

고온소듐 내부유동을 갖는 액체금속로 중간열전달계통 배관에 대한 진동특성 해석

구경희* · 이형연** · 이재한***

Vibration Analysis for IHTS Piping System of LMR Conveying Hot Liquid Sodium

Gyeong-Hoi Koo, Hyeong-Yeon Lee, Jae-Han Lee

Key Words : 액체금속로(Liquid Metal Reactor), 동적강성행렬(Dynamic Stiffness Matrix), 유체-구조물연성(Fluid-Structure Interaction), 진동에너지흐름(Vibration Energy Flow)

Abstract

In this paper, the vibration characteristics of IHTS(Intermediate Heat Transfer System) piping system of LMR(Liquid Metal Reactor) conveying hot liquid sodium are investigated to eliminate the pipe supports for economic reasons. To do this, a 3-dimensional straight pipe element and a curved pipe element conveying fluid are formulated using the dynamic stiffness method of the wave approach and coded to be applied to any complex piping system. Using this method, the dynamic characteristics including the natural frequency, the frequency response functions, and the dynamic instability due to the pipe internal flow velocity are analyzed. As one of the design parameters, the vibration energy flow is also analyzed to investigate the disturbance transmission paths for the resonant excitation and the non-resonant excitations.

기호설명

- A_f cross-sectional area of fluid
- A_n wave coefficient vectors
- C pipe internal flow velocity
- $[D_1]_e, [D_2]_e$ disp. and force coefficient matrix
- $[D]_e$ dynamic stiffness matrix
- I moment of inertia of pipe cross-section
- j complex value, $\sqrt{-1}$
- k general wave numbers
- m_p, m_f mass of pipe and fluid per unit length
- p internal pressure in the pipe
- α, β internal loss factors of the pipe
- ρ_p polar moment of inertia per unit length
- ω angular frequency

1. 서론

현재 한국원자력연구소에서 개발중인 액체금속로(Liquid Metal Reactor)는 소듐을 냉각제로 사용하며 설계운전온도 530°C 와 운전압력 5 기압이하의 설계특성을 가지고 있다[1]. 이러한 액체금속로는 기존의 가압경수로에 비하여 열효율이 아주 높고 안전성이 뛰어나기 때문에 미래형원자로로 크게 각광을 받고 있다. 그러나 경제성 문제로 인하여 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있으며 이러한 문제점 해결을 위한 많은 연구가 진행되고 있다[2,3].

소듐을 냉각제로 사용하는 액체금속로는 일차 소듐냉각재와 증기발생기 급수간의 소듐-물반응을 방지하기 위하여 중간열전달계통(IHTS)을 제공한다. 본 논문에서는 면진설계(Seismic Isolation Design)[4]를 채택하고 있는 액체금속로에 있어서 중간열전달계통 배관의 중간 지지구조물을 제거함으로써 지진하중에 대한 배관설계단순화를 통해 액체금속로의 경제성 향상방안을 살펴보고자 한다.

* 한국원자력연구소 액금로기계설계기술개발

** 상동

*** 상동

이를 위하여 고온배관(Hot leg)의 소듐 내부유동을 고려한 진동해석모델을 파동접근법[5,6]을 이용한 동적강성행렬(Dynamic Stiffness Matrix)로부터 유도하였다. 해석모델로부터 액체금속로 중간열전달계통 배관의 진동모우드 특성, 내부 소듐유동으로 인한 고유진동수의 변화와 그리고 고온소듐냉각재 온도변화에 따른 동적불안정성 해석 등을 수행하고 계산된 고유진동수의 설계타당성을 분석하였다. 또한 복잡한 굽힘배관과 엘보우 그리고 분기관(Branched Pipes)을 갖는 복잡한 형상의 중간열전달 계통배관에 대한 진동에너지 흐름해석을 수행하여 진동전달경로를 분석하였으며 내부소듐 유속변화에 따른 진동에너지흐름 특성을 검토하였다.

