

## 유체유발진동 시험용 유동루프의 시험관 및 배관 지지부 설계변경

### Design Modification of the Test Section and Pipe Supports in the FIV Test Loop

이강희, 강홍석, 윤경호, 송기남  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

지지격자 성능시험의 일환으로 5×5 부분집합체를 이용한 유체유발진동 및 압력강하 시험이 수행될 예정이다. 성능시험을 위한 유동시험 예비단계로서 시험루프의 자유진동해석 및 진동특성시험이 수행되었고, 이로부터 관심 주파수 영역인 20 Hz에서 60 Hz에 걸쳐 30여개의 루프 자유진동모드가 존재함을 확인하였다. 이에 따라 시험관 및 배관의 지지조건에 대한 설계변경을 통하여 시험루프의 자유진동 특성을 조정하였다. 지지부 설계변경으로 시험관 보호용 지지봉은 길이방향 중심에 Clamp 기구 및 고정치구를 제작하여 추가설치 하였고, 회수관의 하류 및 우회관 상단부는 각각 용접이음과 “U”자형 고정쇠를 추가하여 진동변위를 저감시켰다.

#### Abstract

The performance test of the spacer grids developed will be carried out with the 5×5 partial fuel assembly for the Flow-Induced Vibration(FIV) and pressure-drop test. As a preliminary step for the tests, the vibration characteristics of the FIV test loop is investigated by the Finite Element(FE) analysis and the modal test. About 30 eigenmodes of the test loop is identified in the interesting frequency range of 20 Hz to 60 Hz. By modifying support conditions for the test section and pipe, eigenmodes of the loop can be changed into desired value. A clamp tool and fixtures for the support rods of the test section are installed in the middle of the their span. A welded connection and a “U” restrainer are added at the down-stream of a restoring pipe and a upper part of the bypass line, respectively.

## 1. 서 론

한국원자력연구소의 고성능지지격자개발과제는 경수로용 원전연료집합체의 주요 부품인 지지격자체를 독창적으로 개발하는 일과 이와 관련된 기초연구를 함께 수행하고 있다. 경수로 원전연료집합체는 대략 3년 동안 원자로 안의 가혹한 환경조건하에서 연소되기 때문에 원전연료집합체를 이루는 주요한 부품들은 성능에 관련된 여러 시험들을 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 개발단계에 있는 지지격자체의 기계적 및 수력적 성능을 시험하기 위한 것이다. 상용 발전소에 장전되는 핵연료집합체는 길이가 약 4.0m 정도로서 약 250여개 연료봉으로 구성되지만 구축된 유동루프에 장전되는 부분집합체는 2.2m 길이의 모의 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, 루프의 자유진동 특성과약을 위한 유한요소 해석과 모달시험이 수행되었다[4, 5]. 루프의 자유진동 특성으로 관심주파수 영역인 20 Hz에서 60 Hz에 걸쳐 30여개의 루프 자유진동모드가 존재함을 확인하였고, 이에 따라 시험관 및 배관의 지지조건에 대한 설계변경을 통하여 루프의 주파수 특성을 조정하고자 한다. 상대적으로 강성이 작은 보호용 지지봉의 진동모드가 관심주파수 영역에서 시험루프의 저차모드를 형성하기 때문에 지지봉 길이방향 중심에 Clamp 기구 및 고정 치구를 추가하였고, 이로 인한 루프 진동특성의 변화와 지지봉 구속조건에 따른 영향도 살펴보았다. 예상보다 큰 진동변위를 나타내는 회수관 하류와 우회관 상단부는 지지조건이 수정이 필요하다고 판단되며, 이에 대한 수정방안을 구상해 보았다.

## 2. 시험루프 소개

시험루프는 시험관 조립체, 밸브와 플랜지를 포함하는 배관부, 배관 지지구조물, 저수조와 펌프 등으로 구성된다. 시험관 조립체는 부분집합체가 장입되어 2개의 안내관에 의해 상·하단에서 고정되도록 설계되었으며, 시험체의 진동 관측이 가능하고 순환유체의 동압에 견딜 수 있도록 충분한 강도를 갖는 특수재질의 투명 아크릴관으로 제작되었다. 시험관은 아크릴 관을 길이방향으로 볼트체결하여 조립되며, 상·하단 고정판을 연결하는 4개

의 보호용 지지봉에 의해 추가 보강된다. 배관부는 주배관과 지관으로 구성되며, 주배관은 저수조에 채워진 순환유체를 5" 송출관을 통해 펌프로 유입시키고, 펌프를 이용하여 시험관 내부로 순환유체를 공급시키는 4" 공급관과 시험관으로부터 저수조로 물을 회수시키는 6" 회수관이 있다. 지관은 수동으로 유량을 조절하기 위한 3" 우회관과 루프 내 압력이 설계압력보다 올라가게 되면 주관을 보호하기 위한 장치(Rupture disc)가 있는 2" 되먹임관이 있다. 배관부를 공간상의 특정 위치에 고정시키고 배관 자체의 움직임을 구속하는 지지부는 고정치구 및 지지구조물, 그리고 받침구조물 등으로 구성되어 있다. 그 밖에 순환유체를 저장하기 위한 저수조와 이를 지지하는 받침 구조물이 설치되어 있고, 제어패널 및 펌프 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 시험루프의 전체적인 그림과 개략 도면을 보여주며, Fig. 2는 시험루프 구성요소의 그림을 나타낸다.

