

유체유발진동 시험용 유동루프의 자유진동해석

이강희[†]·강흥석*·송기남*·윤경호*·최명환*

Free Vibration Analysis of FIV Test Loop

K-H Lee, H-S Kang, K-N Song, K-H Yoon, and M-H Choi

Key Words: FIV(유체유발진동), Test Loop(시험루프), Free Vibration(자유진동), Fuel Assembly(핵연료 집합체)

Abstract

Vibration characteristics of the FIV test loop for the Flow-Induced Vibration(FIV) study of a PWR partial(5x5) fuel assembly are investigated by the Finite Element(FE) analysis and the modal test. For the FE analysis, 3-D beam element is used for the pipes and the test section and mass element used for the valves and flanges. The 'U' restrainer stiffness determined by numerical simulation is used for the FE model. The result of the FE analysis is compared with that of the modal test. The higher mode similarity between the test and analysis is observed in a few low modes. After that, the mode similarity reduce as the mode goes high. It is concluded that the first to the third vibration modes are observed at the lower parts of the 6 inches restoring line, followed by a local mode at the test section, and the natural frequencies of the modes are 22.4 Hz, 26.0 Hz, 27.5 Hz and 31.4 Hz.

1. 서 론

한국원자력연구소 고성능지지격자개발과제는 경수로용 원전연료집합체의 주요 부품인 지지격자체를 개발하는 일과 이와 관련된 기초연구를 함께 수행하고 있다. 경수로 원전연료집합체는 대략 3년 동안 원자로 안의 가혹한 환경조건에서 연소되기 때문에 원전연료집합체를 이루는 주요한 부품들은 성능에 관련된 시험을 거쳐야 한다. 그렇지만 개발단계에 있는 부품들로 상용핵연료와 동일한 수준의 시험을 수행한다는 것은 비용적인 면이나 시간적으로 낭비가 아닐 수 없다. 이러한 이유로 개발단계의 부품들은 작은 크기의 모형으로 예비시험을 수행하는 절차를 거치게 된다. 이러한 시험에 의하여 개발단계의 부품들은 가능한 빨리 성능이 검증되고 단점이 보완되어

결국 개발과 연구가 빠른 시간 내에 효율적으로 수행되어지게 된다. 이번에 구축된 부분핵연료 집합체의 유체유발진동 시험용 유동루프도 개발 단계에 있는 지지격자체의 기계적 및 수력적 성능을 시험하기 위한 것이다. 상용 발전소에 장전되는 핵연료집합체는 길이가 4.5m 정도로서 약 250개 핵연료봉으로 구성되지만 구축된 유동루프에 장전되는 부분 원전연료집합체는 2.2m 크기의 연료봉 23개로 구성된다. 구축된 시험시설은 개발단계에 있는 지지격자체의 수력적 특성시험과 지지격자체로 지지된 모의 연료봉의 유체유발진동특성시험을 수행하는데 이용될 예정이다[1~3].

시험시설 완공에 따라 계획되어 있던 부분집합체를 이용한 유동시험 예비단계로서, 유동루프 배관계의 자유진동 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 이것은 주로 시험환경을 제공하는 유동루프 배관계의 진동특성이 집합체와 연료봉의 관심동특성 시험자료에 외란(noise)의 형태로 반영되기 때문에, 시험 이전단계에서 관심신호와의 비교를 위한 기본데이터를 확보하는 것이 필요하게 된다. 또한 배관의 진동모드 형상으로부터 지지구조물의 지지성능을 평가해 보고, 필요할 경우

[†] 한국원자력연구소(KAERI)

E-mail : ex-lee@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2298 FAX : (042)863-0565

* 한국원자력연구소

보강설계를 위한 설계안을 제안하며, 최종적으로 유동루프 배관계의 유한요소 해석모델을 개발하여 추후 설계변경이나 시험조건의 변경에 따른 영향성 분석에 활용할 것이다. 유한요소 해석모델의 개발에 있어서 지지구조물을 포함한 시험관 조립체와 각 배관은 3차원 빔요소로 모델링하고 밸브와 플랜지는 질량요소로 모델링하였고, 배관 지지조건의 강성은 수치해석을 통해 평가하였다. 범용유한요소 해석코드인 ABAQUS[4]를 이용하여 수행된 해석 결과는 시험시설의 모달시험에 의한 시험결과와 비교·분석되었다. 모달시험은 가속도계와 충격해머를 이용하였고 시험 신호의 분석을 위하여 I-DEAS[5]의 시험모델인 TDAS를 이용하였다.

