

KAERI/TR-2734/2004

유체유발 진동시험용 유동루프의 자유진동특성 및  
지지성능 평가

Free Vibration Characteristics of the FIV Test Loop and  
Evaluation of the Supporting Performance

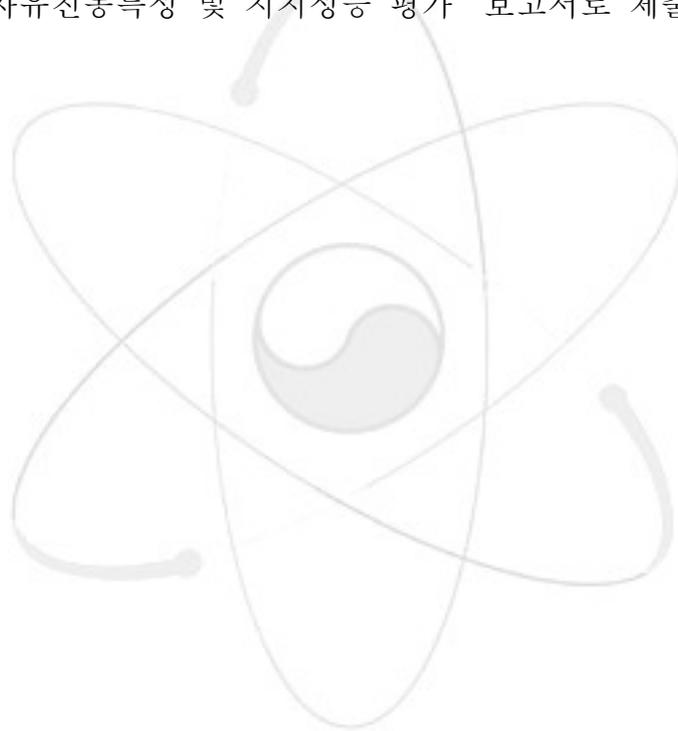
*KAERI*

한국원자력연구소

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2004 연도 “고성능 지지격자 개발” 과제의 “유체유발 진동시험용 유동루프의 자유진동특성 및 지지성능 평가” 보고서로 제출합니다.



2004년 3월

과제책임자 : 송 기 남

주 저 자 : 이 강 희(경수로연료개발부 고성능지지격자개발)

공동 저자 : 강 홍 석, 윤 경 호, 송 기 남  
(경수로연료개발부 고성능지지격자개발)

## 요 약 문

한국원자력 연구소에서는 고성능지지격자 개발과제의 일환으로 부분(5×5) 지지격자체의 성능평가를 위한 유동시험 루프를 제작·설치하였으며, 이를 통하여 부분 핵연료 집합체의 유체유발진동, 압력강하 등의 시험을 수행할 예정이다. 본 연구에서는 시험시설 완공에 따라 계획되어 있던 부분집합체를 이용한 유동시험 예비단계로서, 부분집합체가 장입되어 안내관에 의해 고정될 시험관과 이 관으로 물을 공급·회수하게 될 시험루프의 자유진동특성에 대하여 기술한다. 또한 현 단계의 지지구조물 및 고정조건의 지지성능을 평가해보고, 최종적으로 유동루프 배관계의 유한요소 해석모델을 개발하여 추후 설계변경이나 시험조건의 변경에 따른 영향성 분석에 활용할 것이다. 유한요소 해석 모델의 개발에서 지지구조물을 포함한 시험관 조립체와 배관은 3차원 범요소로 모델링하고 밸브와 플랜지는 질량요소로 모델링하여 유한요소 해석모델을 구성하였고, 배관 지지조건의 강성은 수치적인 해석으로 얻은 결과를 적용하였다. 범용유한요소 해석코드인 ABAQUS를 이용하여 수행된 해석 결과는 모달시험에 의한 시험결과와 비교·분석되었다. 모달시험은 가속도계와 충격해머를 이용하였고, 시험 신호의 분석을 위하여 I-DEAS의 시험모듈인 TDAS를 이용하였다. 모달시험과 해석모드의 비교로부터 1차에서 4차까지의 저차 모드에서 유사성을 갖는 대응모드들이 나타나지만 4차 이상의 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해 지며, 모드형상에 있어서 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다. 구속조건을 추가하여 지지봉의 국부적인 모드를 제거시킨 유동루프 배관계의 저차 진동모드인 1차(22.4Hz)에서 3차(27.5Hz)는 6" 회수관 하류의 진동이 지배적인 모드이며, 4차(31.8Hz)에서 6차(34.6Hz)는 시험관의 진동모드이다. 또한 배관계의 지지조건을 적절히 변경하거나 추가하여 시험루프의 원하지 않는 진동모드를 제거시키거나 억제할 수 있음을 알 수 있었다.

## SUMMARY

For the high performance fuel development research of PWR fuel, a test loop is designed and constructed to evaluate the performances of the spacer grid developed. The test loop is called FIVPET(Flow-Induced Vibration and Pressure drop Evaluation Test loop). The performance test of the space grids will be carried out with the 5×5 rod bundle that consists of 23 dummy rods, 2 guide tubes and 5 spacer grids. In this report, the vibration characteristics of the FIV test loop are investigated by the Finite Element(FE) analysis and the modal test. Also, the supporting performances of the current pipe supports and fixtures are checked by analysis results and improved. 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. By adding or changing some supporting conditions, unwanted vibration modes of the loop can be eliminated or restricted.

# 목 차

제 출 문 -----	i
요 약 -----	ii
SUMMARY -----	iii
목 차 -----	iv
표 목 차 -----	v
그림 목차 -----	v
제 1 장 서 론 -----	1
제 2 장 본 론 -----	3
1절 유동루프 자유진동해석 -----	3
1. 해석개요 -----	3
2. 유동루프 구성요소 -----	3
3. 해석모델 -----	10
2절 해석결과 -----	18
1. 지지봉 구속이 없는 루프의 해석결과 -----	18
2. 지지봉이 구속된 루프의 해석결과 -----	27
3절. 유동루프의 진동특성 시험 -----	33
1. 시험개요 -----	33
2. 시험결과 -----	34
4절 시험 및 해석결과 비교 -----	43
5절 지지성능 평가 및 개선 -----	45
1. 6" 회수관 하류 지지부 -----	45
2. 3" 우회관 지지부 -----	49
제 3 장 결 론 -----	52
참고 문헌 -----	54

## 표 목 차

- 표 1-1 배관과 곡관부의 치수 및 플랜지와 밸브의 질량
- 표 2-1 유동루프 전체 배관계의 고유진동수
- 표 2-2 지지봉을 구속한 유동루프 배관계의 고유진동수
- 표 3-1 유동루프의 고유진동수
- 표 4-1 진동 해석결과와 모달시험의 고유진동수 비교
- 표 5-1 6" 회수관 하류에 U지지부를 추가한 루프의 고유진동수
- 표 5-2 6" 회수관 하류에 용접이음을 추가한 경우의 고유진동수 비교
- 표 5-3 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 고유진동수 비교

## 그림 목차

- 그림 1-1 유동루프 개략도
- 그림 1-2 시험관(Test Section) 조립체와 분리형상
- 그림 1-3 지지구조물과 시험관의 연결형상
- 그림 1-4(a) 6" 회수관 상류 배관 형상
- 그림 1-4(b) 6" 회수관 하류 배관 형상
- 그림 1-4(c) 4" 공급관 상류의 배관 형상
- 그림 1-4(d) 4" 공급관 하류 및 4" 배관에 연결된 밸브형상
- 그림 1-4(e) 5" 송출관의 배관형상
- 그림 1-4(f) 2" 피드백관의 배관 형상
- 그림 1-4(g) 3" 우회관 및 밸브 형상
- 그림 1-5 U자형 고정쇠의 설치형상
- 그림 1-6 U자형 고정쇠의 설치위치
- 그림 1-7 6" 회수관 상류 중심 지지부 및 측면 지지부
- 그림 1-8 4" 공급관 상류의 받침 구조물
- 그림 1-9 유동루프의 유한요소 해석모델
- 그림 1-10(a) 6" 회수관의 유한요소 모델 및 구성요소
- 그림 1-10(b) 4" 공급관의 유한요소 모델과 구성요소
- 그림 1-10(c) 5" 송출관의 유한요소 모델과 구성요소
- 그림 1-10(d) 3" 우회관 및 2" 피드백관의 유한요소 모델과 구성요소
- 그림 1-11(a) U자형 고정쇠 유한요소 해석모델
- 그림 1-11(b) U자형 고정쇠의 정적 변형해석
- 그림 1-12 U자형 고정쇠의 수직·수평방향 하중-변위선도

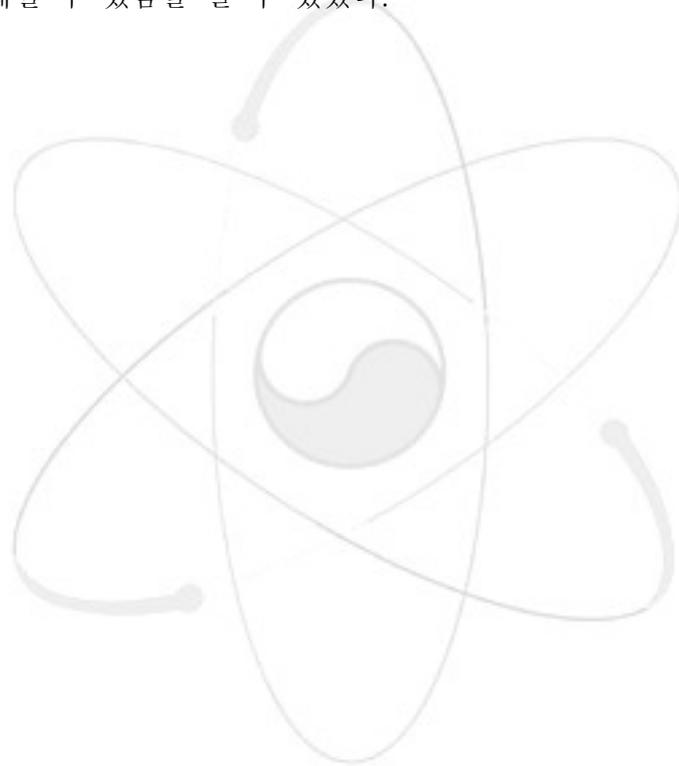
- 그림 1-13 6" 회수관 상류 지지부와 4" 공급관 상류 받침 구조물의 유한요소 모델
- 그림 1-14 시험관 지지봉 구속모델
- 그림 2-1 유동루프 배관계의 진동모드 형상(지지봉 구속이 없는 경우)
- 그림 2-2 지지봉이 구속된 모델의 진동모드 형상
- 그림 3-1 유동루프 진동특성시험 개략도
- 그림 3-2 신호측정 위치 및 가진위치
- 그림 3-3 가속도 계가 부착된 상태
- 그림 3-4 주파수 응답함수(중공관)
- 그림 3-5 주파수 응답함수(물충전)
- 그림 3-6 루프에 물을 채우지 않은 모델의 진동 모드형상
- 그림 3-7 루프에 물을 채운 시험모델의 진동 모드형상
- 그림 5-1 6" 회수관 하류에 U자형 고정쇠를 포함시킨 모델(왼쪽)
- 그림 5-2 6" 회수관에 U지지부를 추가한 모델의 진동 모드형상
- 그림 5-3 6" 회수관을 용접이음으로 벽에 고정한 모델의 모드형상
- 그림 5-4 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델
- 그림 5-5 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 진동모드 형상

## 제 1 장 서 론

한국원자력연구소 신형핵연료 개발단의 고성능지지격자개발과제는 경수로용 원전연료집합체의 주요 부품인 지지격자체(Spacer Grid)를 개발하는 일과 이와 관련된 기초연구를 병행하고 있다. 경수로용 원전연료집합체는 대략 3년 동안 원자로 안의 가혹한 환경조건에서 연소되기 때문에 집합체를 구성하는 주요 부품들은 성능에 관련된 엄격한 시험을 거쳐야 한다. 그렇지만 개발단계에 있는 부품들로 상용연료와 동일한 수준의 시험을 수행한다는 것은 비용적인 면이나 시간적으로 낭비가 아닐 수 없다. 이러한 이유로 개발단계의 부품들은 작은 크기의 모형으로 예비시험을 수행하는 절차를 거치게 되는데, 이러한 시험에 의하여 개발단계의 부품들은 가능한 빨리 성능이 검증되고 단점이 보완되어 결국 개발과 연구가 빠른 시간 내에 효율적으로 수행되어지게 된다. 이번에 구축된 5×5 부분 모의 핵연료집합체의 유체유발진동 시험용 유동루프(FIV Test Loop)도 개발단계에 있는 지지격자체의 기계적 및 수력적 성능을 시험하기 위한 것이다. 상용발전소에 장전되는 원전연료집합체는 길이가 4.5m 정도로서 약 250개 연료봉으로 구성되지만 구축된 유동루프에 장전되는 부분집합체는 길이 2.2m인 연료봉이 2개의 안내관을 포함하여 25개로 구성된다. 구축된 시험시설은 개발단계에 있는 지지격자체의 수력적 특성시험과 지지격자체로 지지된 모의 연료봉의 유체유발 진동특성시험을 수행하는데 이용될 예정이다[1,2].

본 연구는 시험시설 완공에 따라 계획되어 있던 부분집합체를 이용한 유동시험 예비단계로서, 부분집합체가 장입되어 안내관에 의해 고정될 시험관과 이 관으로 물을 공급/회수하게 될 시험루프의 자유진동특성에 관한 것이다. 이것은 주로 시험환경을 제공하는 유동루프의 진동특성이 집합체와 연료봉의 관심 동특성 시험자료에 외란 및 잡음(noise)의 형태로 영향을 미치기 때문에, 유동시험 이전에 관심신호와와의 비교를 위한 기본데이터의 획득차원에서 필요하다. 또한 설계된 유동루프 배관계의 지지 건전성을 평가하는 측면에서 현 단계의 지지구조물 및 고정조건의 적합성을 확인해보고, 최종적으로 유동루프 배관계의 유한요소 해석모델을 개발하여 추후 설계변경이나 시험조건의 변경에 따른 영향성 분석에 활용할 것이다[3]. 유한요소 해석 모델의 개발에서 지지구조물을 포함한 시험관 조립체와 배관은 3차원 범요소로 모델링하고 밸브와 플랜지는 질량요소로 모델링하여 유한요소 해석모델을 구성하였고, 배관 지지조건의 강성은 수치적인 해석을 통해 평가하였다. 범용유한요소 해석코드인 ABAQUS[7]를 이용하여 수행된 해석 결과는 시험모델의 모달시험

에 의한 시험결과와 비교/분석되었다. 모달시험은 가속도계와 충격해머를 이용하였고, 시험 신호의 분석을 위하여 I-DEAS[8]의 시험모듈인 TDAS를 이용하였다. 모달시험과 해석모드의 비교로부터 1차에서3차까지의 저차모드에서 유사성을 갖는 대응모드들이 나타나지만 4차 이상의 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해 지며, 모드 형상에 있어서 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다. 구속조건을 추가하여 지지봉의 국부적인 모드를 제거시킨 유동루프 배관계의 고유진동수 22.4Hz인 1차에서 27.5Hz인 3차의 저차모드는 6" 회수관 하류의 진동모드가 지배적인 모드이며, 배관계의 4차모드는 고유진동수 31.4Hz 로 시험관의 국부적인 진동모드이다. 또한 배관계의 지지조건을 적절히 변경하거나 추가하여 시험루프의 원하지 않는 진동모드를 제거시키거나 억제할 수 있음을 알 수 있었다.



## 제 2 장 본 론

### 1절 유동루프 자유진동해석

#### 1. 해석 개요

일반적으로 배관계의 진동특성은 지지조건과 연결부 강성에 따라 크게 변화될 수 있으며, 구성요소의 진동모드들이 복잡하게 연성되어 나타난다. 배관과 지지구조물의 지지강성 및 감쇠특성은 이들이 설치되는 기반구조물에 의존적으로 변화하게 되므로 그 거동을 예측하기 매우 어려우며, 경우에 따라 이들에 대한 계산 자체가 불가하여 경험에 의존하여 결정되는 것이 사실이다[4]. 전체적인 루프의 진동모드부터 국부적인 모드들의 분리가능성을 확인하고, 구체적으로 어떠한 모드들이 서로 연성되는 특성을 갖는지 파악해 보기 위해서는 부분 영역에 대한 분할모델을 통해서 불가능하고, 전체배관을 하나의 해석모델로 모델링하여 해석할 필요성이 있다. 물론 전체적인 진동모드부터 국부적인 모드들을 분리해 내기 위해서는 분할영역에 대한 해석을 병행해야 한다.