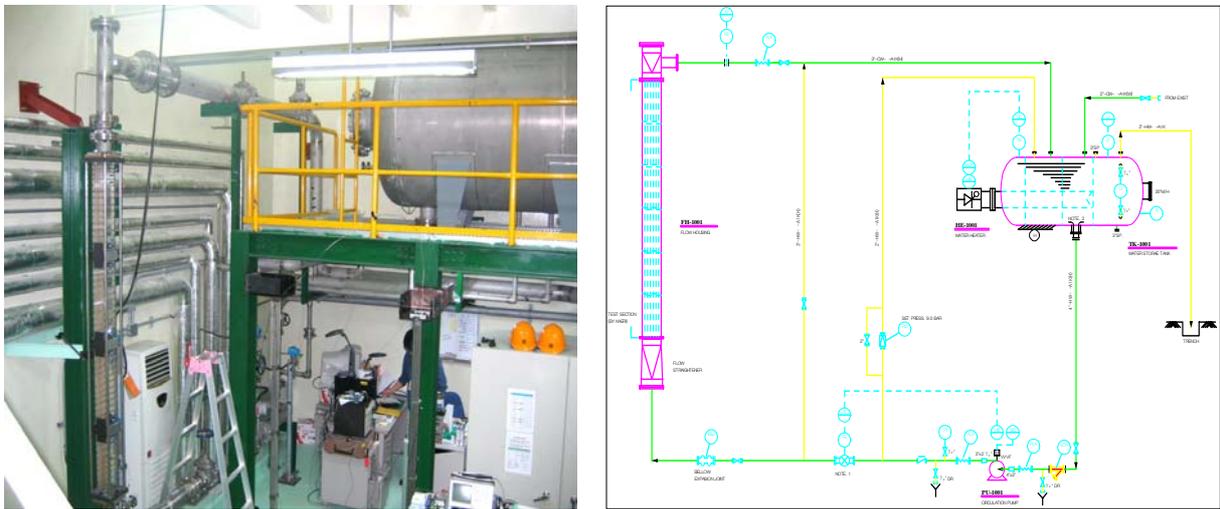


Fig. 1 Overall Picture and Schematic Drawing of the Test Loop



(a) Test Section Assembly, Test Section and its Support Rods



(b) Pipes, Valves, and Flanges



(c) Fixtures, Supports and Base Structures



(d) Tank and its Support Structure



(d) Pump and Piping Lines

Fig 2. Shortcut of the Test Loop

### 3. 시험루프 진동특성

시험루프의 자유진동해석 및 모달시험 결과 90 Hz의 주파수 범위까지 대략 40차의 진동모드를 얻어낼 수 있었다[5]. 해석과 시험으로부터 얻어진 루프의 고유진동수는 Table 1과 Table 2에 각각 정리하였다. 주배관에 대한 시험모델의 경우, 루프에 물을 충전하지 않은 경우와 물을 충전한, 두 경우에 대하여 시험을 수행하였다. Fig. 3은 해석으로부터 얻어진 주요 진동모드형상을 나타내며, Fig. 4는 부분 시험모델을 이용한 모달해석의 진동모드형상을 나타낸다. 관측 위치만을 변화시켜 도시한 Fig. 3에서 점선으로 표시된 선은 변형되기 전의 상태를 나타내며, 사각점으로 표시된 요소는 플랜지 및 밸브에 대한 질량요소를 의미한다.

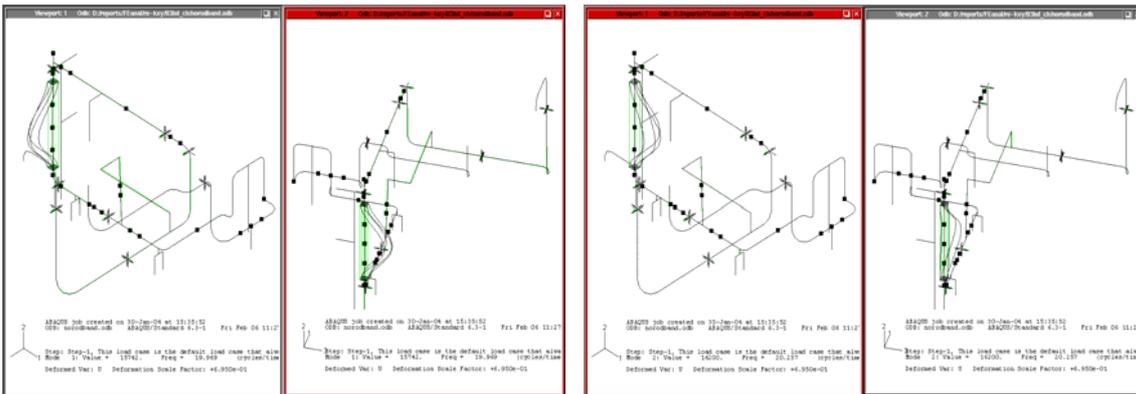
Table 1 FE Analysis Results of the Test Loop

Mode	Nat. freq. (Hz)						
1	20.0	11	27.4	21	56.3	31	66.7
2	20.3	12	31.9	22	56.3	32	66.8
3	20.3	13	34.4	23	56.3	33	68.9
4	20.4	14	36.5	24	56.5	34	70.9
5	20.4	15	37.4	25	56.5	35	71.7
6	20.4	16	40.4	26	56.6	36	73.1
7	20.4	17	40.7	27	56.6	37	78.5
8	20.4	18	41.8	28	57.1	38	82.6
9	22.5	19	51.5	29	59.0	39	84.6
10	26.0	20	55.0	30	64.2	40	87.0

