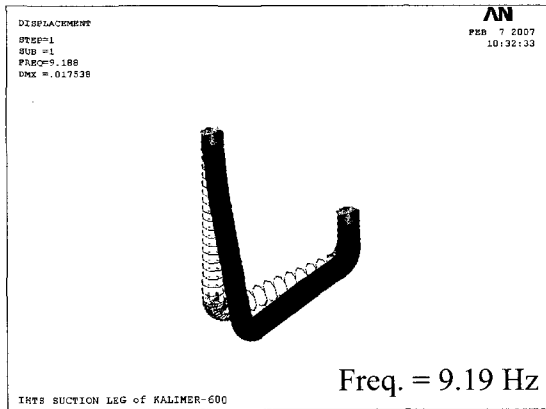
(b) for Simple Model



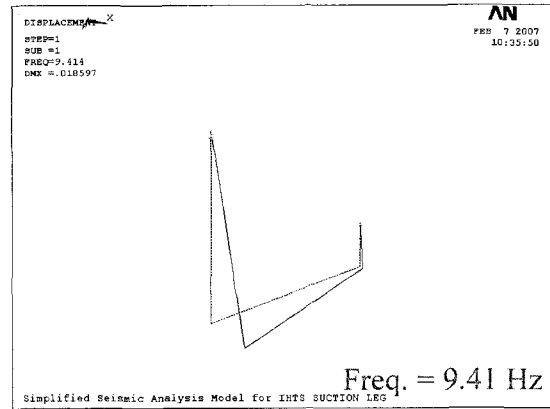
(b) for Simple Model

<Fig. 8> Comparison of Model Shape for IHTS Cold Leg Pipe

<Fig. 9> Comparison of Mode Shape for IHTS Hot Leg Pipe



(a) for Detail Model



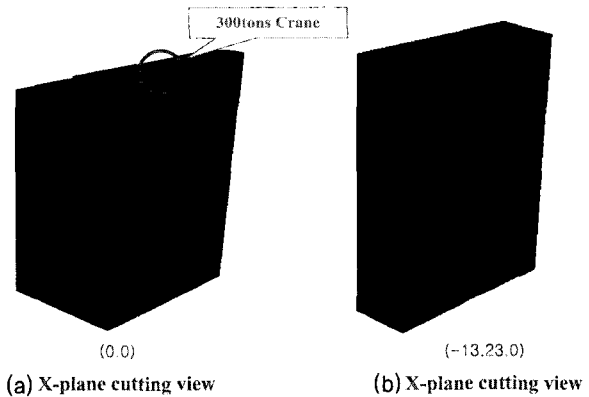
(b) for Simple Model

〈Fig. 10〉 Comparison of Mode Shape for IHTS Suction Leg Pipe

3.5 원자로 건물

상세 유한요소 해석모델

Fig. 11은 KALIMER-600 원자로 건물에 대한 상세 유한요소 해석모델의 부분들을 나타낸 것으로 Fig. 11(a)는 원자로용기 중심부를 가로지르는 해석단면을 나타낸 것이고 Fig. 11(b)는 원자로용기 중심부에서 13.23m 떨어진 위치에서의 해석단면을 나타낸 것이다. 상세 해석모델에는 원자로용기 지지벽(Reactor vault)을 비롯하여 각종 주요 기기들의 격납벽을 포함하고 있으며 모두 3D-Shell 유한요소를 사용하여 모델링하였다.