#### 2. 유동루프 구성요소

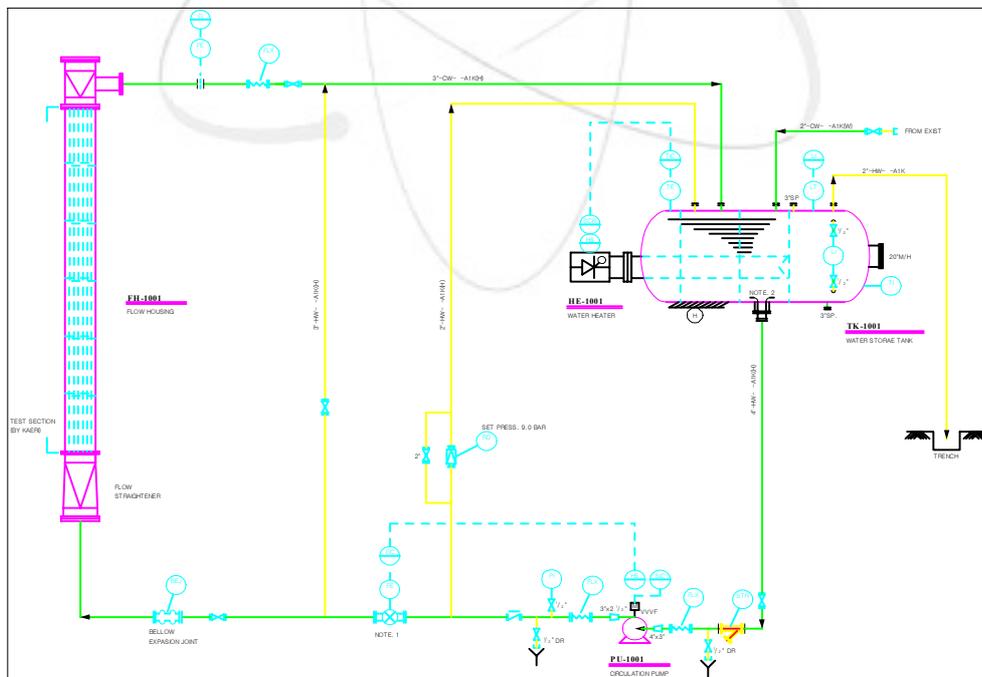


그림 1-1 유동루프 개략도

유체유발 진동 시험용 유동루프는 부분 핵연료 집합체가 장입되어 상·하단 안내관에 의해 고정될 아크릴 시험관(Test section) 조립체, 지지봉과 후면 지지구조물과 같은 시험관 지지구조물, 펌프에서 시험관으로 물을 공급하는 4" 입력관, 시험관으로부터 저수조로 물을 회수시키는 6" 회수관, 저수로에서 펌프로 물을 송출시키는 5" 송출관, 수동으로 유량을 조절하기 위한 3" 우회관, 루프 내 압력이 설계압력보다 올라가게 되면 주관을 보호하기 위한 장치(Rupture disc)가 있는 2" 되먹임관 등의 각종 배관과 이를 지지하는 고정 치구, 받침 구조물 등의 지지구조물 및 저수조와 펌프 등을 포함하는 복잡한 구조물이다. 아래그림 1-1은 유동루프의 개략도를 나타내고 있다.

#### 가. 시험관 조립체

유동시험 시 부분 핵연료 집합체가 장입될 시험관 조립체는 그림 1-2에서와 같이 날개의 아크릴 섹션을 네 측면에서 길이방향으로 볼트 이음한 시험관 자체, 상·하단의 고정 안내관과 네 쪽 모서리에서 볼트 조임으로 안내관을 연결하고 시험관을 지지하는 지지봉, 그리고 시험관의 삼분할 위치에서 시험관을 묶어주는 보호대를 포함한다. 시험관은 내부를 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴로 제작되었으며, 루프 내부 압력에 견딜수 있도록 특수제작 되었다. 시험관 하부에는 유동이 부드럽게 변화될 수 있도록 천이구간과 벌집형의 유동 분배기가 설치되어 있다.

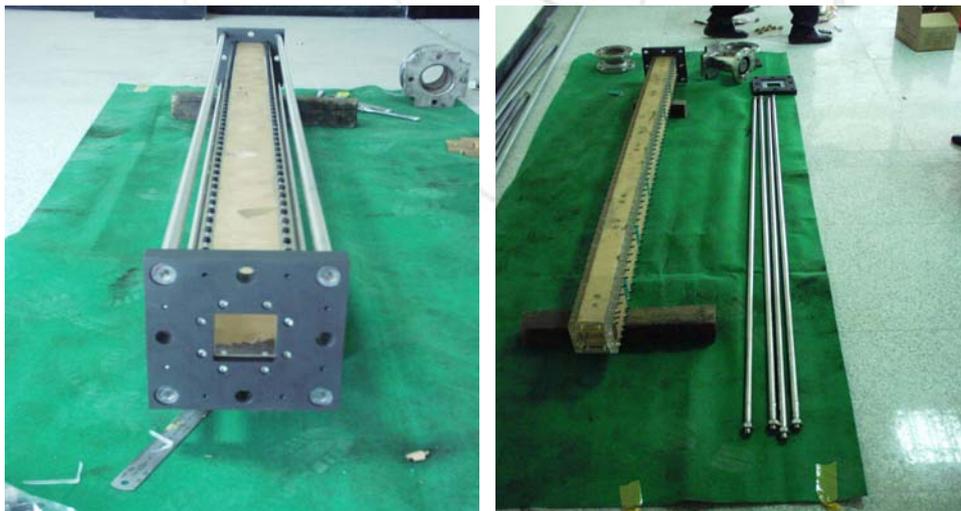


그림 1-2 시험관(Test Section) 조립체와 분리형상

#### 나. 시험관 후면 지지구조물

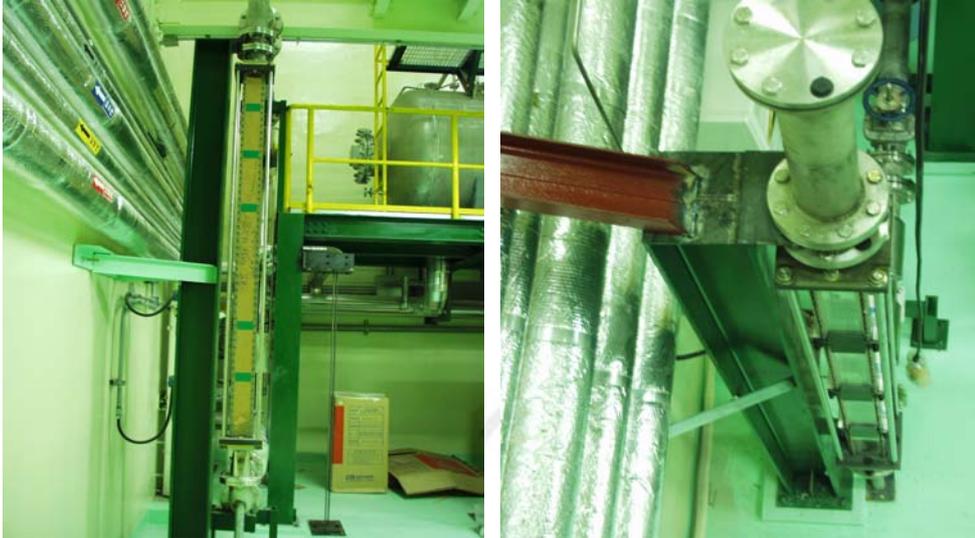


그림 1-3 지지구조물과 시험관의 연결형상

그림 1-3은 시험관 후면에 위치하는 I 단면의 지지 구조물과 시험관 조립체를 나타낸다. 지지구조물은 시험관과 시험관에 연결된 하부 공급관을 지지하는 역할을 하며, 지지구조물 자체는 상단과 길이방향 중심부에 위치한 연결봉에 의해 용접이음되어 있다. 시험관 후면 지지 구조물과 시험관 상단의 4" 배관이 만나는 연결부는 플랜지와 플랜지 사이에 위치한 U자형 고정쇠와 지지구조물로부터 뺀어 나온 보에 의해서 고정되고 있다.

#### 다. 배관부



그림 1-4(a) 6" 회수관 상류 배관 형상

유동루프 배관계의 주배관은 펌프로부터 시험관으로 물을 공급하는 4" 공급관과 시험관을 통과하고 나온 물이 물탱크로 회수되는 6" 회수관 및 저수조로부터 펌프로 물을 토출시키는 5" 토출관이 있다. 주배관 이외에 수동으로 유량을 조절하기 위해 공급관에서 회수관으로 이어져 물을 우회시키는 3" 우회관, 그리고 압력이 올라갈 경우 주관을 보호하기 위한 장치가 있는 2" 되먹임관 등의 지관으로 구성되어 있다. 그림 1-4는 각 배관부의 형상과 플랜지 및 밸브 등을 나타내고 있다.



그림 1-4(b) 6" 회수관 하류 배관 형상



그림 1-4(c) 4" 공급관 상류 배관 형상



그림 1-4(d) 4" 공급관 하류, 펌프, 4" 배관에 연결된 밸브형상



그림 1-4(e) 5" 송출관의 배관형상



그림 1-4(f) 2" 되먹임관의 배관형상



그림 1-4(g) 3" 우회관 및 밸브 형상

라. 배관 지지부



그림 1-5 U자형 고정쇠의 설치형상

U자형 고정쇠는 그림 1-5에서와 같이, 배관의 각 지지부에서 배관의 움직임을 제한하고, 부가적인 지지구조물과 함께 배관을 지지·고정하고 있다. 그림 1-6은 U자형 고정쇠의 설치위치를 숫자로 표시해 둔 그림이다. U자형 고정쇠는 배관의 치수에 따라 크기와 지름이 다르고, 그림 1-5에서와 같이 U자형 고리 끝단에 있는 암나사를 회전시킴으로서 배관이 부가적인 프레임에 묶여지도록 구속시킨다.

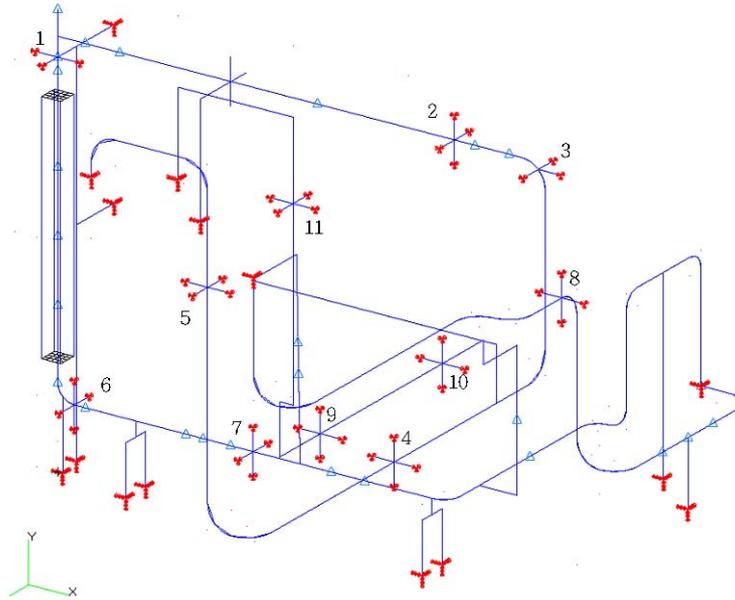


그림 1-6 U자형 고정쇠의 설치위치

그림 1-7의 6" 회수관 상류 지지부는 물탱크의 받침 구조물(I형보)에서 뺀어나온 직각형의 막대구조물로 용접 지지되고 있다. 물탱크에 물의 유동이 있을 경우, 이로부터 발생한 잡음원이 받침구조물과 난간손잡이를 타고 배관 지지부 및 배관으로 직접 전달될 가능성이 있다.



그림 1-7 6" 회수관 상류 중심 지지부 및 측면 지지부

그림 1-8은 루프의 하부에 위치하고 있는 4" 공급관 상류쪽의 받침 구조물을 나타낸다. 왼쪽의 시험관 상류쪽 받침구조물은 아래와 같은 이음구조물을 통해서 배관을 지지하고, 하류쪽 받침구조물은 U자형 고정쇠로 배관을 고정하고 있다.

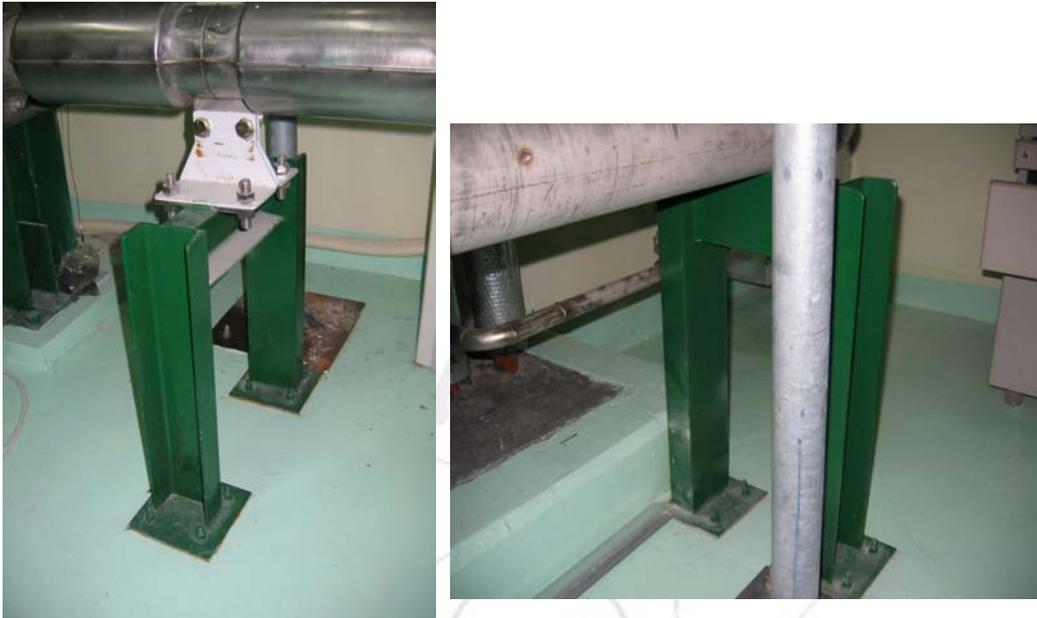


그림 1-8 4" 공급관 상류의 받침 구조물

### 3. 해석모델

유동루프의 전체적인 유한요소 해석모델은 그림 1-9와 같다. 치수별 배관, 지지봉(Rod)과 시험관(TS), 후면 지지구조물(BS), 그리고 지지부 및 연결부는 단면형상과 재질에 따라 3차원 보요소(B31)로 모델링 하였다. 시험관 상·하단에서 지지봉과 체결되어 아크릴 시험관을 잡아주고 있는 사각 판은 4절점 쉘요소(S4R)로 정의하였고, 그림에 도시되지 않았지만 치수별 플랜지와 밸브는 질량요소로 모델링하였다. 4" 공급관, 5" 토출관 그리고 6" 회수관의 곡관연결부는 3절점 엘보우 요소(ELBOW21 or ELBOW31)로 정의하였고, 그 외 직관의 곡관부는 상대적으로 크기가 작아 무시하였다. 6" 회수관 및 4" 공급관 상류 쪽의 벨로우즈와 4" 하류의 펌프는 배관의 자유진동특성에 큰 영향이 없을 것으로 판단되었고, 물탱크 및 물탱크 지지구조물은 상대적으로 강성이 커 해석모델에서 제외시켰다.