2. 해석모델

유동루프 배관계의 유한요소 해석모델은 Fig.1과 같다. 각 배관, 지지봉과 상하단 고정판을 포함하는 시험관 조립체, 후면 지지구조물, 그리고 각종 지지부는 단면형상과 재질에 따라 3차원 보요소(B31)로 모델링하였고 아크릴 시험관과 지지봉의 연결을 위한 사각 판은 4절점 쉘요소(S4R)로 정의하였다.

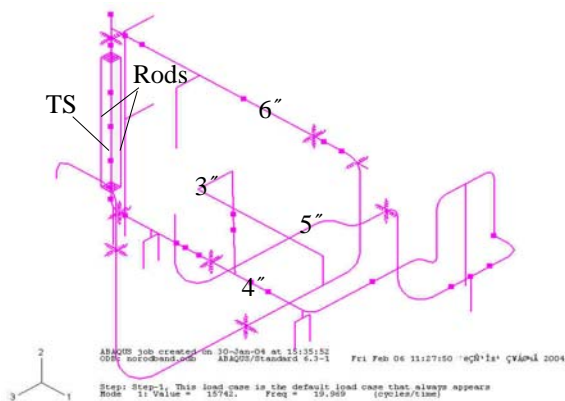


Fig. 1 Finite element model for the test loop

치수별 플랜지와 밸브는 Fig.1의 사각점으로 표시된 것처럼 질량요소로 가정하였고, 곡관 연결부는 6" 에서 4" 까지만 2절점 혹은 3절점 엘보우요소(ELBOW21 or ELBOW31)로 정의하여 해석 모델에 반영시켰다. 6" 과 4" 배관 상류 쪽의 벨로우즈, 하류 쪽의 펌프와 물탱크 및 탱크 지지

구조물은 해석결과에 큰 영향이 없기 때문에 해석모델에서 제외시켰다. Table 1에서는 해석에 포함된 각 배관치수와 플랜지 및 밸브의 질량을 나타내고 있다.

Table 1 Pipes dimension, flange and valve mass

	2"pipe	3"pipe	4"pipe	5"pipe	6"pipe
OD(mm)	60.5	89.1	114.3	139.8	165.2
TH(mm)	3.9	5.5	6.0	6.6	7.1
Material	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
C.Radius (mm)	.	.	0.18	0.20	0.21
Flange (kg)	.	.	7.61	10.5	13.31
Valve (kg)	22	30	38	47	56

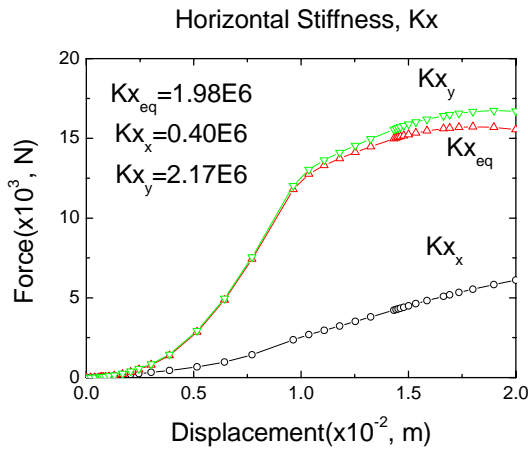
Fig. 1의 모델에서 스프링요소로 표시된 U자형 고정쇠(U Strainer)의 지지강성은 고정쇠를 변형체로 모델링 하고, 배관은 강체로 가정하여 Fig.2에서와 같이 배관을 수직·수평방향으로 강체 변위 시킴에 따라 고정쇠 끝단에서 발생하는 반력을 계산하고, Fig.3과 같이 정적변형해석으로부터 얻어진 변형량과 반력 사이의 관계를 분석하여 유추하였다. 실제로 U자형 고정쇠는 끝단에 있는 암나사를 조임으로써 배관 하단의 연결판에 상당한 장력으로 고정되는데 이러한 기장력효과는 해석에서 제외하였다. 해석으로 얻은 하중변위 선도로부터 2차 강성구간의 해당 기울기를 U자형 고정쇠의 수평 및 수직방향으로의 강성값으로 보았다.