2. 배관 진동해석 공식화

2.1 직선배관 요소

내부유동을 갖는 직선배관 요소에 있어서 조화 가진, $e^{j\omega t}$ 을 갖는 모든 주파수 영역에 대한 진동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

굽힘진동 :

$$E(1+j\alpha)IY_I^{IV}(x,\omega) + (m_f C^2 + pA_f)Y_I''(x,\omega) + j2m_f\omega CY_I'(x,\omega) - (m_p + m_f)\omega^2 Y_I(x,\omega) = F_u(x,\omega) \quad I=1,2 \quad (1)$$

비틀림진동 :

$$G(1+j\beta)J\Phi''(x,\omega) - \rho_p\omega^2\Phi(x,\omega) = T_c(x,\omega) \quad (2)$$

축진동 :

$$E(1+j\alpha)A_p U''(x,\omega) + (m_p + m_f)\omega^2 U(x,\omega) = P_c(x,\omega) \quad (3)$$

식 (1) ~ (3)에 표시된 기호는 위의 기호설명에 기술되어 있으며 이들에 대한 일반적인 해는 각각 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$Y_I(x,\omega) = \sum_{n=1}^4 A_n e^{k_n x} \quad (4)$$

$$\Phi(x,\omega) = \sum_{n=1}^2 B_n e^{k_n x} \quad (5)$$

$$U(x,\omega) = \sum_{n=1}^2 C_n e^{k_n x} \quad (6)$$

식 (4) ~ (6)을 식 (1) ~ (3)에 대입하면 다음식들과 같은 각 파동수(Wave Number)에 대한 특성방정식을 구할 수 있다.

$$E(1+j\alpha)Ik_a^4 + (m_f C^2 + pA_f)k_a^2 + j2m_f\omega Ck_a - (m_p + m_f)\omega^2 = 0 \quad (7)$$

$$G(1+j\beta)Jk_b^2 - \rho_p\omega^2 = 0 \quad (8)$$

$$E(1+j\alpha)A_p k_c^2 + (m_p + m_f)\omega^2 = 0 \quad (9)$$

위의 특성방정식으로부터 4 개의 복소근을 갖는 굽힘 파동수 k_a , 2 개의 복소근을 갖는 비틀림 파동수, k_b 와 축 파동수 k_c 를 각각 구할 수 있다.

따라서 식 (4) ~ (6)으로부터 직선배관 요소 각 절점의 변위상태벡터 $\{W\}$ 는 국부좌표계에서 식 (7) ~ (9)에서 구한 파동수를 이용하여 다음과 같은 파동계수벡터 $\{K\}$ 로 표현할 수 있다.

$$\{W\}_e = [D_1]_e \{K\}. \quad (10)$$

Euler 보이론에 따라서 직선배관 요소 각 절점에서의 탄성 전단반력, 굽힘모멘트, 비틀림모멘트, 그리고 축력은 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_I(x,\omega) = -E(1+j\alpha)IY_I''(x,\omega) \quad (11)$$

$$M_{ib}(x,\omega) = E(1+j\alpha)IY_I'(x,\omega) \quad (12)$$

$$M_c(x,\omega) = G(1+j\beta)J\Phi'(x,\omega) \quad (13)$$

$$P(x,\omega) = E(1+j\alpha)A_p U'(x,\omega) \quad (14)$$

식 (4) ~ (6)을 식 (11) ~ (14)에 대입하여 정리하면 직선배관 요소 각 끝단에서의 탄성 반력벡터 $\{F\}$ 는 다음 식과 같이 파동계수벡터 $\{K\}$ 로 간단히 표현될 수 있다.

$$\{F\}_e = [D_2]_e \{K\}. \quad (15)$$

따라서 식 (10)과 식 (15)로부터 직선배관 요소에 대한 동적강성행렬을 구할 수 있으며 다음과 같은 시스템 방정식으로 표현된다.

$$\{F\}_e = [D_2]_e [D_1]_e^{-1} \{W\}_e = [D]_e \{W\}. \quad (16)$$

위의 식에서 동적강성행렬 $[D]_e$ 는 주파수함수로서 12 x 12 비대칭 행렬을 나타낸다. 이러한 비대칭성의 정도는 식 (1)의 3 번째 항에 주어진 유체 Coriolis 힘에 따라 좌우된다.

2.2 곡선배관 요소

일정한 곡률을 갖는 곡선배관 요소에 대한 시스템 방정식을 곡선배관 양쪽 끝단에서의 전체좌표계로 표현된 상태벡터로 나타낼 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 곡선배관을 여러 개로

분할된 직선배관의 연결로 가정하고 전달행수 접근법(Transfer Matrix Method) [7]을 사용하여 곡선배관에 대한 동적강성행렬을 구하였다.

