2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 지진해석모델 개발 및 시간이력지진응답해석

Development of Seismic Analysis Model of LMFBR and Seismic Time History Response Analysis

구경회, 이재한, 유봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구의 목적은 KALIMER 원자로구조물에 대한 지진응답평가를 위하여 구조물과 일차소듐냉각재 등을 포함한 단순지진해석모델을 개발하고 이를 이용하여 원자로구조물 각 부위에서 발생하는 최대 가속도응답 특성과 상대변위 응답특성을 검토하는 것이다. 면진설계와 비면진설계 각각에 대한 시간이력 지진응답 해석을 수행하여 그 결과들을 비교분석 함으로써 면진설계가 갖고 있는 내진성능의 우수성을 입증하였다. 개발된 KALIMER 지진해석모델을 이용한 시간이력 지진응답해석결과 면진설계는 비면진설계에 비하여 모든 구조물 부위에서 최대 지진가속도 응답이 현저히 감소하며 매우 우수한 면진성능을 나타내었다. 설계 지진하중에 대한 면진시스템의 수평변위, 상부내부구조물과 노심상단 간의 최대 상대변위, 그리고 원자로용기와 원자로배플 상단간의 수평 상대변위 응답은 모두 주어진 설계한계요건을 만족하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to develop the seismic analysis model of KALIMER reactor structures including the primary coolant of sodium and to evaluate the seismic responses of the maximum peak acceleration and the relative displacements by the time history seismic response analyses. The seismic time history response analyses were carried out for both cases of the seismic isolation design and the non-isolation one to verify the seismic isolation performance.From the results of seismic response analysis using the developed seismic analysis model, it is clearly verified that the seismic isolation design gives very significantly reduced seismic responses compared with the non-isolation design. All design criteria for the relative displacement response were satisfied for KALIMER reactor structures.

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 KALIMER 액체금속로는 기존의 경수로 또는 중수로 원자로와 비교하면 원자로의 구조측면에서 매우 상이한 특징을 가지고 있다.

일반적으로 경수로 원자로가 350 °C, 150 bar 정도에서 운전되는 것에 비하면 KALIMER 원자로는 530 °C, 5 bar의 고온/저압의 운전조건을 가지고 있다. 이러한 고온 운전설계조건으로 인하여 구조물에서 발생 가능한 열응력은 설계여유도를 지배하는 실제적인 하중으로 작용하게 된다. 따라서 기본적인 구조설계 개념으로 열응력 발생을 최소화할 수 있는 얇은 두께의 박막구조설계가 필수적이다. 그러나 이러한 기본 구조설계 조건들은 구조물의 박막화로 인하여 지진하중에 매우 취약한 특성을 나타낼 수 있으며 따라서 지진응답해석과 지진좌굴해석 등의 중요성이 기존 경수로에 비하여 상대적으로 훨씬 커지게 된다. 또한 원자로 노심구조를 살펴보면 기존의 경수로 핵연료와는 달리 핵연료가 육각형 단면의 덕트 내에 장착되며 총 379개의 덕트집합체가 하부 노심지지판에 단순 고정된 외팔보 구조형상을 하고 있다. 따라서 이러한 노심구조는 기존의 경수로 노심집합체와는 달리 중간 지지구조체가 없기 때문에 지진하중에 매우 민감한 구조형상을 하고 있다.

KALIMER 설계에서는 이러한 고온 박막구조의 원자로구조물에 대한 지진건전성을 원천적으로 확보하기 위하여 원자로계통, 기기 및 부품에 전달되는 지진하중을 현저히 줄일 수 있는 면진설계(Seismic isolation design)(1)를 도입하고 있다. KALIMER에 적용하기 위한 면진장치로는 얇은 고무판과 강판을 차례로 적층하여 만든 적층고무베어링(Laminated rubber bearing)이 사용된다. 이러한 면진용 적층고무베어링의 설계와 특성에 대한 연구는 현재 국내를 비롯한 원자력 선진국에서 활발히 진행되고 있다(2-5) .

본 연구에서는 기존에 개발된 KALIMER 원자로구조물의 단순 지진해석모델(4)을액체금속로 설계기술개발 연구에서 결정된 개념설계 자료에 근거하여 개선, 보완하고 고유진동수해석과 시간이력지진응답해석을 수행하여 최대 응답가속도 평가와 주요 구조물 간의 최대상대변위응답 평가를 수행하였다. 지진해석에는 면진설계의 경우와 비면진설계의 경우를 각각 수행하여 그 결과들을 비교 평가하였다.

2. KALIMER 원자로구조물 내진설계 개념

현재 국내에서 개발 중에 있는 KALIMER 원자로구조물 및 기기들의 세부 개념설계 형상과 명칭은 I-DEAS(6)로 작성된 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 KALIMER 원자로는 격납용기(Containment Vessel), 원자로용기(Reactor Vessel), 내부구조물(Internal Structure), 노심구조물(Core Structure), 노내상부구조물(Upper Internal Structure), 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger), 그리고 전자펌프(Electro Magnetic Pump) 등으로 구성되어 있다. 여기서 원자로 내부구조물을 구성하는 구조물들은 크게 지지배럴(Support Barrel), 원자로배플(Reactor Baffle), 유동안내물(Flow Guide), 격리판(Baffle Plate), 분리판(Separation Plate), 유입배관(Inlet Pipe), 그리고 유입실(Inlet Plenum)로 구성되어 있다.