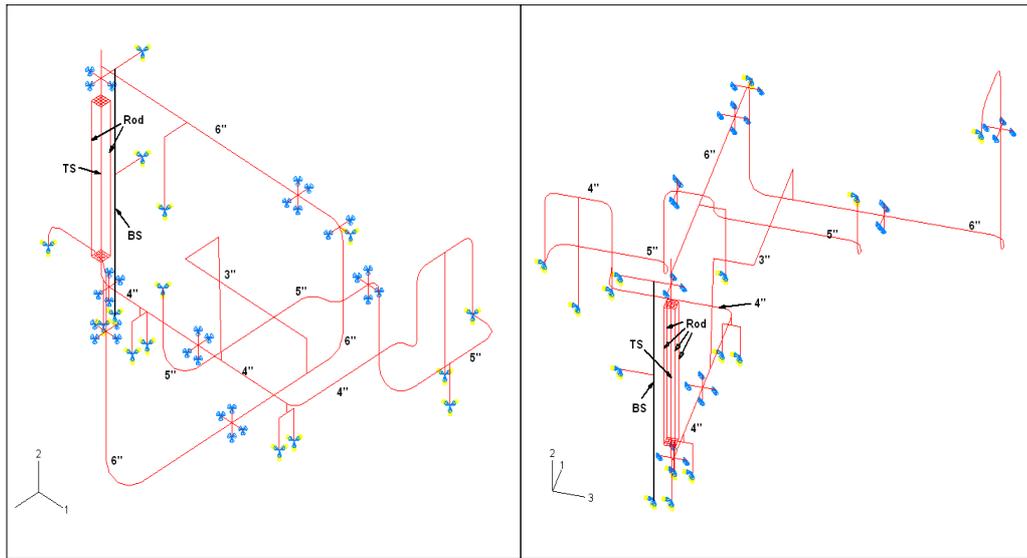


그림 1-9 유동루프의 유한요소 해석모델

#### 가. 시험관 조립체 모델링

사각 아크릴 섹션과 시험관 지지봉은 보요소(B31)로, 상·하단의 안내판은 쉘 요소로, 그리고 시험관 중심부 3지점의 보호대는 부가질량으로 모델링하여 시험관 해석모델을 구성하였다. 조립된 시험관의 지지봉은 실제 상당한 장력으로 안내판을 묶고 있지만, 이러한 선행 장력효과는 해석에서 제외시켰다. 상·하단 고정안내판, 아크릴 시험관 및 지지봉만을 모델링 한 부분 유한요소모델을 가지고 따로 진동해석을 수행해 본 결과 초기 지지봉의 저차모드들이 쌍으로 연속적으로 나타나고, 이후 상판, 하판의 고정안내판의 쉘 모드들이 나타나는데, 이것은 적절히 제한조건을 부여하여 쉘 모드들이 나오지 않도록 처리하였다. 시험관 하단의 4" 공급관 엘보우 연결부 중심에 있는 용접부를 절점 구속하면 너무 보수적인 구속조건임을 확인하여, 용접구조물을 따라 보요소로 모델링하여 해석모델에 포함시켰고, 4"배관의 벨로우즈 부분의 받침 고조물도 절점구속하지 않고 보요소로 해석모델에 포함 시켰다. 플랜지나 밸브는 직접 무게를 측정하여 ABAQUS에서 제공하는 질량요소(mass element)로 모델링하여 해석모델에 포함시켰다.

#### 나. 시험관 후면 지지구조물 모델링

지지구조물 자체는 I단면을 갖는 보요소로 모델링 하고 지지 구조물을 상부와 길이방향 중심에서 벽에 고정시키는 연결봉은 I 단면 보요소로 모델링 하였다. 후면 지지구조물의 강성이 배관이나 시험관의 강성에 비해 상대적으로 커서, 배관진동에

큰 영향이 없을 것으로 생각되나, 유동조건 하에서 지지구조물의 진동이 적지 않음 확인하여 해석모델에 포함시켰다.

다. 배관부 모델링

배관부는 치수에 따라 파이프 요소로 모델링 하였다. 곡관부는 크기에 따라 6", 5", 4" 배관의 경우만을 고려하였고, 3" 와 2" 배관의 곡관부는 무시하였다. 각 배관 및 곡관부의 치수와 해당 플랜지 및 밸브의 무게는 표 1-1에 제시하였다.

표 1-1 배관과 곡관부의 치수 및 플랜지와 밸브의 질량

	2" 배관 (되먹임관)	3" 배관 (우회관)	4" 배관 (공급관)	5" 배관 (송출력)	6" 배관 (회수관)
외경(mm)	60.5	89.1	114.3	139.8	165.2
두께(mm)	3.9	5.5	6.0	6.6	7.1
재질	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
곡관반경(mm)	·	·	0.18	0.20	0.21
플랜지(kg)	·	·	7.61	10.5	13.31
밸브(kg)	22	30	38	47	56

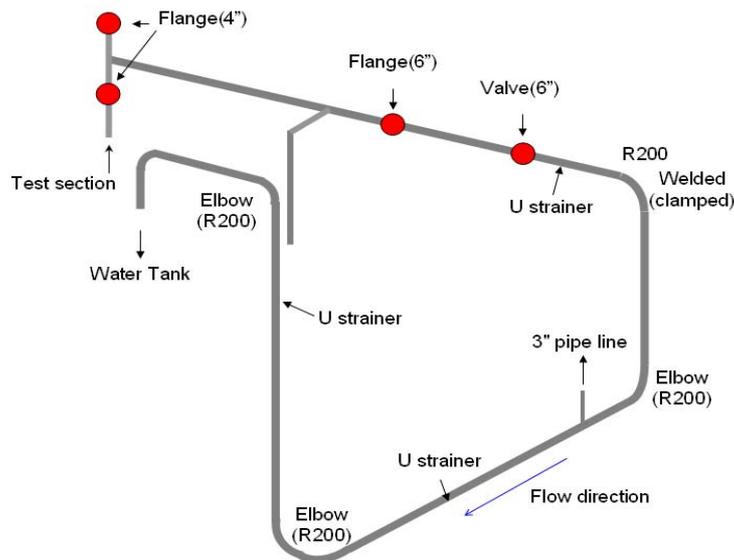


그림 1-10(a) 6" 회수관의 유한요소 모델 및 구성요소

플랜지와 밸브 등과 같은 배관연결요소는 질량효과만을 모델링을 하였고, 이들의 연결부의 강성차이는 계산의 어려움으로 인해 무시하기로 한다. 또한 펌프송출로부터 3~10m/s의 속도로 시험관으로 유입되는 유체의 난동을 감소시키기 위해 설치된 벨로우즈와 연화디스크(flexure disk)는 해석결과에 큰 영향이 없을 것으로 판단되어 해석모델에서 제외시켰다. 그림 2-9는 순환용수의 방향과 배관지지부의 위치 및 플랜지와 밸브 등의 위치를 표시한 치수별 배관의 유한요소 모델의 개략도이다.

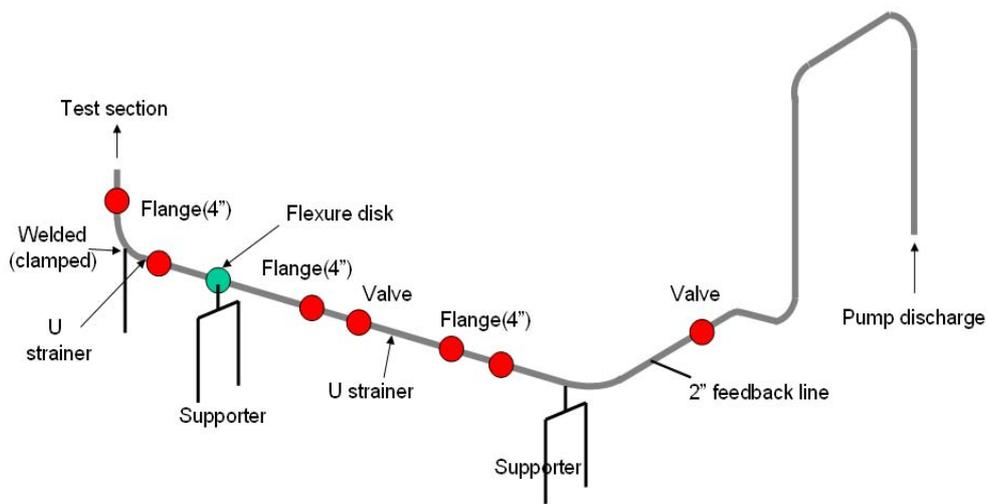


그림 1-10(b) 4" 공급관의 유한요소 모델과 구성요소

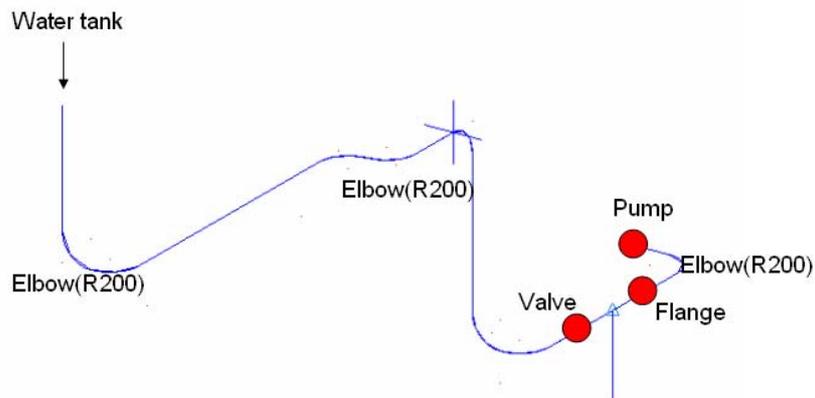


그림 1-10(c) 5" 송출관의 유한요소 모델과 구성요소

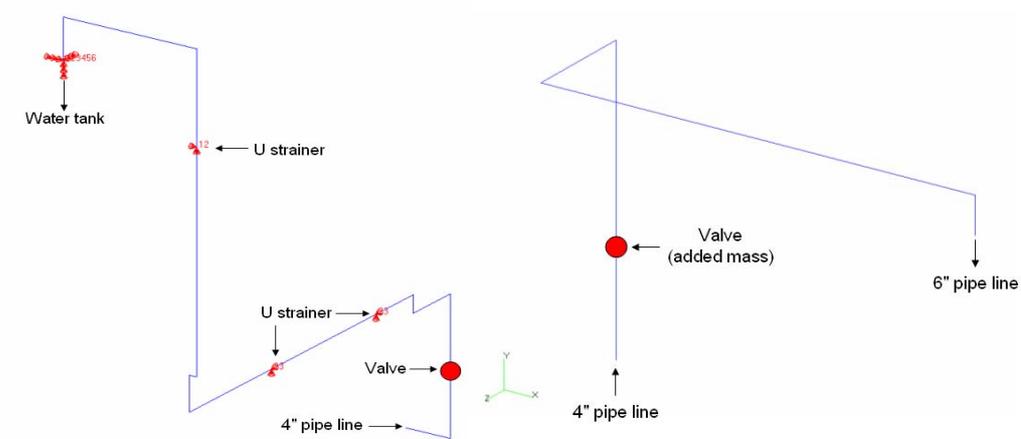


그림 1-10(d) 3" 우회관 및 2" 피드백관의 유한요소 모델과 구성요소

라. 배관 지지부 모델링

U자형 고정쇠로 고정되는 배관 지지부는 스프링 요소(SPRINGA)로 가정하여 해석모델에 반영하였다. U 고정쇠와 같은 체결형 지지부의 지지강성을 계산하는 기존의 연구가 없었기 때문에, 이에 대한 수직·수평방향의 스프링강성은 U자형 고정쇠의 지지부를 3차원 해석모델로 모델링한 후 정적 변형해석을 통해서 작용하중에 따른 변형관계를 유도하여 계산하였다. 스프링 모델에서 요소의 한쪽 끝은 지지하는 배관의 절점위치와 일치하며, 다른 쪽 끝은 공간상에서 변위자유도가 구속되어 있다.

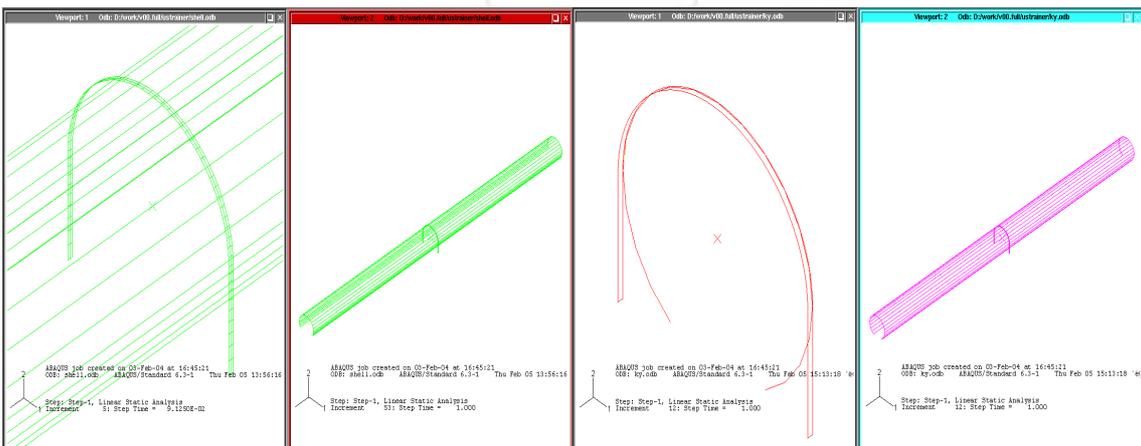


그림 1-11(a) U자형 고정쇠 유한요소 해석모델



그림 1-11(b) U자형 고정쇠의 정적 변형해석

U자형 고정쇠 지지부의 해석모델은 그림 1-11에서와 같이 고정쇠를 변형가능한 등가의 쉘요소로, 배관은 강체로 모델링하여 구성했다. 배관이 그림 1-11에서와 같이 수평·수직방향으로 강체 변위함에 따라 고정쇠 끝단에서 발생하는 반력을 계산하고, 이로부터 얻어진 변형량과 반력의 관계를 그림 1-13과 같이 유도하였다. 실제로 고정쇠는 끝단에 있는 암나사를 조임으로써 배관 하단의 연결판에 상당한 장력으로 고정되는데, 해석에서는 기장력효과의 영향을 고려하지 않고, 하중 변위 선도에 나타나는 2차 강성구간(그림 A구간)의 해당 지지강성을 U자형 고정쇠 수평·수직방향으로의 강성값으로 보았다. 수평방향으로의 지지강성은 x와 y방향에 대한 값으로부터 평균적인 유효수치이다..

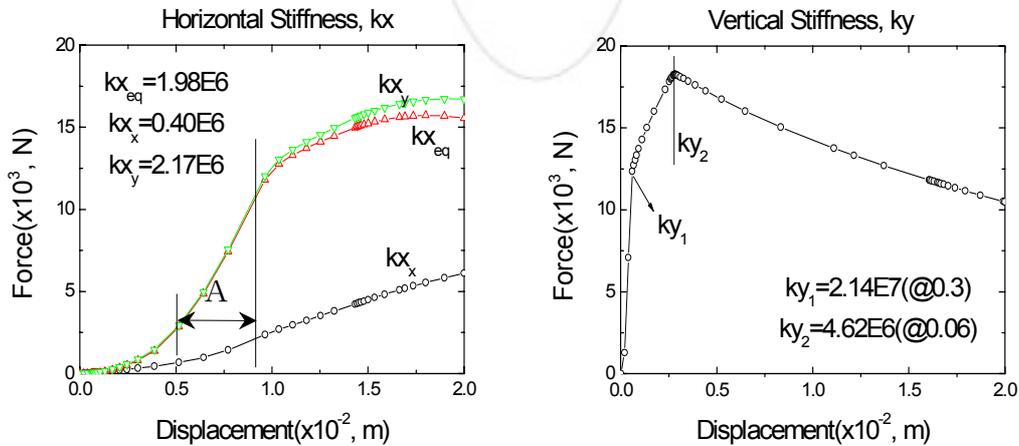


그림 1-12 U자형 고정쇠의 수직·수평방향 하중-변위선도

6" 회수관 상류 지지부는 용접이음에 의한 지지조건을 감안하여 단순지지와 같은 고정조건이나 이보다는 덜 보수적인 추가 부재를 포함하여 모델링하였다. 지지부가 저수조 받침구조물과 연결되고 고정되어 있다고는 하나 상대적인 움직임이 크다. 탱크 받침 구조물의 뼈대구조물(I형 보)도 해석모델에 추가시켜서 모델링하는 것을 고려해 보았으나, 뼈대구조물의 강성이 상대적으로 커 큰 영향이 없었다.