3. 액체금속로 IHTS 배관 진동특성 해석

3.1 제안된 파동접근법의 정확성 검증

본 논문에서 사용된 파동접근법은 시스템행렬에 사용된 동적강성행렬이 식 (4)~(6)에 표현된 엄밀해를 사용하여 결정된 것이기 때문에 진동특성 해석결과가 매우 정확한 결과를 준다[6,7]. Table 1은 외경 35.56Cm, 두께 1.113Cm, 길이 7.517Cm 그리고 탄성계수 158GPa를 갖는 단순 직선배관에 대한 고유진동수 해석결과를 비교한 것으로 제안된 파동접근법이 엄밀해와 비교하여 매우 정확한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Table 1. Verification of Wave Approach for Natural Frequency (Hz)

Mode No.	Wave Approach	FEM (Elem=20)	Exact Sol.
1	5.432	5.429	5.434
2	34.04	33.90	34.00
3	95.31	94.36	95.32
4	186.78	183.38	186.93
5	308.76	299.95	308.97

3.2 IHX 고온배관의 고유진동수 해석

현재 국내에서 개발중인 액체금속로는 2개의 증기발생기를 갖는 2-loop 시스템이며 각 loop의 중간열전달계통은 Fig. 1과 같이 고온배관(Hot Leg Piping), 저온배관(Cold Leg Piping), 그리고 흡입배관(Suction Piping)으로 구성되어 있다.

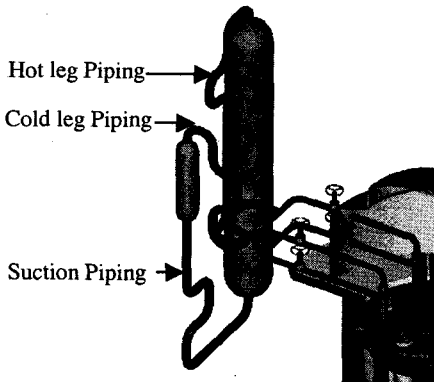


Fig. 1 IHTS Piping System of LMR

이들 배관중에 고온배관의 길이가 가장 길며 정상운전시에 $T=511^{\circ}\text{C}$, $P=0.35\text{MPa}$ 의 고온소듐이 약 6.0m/s의 유속으로 고온배관을 통해 원자로에서 증기발생기 쪽으로 흘러간다. 원자로내부에는 4개의 중간열교환기가 있으며 중간열교환기에 연결된 각각의 고온배관은 원자로헤드를 나온후 2개가 한쌍이 되어 Fig. 1에서와 같이 하나의 배관에 연결되어 증기발생기 상부노즐에 연결된다. 따라서 중간열전달계통 배관은 2가지 종류의 배관으로 구성되어 있으며 중간열교환기에 연결된 작은배관은 외경 $D_1=35.56\text{Cm}$, 두께 $t_1=1.113\text{Cm}$ 이고 증기발생기에 연결되는 큰배관은 외경 $D_2=50.8\text{Cm}$, 두께 $t_2=1.506\text{Cm}$ 이다. Fig. 1에서와 같이 액체금속로 중간열교환계통 배관은 고온운전시 발생할 수 있는 과도한 열팽창을 흡수하기 위하여 많은 곡선배관 형상을 가지고 있다. 이러한 곡선배관의 곡률반경은 작은배관의 경우에는 $r=53.34\text{Cm}$, 큰배관의 경우에는 $r=76.2\text{Cm}$ 이다. 모든 배관재질은 316 스테인레스강이며 이는 30년 운전수명동안 고온소듐 환경을 견딜 수 있도록 선택된 것이다.

Fig. 2는 액체금속로 중간열전달계통 고온배관에 대한 진동해석모델을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 제안된 파동접근법을 사용한 해석모델은 기존의 유한요소 해석모델과는 달리 직선배관과 곡선배관의 끝단만이 시스템행렬을 구성하는 절점으로 선정됨으로써 복잡한 3차원 배관 모델링방법이 매우 단순하고 시스템행렬 크기가 매우 작아지는 장점을 가지고 있다.