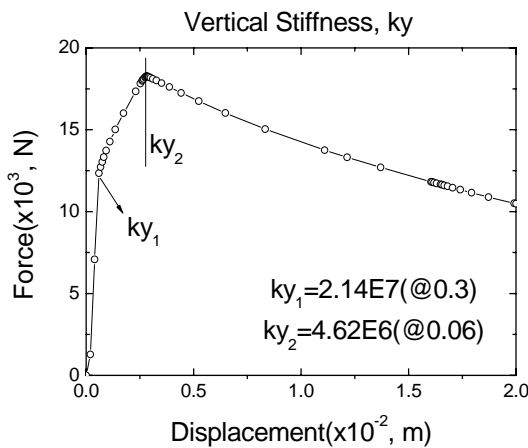
Fig.2 Deformation analysis of the U Strainer

그림 Fig.3(a)의 수평방향으로의 지지강성은 배관단면 가로(x)축과 세로(y)축에 대한 강성으로부터

터 평균적인 유효수치를 계산하여 결정하였다 ($K_{eq} = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}$).



(a) P-δ curve for the horizontal rigid body motion



(b) P-δ curve for the vertical rigid body motion

Fig.3 P-δ curve for U strainer stiffness

3. 해석결과

유동루프의 배관 자유진동해석으로부터 얻어진 20차까지의 고유진동수와 대표적인 진동모드 형상을 각각 Table 2와 Fig.4에 정리하였다. 관측 위치만을 변화시켜 도시한 아래의 그림에서 점선으로 표시된 선은 변형되기 전의 상태를 나타내고 있다.

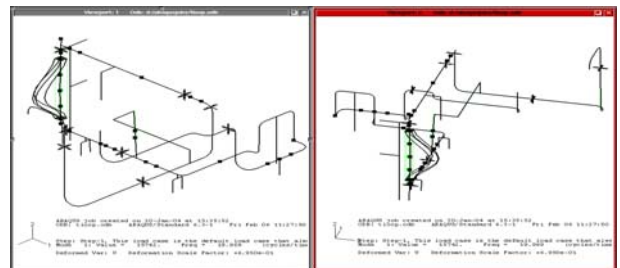
고유진동수 20Hz부근에 물려있는 유동루프 배관계의 1차에서 8차까지의 모드는 상대적으로 강성이 작은 시험관 지지봉의 국부(local) 진동모드

이며, 지지봉의 대칭성으로 인해 두개의 모드씩 방향을 달리하면서 동일한 모드형상이 반복되어 나타난다.

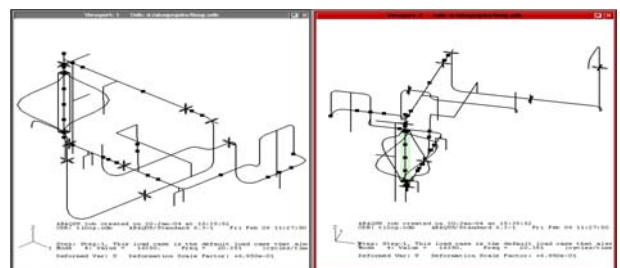
Table 2 Natural frequency of the test loop

Mode	Natural freq. (Hz)	Remark	Mode	Natural freq. (Hz)	Remark
1	20.0	Rods	11	27.4	6"
2	20.3	Rods	12	31.9	TS
3	20.3	Rods	13	34.4	TS
4	20.4	Rods	14	36.5	6"
5	20.4	Rods	15	37.4	B.S
6	20.4	Rods	16	40.4	Coupled
7	20.4	Rods	17	40.7	5"
8	20.4	Rods	18	41.8	Coupled
9	22.5	6"	19	51.5	Rods
10	26.0	6"	20	55.0	Rods