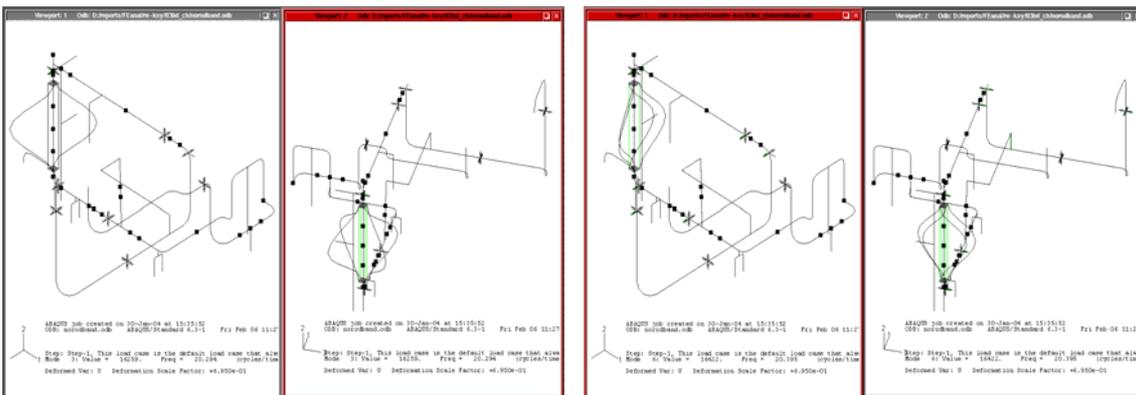
Table 2 Results of the Partial Test Model

Mode	Natural frequency(Hz)		Mode	Natural frequency(Hz)	
	w/o Water	w/ Water		w/o Water	w/ Water
1	19.38/19.4*/19.6 <sup>+</sup>	18.64	6	49.37/49.3*/40.4 <sup>+</sup>	48.52
2	21.54/25.6*/25.1 <sup>+</sup>	20.92	7	52.42/59.3*/45.7 <sup>+</sup>	50.85
3	28.39/27.1*/27.4 <sup>+</sup>	25.84	8	57.80/ · /59.8 <sup>+</sup>	55.52
4	35.54/34.5*/30.6 <sup>+</sup>	33.99	9	59.78/ · / ·	57.08
5	47.44/47.9*/35.5 <sup>+</sup>	46.88	10	·	·

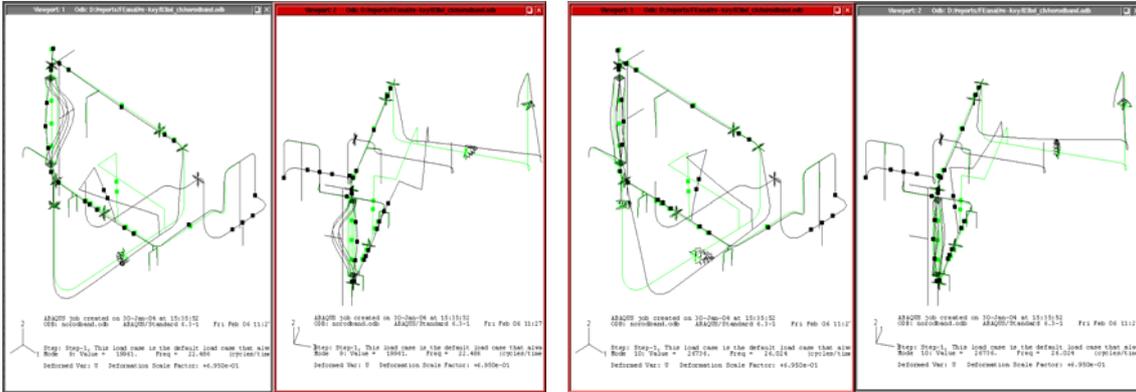
(\* : Restoring Pipe Test Model, + : 3" Bypass Pipe Test Model)