〈Fig. 11〉 Detail Finite Element Model of Reactor Building

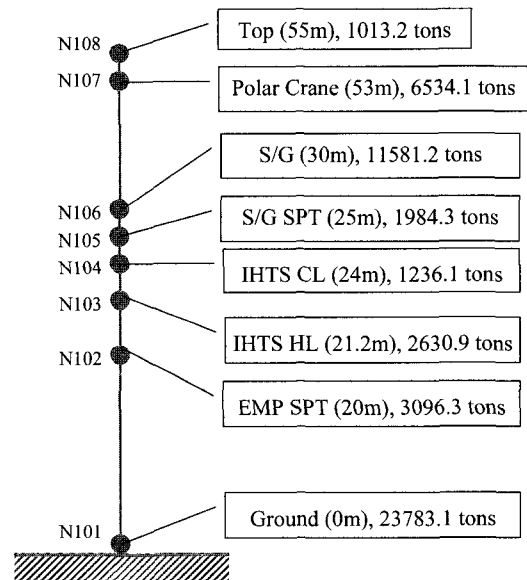
단순 해석모델

Fig. 12는 원자로 건물에 대한 단순 지진해석모델을 나타낸 것으로 총 절점수는 8개이며 요소수는 7개이다. 그림에서와 같이 각 절점은 주요 기기 및 배관의 지지점을 모두 포함하며 이들 각 위치에서 설계 지진응답스펙트럼을 계산할 수 있도록 절점의 위치를 결정하였다.

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

단순모델 검증

상세 유한요소 해석모델의 경우 수평 X-방향의 1차 고유진동수는 4.8Hz로 나타났고 단순 해석모델의 경우에는 4.51Hz로 나타났다. 수평 Y-방향에 대한 1차 고유진동모우드 해석결과 상세모델은 4.44Hz, 단순모델은 4.31Hz로 전체적인 해석모델의 오차가 6.0% 정도로 잘 일치하였다.



〈Fig. 12〉 Simple Seismic Model of Reactor Building

에는 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.

3.6 면진장치

원자로 건물과 지반 사이에 작용하는 면진장치의 해석모델

<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

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

$$K_H = \frac{M_i(2\pi f_H)^2}{6} = \frac{57601E3(2\pi \times 0.5)^2}{6} = 94750 \text{ tons/m}$$

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

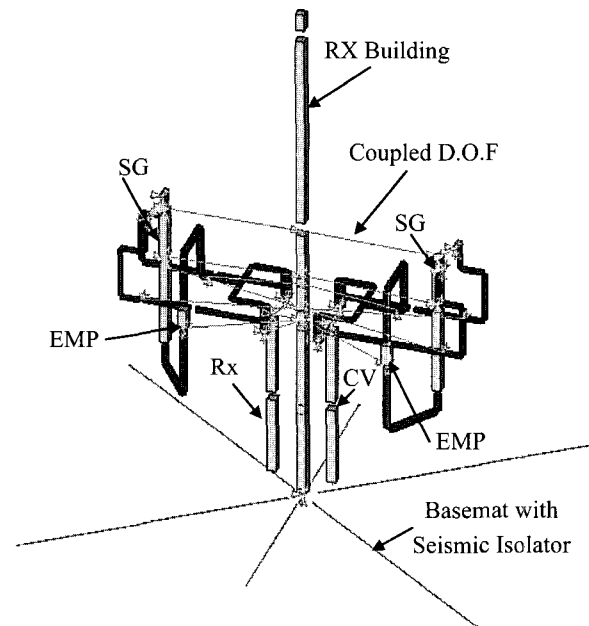
$$K_v = \frac{M_i(2\pi f_v)^2}{6} = \frac{57601E3(2\pi \times 21)^2}{6} = 1671.4E9 \text{ kg/m}$$

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

4. 해석결과 및 분석

4.1 고유진동수 해석

Fig. 13은 앞에서 기술한 원자로 건물을 비롯한 각 부분



<Fig. 13> Developed Simple Seismic Model of KALIMER-600

별 단순 해석모델을 결합하여 최종적인 시간이력 지진응답 해석을 위한 KALIMER-600의 ANSYS 해석모델을 나타낸다. 그림에서와 같이 해석모델에는 각 기기, 계통 및 원자로 건물 사이의 복잡한 상호연계 자유도가 고려되어 있다.