4" 공급관 상류의 받침 구조물은 해석 초기에 단순지지와 같은 보수적인 경계조건으로 모델링 하였으나 지지부가 지나치게 보수적으로 평가되어 받침구조물을 포함하는 보요소로 모델링 하였다. 그림 1-13은 6" 회수관 상류 지지부 및 4" 공급관 상류의 받침 구조물의 유한요소 모델을 나타낸다.

5" 공급관의 순환용수가 펌프로 유입되는 하류 배관영역과 펌프에서 토출되는 4" 공급관 하류쪽의 배관 지지부는 수직 보를 배관하단에 끼워 넣어 배관의 움직임을 제한하고 있으며, 이 지지구조물도 환봉의 해당 유한요소 모델로 모델링 하였다.

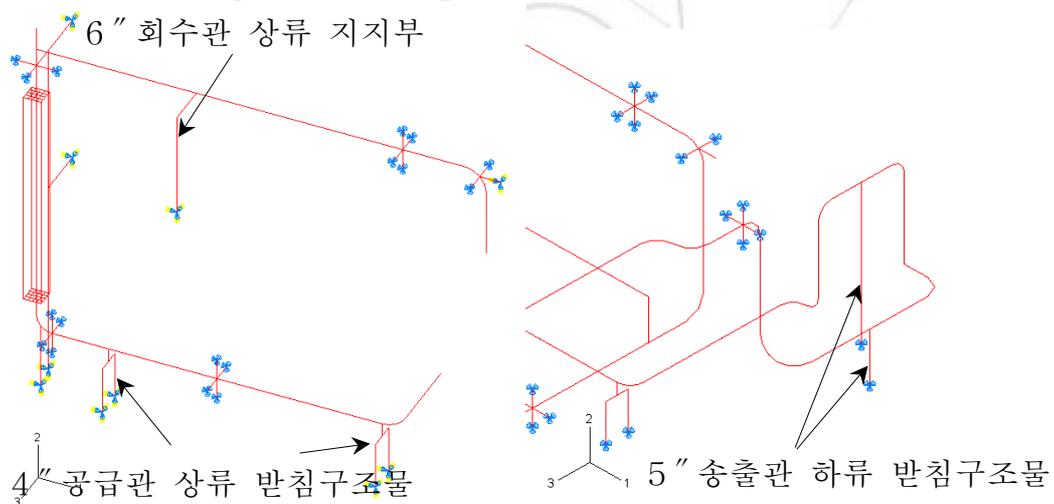


그림 1-13 6" 회수관 상류 지지부와 4" 공급관 상류 및 하류 받침 구조물, 그리고 5" 송출관 하류의 지지구조물 모델링

마. 지지봉 구속 모델

그림 1-14는 지지봉의 횡방향 진동을 억제하기 위해 해석모델의 시험관 중심위치에 추가시킨 지지봉 구속모델을 나타내고 있다. 지지봉 구속에 사용된 연결요소는 지지봉 단면과 동일한 보요소를 사용하였고, 지지봉 및 후면 지지구조물과 용접이음 되어있다고 가정하였다.

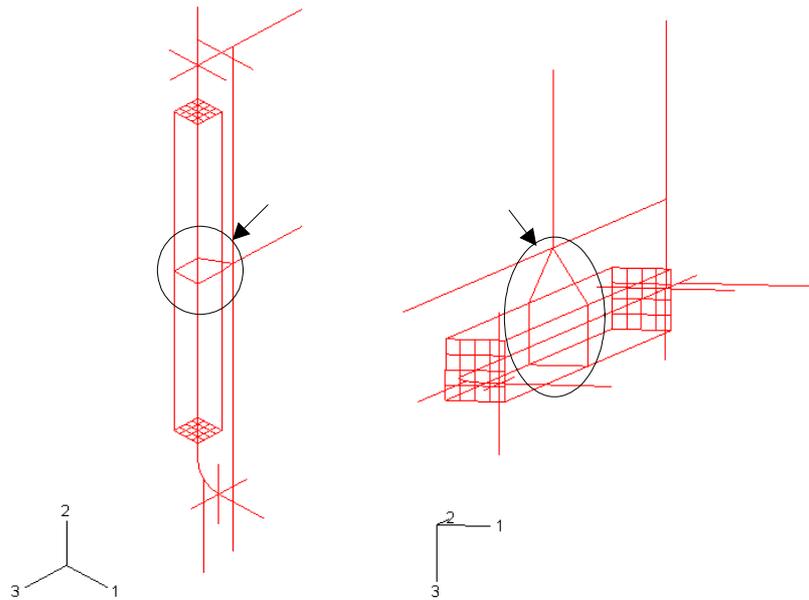


그림 1-14 시험관 지지봉 구속 모델

## 2절 해석결과

### 1. 지지봉 구속이 없는 루프의 해석결과

유동루프 배관계의 자유진동해석 결과, 100Hz 미만까지 대략 40차의 진동모드를 얻을 수 있었다. 루프의 고유진동수는 표 2-1에 정리하였다. 그림 2-1은 유동루프 배관계의 진동해석으로부터 얻어진 1차에서 20차까지의 진동모드형상을 나타내고 있다. 관측 위치만을 변화시켜 도시한 그림에서 점선으로 표시된 선은 변형되기 전의 상태를 나타내고 있으며, 4각점으로 표시된 요소는 플랜지 및 밸브에 대한 질량요소를 의미한다.

표 2-1 유동루프 전체 배관계의 고유진동수

모드	고유진동수 (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

고유진동수 20Hz 부근에 몰려있는 유동루프 배관계의 1차에서 8차까지의 모드는 상대적으로 강성이 작은 시험관 지지봉의 진동모드이며, 지지봉의 대칭성으로 인해 두개의 모드씩 방향을 달리하면서 동일한 모드형상들이 반복되어 나타나고 있다. 즉, 1차와 2차, 3차와 4차, 5차와 6차, 7차와 8차 모드는 각각 동일한 시험관 지지봉의 진동모드이다. 1차 모드형상은 시험관과 3" 배관의 진동모드가 약하게 연성되어 나타나며, 시험관의 1차 보 진동모드(길이방향으로 반파)도 다소 관찰할 수 있다. 1차와 2차 모드는 각각 x와 z방향으로 마치 하나의 집합체처럼 묶여서 같은 위상으로 움직이는 보 진동모드이며, 3차이상의 모드에서는 날개의 지지봉들에 대한 대칭적인 움직임과 함께 비틀림 진동모드도 관찰됨을 확인할 수 있다. 기본진동수

에서의 모드형상이 다른 요소와의 연성이 없는 주로 시험관 지지봉만의 모드이므로, 전체 모드형상으로부터 모드분리가 가능하며, 지지봉의 진동모드가 시험관 및 시험체에 미칠 영향을 고려하여 적절한 방식으로 구속하거나 묶음으로써 이들의 모드를 제거하거나, 고유진동수를 높일 필요가 있다. 각 지관의 시험관 지지봉에 대한 영향을 원거리(far field)로 생각할 때, 시험관 지지봉과 이들 지관의 연성은 크지 않을 것으로 판단된다.

고유진동수 22.5Hz인 9차에서 27.4Hz인 11차 까지의 모드형상은 6" 회수관 쪽 하류의 진동변위가 지배적이면서 각종 지관 및 시험관, 시험관 지지봉 등 여러 배관요소들이 복잡하게 연성된 모드이다. 9차 모드형상은 6" 회수관 하류쪽이 기준좌표의 3방향으로 벗어나려는 진동변위가 가장 두드러지며, 회수관에 묶여있는 3" 배관의 진동변위는 6" 회수관의 움직임 때문에 모드형상이 다소 과장된 것이라고 생각된다. 시험관의 1차 보진동모드와 함께, 집합체 묶음처럼 같은 위상으로 움직이는 시험관 지지봉의 진동모드 및 4" 공급관 상류쪽의 진동변위도 약하게 연성되고 있다. 10차 모드형상은 9차 모드형상과 전체적으로 유사하나 6" 회수관 쪽의 진동변위가 9차에 비해 확대되어 1방향으로 벗어나려는 진동변위가 나타남에 따라 3" 우회관의 진동위상이 반대로 바뀌었음을 관찰할 수 있다. 6" 회수관 상류쪽 시험관 연결부의 진동변위도 약하게 연성되어 나타나고 있다. 11차 모드형상도 9차와 10차 크게 다르지 않다.

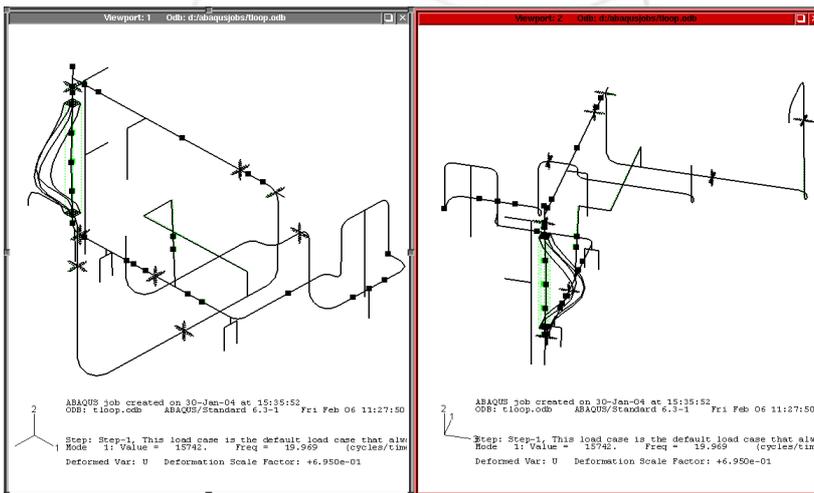
고유진동수 31.9Hz인 12차 모드형상은 시험관과 지지봉의 진동변위가 두드러지고 6" 회수관 상류쪽 시험관 연결부의 진동변위가 약하게 연성되고 있다. 흥미로운 것은 시험관의 진동모드가 이전의 모드들이 비해 두드러지게 증가하여 시험관만의 기저진동수가 대략 이 주파수 부근에 있을 것으로 생각되나, 배관 진동해석의 경우 모드들이 지지조건 및 경계조건에 따라 심하게 왜곡될 가능성이 있어 시험관만의 기저진동수는 따로 이부분만을 모델링에서 분리시킨 후 해석할 필요가 있다. 12차 이전의 일부 모드들(1차, 9차에서 11차)에서도 시험관의 진동변위가 연성되어 나타나는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 같은 구조물로 묶여있는 시험관 모드가 지지봉과 상·하단의 주배관에 의해 영향을 받고 있음을 의미한다. 11차까지의 모드형상에서 관찰된 6" 하류쪽의 진동변위가 없어진 것으로부터 12차 모드는 이전까지의 6" 회수관 하류쪽의 움직임이 큰 진동모드와는 분리되는 모드로 생각할 수 있다.

고유진동수 34.4Hz인 13차 모드형상은 12차 모드형상과 유사하나, 시험관의 1차 보진동모드가 기준좌표의 2방향으로 방향을 바꾸어 나타났으며, 이외의 지지봉이나 배관의 모드들과 거의 연성이 없는 시험관만의 모드로 분리가능하다. 고유진동수 36.5Hz인 14차 모드형상은 6" 회수관 상류 시험관과의 연결부가 시험관 지지구조물 쪽으로(기준좌표의 -3방향으로)기울어지는 형상이다. 이에 따라 시험관과 지지봉, 및 3" bypass 관이 함께 진동변위하는 것으로 보인다. 해당 모드에 상응하는 주파수의 외란이 예상될 경우, 6" 배관의 상류쪽을 현재의 지지조건보다 조금 더 보수

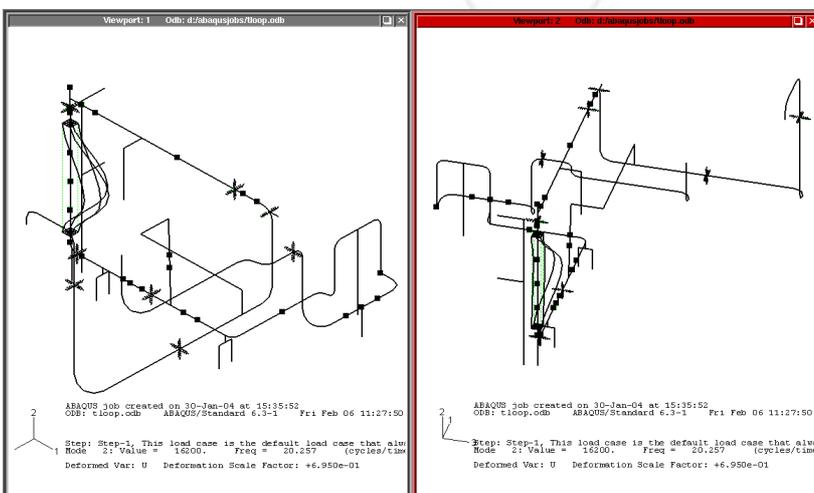
적으로 적용하는 것이 필요하다. 고유진동수 37.5Hz인 15차 모드는 시험관 지지구조물이 주로 진동하는 로컬모드로 볼 수 있을 것 같다.

고유진동수 40.4Hz인 16차 진동모드 형상은 전체 배관계가 연성된 전형적인 진동모드로 배관계의 모드형상 분석에 있어서의 어려움을 단적으로 보여주고 있다. 시험관과 집합체처럼 움직이는 지지봉은 1차 보진동모드에 가까운 형태로 진동변위하고 있으며, 주로 6" 회수관의 진동변위가 두드러지게 나타난다. 고유진동수 40.7Hz인 17차 진동모드 형상은 주로 5" 배관의 진동변위에 대한 모드로 다른 요소와의 연성이 거의 없는 분리 가능한 형태를 취하고 있다. 고유진동수 41.8Hz에 대응하는 18차 모드는 전체적으로 16차 모드형상과 유사하다.

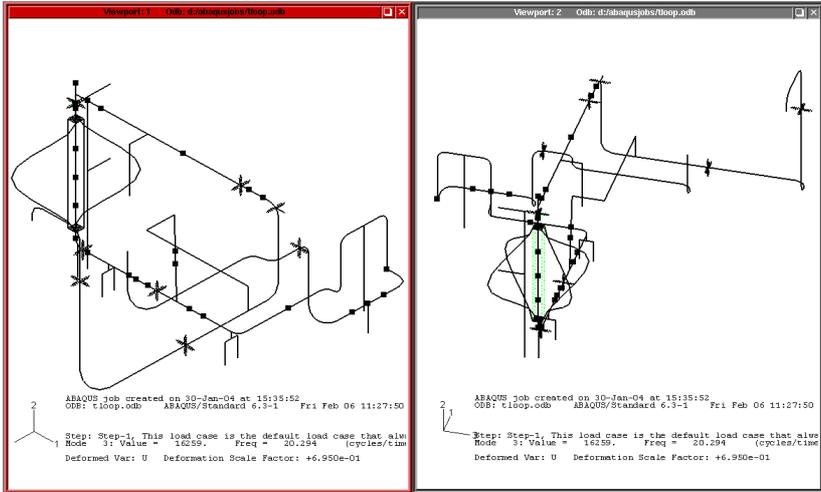
고유진동수 51.5Hz인 19차에서 55Hz인 20차까지의 모드는 분리 가능한 형태로 나타나는 시험관 지지봉의 진동모드로 20Hz 부근에 몰려있는 1차 보진동모드(길이방향으로 반파)에서 2차 보진동모드(길이방향으로 완파)로 발전하였다. 19차와 20차 모드는 집합체처럼 같은 위상으로 움직이며, 시험관의 진동모드가 뚜렷이 연성되어 있는 것이 특징이다.