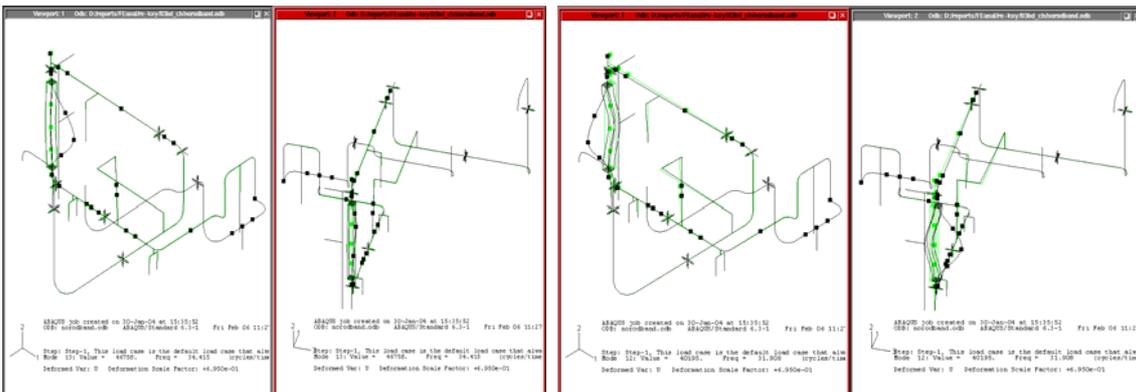
(a) 1st and 3rd Mode



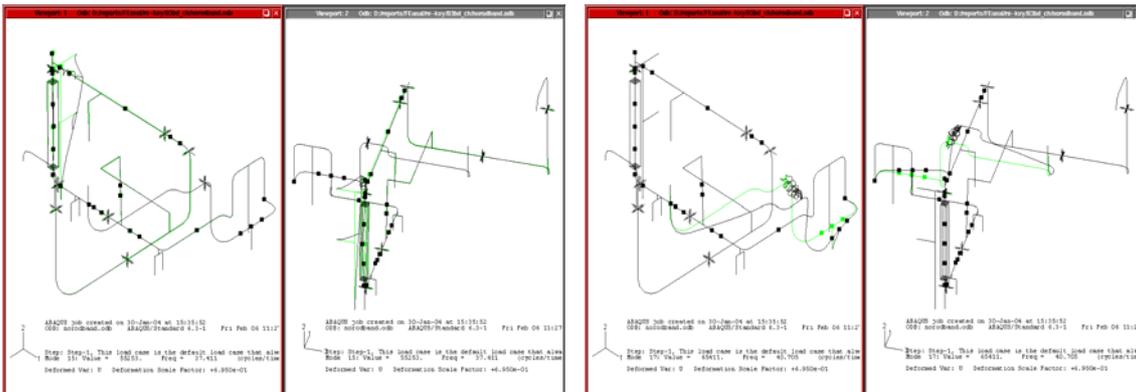
(b) 5th and 7th Mode



(c) 9th and 10th Mode

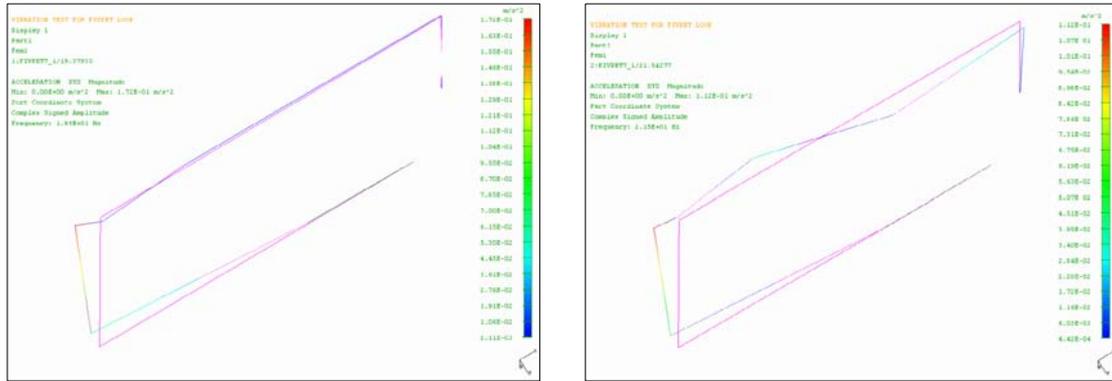


(d) 12th and 13th Mode

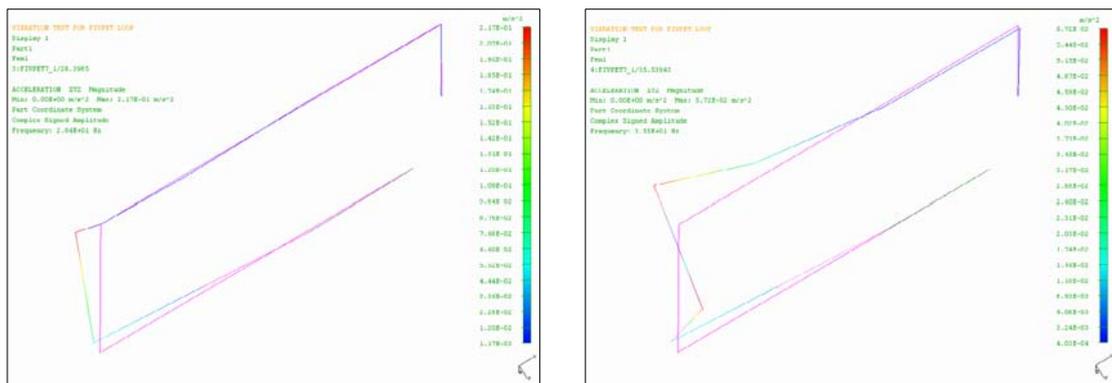


(e) 15th and 17th Mode

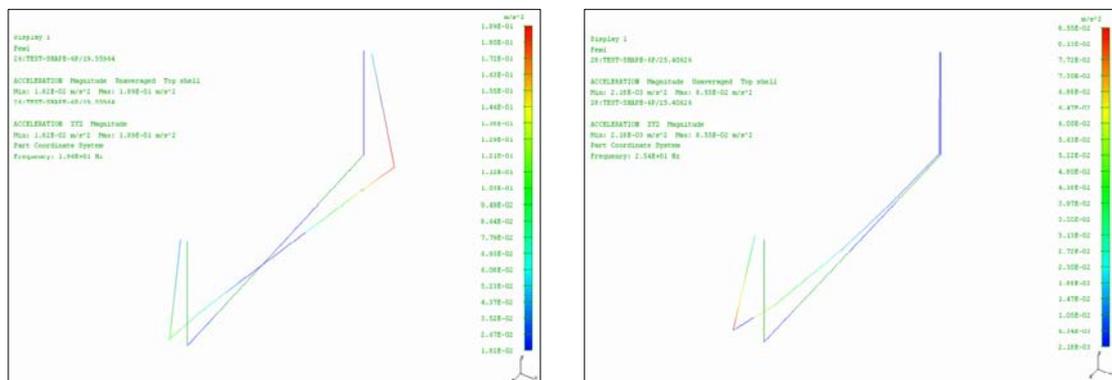
Fig 3. FE Analysis Mode Shapes



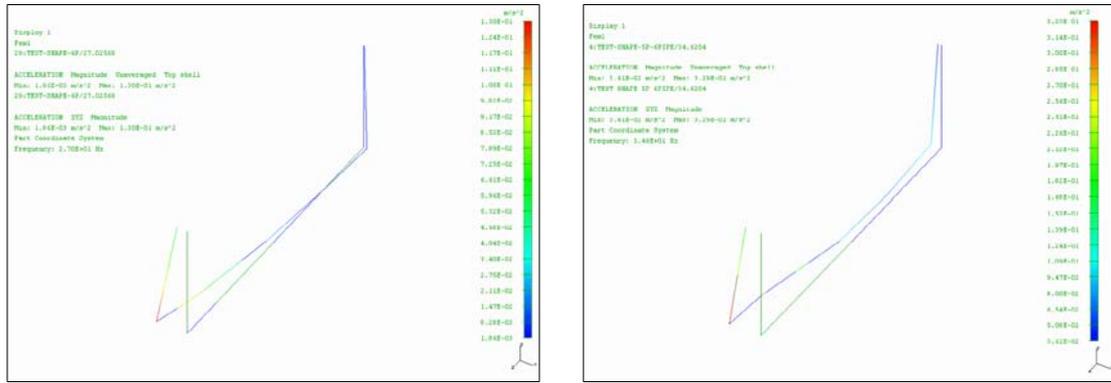
(a) 1st and 2nd Mode of the Main Pipe



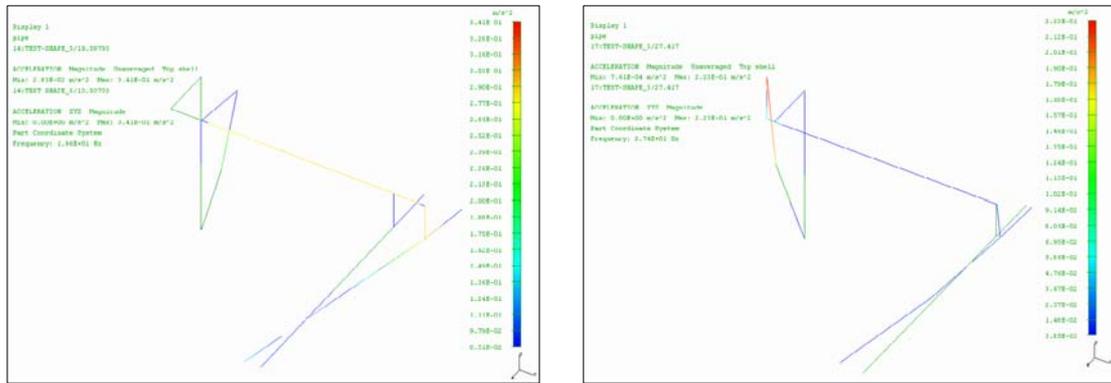
(b) 3rd and 4th Modes of the Main Pipe



(c) 1st and 2nd Mode Shape of the 6" Pipe Downstream Model



(d) 3rd and 4th Mode Shape of the 6" Pipe Downstream Model



(e) 1st and 2nd Mode Shape of the 3" Pipe Upper Part Model

Fig 4. Test Mode Shapes