비면진의 경우(지반고정)에 대한 KALIMER-600 지진해석모델의 1차 동특성 해석결과는 부분별 고유진동수 해석결과와 마찬가지로 수평 Y-방향으로의 원자로건물 진동모우드(4.35Hz)가 가장 먼저 나타나고 다음으로 수평 X-방향으

로의 진동모우드(4.54Hz)가 나타났다. Table 4는 상세 유한 요소 해석모델과 단순해석모델에 대한 1차 고유진동수 해석 결과를 각각 나타낸 것으로 단순해석모델의 동특성과 상세 유한요소 해석모델의 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 14는 면진설계를 적용한 KALIMER-600의 1차 진동모우드 해석결과를 나타낸 것으로 면진된 원자로 시스템 전체가 방향에 관계없이 수평 X 또는 Y 방향 모두 설계 면

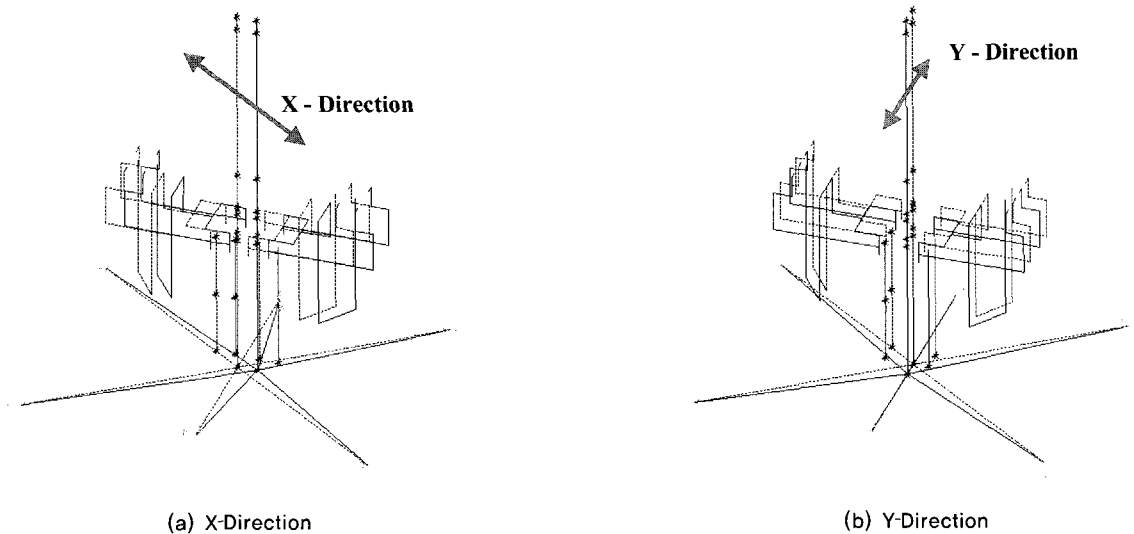
진주파수 0.5Hz의 강체 진동모우드를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.2 시간이력 지진응답해석

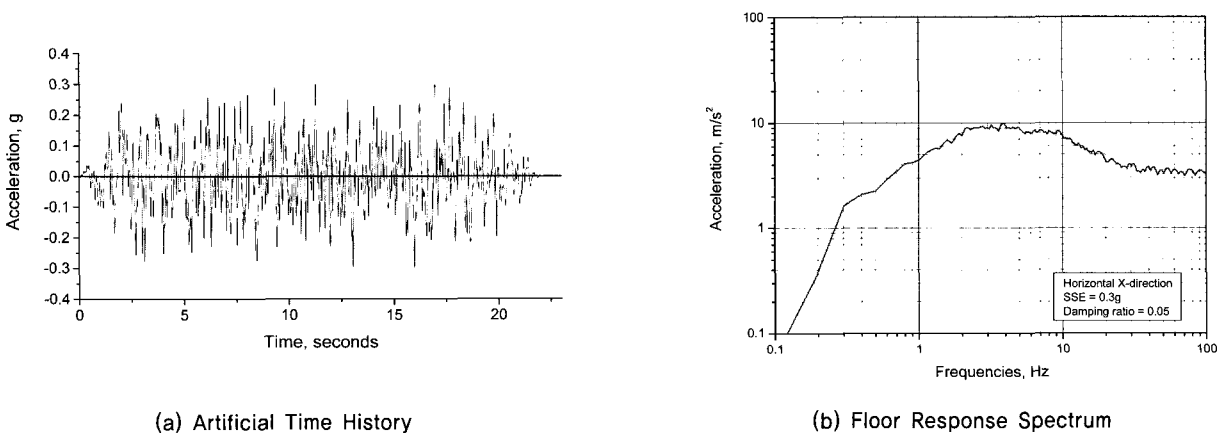
Fig. 15(a)는 시간이력 지진응답해석에 사용된 안전정지 기준 지진 0.3g 입력지진 파형을 나타낸다. 입력지진은 미국 NRC Regulatory Guide 1.60의 규정에 따라서 만들어진