KALIMER 원자로 격납용기는 기존의 가압경수로와는 달리 원자로용기 바깥에 약 15cm의 간격을 두고 원자로용기를 에워싸고 있는 원통형 실린더로서 원자로용기를 통한 일차 소듐냉각재의 누출을 감시하고 대량누출시에 원자로와의 환형공간사이에 소듐냉각재를 집적함으로써 노심용융사고로부터 안전성을 보장하기 위한 구조물이다. 노심을 비롯한 모든 원자로내부구조물을 지지하는 노심지지물은 단순 치마형(Skirt type) 구조물로 원자로용기 하부헤드와 유입실 하부판에 연결된다. 원자로내부구조물 중에서 원자로배플

은 고온 소듐냉각재가 원자로용기에 직접 접촉하는 것을 방지하기 위한 중요한 구조물이다. 격리판/분리판/지지배럴/원자로배플로 구성된 환형격리구조물은 노심을 통과한 고온소듐 냉각재(530 °C)와 중간열교환기를 나온 저온소듐 냉각재(385 °C)와의 직접적인 경계를 이루는 구조형상을 배제하기 위한 설계개념이 적용된 것으로 고온 및 저온소듐냉각재의 온도차를 완화시키는 기능을 한다. 또한 환형격리물 내에는 4개의 중간열교환기와 4개의 전자펌프가 배치된다. 지지배럴은 기본적으로 노심을 나온 고온소듐냉각재를 중간열교환기로 안내하는 기능과 각종 내부구조물을 지지하는 중요한 구조물로서 노심지지구조물과 직접적으로 연결된다. 유동안내물은 중간열교환기에서 나온 저온소듐냉각재가 지지배럴 외곽의 노심차폐체를 냉각시키면서 전자펌프를 통해 노심으로 자연스럽게 유입될 수 있도록 하는 기능을 가지고 있다.

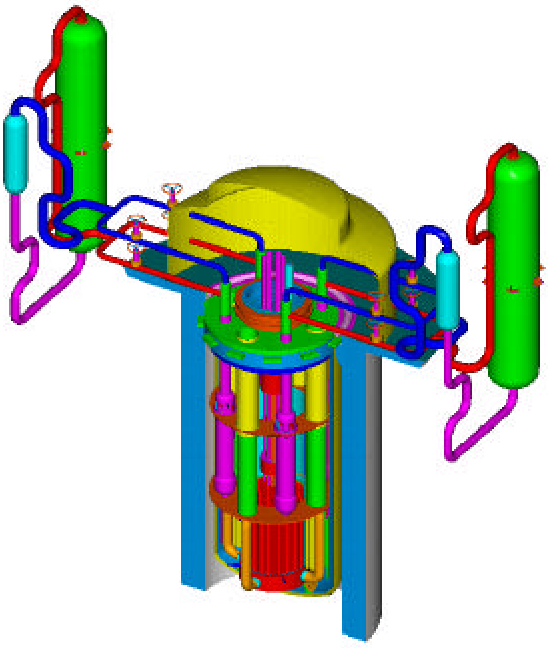
예비설계된 KALIMER 액체금속로는 유입실(Inlet plenum)의 상하부판을 제외하고는 모든 원자로구조물의 두께가 약 5.0cm이하의 박막구조이며 원자로용기는 직경 702.0cm, 두께 5.0cm 그리고 원자로용기 총길이 1872.5cm로 박막의 긴 원통형 실린더 구조이다. 이러한 원자로구조물은 모두 원자로헤드에서 지지되는 외팔보 구조를 하고 있으며 지지배럴을 포함한 내부구조물도 Fig. 1에 나타난 것과 같이 원자로용기 하부헤드로부터 지지되는 외팔보 구조를 하고 있다. 또한 원자로헤드에 고정지지되어 환형격리구조물 내부에 장착되는 직경 120cm의 중간열교환기 4개와 전자펌프 4개도 외팔보 구조형상의 기기들이다. 이러한 구조들은 모두 설계측면에서 단순화의 장점이 있는 반면에 수평지진하중에 매우 취약한 설계특성을 가지게 된다. 이러한 설계사항을 보완하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 격리판과 분리판을 관통하는 기기들이 각각의 중간 및 끝단 위치에서 원자로 내부 고정구조물과 수평적으로 상호 지지체 역할을 함으로써 외팔보 구조형상이 갖는 단점을 최대한 보완하는 내진설계 개념을 채택하고 있다. 또한 유동안내물이 전자펌프 노즐을 통해 분리판을 수직적으로 지지하는 구조형상을 하고 있어서 분리판의 수직강성이 증가하며 따라서 격리판/분리판/지지배럴/원자로배플로 구성된 환형격리구조물의 수직지진하중에 대한 취약성을 잘 보완해 주고 있다.

상부내부구조물은 노심출력을 제어하는 제어봉구동장치와 각종 내부감시센서들을 안내하는 역할을 한다. 이 구조물은 원자로헤드를 구성하는 회전플러그 하부에 지지되는 외팔보 구조로 수평지진에 취약할 수 있으며 노심제어장치를 안내한다는 기능을 고려할 때 수평 및 수직 지진변위응답을 최소화할 수 있는 구조설계가 요구된다.

3. 단순 시간이력지진해석모델 개발

3.1 해석모델의 기본 개념

Fig. 1의 개념설계도에서 보여주듯이 KALIMER 원자로구조물은 원자로내부구조물과 기기들 사이에는 매우 복잡한 구조적 연계특성을 나타낸다. 원자로구조물에 대한 지진응답특성을 평가하고 노심을 포함한 기기들의 설계 층응답스펙트럼을 생산하기 위해