시험결과로 나타난 루프의 기본진동수(19 Hz)는 해석결과에 나타나지 않았지만 회수관에 의한 진동모드일 것으로 생각된다. 이것은 회수관을 공유하는 시험모델(Fig. 4)의 시험결과(Table 2)로부터 예측가능하다. 루프 해석결과 20 Hz부근에 집중되어 있는 모드들은 지지봉에 의한 국부적 진동모드이며, 56Hz 부근에도 이와 같은 국부적인 지지봉 모드들이 나타난다. 이후 22 Hz이상 30 Hz이하의 3개 정도의 모드에서 회수관과 우회관의 진동변위가 지배적인 모드들이 나타나고, 32 Hz에서 34 Hz부근에 시험관의 진동변위가 큰 모드들이 나타난다.

#### 4. 루프 지지부 설계변경

##### 1) 시험관 보호용 지지봉 구축부

시험루프의 해석과 지지봉 진동시험 결과, 20 Hz와 56 Hz 부근에 나타난 시험루프의 진동모드는 시험관 지지봉에 의한 국부적인 진동모드이다. 주배관이나 지관에 비해 상대

적으로 강성이 작은 시험관 지지봉의 고유모드가 관심주파수 영역에서 시험루프의 저차 모드를 형성하기 때문에, 지지봉의 기본 진동모드를 제한할 수 있도록 구속조건을 추가할 계획이다. Fig. 5는 시험루프의 유한요소 모델에 지지봉과 같은 제원의 연결봉을 이용하여 구속장치를 모델링하고 해석모델에 추가시킨 경우와 구속되기 전 자유상태의 지지봉 모델을 비교한 그림이다. 연결봉은 지지봉과 용접되어 있으므로 절점을 공유하는 것으로 모델링하였다. Table 3은 지지봉이 구속되지 않은 경우와 구속된 경우의 유한요소 해석 결과를 나타낸다.