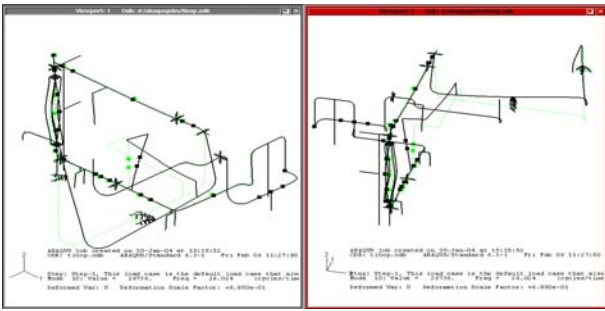
1차와 2차모드는 각각 1과 3방향으로 마치 하나의 집합체처럼 묶여서 같은 위상으로 움직이는 1차 보진동모드(길이방향으로 반파)이며, 3차 이상의 모드에서는 날개의 지지봉들에 대한 대칭적인 움직임과 함께 비틀림 진동모드도 관찰된다. 지지봉의 진동모드가 시험관 및 시험대상체의 관심주파영역에 놓임에 따라 적절한 방식으로 구속하거나 추가지지조건을 부여하여 이들 모드를 변화 혹은 제거시킬 필요가 있다.



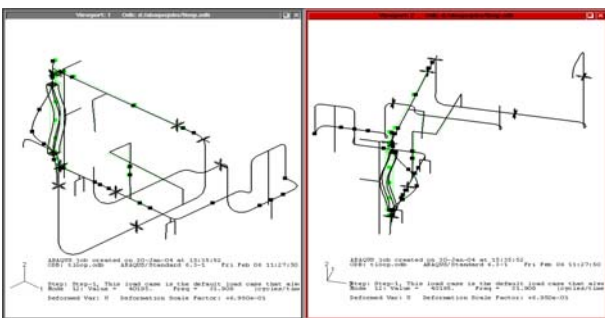
(a) First mode shape of the test loop



(b) 4th mode shape of the test loop



(c) 10th mode shape of the test loop



(d) 12th mode shape of the test loop

Fig. 4 Mode shapes of the test loop

고유진동수 22.5Hz인 9차에서 27.4Hz인 11차까지의 모드형상은 6" 회수관 하류의 진동변위가 지배적이면서 각종 지관 및 시험관, 시험관 지지봉 등 여러 배관요소들이 복잡하게 연성된 모드이다. 고유진동수 31.9Hz인 12차 모드형상은 시험관과 지지봉 집합체의 진동변위가 두드러지고 6" 회수관 상류 연결부의 진동변위가 약하게 연성되고 있다. 시험관의 진동변위가 이전의 모드에 비해 두드러지게 증가한 것으로 볼 때 시험관의 국부적 모드가 대략 이 주파수 부근에 있을 것으로 판단된다.

선행해석의 결과로부터 20Hz 주파수 근방의 1차에서 8차까지의 모드들이 시험관 지지봉의 로컬모드임을 확인하였다. 실제로 지지봉의 고유진동수가 몰려있는 20Hz부근은 핵연료집합체의 관심 주파역 영역에 속하므로 지지봉을 적절히 구속하거나 고정조건을 변경하여 고유진동수를 조정할 필요성이 있다. 이에 따라 3개의 지지봉을 길이방향 중심에서 연결시키는 연결봉을 해석모델에 추가하고 지지구조물의 간섭으로 연결이 제한되는 나머지 두개의 봉은 지지구조물에 고정시

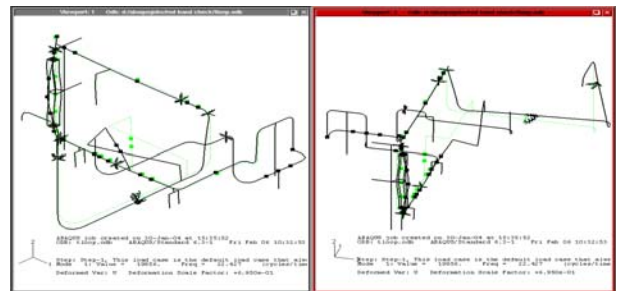
켰다. 지지봉을 추가 구속한 해석모델로부터 얻어진 20차까지의 고유진동수와 대표적인 진동모드 형상을 각각 Table 3과 Fig.5에서 정리하였다.