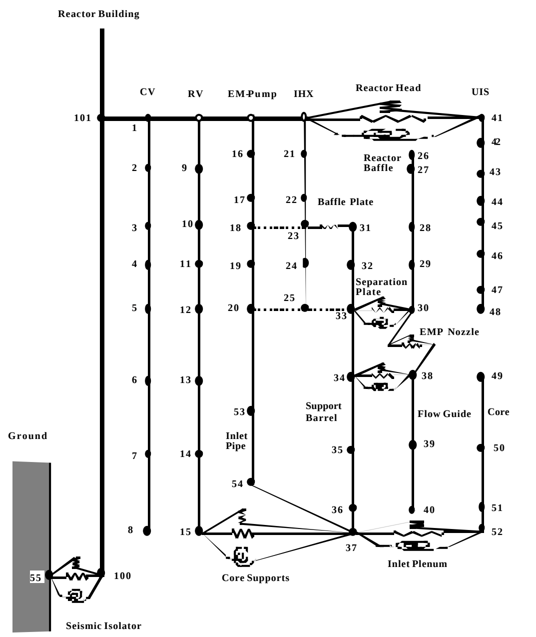


Fig. 1 Conceptually Designed KALIMER　　Fig. 2 Seismic Analysis Model of KALIMER

서는 지진해석모델 개발이 필수적이다. 지진시간이력해석을 위한 해석모델에는 원자로구조물 전체에 대한 유한요소모델을 사용할 수 있으나 이는 컴퓨터 전산해석상 매우 비효율적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 원자력발전소의 시간이력지진해석에 사용되고 있는 집중질량-스프링 요소로 구성된 단순 지진해석모델을 개발하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 KALIMER 원자로구조물의 단순 지진해석모델을 나타낸 것으로 지반으로부터의 지진하중을 원자로구조물로 전달하는 원자로건물은 강체로 가정하였다. 그림에서와 같이 원자로용기를 포함한 모든 기기 및 장치들의 지지대 역할을 하는 원자로헤드는 격납용기, 원자로용기 그리고 기기들과 노내상부구조물간의 상대운동을 고려한 수평, 수직 그리고 회전스프링요소(절점 1 – 절점 41)로 모델링하였다. 이는 원자로헤드의 강성을 고려한 상부내부구조물과 노심간의 상대변위에 대한 해석자료를 생산하여 주어진 설계지진에 대한 제어봉의 노심내 삽입기능요건과 반응도삽입(Reactivity insertion) 요건 등을 검토하기 위한 것이다.

기기들과 지지배럴 사이의 상호 수평결합을 제공하는 격리판과 분리판을 스프링요소(절점 23 – 절점 31, 절점 30 – 절점 33)로 처리하여 기기들과 내부구조물간의 수평변위 연계를 고려하였다. 따라서 Fig. 4의 지진해석모델에서와 같이 격리판에 의한 중간열교환기와 전자펌프 그리고 지지배럴 간의 수평적 결합은 전자펌프(절점 18)와 중간열교환기(절점 23)가 수평방향 강체연계로 모델링 되고 이들은 지지배럴(절점 31)에 격리판의 수평 스프링요소에 의해 연계된다. 분리판의 스프링요소는 지지배럴(절점 33)과 원자로배플(절점 30)을 연결하며 지지배럴의 절점 33에서의 수평거동은 원자로 기기(절점 20, 절점 25)와 수평적으로 강체연계되는 것으로 모델링하였다.

유동안내물 내부로 유입된 저온냉각재를 전자펌프로 원활하게 공급시키기 위한 4개의 전자펌프노즐은 지진해석모델에서 분리판(절점 30)과 유동안내물 상부판(절점 38)을 연결하는 수평, 수직스프링요소로 모델링하였으며 이때 분리된 4개의 노즐구조를 고려하여

이들에 대한 전체 회전강성은 무시하였다. 그리고 전자펌프노즐과 연결되는 유동안내물의 상부판은 안내물의 측면실린더와 지지배럴을 연결하는 스프링요소로 모델링하였다.

원자로용기 하부헤드에 용접되는 치마형 노심지지구조물과 유입실 하부 Grid 판을 스프링요소로 모델링하여 복잡한 하부구조물의 해석모델을 단순화시켰다.

379개의 덕트집합체로 구성된 원자로노심은 유입실 하부 Grid 판(절점 52)에 고정지지되는 3개의 요소로 모델링하였다. 이러한 단순 질량-스프링모델은 일반적으로 사용되고 있는 Cluster Modeling Technique[7]을 사용하였다.

3.2 상세 강성해석

위의 지진해석모델 기본개념에서 기술한 원자로헤드, 격리판, 분리판, 전자펌프노즐, 노심지지물, 유입실 하부판 그리고 유동안내물 상부판에 대한 스프링요소의 강성을 결정하기 위하여 ANSYS[8]에서 제공하는 Shell63 요소를 이용한 상세 유한요소해석을 수행하였다. 원자로헤드에 대한 스프링상수를 구하기 위하여 노내상부구조물의 내부관통점을 경계조건으로 하여 원자로헤드 원주둘레에 단위변위와 단위회전각을 적용하여 이때 발생되는 각 경계절점의 반력합을 스프링강성으로 결정하였다. 격리판, 분리판, 유동안내물 상부판에 대한 강성해석도 이와 마찬가지로 지지배럴과의 접촉부위를 경계조건으로 하여 외곽원주 부위에 단위변위와 단위회전각을 적용하여 강성평가를 수행하였다. 전자펌프노즐과 노심지지물에 대한 강성해석은 하부면을 경계조건으로 하고 상부면에 단위변위를 적용하는 방법으로 스프링강성을 결정하였다. 유입실 하부 Grid 판의 수평강성은 15cm의 설계두께를 고려하여 강체로 가정하였으며 수직강성 평가에는 노심집합체와의 연계를 고려한 변형형상을 가정하고 하부 Grid 판의 중앙점을 경계조건으로 외곽원주 부위에 단위변위를 적용하는 방법을 사용하였다.

Table 1은 원자로구조물에 대한 유한요소 강성해석으로부터 결정된 스프링강성값들을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 분리판을 포함한 각 구조물들은 설계 수평강성이 충분하며 격리판과 유동안내물 상부판의 수직강성과 회전강성은 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Calculated Spring Constants of KALIMER Reactor Structures

	Nodes	Horizontal Stiffness (N/m)	Vertical Stiffness (N/m)	Torsional Stiffness (N.m/rad)
Separation Plate	30 – 33	0.2728×10^{11}	0.2338×10^{9}	0.4888×10^{7}
Baffle Plate	23 – 31	0.6820×10^{10}	0.3653×10^{7}	0.7637×10^{5}
Inlet Plenum (Lower Grid Plate)	37 - 52	∞	0.1625×10^{10}	0.4183×10^{9}
Core Supports	15 – 37	0.6935×10^{11}	0.1464×10^{12}	0.1608×10^{8}
Flow Guide (Upper Plate)	34 – 38	0.1178×10^{11}	0.5732×10^{7}	0.1119×10^{6}
EMP Nozzle	30 - 38	0.6222×10^{10}	0.6173×10^{11}	-
Reactor Head	1 - 41	0.4764×10^{11}	0.11891×10^{10}	0.3859×10^{8}
Isolation Device	55 - 100	11.8246×10^{6}	21.3714×10^{9}	∞

3.3 일차소듐냉각재 부가질량 효과

Fig. 1에서와 같이 원자로용기를 비롯한 내부구조물들은 일차소듐냉각재의 경계와 유로를 제공한다. 지진발생시 원자로구조물들의 동적거동은 이들 구조물과 일차소듐냉각재들 사이의 매우 복잡한 유체-구조물 상호작용으로 인해 큰 영향을 받을 수 있다.