〈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



〈Fig. 14〉 Fundamental Mode Shape for KALIMER-600



〈Fig. 15〉 Input Seismic Load (SSE 0.3g)

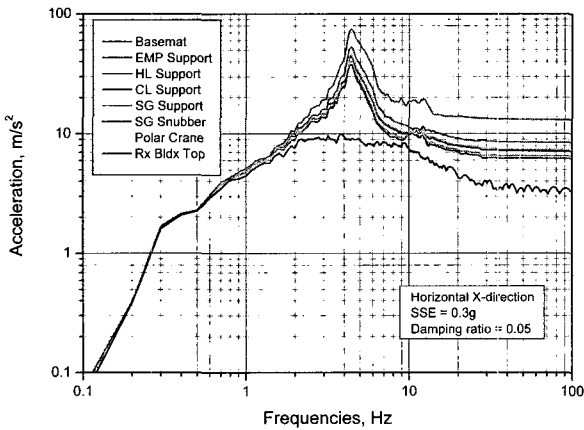
설계인공지진파형이다. Fig. 15(b)는 5% 감쇠를 갖는 입력 지진에 대한 층응답스펙트럼을 나타낸 것으로 강지진 주파수가 2Hz - 10Hz 범위에 존재한다.

Fig. 16(a)은 비면진 설계의 경우에 대한 원자로건물의 각 절점에서 기기 및 구조물의 지지점에 대한 층응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 원자로건물 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. 원자로건물의 경우 꼭대기에서의 가속도응답은 약 1.33g이며 입력지진 0.3g에 비해 4배 정도 크게 증폭되어 나타났다. Fig. 16(b)은 주요 기기 및 구조물에서의 층응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것으로 모두 입력지진에 비해 첨두 가속도 응답이 크게 증폭됨을 알 수 있고, 특히 중간 열전달계통의 저온배관에서 2.0g의 응답증폭이 발생하여 비면진 설계의 경우에는 중간 열전달계통 배관의 내진설계가 매우 불리함을

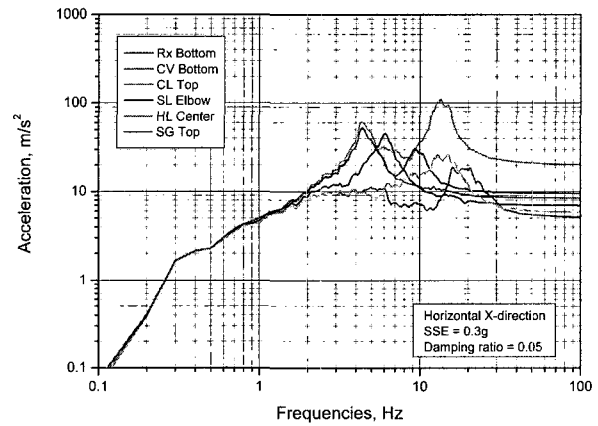
알 수 있다.

Fig. 17(a)은 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. 17(b)은 주요기기 및 구조물에서의 층응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것으로 원자로 건물과 마찬가지로 최대 응답은 모두 설계 면진주파수 0.5Hz에서 발생하며 첨두 가속도응답도 모두 0.23g로 거의 동일하다.