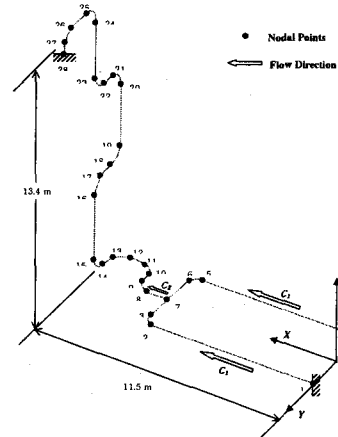


Fig. 2 Analysis Model Using Wave Approach

Table 2는 원자로 정상운전조건에 대한 고유진동수 해석결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 내부유체가 없을 경우에 고온배관의 고유진동수는 3.41Hz이다. 정상운전시 유속과 내압을 무시할 경

우 고유진동수는 2.54Hz 이며 설계 내부유속 6m/s, 내부압력 0.35MPa 를 고려할 경우 고유진동수는 2.53Hz 로 설계유속과 내압이 고유진동수에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 2 의 고유진동수 해석결과부터 원자로 정상운전시 중간열전달계통의 고온배관에 배관지지물을 전혀 설치하지 않더라도 배관의 1 차고유진동수가 수평 면진주파수(Horizontal Seismic Isolation Frequency) 0.5Hz 보다 훨씬 높으며 따라서 면진설계를 고려하면 충분히 지진하중을 견딜 수 있을 것으로 판단된다. 표에서와 같이 2nd 고유진동수와 3rd 고유진동수는 각각 4.88Hz 와 5.41Hz 로서 근접모우드를 나타내며 이러한 결과는 주파수응답해석 결과에서도 뚜렷이 나타난다.

Table 2. Natural Freq. of IHTS Hot Leg Piping (Hz)

Mode No.	No internal fluid	With internal fluid	
		C = 0	C=6m/s P=0.35MPa
1	3.41	2.54	2.53
2	6.61	4.91	4.88
3	7.29	5.42	5.41
4	9.48	7.09	7.09
5	12.75	9.50	9.50

Fig. 3 은 고온배관의 1 차 고유진동모우드를 나타낸 것으로 수평 Y-Y 방향으로의 진동이 지배적인 것으로 나타났다.

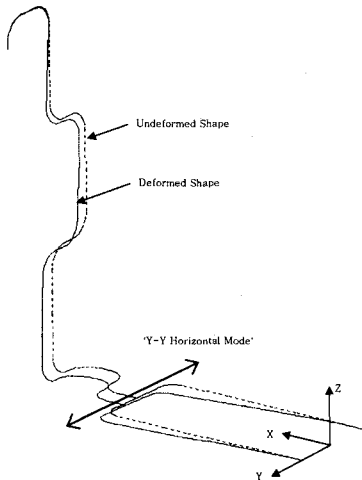
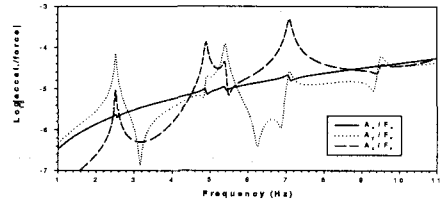


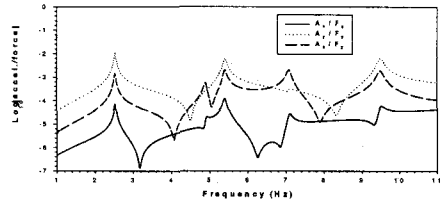
Fig. 3 Fundamental Mode Shape

Fig. 4 는 절점 3 의 가진점에 대한 주파수응답함수를 나타낸 것으로 1st 진동모우드와 3rd 진동모우드는 수평 Y-방향 응답에 지배적으로 나타나고

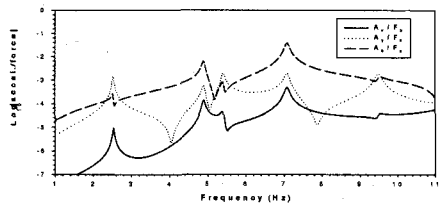
2nd 진동모우드는 수직 Z-방향 응답에 지배적으로 나타난다. Fig. 4(a)에서와 같이 X-방향의 가진시 최대 수직가속도응답은 4th 진동모우드에 의해 발생되며 이는 Fig. 4(c)의 수직 Z-방향 가진에서도 잘 나타난다.