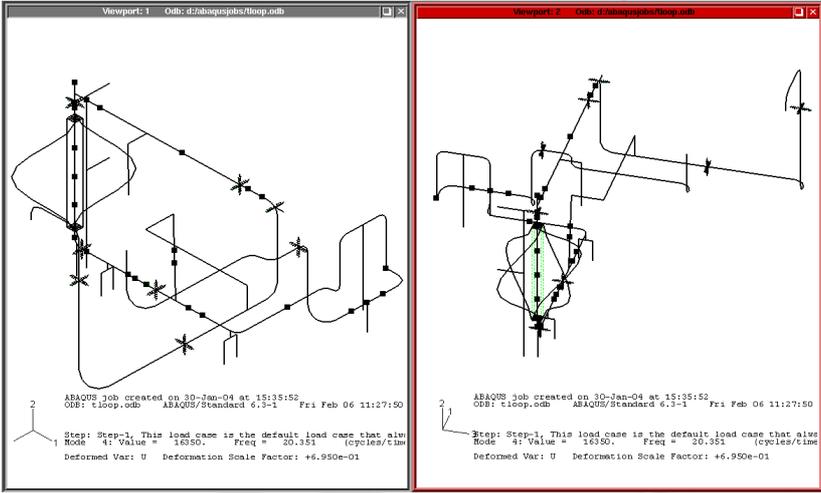
(a) 1st mode



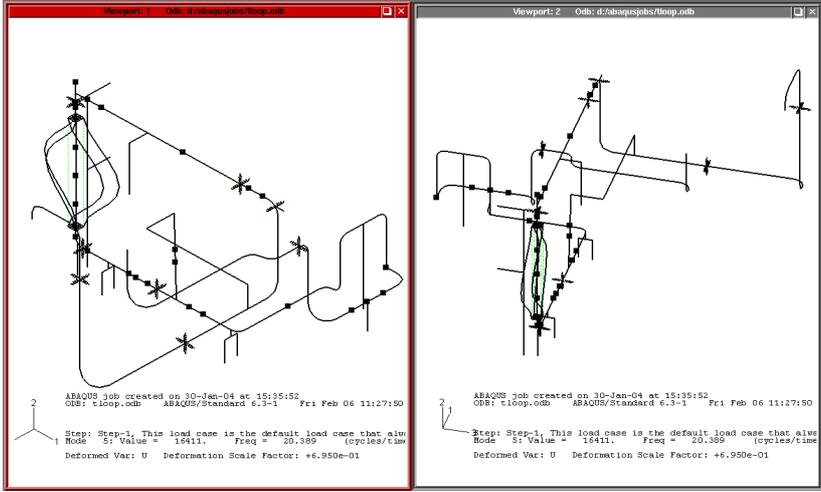
(b) 2nd mode



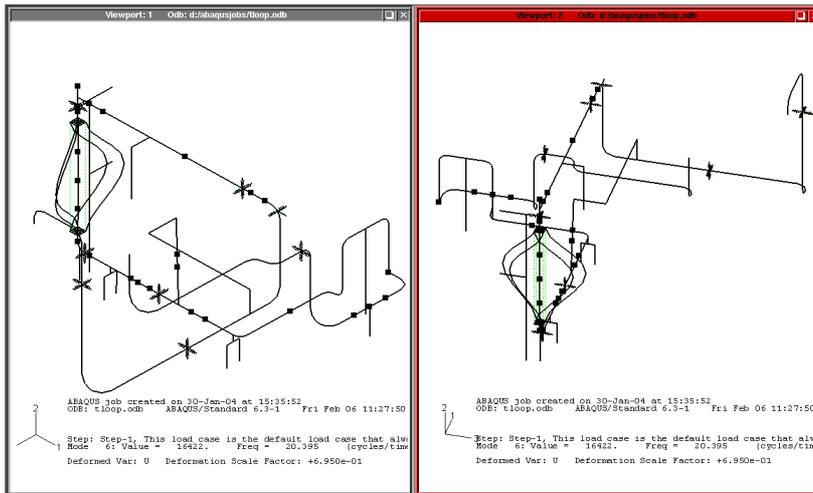
(c) 3rd mode



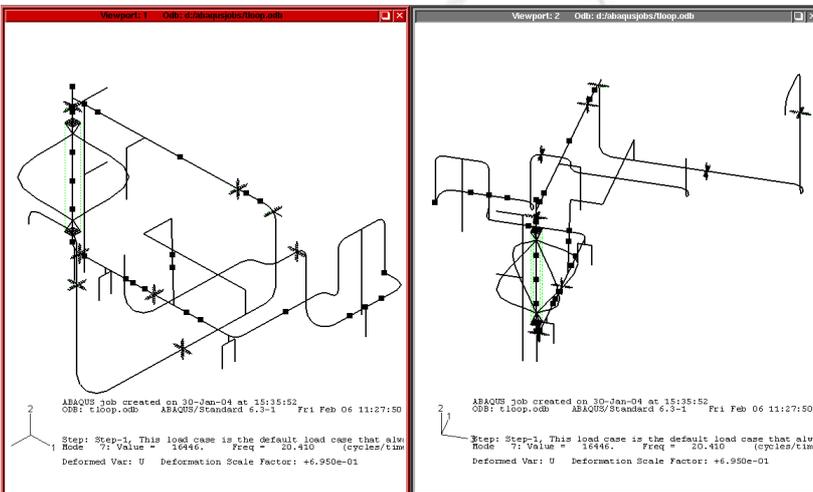
(d) 4th mode



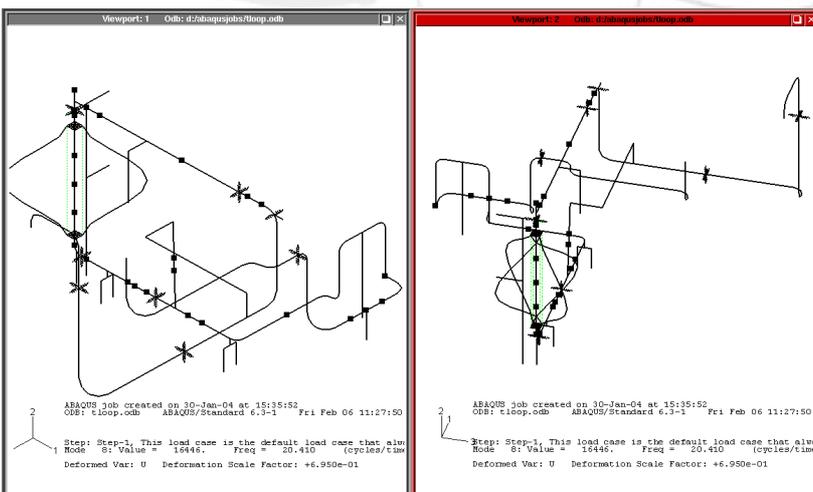
(e) 5th mode



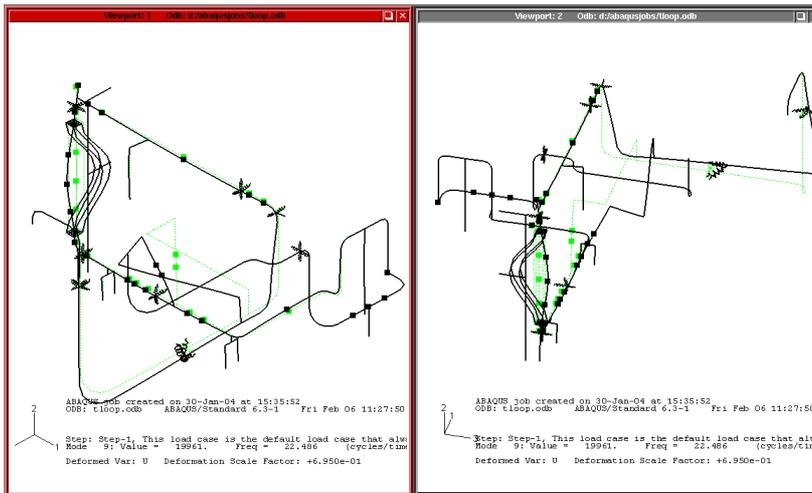
(f) 6th mode



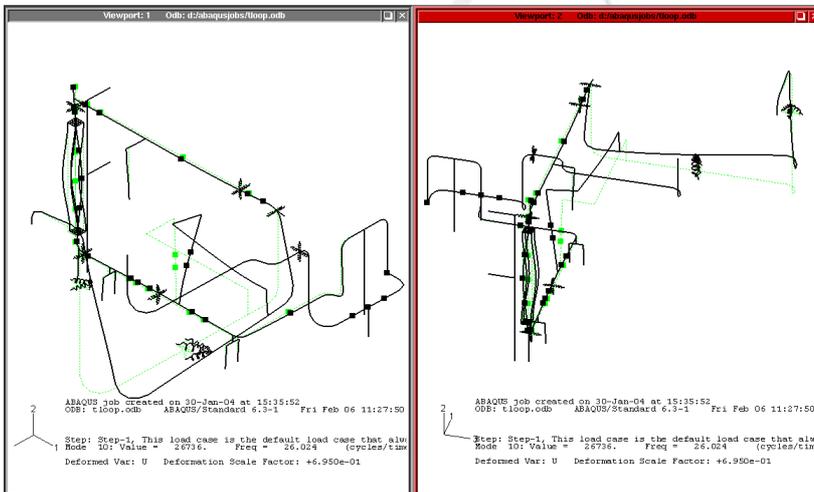
(g) 7th mode



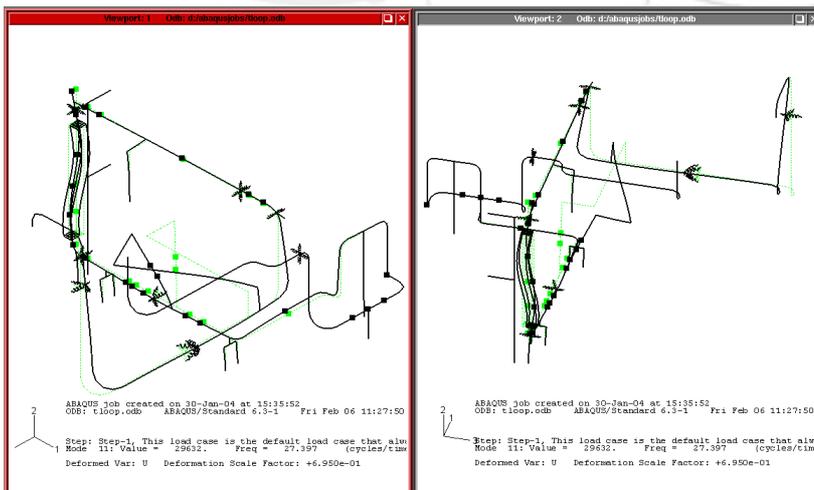
(h) 8th mode



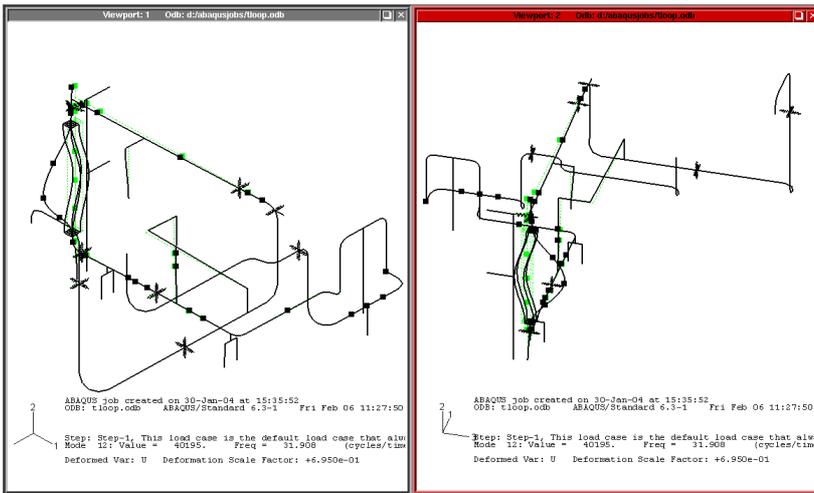
(i) 9th mode



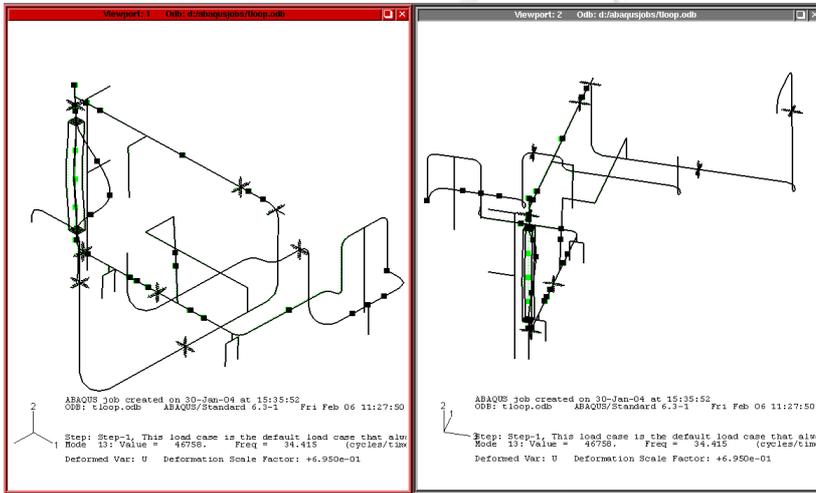
(j) 10th mode



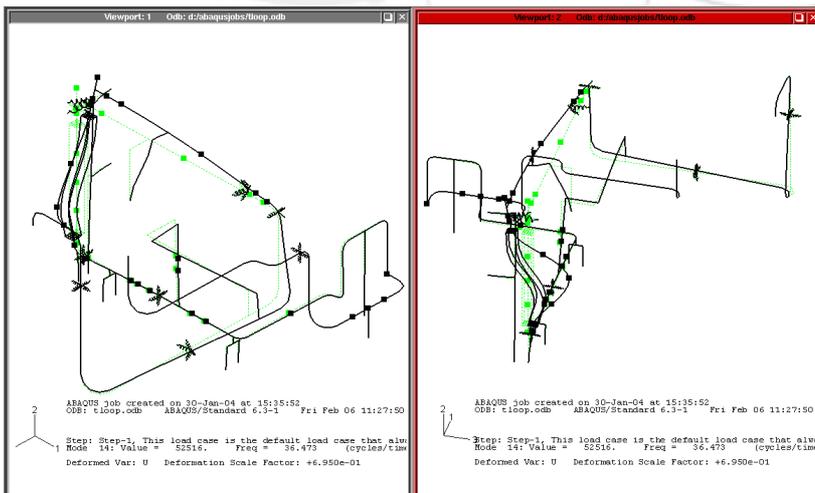
(k) 11th mode



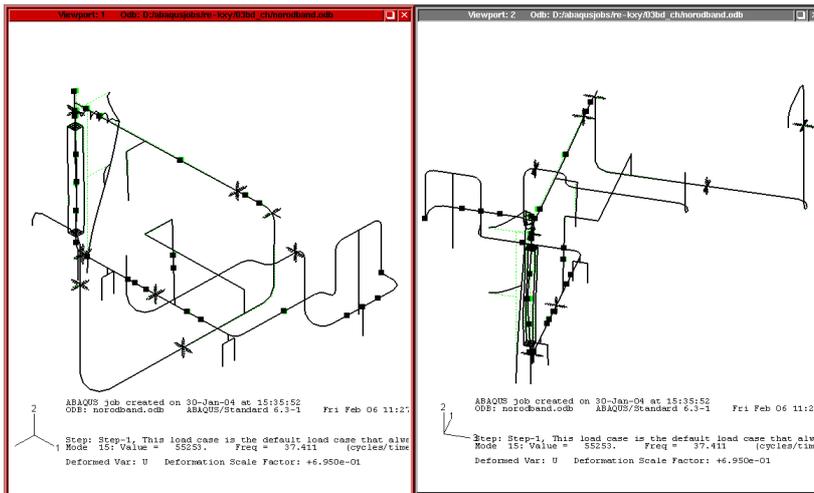
(l) 12th mode



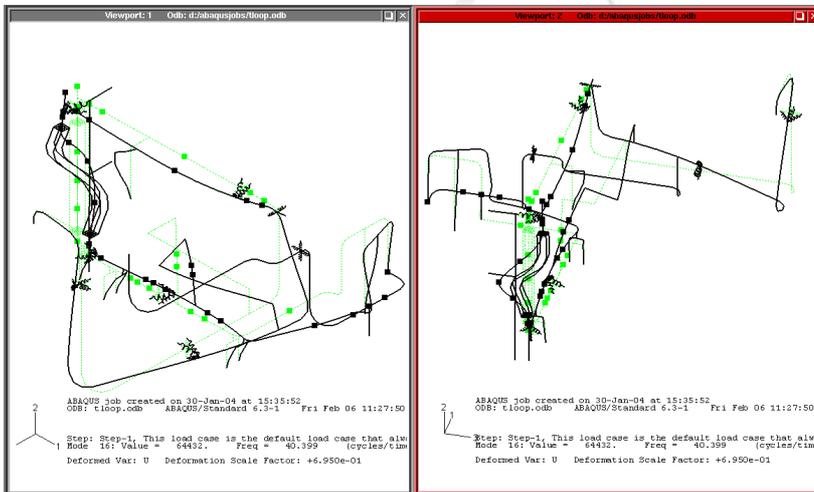
(m) 13th mode



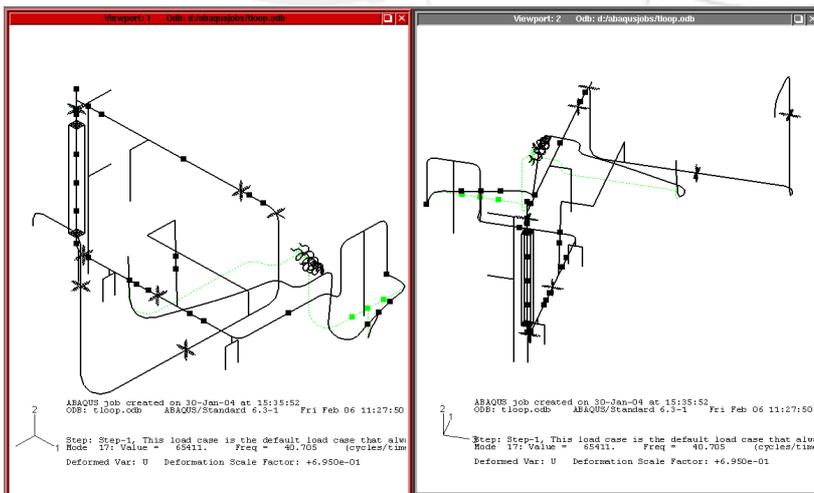
(n) 14th mode



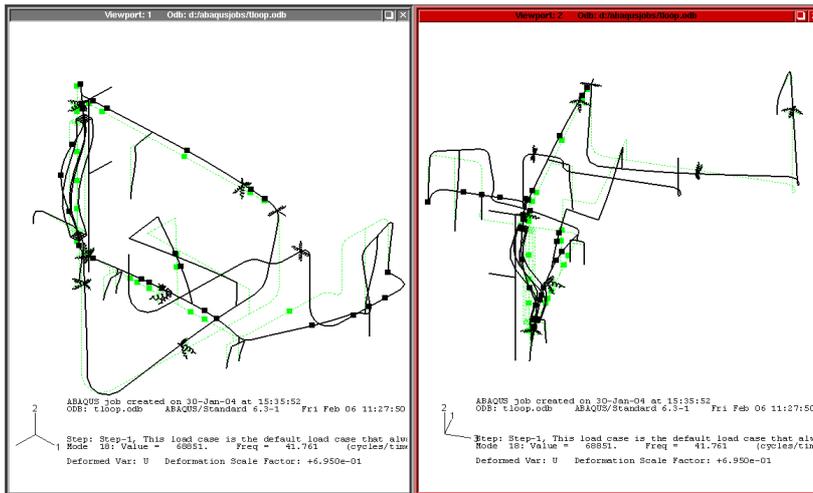
(o) 15th mode



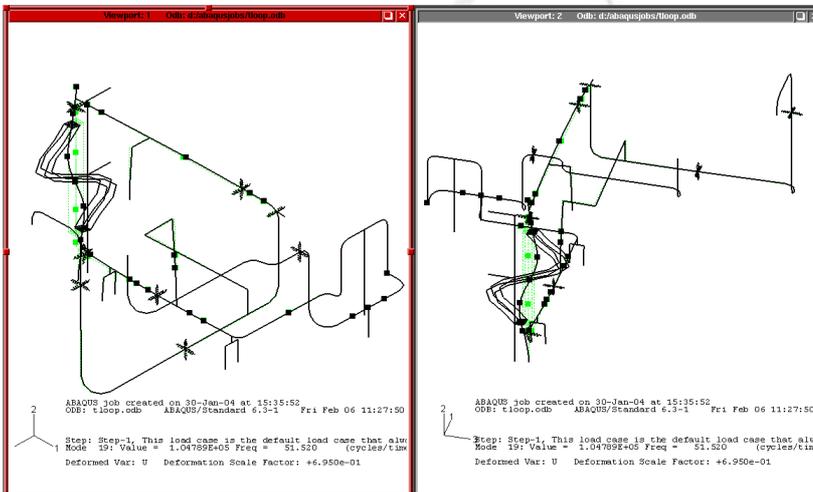
(p) 16th mode



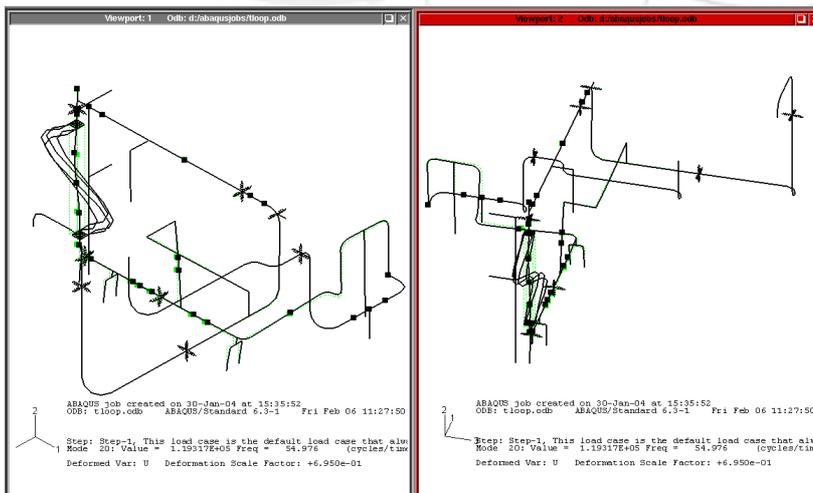
(q) 17th mode



(r) 18th mode



(s) 19th mode



(t) 20th mode

그림 2-1 유동루프 배관계의 진동모드 형상(지지봉 구속이 없는 경우)

## 2. 지지봉이 구속된 루프의 해석결과

선행해석의 결과로부터 20Hz 부근에 몰려있는 1차에서 8차까지의 모드들이 시험관 지지봉에 의한 국부적인 진동모드임을 확인하였다. 이에 따라 상대적으로 강성이 작은 4개의 지지봉을 상호 구속하고, 다시 지지구조물에 연결시킴으로써(그림 1-14참조), 지지봉에 추가된 구속조건이 전체적인 루프진동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 3개의 지지봉을 길이방향 중심에서 연결시키는 연결봉을 해석모델에 추가하고 지지구조물의 간섭으로 연결이 제한되는 나머지 두개의 봉은 지지구조물에 고정시켰다.

지지봉에 구속조건을 추가시킨 경우, 해석으로부터 얻어진 40차까지의 고유진동수를 표2-2에 정리하였고, 그림2-2는 변경된 모델을 이용하여 얻어진 1차에서 12차까지의 진동모드형상을 나타낸다.