앞의 면진 및 비면진 설계의 경우에 대한 가속도 층응답스펙트럼 계산결과를 비교해 보면 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 설계기술

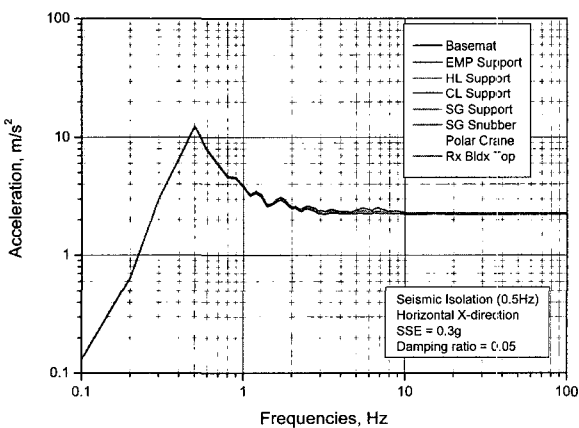


(a) for Rx Building

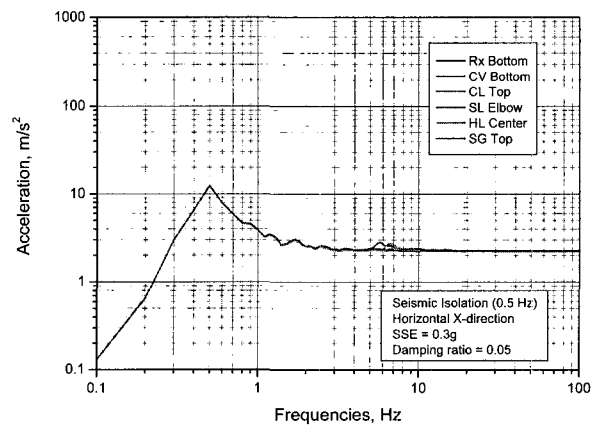


(b) for Main Components

<Fig. 16> Calculated Floor Response Spectrum (Non-Isolation Case)

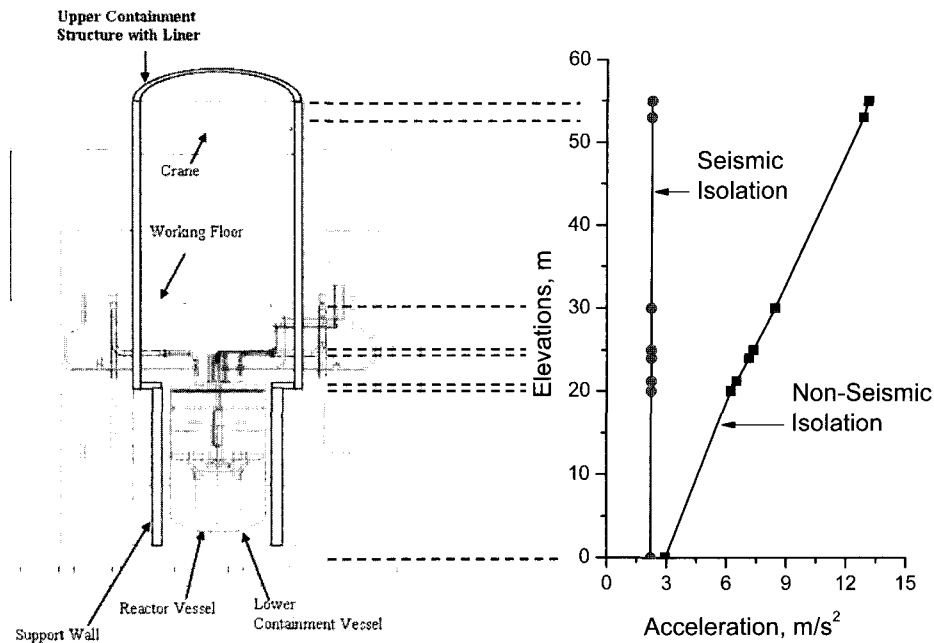


(a) for Rx Building



(b) for Main Components

<Fig. 17> Calculated Floor Response Spectrum (Isolation Case)