(a) For Excitation of X-Direction at Node 3



(b) For Excitation of Y-Direction at Node 3



(c) For Excitation of Z-Direction at Node 3

Fig. 4 Freq. Response Function at Node 3

3.3 내부유체 유동으로 인한 동적불안정성 해석
배관내부유속이 증가하면 유체-구조물 상호작용으로 인하여 배관계통의 고유진동수가 점점 줄어들고 유속이 임계치에 도달하면 고유진동수가 0Hz 에 접근하면서 배관계통은 동적인 좌굴손상을 당하게 된다.

Fig. 5 는 고온배관의 유속증가에 따른 동적불안정성 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이며 해석 결과에서와 같이 내부유속이 약 260m/s 에 도달하면 고유진동수가 0Hz 가 되며 동적좌굴이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 임계유속은 정상운전 조건에서의 설계유속 6m/s 에 비해 매우 높으며 따라서 예비 설정된 설계유속은 동적불안정성에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

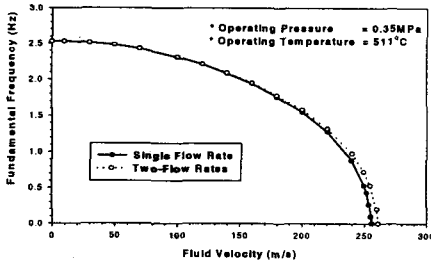


Fig. 5 Dynamic Instability of IHTS Hot Leg Piping

3.4 진동에너지흐름 해석

진동에너지흐름은 다음 식으로 정의된다.

$$Q = \frac{\partial w_m(x,t)^T}{\partial t} f_m(x,t) \quad (17)$$

위의 식에서 w_m 과 f_m 은 배관변위와 탄성 복원력을 각각 나타내며 T 는 이항부호(Transpose Operator)를 나타낸다. 임의 위치에서의 예상되는 진동에너지흐름은 위의 식 (17)을 다음 식과 같이 모든 시간에 걸쳐 적분함으로써 구해질 수 있으며 이러한 물리량은 Power Theorem 통한 응답변수들의 스펙트럼 성분으로도 간단히 표현될 수 있다.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \frac{\partial w_m(x,t)^T}{\partial t} f_m(x,t) dt \quad (18)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} i\omega W_m^H(x,\omega) F_m(x,\omega) \frac{d\omega}{2\pi}$$

위의 식에서 H 는 Hermitian 또는 복소공액이항을 나타낸다.

진동에너지흐름은 변위와 복원력 응답간의 순간연성을 나타내는 비선형량이며 식 (17)은 정상상태 진동에너지흐름을 나타낸다.

본 논문에서는 정상운전조건에서 증기발생기에서 발생하는 가진력이 전 주파수범위에 걸쳐 X, Y, Z 방향으로 1.0 MN 이 동시에 발생한다고 가정하였다. 해석에 사용된 손실계수는 0.025 이다.

Fig. 6 은 배관내부에 유속이 없는 경우에 대한 배관 위치에 따른 진동에너지흐름 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 공진주파수 부근 주파수에서는 배관위치에 따른 진동에너지흐름의 변화가 비공진주파수에서의 값보다 크게 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 공진주파수에서는 진동에너지흐름 손실이 작기 때문에 가진하중에 의한 배관진동이 크게 발생함을 의미한다. 그러나 비공진주파수에서는 가진점에서 멀어질수록 진동

에너지흐름 손실이 크게 발생하며 가진 하중에 의한 배관진동이 작음을 나타낸다. 그림에서와 같이 1 차고유진동수 2.54Hz 에서는 거의 진동에너지흐름 손실이 발생하지 않으며 가진하중 발생시 지배적인 진동발생모우드로 예상된다.

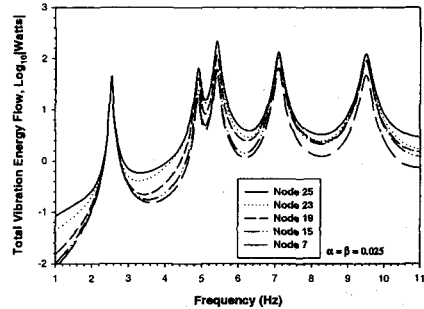


Fig. 6 Total Vibration Energy Flow w/o Flow Velocity

Fig. 7 은 1 차 고유진동수인 2.54Hz 가진주파수에 대하여 배관내부 유속변화에 따른 배관 각 위치에서의 진동에너지흐름 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 유속이 클 경우 최대 진동에너지흐름은 수평과 수직배관이 연결되는 절점 13, 14, 15 부근에서 발생하며 유속의 변화에 따라서 이 위치에서의 진동에너지흐름이 크게 영향을 받을 수 있다.