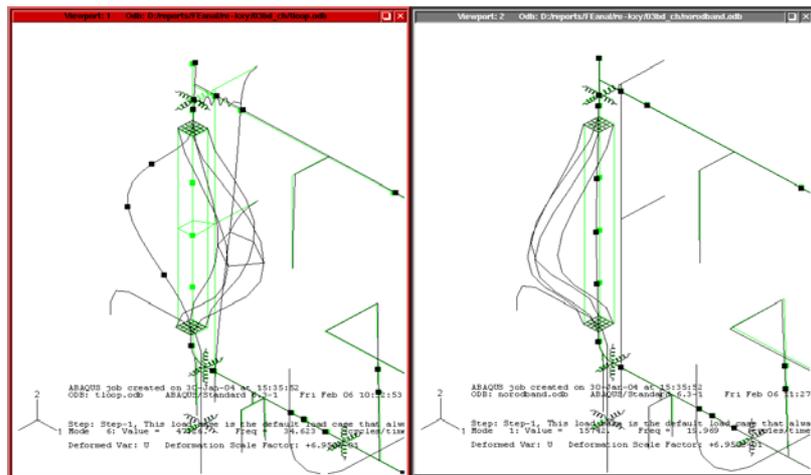


Fig. 5 FE Model for the Clamped and Free Rod

Table 3 Mode Comparisons between Rod Free and Clamped Model

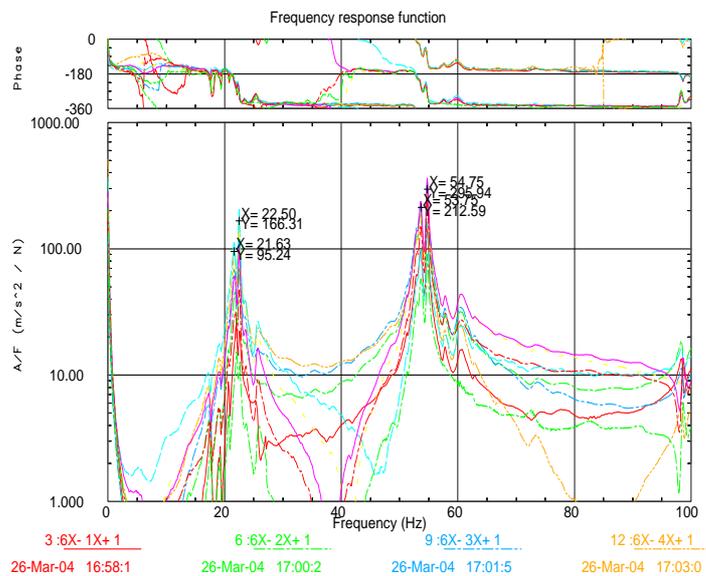
Free Rod			Clamped Rod		
Mode	Nat. frequency (Hz)	Remark	Mode	Nat. frequency (Hz)	Remark
1~8	<u>20.0 ~ 20.4</u>	Rod	1~3	22.4, 26.4, 27.5	6" pipe
9~11	22.4, 26.0, 27.4	6" pipe	4~6	31.8, 34.2, 34.4	Test section
12~13	31.9, 34.4	Test Section	7	36.5	6" pipe
14	36.5	6" pipe	8, 10	40.4, 41.8	Coupled
15	37.4	Backup Support	9, 12	40.7, 56.3	5" pipe
16, 18	40.4, 41.8	Coupled	11	46.5	Test section
17	40.7	5" pipe	13	56.7	4" pipe
19, 20	<u>51.5, 55.0</u>	Rod	14, 16	58.4~65.2	Coupled
21, 22	<u>56.3</u>	Rod	17	66.5	Rod
24~27	<u>56.5, 56.6</u>	Rod	18	66.8	5" pipe
23	56.3	5" pipe	19	67.7	Rod
28	57.1	Coupled			

지지봉이 구속된 시험루프의 해석결과 구속되지 않은 지지봉(Rod) 해석모델의 20 Hz와 56 Hz 부근 진동모드들이 사라지고 1차(22.4 Hz)와 2차(26.4 Hz), 3차(27.5 Hz)에서 6" 회수관 하류쪽 진동변위가 지배적인 모드들이 나타났다. 4차(31.8 Hz)와 5, 6차(34 Hz)는 시험관의 진동변위가 지배적인 모드이다.

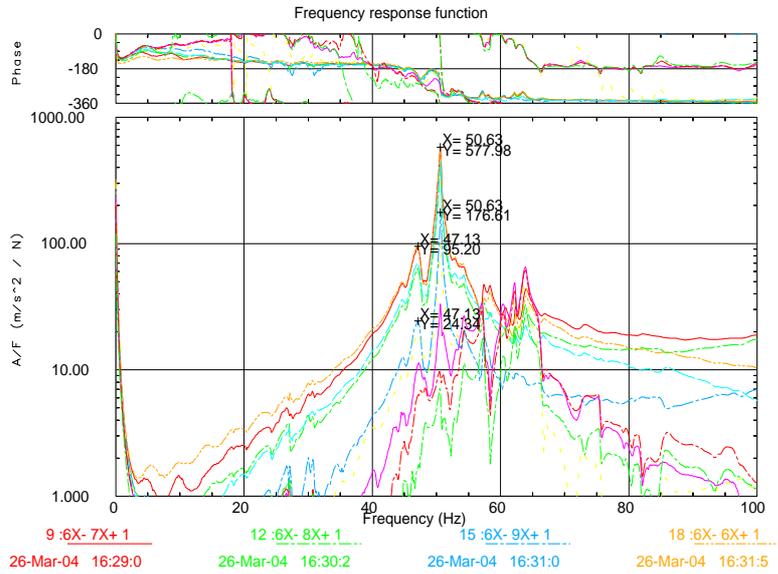
Fig. 6은 해석모델에서와 같이 시험관 지지봉을 길이방향 중심에서 구속하기 위해 설계·제작된 Clamp 기구 및 고정치구와 실제 루프에 설치된 형상을 나타낸다. 좌·우·하단의 세 측면에서 지지봉과 지지봉 사이를 상호 구속하는 고정치구와 후면 지지구조물에 의해 연결이 제한되는 상단 두 지지봉은 후면 지지구조물과 조임장치(clamper)를 이용하여 구속하였다.