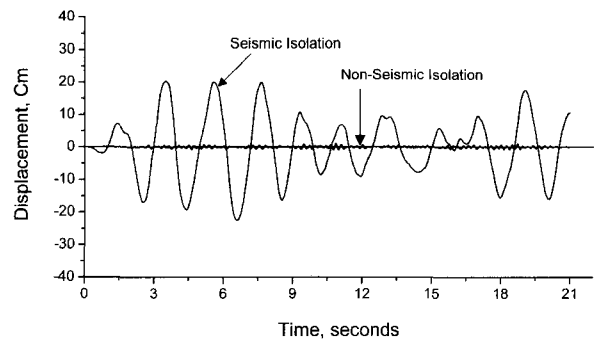
(Fig. 18) Comparison of Seismic Response Amplification

임을 알 수 있다. Fig. 18은 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. 안전정지기준 0.3g 지진하중시 비면진설계의 경우에 원자로 용기 및 격납용기 하부헤드, 그리고 중간열전달계통 저온배관에서의 시간이력 변위응답파형 해석결과 최대 변위응답은 모두 1cm이하로 나타났다. 그러나 면진설계의 경우에는 면진장치의 대변형 거동으로 인해 Fig. 19의 변위응답 비교결과에서와 같이 20cm 이상의 변위응답이 발생한다. 따라서 면진설계를 적용할 경우에는 면진장치의 대변형 거동을 수용할 수 있는 적절한 건물배치 및 연계 설계기술이 요구된다.

5. 결론

본 논문에서는 KALIMER-600 주요 기기, 중간열전달계통 배관시스템, 그리고 원자로 건물 등을 포함하는 시간이력 지진응답해석용 단순 지진해석모델 개발에 대한 상세 내용들을 기술하였다. 개발된 단순지진해석모델은 최소한의 절점수를 가지면서 상세 유한요소 해석모델의 동특성 해석결과와 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 본 논문에서 개발



(Fig. 19) Comparison of Displacement Responses Between Seismic Isolation and Non-Isolation Design

된 단순 지진해석모델은 KALIMER-600에 대한 시간이력 지진응답해석과 주요 기기 및 구조물에 대한 설계 층응답스펙트럼 생산의 기반이 될 것으로 기대한다.

단순 해석모델을 사용한 지진해석결과로부터 다음과 같은 결론들을 요약할 수 있다.

- KALIMER-600의 최소 고유진동수는 면진 설계주파수 0.5Hz 보다 훨씬 높은 4.35Hz (원자로건물)로 나타났으며 따라서 면진설계 적용타당성이 입증되었다고 판단된다.
- 안전정지기준 0.3g 지진하중에 대한 시간이력 지진응답 해석결과 비면진설계의 경우에는 원자로건물 상단에서 1.33g, 중간 열전달계통 배관에서 2.0g 이상의 가속도응답 증폭이 발생하였으며 이로 인하여 내진설계 비용이 크게 증가할 것으로 나타났다.

- 그러나 면진설계를 적용할 경우에는 가속도응답 증폭현상이 발생하지 않았으며 지진설계에 대한 충분한 안전성과 경제성을 보장할 수 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 한도희, 구경희 외 30인, KALIMER-600 예비 개념설계 보고서, KAERI/TR-2784/2004, 한국원자력연구소, 2004.
2. T. Fujita, "Seismic Isolation Rubber Bearings for Nuclear facilities," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 127, pp. 379-391, 1991.
3. M. Forni and A. Martelli, Proposal for Design Guidelines for Seismically Isolated Nuclear Plants; Final Report, Contract ETNU-0031-IT (CCSH), 1994.
4. T. Somaki, T. Nakatogawa, et.al, "Development of 3-Dimensional Base Isolation System for Nuclear Power Plants," *Transactions, SMiRT 16*, 2001, Paper # 1015.
5. 유봉, 구경희, 이재한, 액체금속로 KALIMER를 위한 면진설계 지침서(Revision A), KAERI/TR-1544/2000, 한국원자력연구소, 2000.
6. 구경희, 이형연, 유봉, "면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석," 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제1호, 1999, pp. 75-92.
7. 구경희, 이재한, "유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성 및 지진응답에 대한 유체부가질량 영향," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제5호, 2001, pp. 25-33.
8. 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, 2003, pp. 457-466.
9. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, 2004.