본 연구에서는 수평지진하중시 발생할 수 있는 복잡한 유체-구조물 상호작용 효과를 유체부가질량접근법[9]을 사용하여 수평지진해석모델에 고려하였다.

유체부가질량접근법에 대한 기본적인 이론을 살펴보면 다음과 같다. 직경이 다른 두 개의 동축 원통형 실린더 사이에 유체가 채워져 있을 경우에 감쇠부분을 고려하지 않을 경우 주어진 시스템에 대한 지진운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

여기서 m_1과 m_2는 두 실린더의 질량, k_1과 k_2는 강성을 나타내며 x_1과 x_2는 상대변위를 각각 나타낸다. 식 (1)에서 세번째 항은 유체부가질량으로 인하여 구조물에 발생되는 지진하중을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha M_1 & -(1+\alpha) M_1 \\ -(1+\alpha) M_1 & (1+\alpha) M_1 + M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서

$$M_1 = \rho_f \pi R_1^2 L \ , \qquad M_2 = \rho_f \pi R_2^2 L \tag{3, 4}$$

$$\alpha = \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \tag{5}$$

이다. 위의 식 (3, 4, 5)에서 r_f는 유체밀도, R_1과 R_2는 각 실린더의 직경, 그리고 L은실린더 길이를 나타낸다.

위의 식 (2)의 오른쪽 유체부가질량 행렬에서 대각선행렬 외에 발생되는 유체부가질량 항은 유체에 의하여 외부실린더와 내부실린더 간의 상호작용이 존재함을 나타낸다. 실제적인 공학적인 적용 예로써 외부실린더가 내부실린더에 비하여 상대적으로 매우 강성이 큰 경우에는 외부실린더의 거동을 강체(x_1=0)로 가정할 수 있으며 이때 내부실린더의 지진운동방정식은 위의 식(1)과 식(2)로부터 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$(m_1 + \alpha M_1)\ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -(m_1 - M_1)\ddot{x}_g \tag{6}$$

위의 식 (6)에서 외부실린더와 내부실린더의 간격(R_2 – R_1)이 줄어들 수록 α는 점점 커지며 극단적인 경우 무한대 값을 갖게 된다. 따라서 내부실린더는 두개의 실린더 간격크기에 따라서 유체부가질량(즉, αM_1)의 영향이 매우 크게 나타나며 고유진동수 변화에 크게 영향을 미칠 수 있다. 유체부가질량으로 인한 고유진동수의 감소는 다음과 같은 주파수감소계수로 정의할 수 있다.

$$D_f \equiv \frac{f_{fluid}}{f_{air}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + a M_1}} \tag{7}$$

또한 유체속에 잠겨있는 물체는 유체부가질량 효과로 인하여 가진 지진하중이 감소하는 결과를 나타낸다. 식 (6)의 오른쪽 항에 나타난 바와 같이 구조물을 가진하는지진하중이 내부실린더의 부력, 즉 $r_f p R_1^2 L$ 만큼 감소하는 결과를 나타낸다. 이러한 효과는 두 원통 실린더사이의 간격크기와는 무관함을 알 수 있으며 다음 식과 같이지진하중 감소계수로 표현될 수 있다.

$$D_e = \frac{m_1 - M_1}{m_1 + a M_1} \tag{8}$$

본 연구에서는 원자로내부의 일차소듐냉각재에 대한 영향을 고려하기 위하여 유체부가질량접근법을 적용하였으며 수평지진해석모델에서 상부내부구조물과 원자로배플 그리고 지지배럴을 단순한 동축 원통형 실린더로 가정하였다.

먼저 환형격리구조물 내의 정지소듐은 모두 지지배럴에 부가되는 것으로 가정하였으며 이 위치에 해당하는 지지배럴 내의 소듐은 절점 31, 32, 33에 균등분배 하였다. 그리고 지지배럴과 상부내부구조물이 동축 실린더로 가정되어 유체부가질량 효과를 고려하였다.

분리판에서부터 유동안내물 상판까지의 지지배럴 내부소듐은 절점 34에 부가하였으며 이 부위에서는 원자로용기와 지지배럴이 동축 실린더로 가정되어 이들 사이에 존재하는 유체부가질량 효과를 고려하였다.

격리판(Baffle Plate) 상단에서부터 소듐자유표면까지 존재하는 고온소듐은 원자로배플과 상부내부구조물이 동축 실린더 효과를 나타내는 것으로 가정하였으며 부가질량은 모두 절점 27에 작용하는 것으로 모델링 하였다.

유동안내물 상판 아래에서부터 원자로용기 하부헤드에 존재하는 소듐냉각재는 모두 절점 15에 부가하였으며 중간열교환기와 전자펌프 그리고 유입배관내의 소듐냉각재는 각각 해당하는 절점에 균등분배 하였다.

3.4 면진시스템 모델

KALIMER 원자로구조물에 대한 면진장치에는 얇은 고무판과 강판을 차례로 적층하여 만든 적층고무베어링이 사용된다. 이러한 면진장치는 구조 특성상 수직적으로는 매우 무거운 상부무게를 지탱할 수 있으며 지진하중이 작용할 경우에 안정된 수평변형을 함으로써 지지하고 있는 상부구조물이 자연스럽게 강체운동을 할 수 있도록 만들어 준다. 본 연구에서는 면진장치를 포함한 상부구조물의 수평고유진동수가 0.5Hz(면진설계주파수)가 되는 면진설계를 고려하였다. 복잡한 적층고무베어링의 동적거동에 대한 해석모델에는 여러가지가 있으나[11] 본 해석에서는 단순 스프링-감쇠요소를 사용하였다. 수평강성은 면진설계주파수 0.5Hz에 대하여 원자로건물과 원자로구조물의 총 무게를 합친 58600톤을 가정하여 580.0MN/m로 결정하였다. 그리고 면진시스템의수직강성은 적층고무베어링의 설계수직주파수 21.0Hz를 고려하여 1020.2GN/m로 결정하였으며 회전강성은 무한대로 가정하였다. 해석에 사용된 면진시스템의 수평 및 수직거동에 대한 임계감쇠비는 각각 10%와

3%를 사용하였다[12].