Fig. 8 은 비공진주파수인 150Hz 가진주파수에 대한 진동에너지흐름 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 진동에너지흐름이 가진점에서 멀어질수록 급격히 줄어들며 유속에 의한 영향이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 액체금속로 중간열전달계통 배관 중에서 고온소듐 내부유동을 갖는 고온배관에 대한 진동특성 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 중간지지물이 제거된 액체금속로 고온배관의 고유진동수는 2.54Hz 이며 이는 면진설계주파수 0.5Hz 에 비해 충분히 높기 때문에 면진설계의 장점을 최대한 활용한 단순배관설계가 가능하다.
- 고온배관의 동적불안정성을 야기하는 배관내부 임계유속은 약 260m/s 이며 이는 설계유속 6m/s 에 비해 충분한 여유도가 있다.
- 공진주파수에서의 진동에너지흐름은 수평배관

과 수직배관이 연결되는 부위에 발생하며 유속이 증가할수록 이 부위에서의 진동에너지흐름은 증가한다.

비공진주파수에서의 진동에너지흐름은 가진점에서 멀어질수록 크게 줄어들며 내부유속의 영향을 크게 받지 않는다.

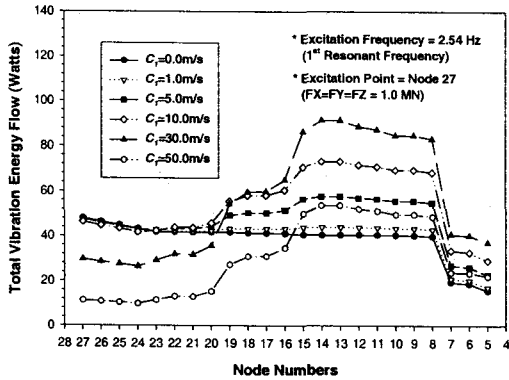


Fig.7 Vibration Energy Flow for an Resonant Excitation

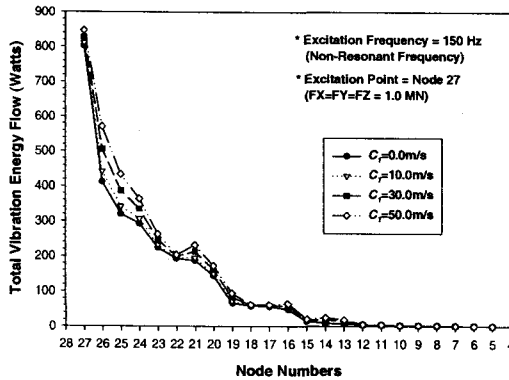


Fig. 8 Vibration Energy Flow for Non-Resonant Excitation

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) 한도희, 김영진, 구경희, 등, 2000, "KALIMER 예비 개념설계 보고서," KAERI/TR-1636/2000, 한

국원자력연구소.

(2) K. Hirata, S. Yabana, K. Kanazawa and A. Matsuda, 1994, "Effects of Applying Three-dimensional Seismic Isolation System on the Seismic Design of FBR," CRIEPI Research Report No. U97001.
 (3) T. Yashiro, H. Ikeuchi, K. Hirata and Y. Fukushima, 1998, "A Study on the Simplification for FBR Nuclear Components by 3-D Base Isolated System," ICONE-6.
 (4) G.H. Koo, J.H. Lee, H.Y. Lee, and B. Yoo, 1999, "Stability of Laminated Rubber Bearing and Its Application to Seismic Isolation," KSME International Journal, Vol. 13, No. 8, pp.595-604.
 (5) G.H. Koo and Y.S. Park, 1996, "Vibration and Power Flow Analysis for the Branched Piping System by wave Approach," Transactions of the KSME, Vol. 20, No. 4, pp.1225-11232.
 (6) R.S. Langley, 1989, "Application of the Dynamic Stiffness Method to the Free and Forced Vibration of Aircraft Panels," Journal of Sound and Vibration, Vol.135, No. 2, pp.319-331.
 (7) G.H. Koo and Y.S. Park, 1996, "Vibration Analysis of a 3-Dimensional Piping System Conveying Fluid by Wave Approach," Int J Press. Vessels Piping, Vol. 67, pp.249-256.