해석결과 선행해석에서 나타난 20Hz 부근의 8개 지지봉 모드들이 사라지고, 고유진동수 22.4Hz인 1차에서 27.5Hz인 3차까지의 모드에서 6" 회수관 하류 진동변위가 지배적인 모드들이 나타났다.

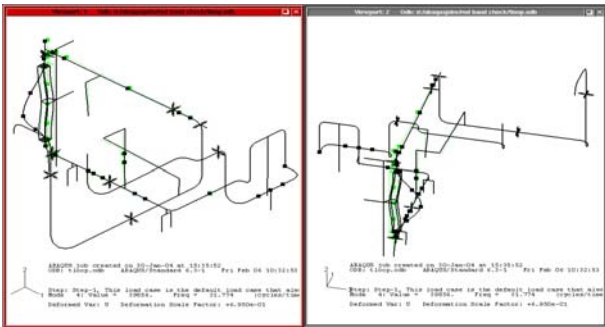
Table 3 Natural frequency of the test loop

Mode	Nat. freq.(Hz)	Remark	Mode	Nat. freq.(Hz)	Remark
1	22.4	6"	11	46.5	Rods
2	26.0	6"	12	56.3	5"
3	27.5	6"	13	56.7	4"
4	31.8	TS	14	58.4	coupled
5	34.2	TS	15	58.8	TS
6	34.6	TS	16	65.2	TS
7	36.5	6" up	17	66.4	Rods
8	40.4	coupled	18	66.8	5"
9	40.7	5"	19	67.7	coupled
10	41.8	coupled	20	68.7	coupled

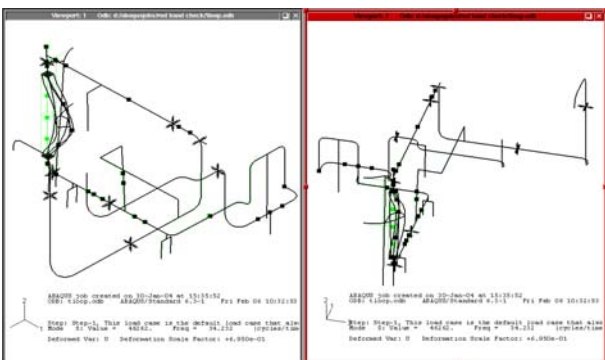
3" 우회관은 6" 와 4" 관에 고정되어 있기 때문에 이들의 움직임에 따라 Fig. 4(c)에서와 같이 진동변위가 다소 과장된 것으로 보이며, 4차 이상 모드들은 이전의 결과와 유사하게 나타나지만 특별히 고유진동수 34.2Hz인 5차와 36.5Hz인 6차 모드에서 시험관의 진동모드가 지배적으로 나타나며 후면 지지구조물의 모드도 같이 발생하였다. 해석결과처럼 후면 지지구조물이 35Hz 부근의 저주파대역에 진동모드를 갖고 있다면, 저주파 영역의 진동수를 갖는 핵연료 집합체 및 시험관과의 공진을 피하기 위해서 적절한 방식으로 추가 보장하는 방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.