4. 모우드 해석

4.1 수평방향 모우드 해석

Table 2는 개발된 KALIMER 단순 지진해석모델을 사용하여 구한 수평방향 모우드 해석 결과를 나타낸 것이다.

표에서와 같이 KALIMER 원자로구조물은 0.5Hz의 수평방향 1차고유진동수를 가지며 이는 면진시스템의 설계 면진주파수를 나타낸다(Fig. 3). 2번째 고유진동수는 1.87Hz로서 이는 노심의 1차모우드를 나타낸다. 3번째 고유진동수는 3.0Hz로서 상부내부구조물의 1차 모우드를 나타낸다. 4번째 고유진동수는 5.5Hz로서 원자로용기와 내부기기들이 동 위상으로 연계거동을 하는 모우드 형상을 나타낸다. 5번째 고유진동수는 12.33Hz로서 지지배럴의 1차모우드와 노심의 2차모우드가 각각 나타낸다. 6번째 고유진동수는 13.83Hz로서 상부구조물의 2차모우드를 나타낸다. 7번째 고유진동수는 15.22Hz로서 격납용기 1차모우드를 나타낸다. 8번째 고유진동수는 16.42Hz로서 원자로용기와 내부기기들이 반대 위상으로 연계거동하는 모우드형상을 나타낸다. 9번째 고유진동수는 18.91Hz로서 원자로배플의 1차 모우드를 나타낸다. 10번째 고유진동수는 37.43Hz로서 지지배럴의 2차모우드와 내부기기들의 2차모우드가 상호 연계되는 모우드형상을 나타낸다. 그리고 유동안내물과 내부배관의 수평 고유진동수는 각각 43.09Hz와 52.69Hz로서 상대적으로 매우 높은 고유진동수를 나타낸다.

표에서와 같이 면진설계의 경우에 대부분의 유효관성질량이 0.5Hz 면진시스템 거동에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 대부분의 입력 지진에너지는 면진시스템으로 인한 원자로구조물의 강체거동을 야기시키는데 소진되고 원자로구조물에 전달되는 지진에너지는 극히 미약할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 비면진설계의 경우에는 각 고유진동수들 유효관성질량이 매우 크게 나타나며 따라서 입력지진에너지가 모두 원자로구조물에 직접 전달되기 때문에 원자로구조물에서의 지진응답이 크게 증폭될 것으로 예상될 수 있다.

수평 고유진동수 해석결과로부터 노심을 비롯하여 상부내부구조물, 원자로용기, 내부기기 등의 수평 고유진동수가 설계지진동의 강지진주파수범위인 1.5Hz ~ 10.0Hz 이내에 존재하는 것으로 나타났으며 따라서 이들에 대한 지진 안전성을 확보하기 위해서는 면진설계가 필수적임을 알 수 있다.

4.2 수직방향 모우드 해석

Table 3은 개발된 단순 지진해석모델를 사용하여 구한 수직방향 모우드 해석결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 1번째 고유진동수는 7.73Hz로서 원자로배플과 유동안내물이 상호 연계거동을 나타낸다(Fig. 4). 2번째 고유진동수는 13.69Hz로서 노심과 원자로용기 그리고 지지배럴이 상호 연계되는 모우드형상을 나타낸다. 3번째 고유진동수는 21.34Hz로서 면진시스템의 수직 설계주파수를 나타내며 이때 유효관성질량은 56121.3톤으로 매우 크며 이러한 면진시스템의 수직고유진동수는 원자로구조물의 가진효과를 상승시켜 수직 지진응답을 증폭시키는 역효과를 나타낼 수 있다. 4번째 고유진동수는 30.39Hz로서 원자로

헤드와 상부내부구조물이 동위상으로 거동하는 모우드형상을 갖는다. 5번째 고유진동수는 33.6Hz로서 원자로용기와 지지배럴이 동위상으로 거동하는 모우드형상을 나타낸다. 6번째 고유진동수는 52.5Hz로서 중간열교환기의 1차모우드 형상을 나타낸다. 7번째 고유진동수는 58.22Hz로서 전자펌프의 1차모우드를 나타낸다. 8번째 고유진동수는 63.24Hz로서 격납용기의 1차모우드 형상을 나타낸다. 9번째 고유진동수는 94.33Hz로서 원자로용기와 지지배럴이 반대위상으로 거동하는 모우드형상을 나타내며 10번째 고유진동수는 139.8Hz로서 원자로헤드와 상부내부구조물이 반대위상으로 거동하는 모우드 형상을 나타낸다.

수직 모우드해석 결과로부터 원자로배플과 유동안내물의 연계거동으로 나타나는 1차 고유진동수 7.73㎐는 설계 지진동의 강지진주파수 범위에 포함되며 따라서 이들 부위에서의 수직지진응답 증폭이 크게 나타날 것으로 예상된다.

Table 2. Horizontal Modal Analysis Results of KALIMER Reactor Structures

Mode No.	Frequencies (Hz)	Effective Mass (kg)		Remarks (Mode Shape)
		Seismic Isolation	Non-isolation	
1	0.50	57239.0E3	-	Isolation Mode
2	1.87	849.6	133.9E3	Core(1st)
3	3.00	12.7	14.7E3	UIS(1st)
4	5.50	46.2	622.1E3	RV(1st)+CP(1st) : in-phase
5	12.33	7.6E-3	2.6E3	SB(1st), Core(2nd)
6	13.83	1.4E-2	7.7E3	UIS(2nd)
7	15.22	7.6E-2	59.5E3	CV(1st)
8	16.42	5.2E-4	0.5E3	RV(1st)+CP(1st) : Out of phase
9	18.91	3.6E-3	6.3E3	RB(1st)
10	37.43	1.7E-4	4.3E3	SB(2nd)+CP(2nd)
11	41.18	2.4E-5	1.0E3	UIS(3rd)
12	43.09	9.1E-8	4.7	FG(1st)
13	45.04	4.2E-4	25.6E3	RV(2nd)
14	52.69	3.6E-7	40.9	Inlet Pipe(1st)

Note : CP indicates the components of IHX and EM Pump.