표 2-2 지지봉을 구속한 유동루프 배관계의 고유진동수

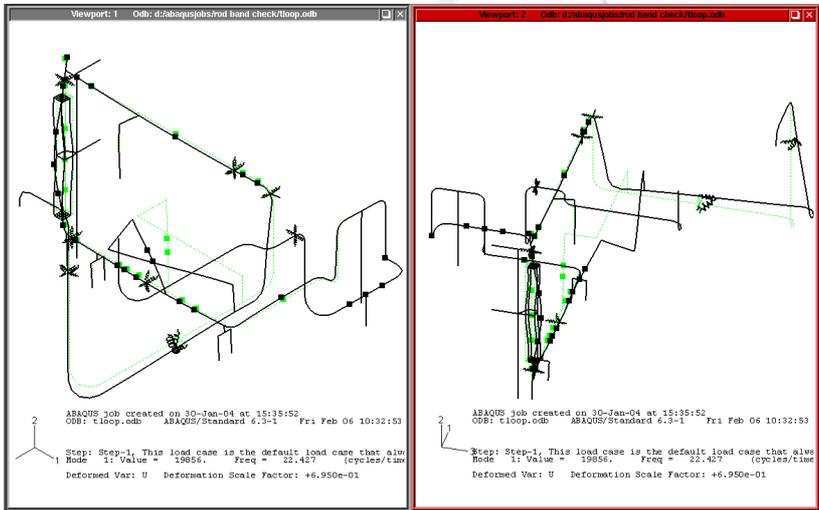
모드	고유진동수 (Hz)						
1	22.4	11	46.5	21	70.6	31	80.7
2	26.0	12	56.3	22	71.4	32	81.4
3	27.5	13	56.7	23	71.7	33	82.1
4	31.8	14	58.4	24	72.5	34	82.4
5	34.2	15	58.8	25	73.0	35	82.7
6	34.6	16	65.2	26	74.2	36	82.7
7	36.5	17	66.4	27	77.1	37	82.9
8	40.4	18	66.8	28	78.0	38	83.0
9	40.7	19	67.7	29	78.5	39	84.7
10	41.8	20	68.7	30	79.1	40	87.2

지지봉이 구속된 모델의 해석결과 20Hz 부근의 국부적인 지지봉 모드들이 사라지고, 기본진동수와 2차, 3차 모드에서 6" 회수관 하류쪽 진동변위가 지배적인 모드들이 나타났다. 즉, 1차 모드인 22.4Hz와 2차 모드인 26.0Hz, 그리고 3차 모드인 27.5Hz는 6" 회수관 하류쪽 배관의 진동변위가 지배적이면서, 시험관과 지지봉의 진동변위도 다소 나타난다. 3" 우회관의 진동변위는 6" 회수관과 4" 공급관에 묶여서 이들의 진동변위에 따라 다소 과장된 것으로 보인다.

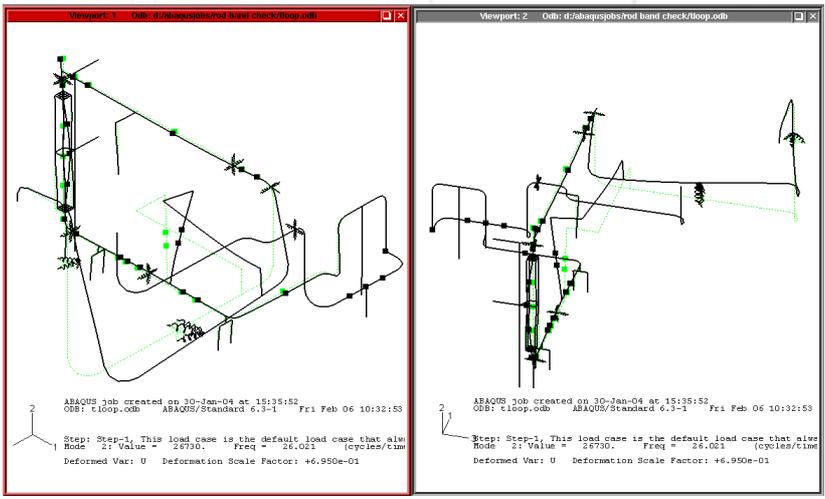
고유진동수 31.8Hz의 4차 모드형상은 시험관의 1차 보 진동모드가 지배적이며, 6" 회수관 상류쪽 연결부의 진동변위가 다소 형성되는 모드이다. 지지봉 구속 이전에도 해당 주파수에서의 모드형상에는 지지봉 진동변위가 거의 없었다. 고유진동수

34.2Hz인 5차와 36.5Hz인 6차 모드는 시험관의 진동모드가 지배적이기는 하나 연결봉으로 묶여있는 지지봉 집합체와 후면 지지구조물의 진동변위가 눈에 띄게 연성되고 있다. 4차에서 6차까지의 모드는 시험관의 진동모드로 판단된다.

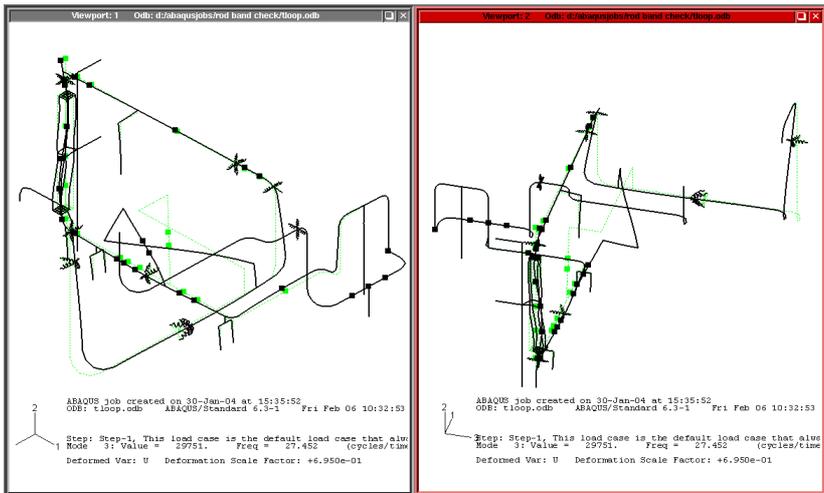
고유진동수 36.5Hz인 7차모드는 6" 회수관 상단의 진동변위가 가장 크고 상대적으로 약하게 진동하는 시험관과 지지봉의 모드들이 다소 연성되어 있다. 고유진동수 40.4Hz인 8차모드와 41.8Hz인 10차 모드는 시험관과 주배관을 포함한 다양한 요소들이 복잡하게 연성된 모드이다. 고유진동수 40.7Hz인 9차 모드는 연성이 없는 5" 배관만의 고유모드이다. 고유진동수 46.5Hz인 11차 모드는 시험관 지지봉의 모드로써, 연결관에 의해 복잡하게 꼬여있는 진동변위를 나타내고, 고유진동수 56.3Hz인 12 차모드는 5" 배관의 모드가 다시 나타난다. 흥미로운 점은 5" 배관의 진동모드의 경우, 다른 배관들과 연성되는 경우가 60Hz 이전의 저차모드에서는 거의 없다.