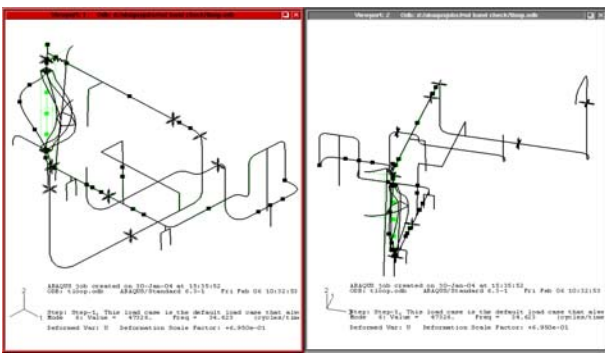
(a) First mode shape of the test loop



(b) 4th mode shape of the test loop



(c) 5th mode shape of the test loop



(d) 6th mode shape of the test loop

Fig. 5 Mode shapes of the test loop

4. 진동시험

유동루프의 진동시험은 Fig.6에서와 같이 시험관을 중심으로 상부 6" 회수관과 하부 4" 공급관의 상류쪽 만을 포함하는 부분 시험모델에 대해서, 충격해머로 가진하여 시험모델의 8개 신호측정 위치에 부착된 가속도계로부터 가속도신호를 획득한 후, IDEAS[5] 시험모델인 TDAS를 이용하여 신호 및 주파수분석 하였다.

모달시험결과, 시험모델에 대한 9차모드의 고유진동수와 4차까지의 모드형상을 Table 4와 Fig. 7에 각각 나타낸다. 배관에 물을 채운경우와 그렇지 않은 경우의 두 가지 시험조건에 대해 각각 18.6Hz와 19.4Hz에서 배관의 기본진동수가 존재하며, 20Hz부근에 2개의 모드가 몰려있다.

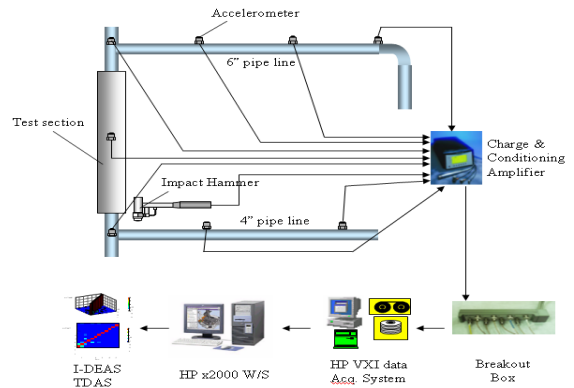


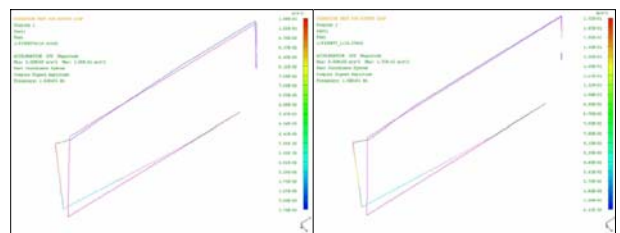
Fig. 6 Schematic diagram of the modal testing

이후로 30Hz 부근에 2개, 그리고 50Hz 부근에 3개씩 짝을 이루어 나타나고 있다. 6차까지의 저차모드에 대해서 배관계의 고유진동수는 50Hz 미만으로 측정되었다. 배관에 물이 충전되어 있는 경우는 유체에 의한 추가질량효과 때문에 고유진동수가 전체적으로 감소함을 확인할 수 있다.

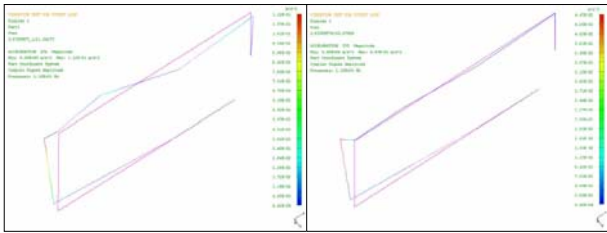
Table 4 Natural frequency of the test loop

Mode	Natural freq.(Hz)		Mode	Natural freq.(Hz)	
	case1	case2		case1	case2
1	19.38	18.64	6	49.37	48.52
2	21.54	20.92	7	52.42	50.85
3	28.39	25.84	8	57.80	55.52
4	35.54	33.99	9	59.78	57.08
5	47.44	46.88	10	.	.