Table 3. Vertical Modal Analysis Results of KALIMER Reactor Structures

Mode No.	Frequencies (Hz)	Effective Mass (tons)	Remarks (Mode Shape)
1	7.73	171.8	RB+FG
2	13.69	719.7	Core+RV+SB
3	21.34	56121.3	Seismic Isolator
4	30.39	20.3	RH+UIS : In-phase
5	33.60	89.3	RV+SB : in-phase
6	52.50	1.7	IHX
7	58.22	1.2	EMP
8	63.24	1.2	CV
9	94.33	0.05	RV+SB : Out of phase
10	139.8	0.1E-3	RH+UIS : Out of phase

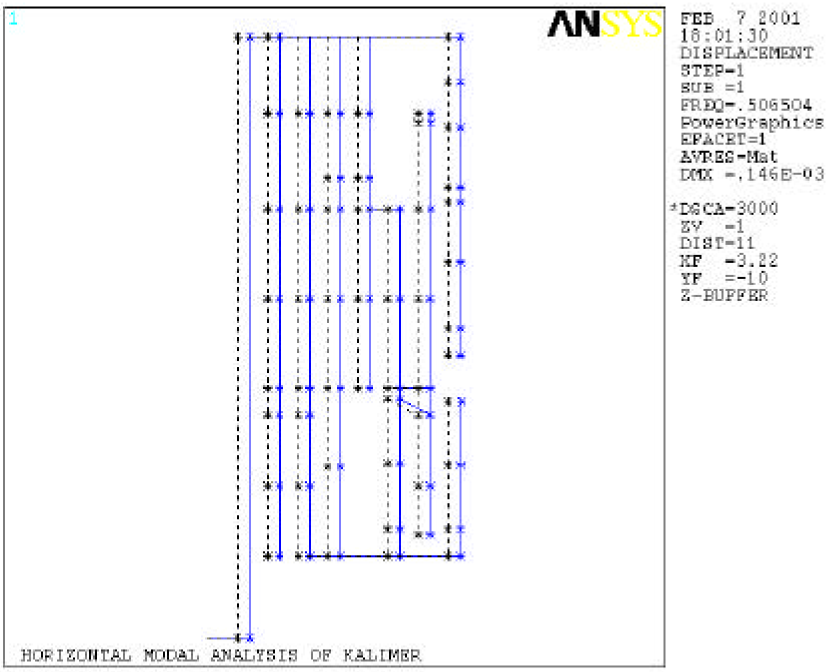


Fig. 3 1st Mode Shape of KALIMER (Horizontal)

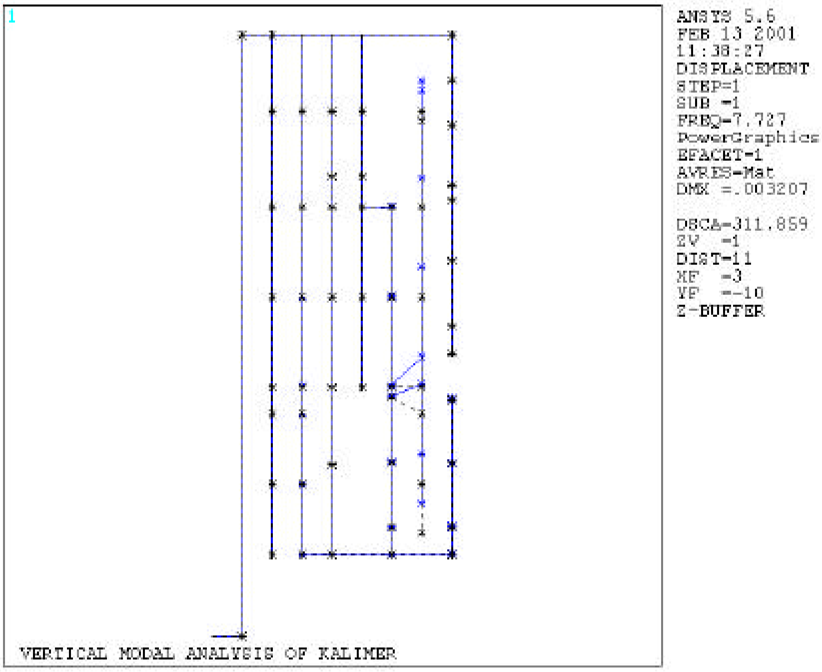


Fig. 4 1st Mode Shape of KALIMER (Vertical)

5. 시간이력 지진응답해석

5.1 입력지진 하중

해석에 사용된 입력지진은 US NRC Regulatory Guide 1.60에 부합하는 인공지진파형을 사용하였으며 수평 및 수직 설계입력지진은 운전기준지진 (OBE : Operating Basis Earthquake) 0.15g와 안전정지지진 (SSE : Safe Shutdown Earthquake) 0.3g이며 인공지진파형에 대해 일정 비율을 곱하여 이들 두 지진하중의 최대 첨두가속도를 만족하도록 하였다. 해석에 사용된 수직지진성분은 ASCE(American Society of Civil Engineers)의 안전관련 원자력구조물의 지진해석 기준에 따라서 수평지진파형에 대해 2/3에 해당하는 크기를 사용하였다[9]. 지진해석에 사용된 시간간격은 0.01초이며 총 지진해석시간은 21초이다.

시간이력 지진해석에 사용된 원자로구조물의 감쇠는 운전기준지진의 경우에는 임계감쇠의 3%, 안전정지지진의 경우에는 5%를 적용하였다.