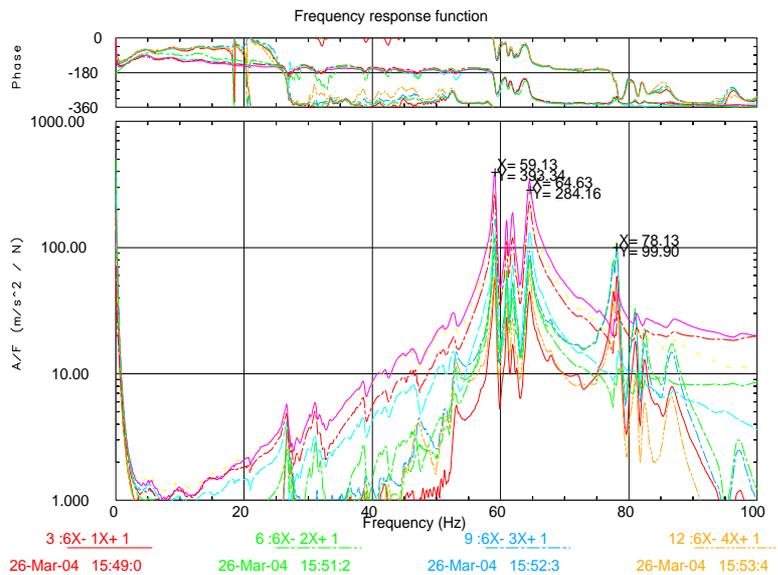
Fig. 6 Rod Clamper and Fixtures Assembly



(a) FRF and Phase Angle Change of the Free Rod



(b) FRF and Phase Angle Change of the Partially Clamped Rod



(c) FRF and Phase Angle Change of the Fully Clamped Rod

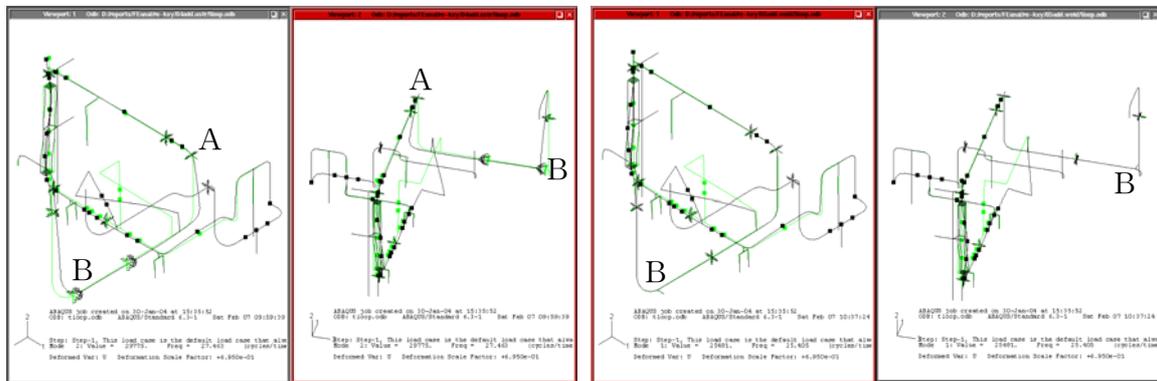
Fig. 7 The Effects of Clamp Condition for the Support Rod

지지봉의 구속조건이 진동특성에 미치는 영향을 파악해 보기 위해 구속이 없는 자유상태의 지지봉과 clamp 기구 및 고정치구에 의해 부분 혹은 완전 고정되어 있는 지지봉에 대하여 진동특성 시험을 수행하였다. Fig. 7은 이들에 대한 진동특성 시험결과인 주파수

응답함수를 타나낸다. 지지봉 구속조건이 자유상태에서 완전고정조건으로 변함에 따라 기본진동수는 자유상태의 22.5 Hz에서, 부분고정 조건일 때 50.6 Hz, 완전고정 조건일 때 59.1 Hz로 각각 28.1 Hz, 36.6 Hz 만큼 증가하였다. 따라서 지지봉의 진동특성은 구속조건에 따라 크게 변화될 수 있고, 시험관 지지봉을 적절히 구속함으로써 시험루프의 저차 진동모드를 조정할 수 있다.

## 2) 회수관 하류 지지부

지지봉에 구속조건이 추가된 경우에도, 30 Hz 미만의 저주파 영역에서 2~3개의 시험루프 진동모드가 여전히 존재한다. 이것은 주로 회수관 하류의 진동변위가 지배적인 모드로 1차(22 Hz)에서 3차(30 Hz)이내의 주파수범위에 몰려있다. 이로 인해, 루프가동 시 회수관 하류의 진동변위가 상당히 클 것으로 예상된다. 따라서 회수관 하류의 지지조건을 적절히 변경하여 30 Hz이하에 존재하는 시험루프의 진동모드를 조정하고 외부 가진원에 의한 공진에 대비하여 회수관 하류(그림의 B위치)의 진동변위를 억제시킬 필요성이 있다. 우선, 저수조 하단의 회수관 굴곡부에 Fig. 8에서와 같이 기준좌표의 x-y방향으로 향하는 U자형 고정쇠 지지부 하나를 포함시켰다. 해석결과 Table 4에서와 같이 1차, 2차 고유진동수는 각각 2.9%와 5.5%로 증가한 23.1 Hz, 27.5 Hz를 나타냈으며, 회수관 하류의 x방향 진동변위가 상당부분 억제되었다. 회수관 하류를 상류 상단(그림의 A위치)의 용접이음과 같은 방식으로 구속하게 되면(그림의 B위치), Fig. 8(b)에서와 같이 회수관 하류의 z방향 진동변위까지 완전히 구속 시킬 수 있다.