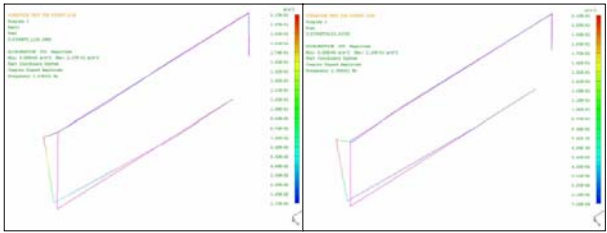
(case1: empty pipe, case2 : pipe filled with coolant)



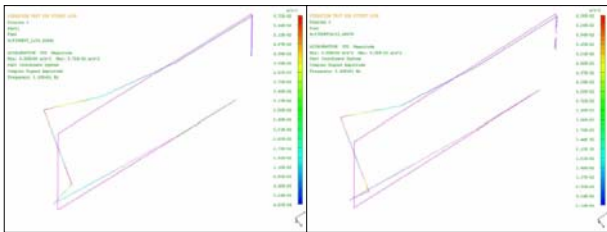
(a) First mode shape of the test loop



(b) Second mode shape of the test loop



(c) Third mode shape of the test loop



(d) 4th mode shape of the test loop

Fig. 7 Experimental mode shapes of the test loop

Table 5는 선행 해석결과와 모달시험으로부터 얻어낸 유동루프 배관계의 진동모드를 상호비교한 것이다. 고유진동수 및 모드형상의 유사성을 기준으로 해서 순차적으로 시험결과의 모드와 해석결과의 진동모드들을 대응시켜보았다. 비교란은 Fig. 1의 해석모델에서와 같이 대응되는 해석모드에서의 지배적인 진동변위를 갖는 배관계 구성요소를 나타낸다.

Table 5 Result comparison between test and analysis

Test Results		Analysis Results		Remark
Mode	Nat. Freq. (Hz)	Mode	Nat. freq. (Hz)	
1	19.38	1~8	20~20.4	Rods
2	21.54	9	22.5	6" back
3	28.39	10~12	26.7~31.9	6l.s, TS
4	35.54	14	36.5	6u.s
5	47.44	16, 18	40.4, 41.8	Coupled
6	49.37
7	52.42	19, 20	51.9, 55.0	Rods
8	57.80	21~27	56.3~56.6	Rods
9	59.78	28, 29	57.1~59.0	Rods/TS

4차 이하의 시험 고유진동수는 14차까지의 해석 고유진동수와 최대 12.3%의 오차를 가지면서 부분적으로 대응되고, 그 이상의 고차모드에서는 시험과 해석결과의 대응관계가 거의 나타나지 않는다. 해석적으로 얻어진 주요 모드에 상응하는 시험모델에 대한 모드검출 진동시험이 추가적으로 필요하다.

5. 결 론

유동시험 예비단계로 수행된 유동루프의 배관 진동특성 파악결과, 배관계 1차에서 3차모드의 고유진동수는 22.4Hz에서 27.5Hz의 범위에 존재하며, 이에 대한 모드형상은 6" 회수관 하류의 진동변위가 지배적인 모드이다. 시험관의 진동변위가 지배적인 4차 모드는 31.4Hz 부근에서 나타났다. 또한 저차모드에서 시험결과와 유사성을 갖는 대응모드들이 다소 관찰되나 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해 지며, 경우에 따라 국부적인 로컬모드가 나타나기도 하지만 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업인 경수로용 신형핵연료 개발(대과제) 고성능지지격자개발과제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호, 2001, " 5x5 부분핵연료집합체의 유체유발진동시험장치 개발 ", 한국원자력학회 추계학술대회 논문집.
- (2) H.S. Kang, K.N. Song, K.H Yoon, H.K Kim, 2001, "Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test", KAERI/TR-1738-, KAERI
- (3) H.S. Kang, K.N. Song, K.H Yoon, H.K Kim, 2001, "Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure", J. of KNS, Vol.33, No.1
- (4) HKS, 1999, "ABAQUS Ver.5.8 User's Manual"
- (5) MTS System Corporation, 1999, "Exploring I-DEAS Test", Usr's Manual