5.2 최대 첨두가속도 응답해석

Fig. 5는 면진 및 비면진 설계시 지진해석모델의 각 절점에 대한 최대 수평첨두가속도 응답해석결과를 나타낸 것이다. 면진설계의 경우에 모든 원자로 구조물들에서의 지진응답증폭은 발생하지 않으며 오히려 입력지진가속도 수준보다 작게 나타났다. 이러한 해석결과로 부터 적절한 면진설계를 도입할 경우 지진하중에 대해 면진장치 위에 지지된 모든 원자로구조물 및 기기들의 강체운동을 유도할 수 있고 수평지진응답의 증폭가능성을 완전히 배제시킬 수 있음을 의미한다. 반면에 비면진설계의 경우 모든 원자로구조물에서 매우 큰 지진응답 증폭이 발생하며 면진설계 결과들과 비교하여 원자로용기의 경우에 7.2배, 원자로배플은 8.1배, 상부내부구조물은 6.6배, 노심은 5.3배로 크게 나타났다.

Fig. 6은 면진 및 비면진 설계조건에 대한 최대 수직첨두가속도 응답해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 수직응답의 경우에 면진설계가 비면진설계에 비하여 가속도응

답이 크게 발생하였으며 이는 앞서 설명한 바와 같이 면진시스템의 수직강성과 원자로건물 전체의 무게에 의하여 발생되는 21Hz의 수직고유진동수의 존재가 그 원인이다. 적층고무베어링을 사용하는 면진시스템은 필연적으로 역효과적인 수직주파수가 존재하게 되며 이를 설계시 입력지진 주파수특징에 맞추어 배제시키기가 매우 힘들다. 이러한 면진시스템의 수직고유진동수는 비면진설계에 비하여 수직지진응답을 증가시키는 역할을 하게 되며 이러한 수평면진용 적층고무베어링의 사용은 면진설계에 있어서 해결되어야 하는 중요한 문제점이 되고 있으며 해결방안으로서 3차원 수평-수직 면진장치에 대한 연구[13]가 현재 진행중이다.

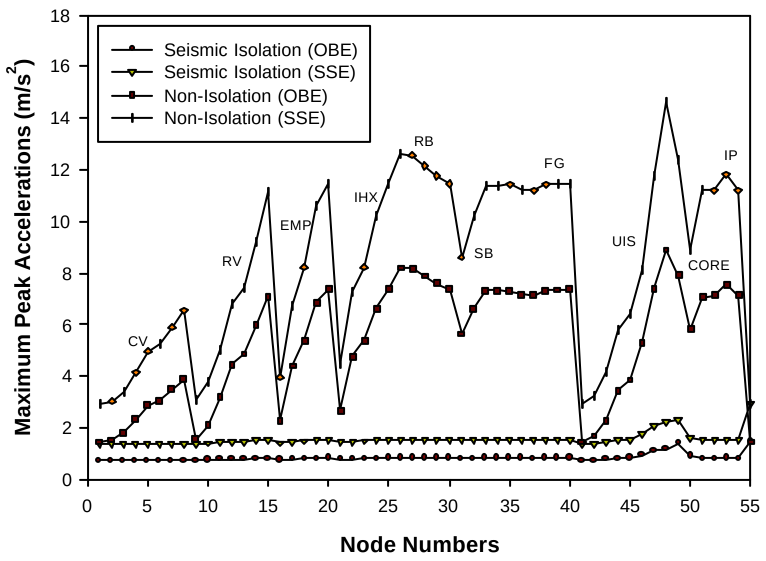


Fig. 5 Maximum Horizontal Peak Acceleration Responses for Each Node

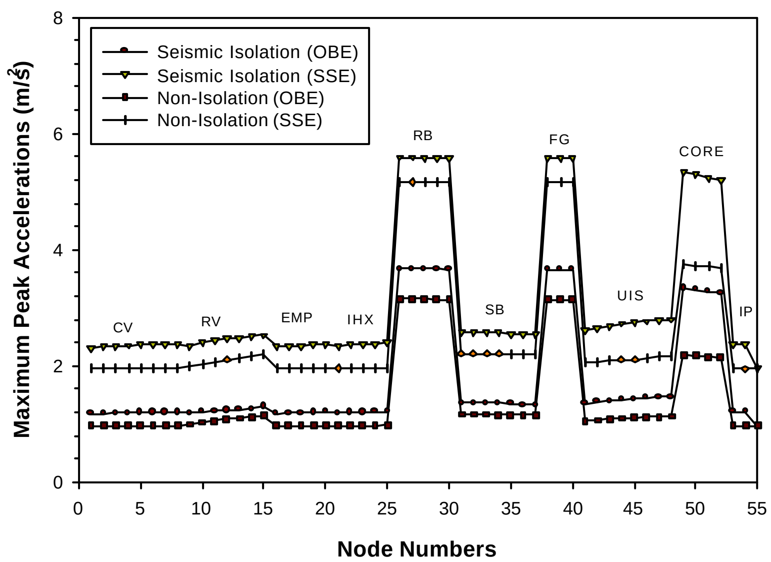


Fig. 6 Maximum Vertical Peak Acceleration Responses for Each Node

5.3 상대지진변위 한계요건 검토

설계지진들에 대한 원자로구조물의 변형한계요건으로서 지반과 면진구조물 간의 상대변위, 노내상부구조물과 노심간의 상대변위 지진응답, 그리고 원자로용기와 원자로배플 상단 간의 상대 지진변위응답은 KALIMER 액체금속로에 대한 기능 및 구조설계에 있어서 매우 중요한 설계요건들이다.

Table 4는 면진시스템의 수평변위응답과 노내상부구조물과 노심의 상대변위응답, 원자로용기와 원자로배플 상단 간의 상대 지진변위응답을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 면진설계의 경우 최대 설계지진하중인 안전정지지진 하중시에 면진장치의 최대 수평변위는 약 13.1cm로서 이는 KALIMER 면진장치용으로 개발되고 있는 직경 120cm, 총고무두께 27.84cm 적층고무베어링의 약 50% 전단변형률에 해당한다. 따라서 축소규모 적층고무베어링을 사용한 실제 전단변형 특성실험[14]에서 적층고무베어링은 300% 전단변형이상에서도 충분히 안정된 전단변형특성을 나타낸 점을 고려할 때 면진장치의 전단변형 여유도는 매우 큰 것으로 나타났다. 원자로구조물 전체 시스템에 대한 면진장치의 수평변형 정도는 면진시스템과 비면진시스템 사이의 연결계통 설계에 매우 중요한 요건이 된다.