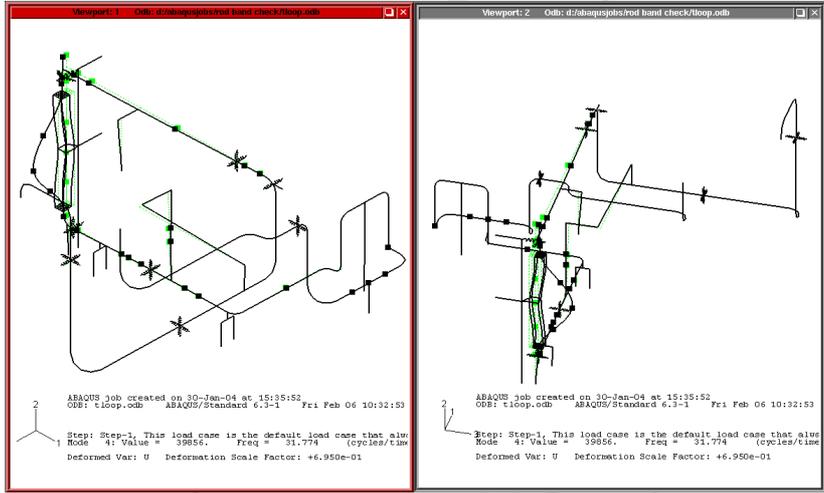
(a) 1st mode



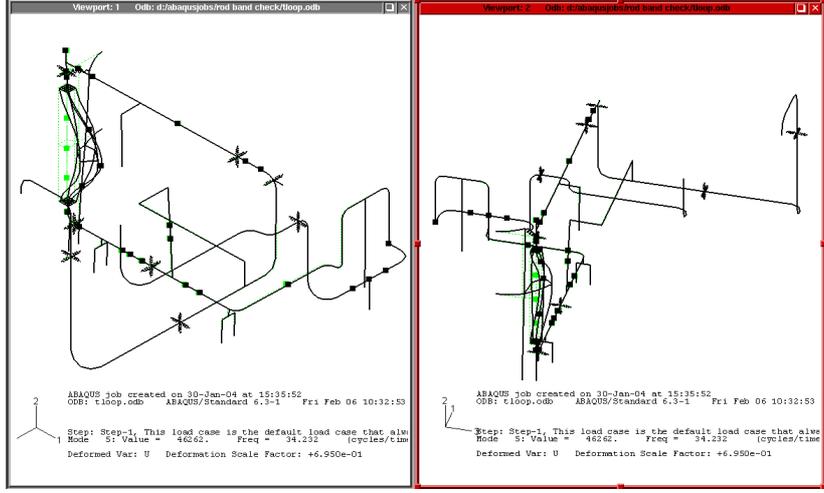
(b) 2nd mode



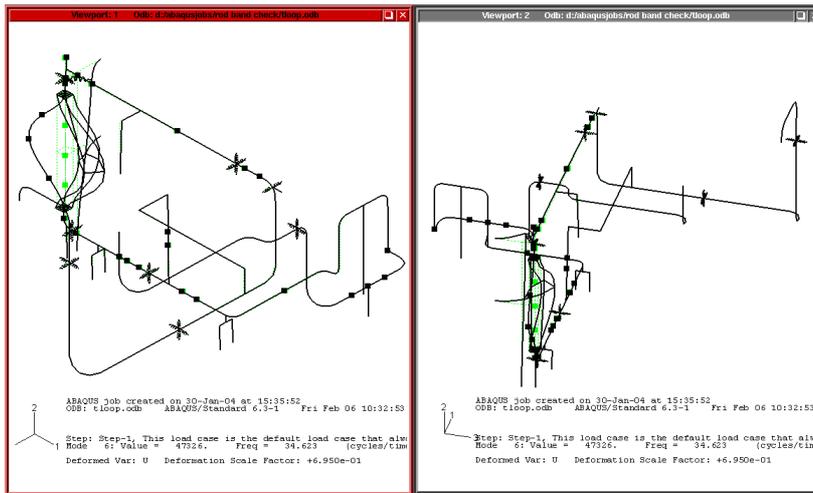
(b) 3rd mode



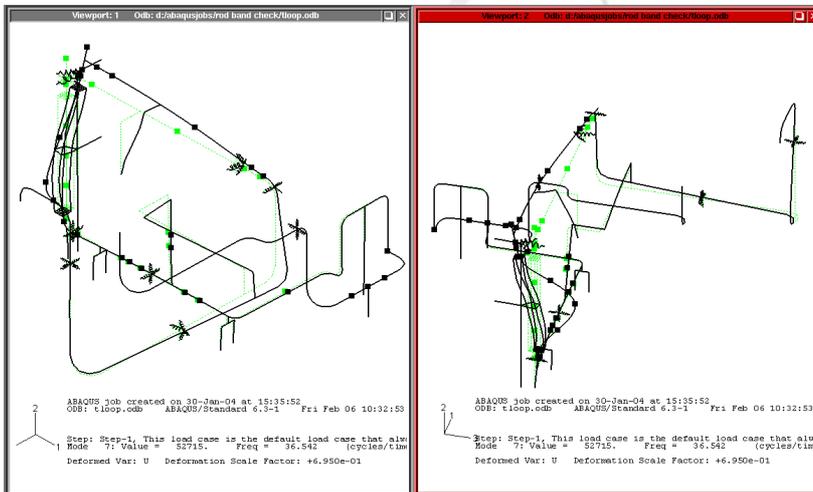
(d) 4th mode



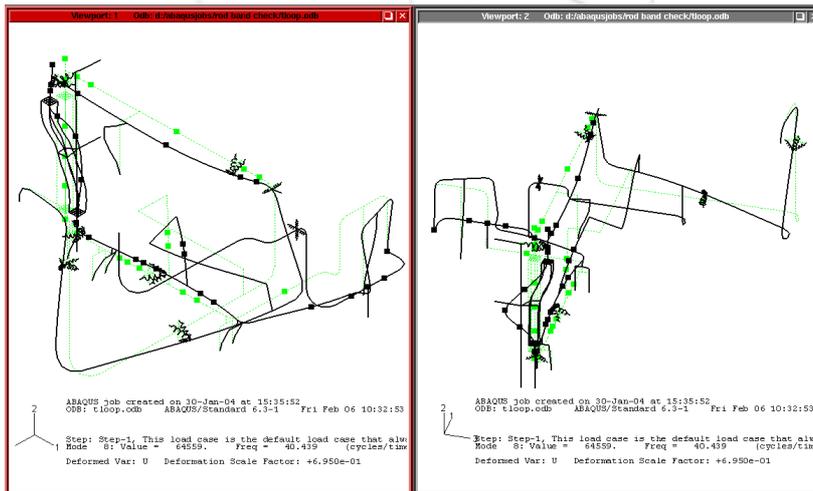
(e) 5th mode



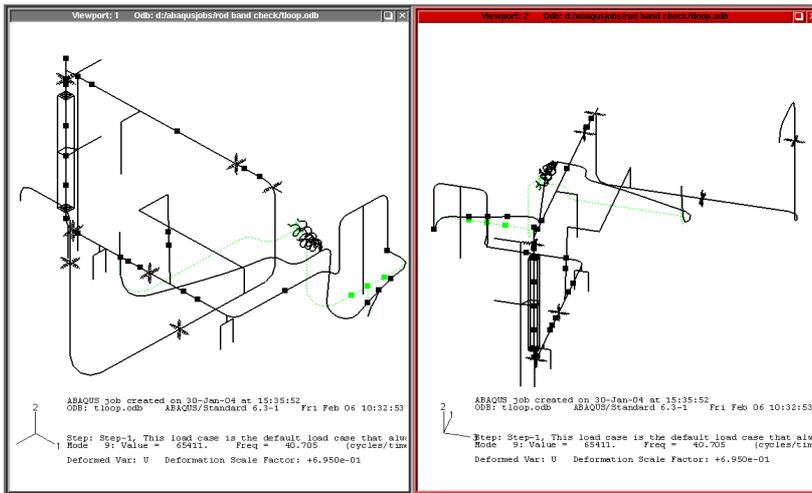
(f) 6th mode



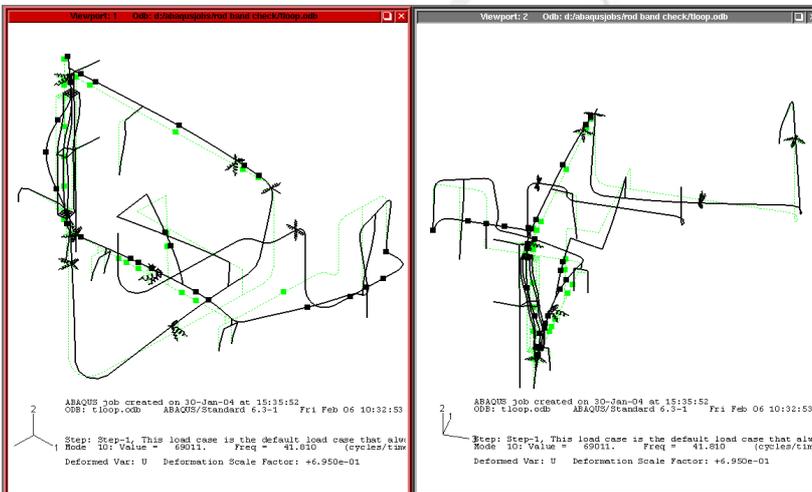
(g) 7th mode



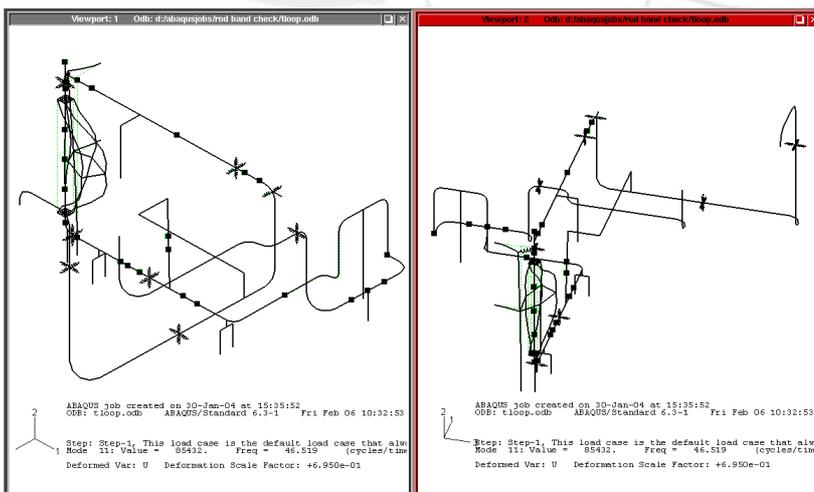
(h) 8th mode



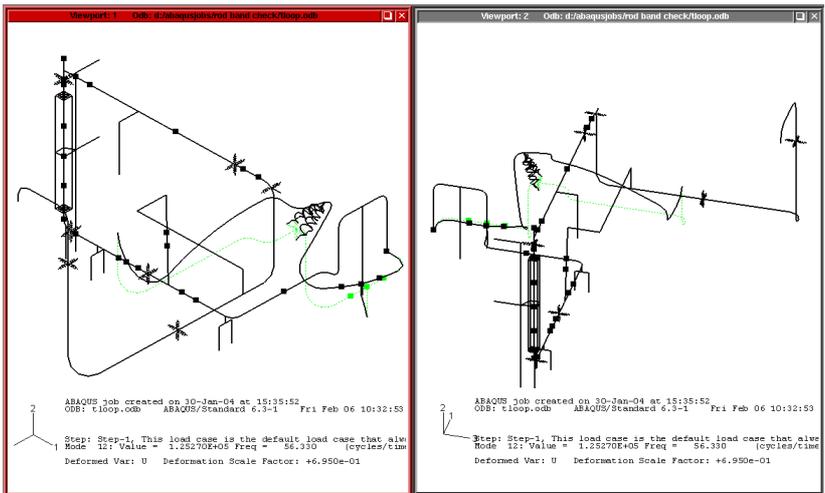
(i) 9th mode



(j) 10th mode



(k) 11th mode



(1) 12th mode

그림 2-2 지지봉이 구속된 모델의 진동모드 형상



### 3절. 유동루프의 진동특성 시험

#### 1. 시험개요

유동루프에 대한 진동특성시험은 루프에 물을 채운경우와 채우지 않은 경우에 대하여 수행하였다[5]. 그림 3-1은 유동루프 진동특성시험의 개략도를 나타낸다. 진동시험은 비교적 간단하면서도 정확한 결과를 얻을 수 있는 충격해머와 가속도계를 이용한 충격가진법을 이용하였고[6], 데이터 획득 및 처리를 위하여 IDEAS[8]의 TDAS 모듈을 이용하였다.

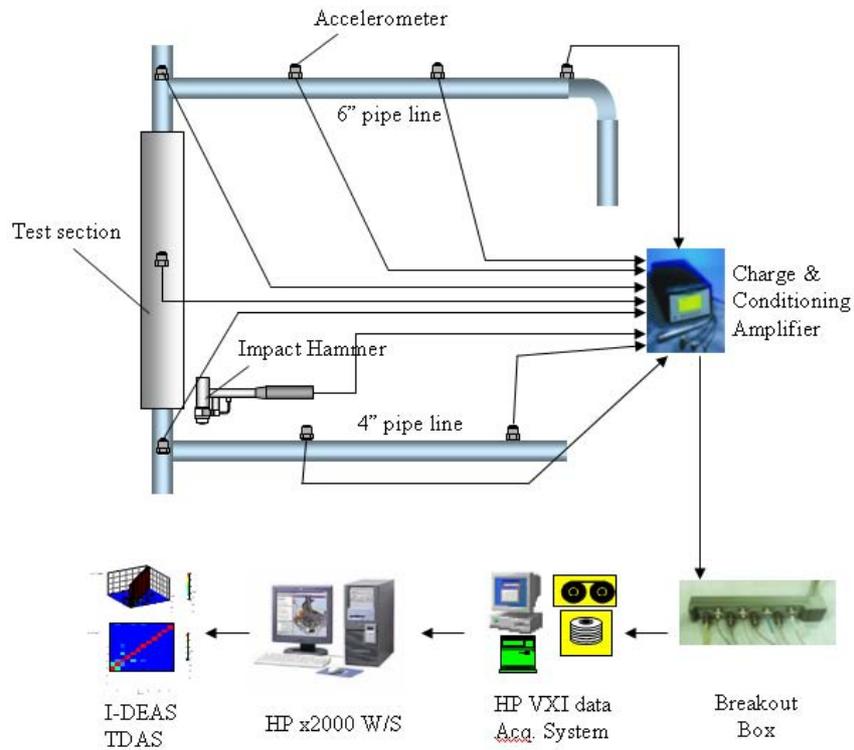


그림 3-1 유동루프 진동특성시험 개략도

신호측정위치는 선형해석을 통하여 얻어진 가속도 신호와 모드형상을 분석하여 노달점을 피하고, 진동변위가 클 것으로 예상되는 지점으로 설정하였고, 가진위치는 시험관 하부의 4" 공급관 엘보우 상부 플랜지로 결정하였다. 그림 3-2는 시험모델에서의 신호측정 위치와 가진위치를 도시하고 있으며, 그림 3-3은 6" 회수관 상단에 가속도계가 부착된 상태의 그림을 나타낸다. 진동변위에 대한 자유도는 그림 3-2에서의 시험루프가 만들어내는 평면의 전·후방향(z방향)만을 고려하기로 한다.

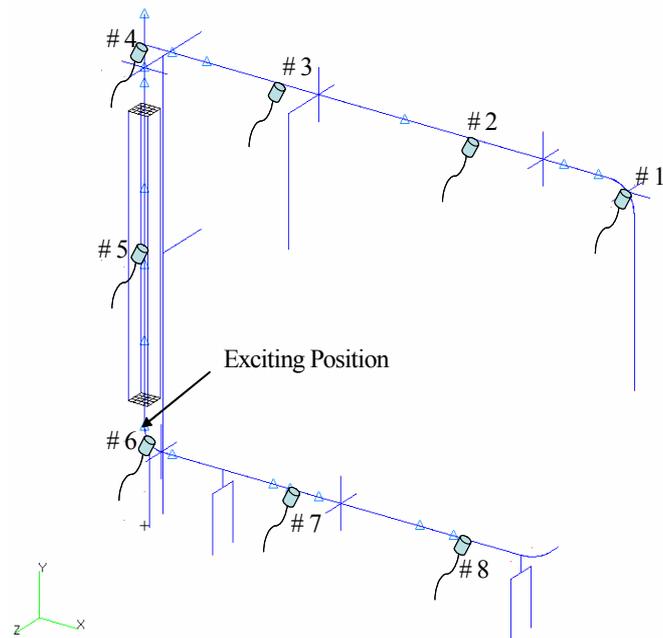


그림 3-2 신호측정 위치 및 가진위치

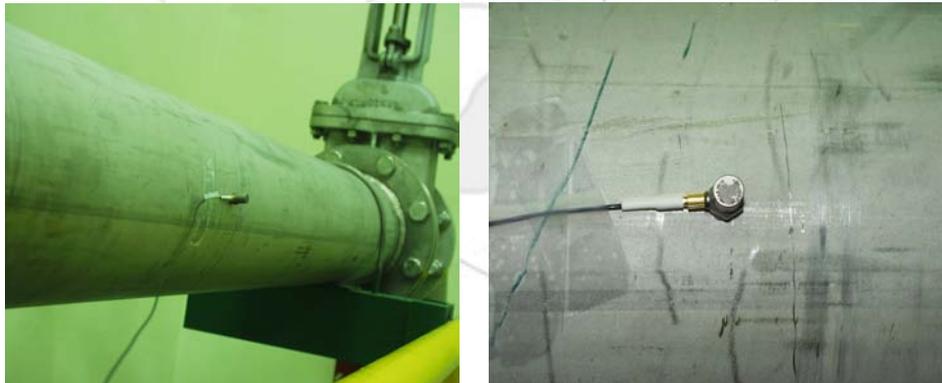


그림 3-3 가속도 계가 부착된 상태

## 2. 시험결과

루프에 물을 채운지 않은 경우와 채운 경우에 대한 유동루프의 9차까지의 고유진동수를 표 3-1에 나타내었다. 두 경우 모두 60Hz의 범위 이내에 9개의 고유진동수가 존재하였다. 두 가지 시험조건에 대해 유동루프의 기본진동수는 약 19.4Hz 및 18.6Hz를 보였고, 그림 3-4는 8개의 신호측정위치에서 측정된 주파수 응답함수를 나타낸다. 기본진동수를 포함해서 20Hz부근에 2개의 모드, 이후로 몇 개의 모드들이 두개 혹은 세 개의 짝을 이루어 나타나고 있다. 배관에 물이 충전되어 있는 경우, 유체에 의한 부가질량효과로 인하여 고유진동수가 전체적으로 감소함을 확인할 수 있다.