(a) U Restrainer

(b) Welded Connection

Fig. 8 Mode Shape of the Constrained Restoring Pipe Model

## 3) 우회관 상단 지지부

Fig. 8에서와 같이 회수관 지지부를 보강한 모델의 경우라도, 우회관이 루프 전면으로 기울어지는 진동변위를 나타내고 있다. 실제로 우회관은 아무런 지지조건 없이 자체의 강

성으로만 공급관과 회수관에 고정되어 있다. 이 때문에 우회관에도 적절한 지지조건이 추가가 요망된다. Fig. 9에서와 같이(그림의 A위치) 우회관 중심에 U 고정쇠 지지부를 추가할 경우 루프 기본진동수는 이전의 결과보다 6.2 Hz(19.6%)증가한 31.6 Hz로 나타난다. Fig. 9은 우회관에 U지지부를 추가된 모델의 모드형상과 이전의 결과를 비교한 것이다. U지지부 하나만 추가하여도 우회관의 진동변위는 충분히 억제시킬 수 있을것으로 생각 된다.

Table 4는 우회관에 U지지부 하나를 포함시킨 모델의 해석결과 5차까지의 고유진동수를 이전의 지지봉 구속 모델, 회수관에 U지지부 하나만을 추가한 모델, 그리고 용접이음을 이용하여 회수관 하류를 구속한 모델과 비교한 것이다. 지지조건이 보수화됨에 따라 지지강성의 증가로 인하여 기본 고유진동수가 조금씩 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

Table 4 Natural Frequency of the Test Loop

Clamped rods		U restrainer in a restoring line		welded connection in a restoring line		U restrainer in a bypass line	
Mode	Natural Freq. (Hz)	Mode	Natural Freq. (Hz)	Mode	Natural Freq. (Hz)	Mode	Natural Freq. (Hz)
1	22.4	1	23.1	1	25.4	1	31.6
2	26.0	2	27.5	2	31.8	2	34.2
3	27.5	3	31.8	3	34.2	3	34.6
4	31.8	4	34.2	4	34.6	4	36.5
5	34.2	5	34.6	5	36.3	5	39.7

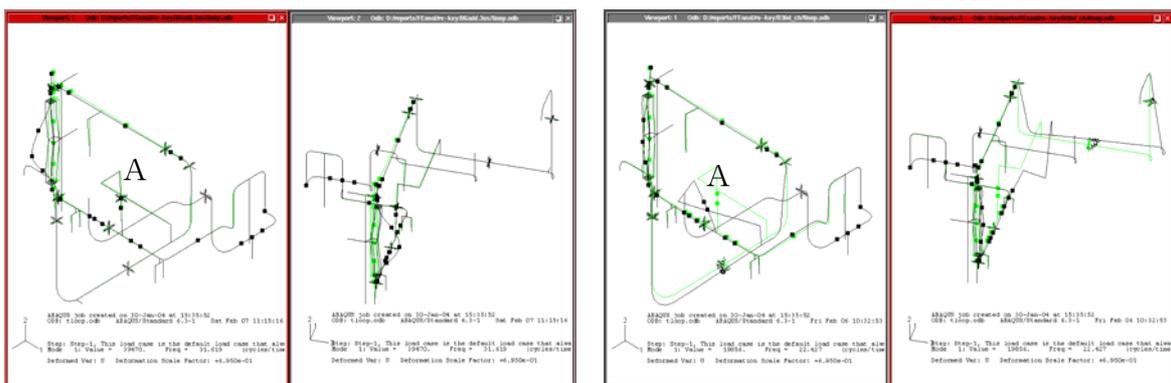


Fig. 9 Mode Shape of the Constrained Bypass Pipe Model

## 5. 결론

본 논문에서는 유체유발진동 시험용 유동루프의 시험관 및 배관 지지부의 설계변경을 통하여 루프의 주파수 특성을 관심주파수영역 밖으로 조정하고자 하였다. 이를 위해 시험관 보호용 지지봉의 길이방향 중심에 Clamp 기구 및 고정치구를 설치하여 20 Hz 부근에 집중되어 있던 지지봉의 진동 모드를 억제시킬 수 있었다. 해석결과 회수관 하류 및 우회관 상단부는 상대적으로 큰 진동변위가 예상되며, 용접고정 또는 추가부재를 이용하는 방식으로 적절히 지지부를 보강시킬 필요성이 있다. 유한요소 해석을 통하여 지지부 설계변경을 수행해 본 결과, 회수관 하류를 용접고정할 경우, 루프의 1차, 2차 고유진동수는 각각 13.4 % (25.4 Hz), 22.3 % (31.8 Hz) 증가 하였으며, 우회관에 U지지부 하나를 추가로 설치한 경우, 루프 기본진동수는 이전의 결과에 비해 6.2 Hz (19.6 %) 증가한 31.6 Hz로 나타났다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호, " 5×5 부분핵연료집합체의 유체유발진동시험 장치 개발 ", 한국원자력학회 2001년도 추계학술대회 논문집.
- (2) H.S. Kang, K.N, Song, K.H Yoon, H.K Kim, "Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test", KAERI/TR-1738/2001, KAERI, 2001
- (3) H.S. Kang, K.N, Song, K.H Yoon, H.K Kim, "Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure", J. of KNS, Vol. 33, No. 1, 2001
- (4) 이강희, 강홍석, 윤경호, 송기남, 최명환, "유체유발진동 시험용 유동루프의 자유진동 해석", 한국기계학회 2004년도 춘계학술대회 논문집
- (5) 이강희, 강홍석, 윤경호, 송기남, "유체유발진동 시험용 유동루프의 자유진동특성 및 지지성능 평가", KAERI/TR-2734/2004, 한국원자력연구소, 2004