운전기준지진 또는 안정정지지진이하 수준의 지진이 발생할 경우에 원자로 제어봉이 수직관성력(중력)으로 노심에 삽입되어야 한다. 이를 위하여 노내상부구조물과 노심 상부끝단과의 수평상대변위로 인하여 일차 원자로정지 기능이 영향을 받지 말아야 한다. Table 4에서와 같이 면진설계를 도입할 경우에 운전기준지진에 대해서는 1.09cm, 안정정지지진에 대해서는 1.83cm의 노내상부구조물과 노심 상부끝단과의 수평상대변위가 발생하며 이는 비면진설계에 비하여 약 5배의 응답감소 효과를 나타낸다.

원자로헤드와 노심간의 수직상대변위는 노심에 대한 반응도삽입(Reactivity insertion) 요건 만족에 매우 중요하다. 반응도삽입사고는 순간반응도삽입으로 인한 초임계발생과 주기적 반응도삽입으로 인한 핵연료파손 사고 등을 야기할 수 있다. 개념설계된 KALIMER 원자로의 경우에 Table 4에서와 같이 면진설계의 경우에 원자로상부덮개와 노심간의 수직상대변위는 비면진설계에 비하여 앞서 언급한 가속도응답 결과와 마찬가지로 약 83%(OBE 지진의 경우), 56%(SSE 지진의 경우) 정도 증가하지만 모두 1.1mm이하의 매우 작은 수직 상대변위응답을 나타냄으로써 지진에 의한 반응도삽입 요건을 충분히 만족할 것으로 예상된다.

원자로용기와 원자로배플 사이의 수평 설계간격은 2.5cm이다. 따라서 실제 운전수명 말기에서 발생할 수 있는 비탄성변형량을 고려하며 원자로용기와 원자로배플 상단에서 발생할 수 있는 지진상대변위 한계는 2.0cm로 설정되어 있다. Table 4의 결과에서 SSE 하중에 대하여 면진 설계시는 0.164cm, 비면진 설계시에는 1.15cm의 상대변위응답이 발생하며 이는 설계한계요건 2.0cm를 충분히 만족한다.

Table 4. Relative Displacement Responses of KALIMER

Unit : Cm

Design Condition	Load Type	Isolation System		UIS/CORE		RV-RB
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Seismic Isolation	OBE	7.07	7.84E-6	1.09	0.062	0.088
	SSE	13.1	1.65E-5	1.83	0.108	0.164
Non-Isolation	OBE	-	-	5.98	0.034	0.728
	SSE	-	-	8.85	0.069	1.150

6. 결 론

KALIMER 원자로구조물은 각각 외팔보 구조형상의 원자로내부구조물과 기기들이 끝단과 중간부위에서 서로 격리판과 분리판을 통해 수평적으로 강성연계되어 있고 수직적으로는 유동안내물이 전자펌프노즐을 통하여 분리판에 연결되어 수직강성이 취약한 원자로배플 등의 지지역할을 함으로써 지진하중에 대한 구조설계가 잘 반영되어 있다. 시간이력 지진응답 해석결과 면진설계된 KALIMER 원자로구조물은 비면진설계 경우에 비하여 가속도응답과 구조물간의 상대변위응답이 현저히 감소하였으며 이러한 효과는 가속도와 상대변위에 대한 각종 구조설계요건을 충분히 만족시 킬 뿐만 아니라 노심을 포함한 모든 원자로구조물의 내진설계를 매우 단순화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 KALIMER 원자로구조물의 내진여유도와 한계지진하중 평가절차를 통해 열응력을 최소화 시킬 수 있는 최적의 박막구조물 설계와 배관지지물 설계단순화 등을 수행할 수 있으며 이로부터 경제성 향상을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. H. Shiojiri, T. Matsuda, et.al., "Seismic Isolation for FBR-Preliminary Study," *ASME PVP, Seismic, Shock, and Vibration Isolation-1989*, Vol.181, pp.115-120.
2. T. Fujita, S. Suzuki, and T. Yoshizawa, "Experimental Study of Laminated Rubber Bearings for Earthquake Isolation of Buildings," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.53, No.485, 1987, pp.71-76.
3. 구경회, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무베어링의 기계적 역학특성," 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제2호 (통권 제2호), 1997, pp.79-89.
4. 구경회, 이형연, 유봉, "면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석," 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제1호 (통권 제9호), 1999, pp.75-92.
5. G.H. Koo, J.H. Lee, B. Yoo, and Y. Ohtori, "Evaluation of Laminated Rubber Bearings for Seismic

Isolation Using Modified Macro-Model with Parameter Equations of Instantaneous Apparent Shear Modulus," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp.594-602.
6. Exploring I-DEAS Design, Volume I, II, SDRC, 1998.
7. G.H. Koo, J.H. Lee and B. Yoo, "Core Seismic Analysis for a Seismically Isolated LMR," ASME PVP-Vol.379, Seismic, Shock, and Vibration Isolation, 1998, pp.221-227.
8. ANSYS User's Manual for Version 5.6, Volume I,II,III, Swanson Analysis Systems, Inc.
9. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures, American Society of Civil Engineers, 1986, 91 pp.
10. R. J. Fritz, "The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids," Journal of Engineering for Industry, ASME, pp.167-173, 1972.
11. G.H. Koo, J.H. Lee, and B. Yoo, "Seismic Response Analyses of Seismically Isolated Structures Using the Laminated Rubber Bearings," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.30, No.5, 1998, pp.387-395.
12. 유봉, 구경회, 이재한, "액체금속로 KALIMER를 위한 면진설계지침서, Revision A," 한국원자력연구소, KAERI/TR-1544/2000, 2000.
13. 구경회, 이재한, 유봉, " KALIMER 원자로구조물에 대한 3차원면진설계 적용가능성 분석," 한국원자력연구소, KAERI/TR-1065/98, 1998, 35 pp.
14. 유봉, 이재한, 구경회, "액체금속로용 축소규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성시험결과 분석," KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소, 199, 121 pp.