표 3-1 유동루프의 고유진동수

모드	고유진동수(Hz)		모드	고유진동수(Hz)	
	공관	물충전		공관	물충전
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	·	·

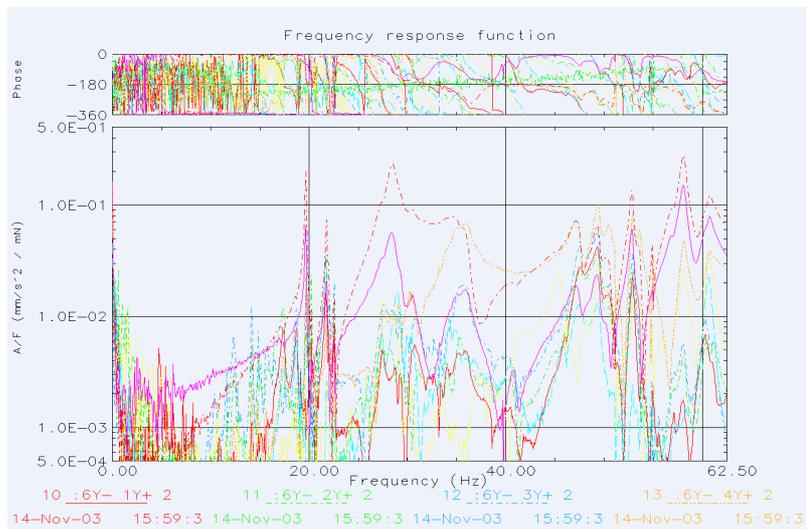


그림 3-4 주파수 응답함수(중공관)

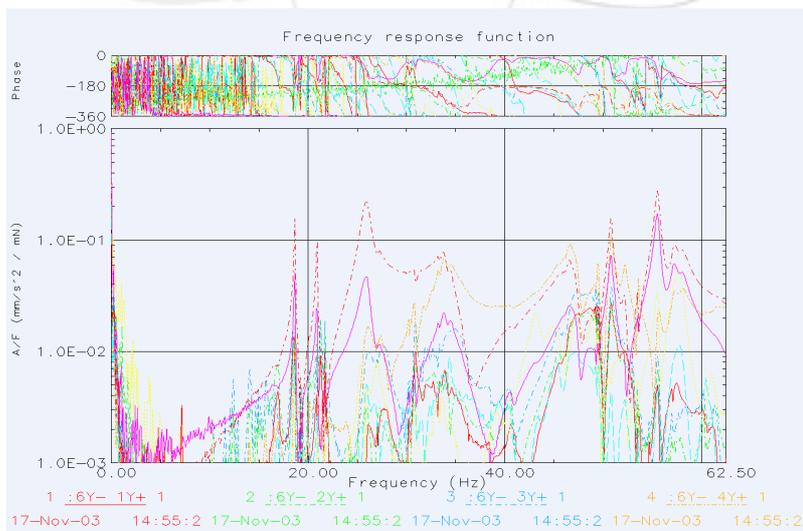
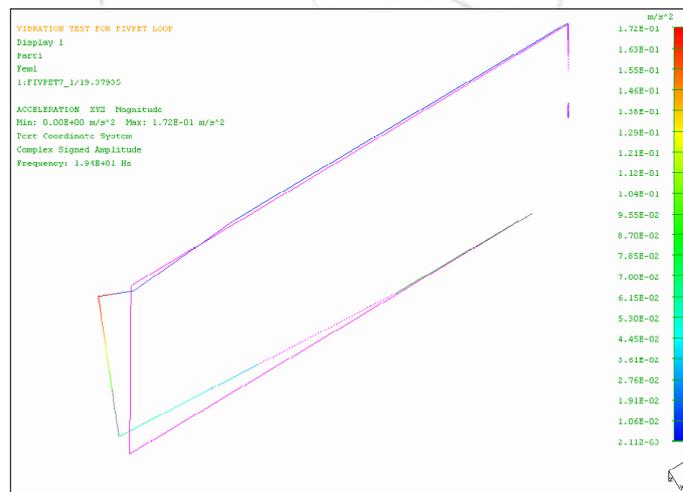


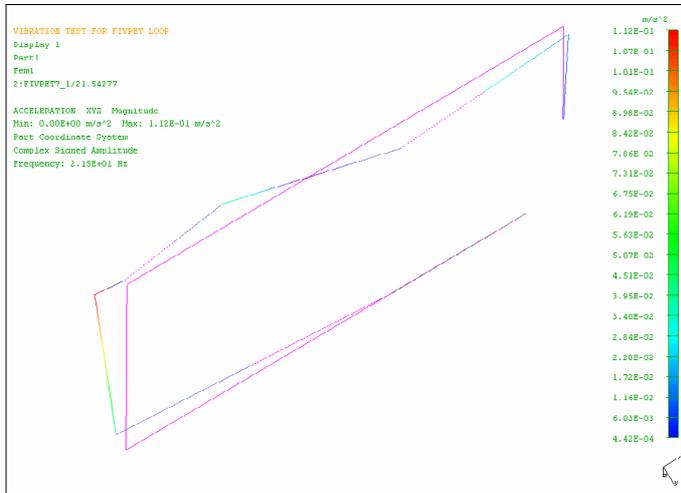
그림 3-5 주파수 응답함수(물충전)

그림 3-6과 그림 3-7은 각각 루프에 물을 채우지 않은 중공관인 경우와 물을 채운 경우의 진동모드를 나타낸다. 두 모드가 전체적으로 유사하나 물을 채운경우는 물에 의한 감쇄효과로 인하여 진동변위가 다소 축소되었다. 1차 모드는 시험관의 1차 보진동모드(길이방향으로 반파)와 4" 공급관 상류쪽 시험관 연결부의 진동변위가 지배적으로 나타나고, 6" 회수관 상류쪽의 진동변위(길이방향으로 1차 보진동모드)도 연성된다. 2차 모드는 전체적으로 1차 모드와 유사하나, 상단 6" 회수관의 진동모드가 1차 보진동모드에서 2차 보진동모드로 변화되었다. 또한 두 경우를 비교해 볼 때, 루프에 물이 채워진 경우 6" 상류의 진동변위가 상당히 축소되었음을 관찰할 수 있다. 3차 모드는 시험관의 1차 보진동모드가 지배적이며 4" 공급관 상류의 진동변위도 약하게 나타난다. 4차 모드에서는 6" 상류쪽 시험관과의 연결부위에 상당히 큰 진동변위가 나타난다. 5차 모드와 6차모드는 4차 모드의 6" 상류 시험관 연결부의 진동변위가 위상을 반대로 하여 진동변위하고, 4" 상류 시험관 연결부의 진동변위도 약하게 관찰된다. 7차 모드는 6" 상류의 진동모드가 고차모드로 변화되었고, 이후의 8차에서 9차까지의 모드는 이전의 국부모드들이 고차모드로 발달하면서 4" 공급관 상류쪽의 진동변위가 점차 증가하는 모드 형상을 나타낸다.

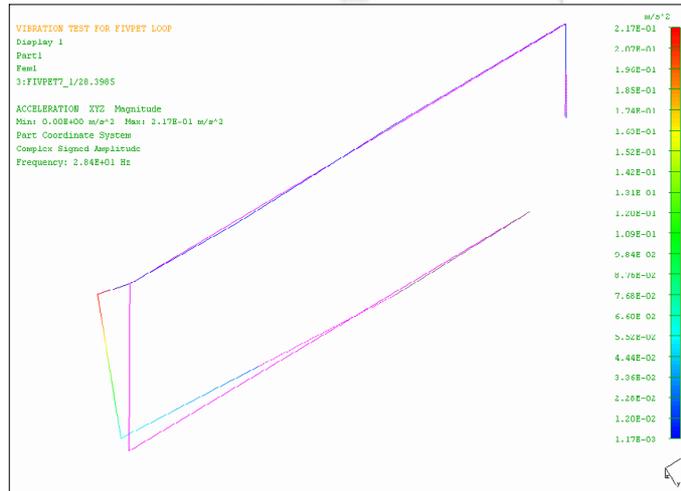
두 조건에 대한 시험모드에서 시험관의 보진동모드와 6" 상류 시험관 상단부의 진동변위가 다소 크게 나타나고, 4" 상류 공급관 쪽의 자유진동변위는 6" 회수관에 비해 작은 것으로 판단된다. 4" 하류 공급관과 6" 하류 회수관 및 그 외 지관에 대한 시험모드형상은 본 시험모델로부터 얻어낼 수 없었다.



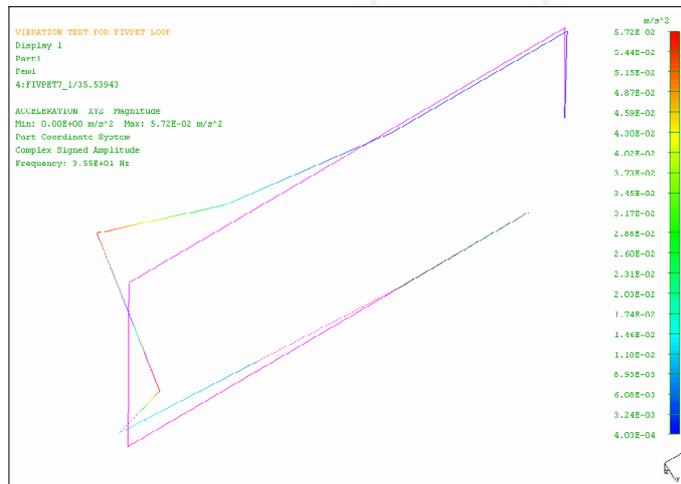
(a) 1st mode



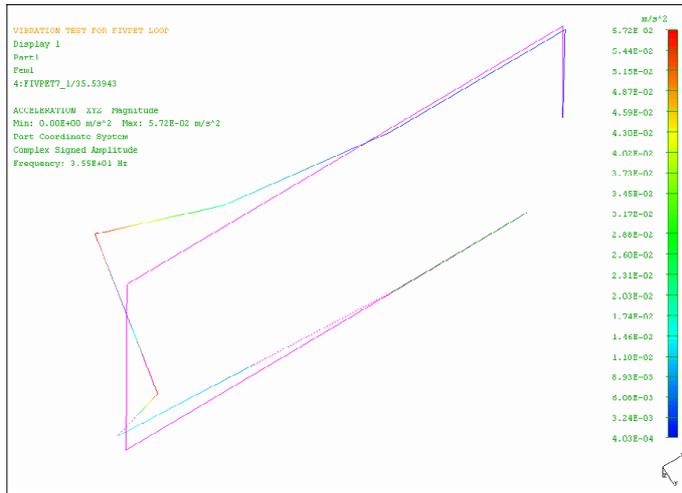
(b) 2nd mode



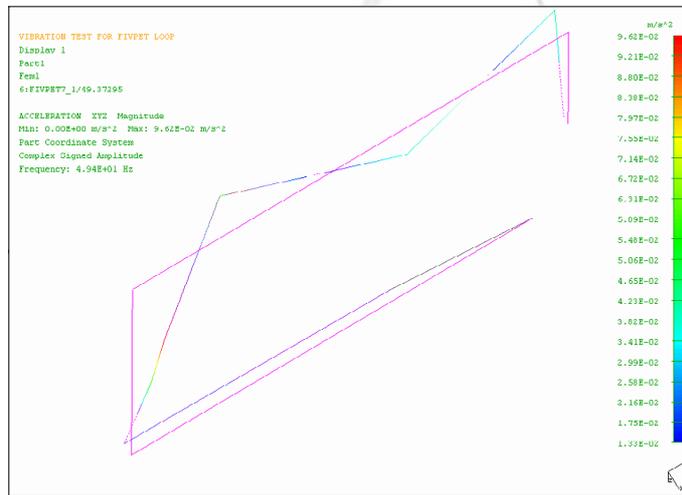
(c) 3rd mode



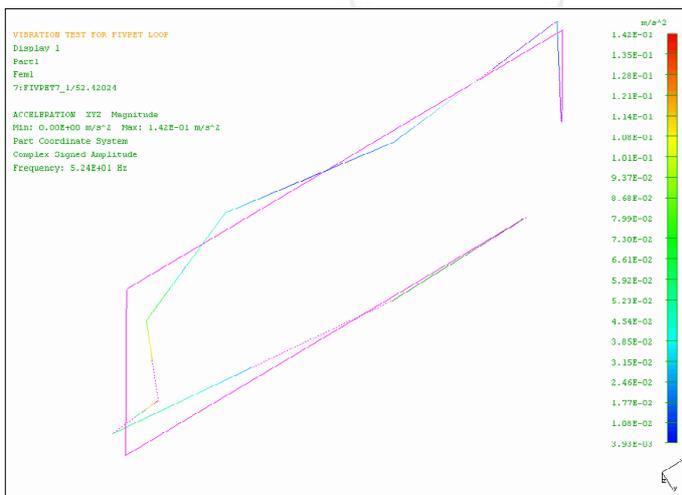
(d) 4th mode



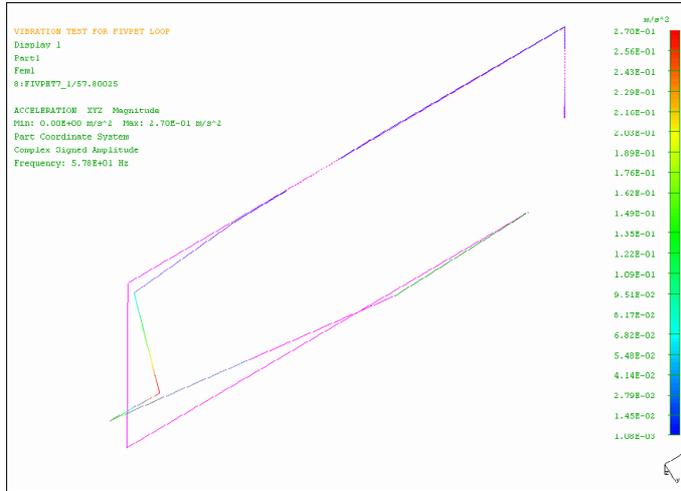
(e) 5th mode



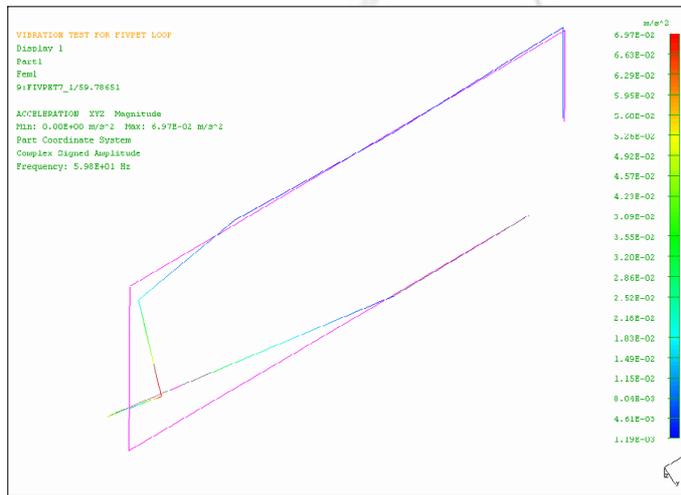
(f) 6th mode



(g) 7th mode

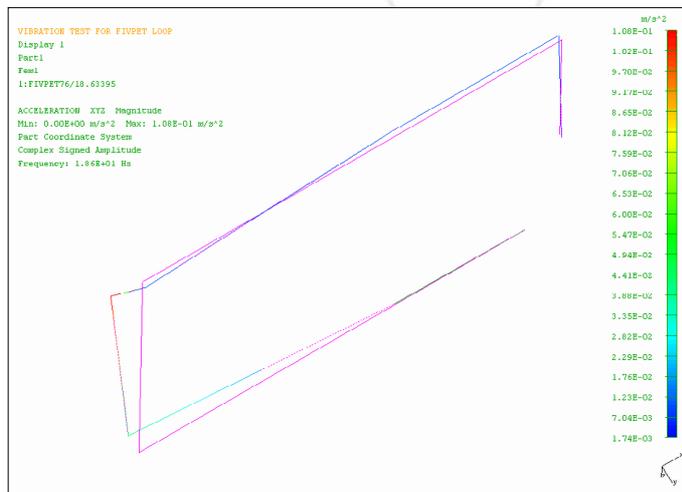


(h) 8th mode

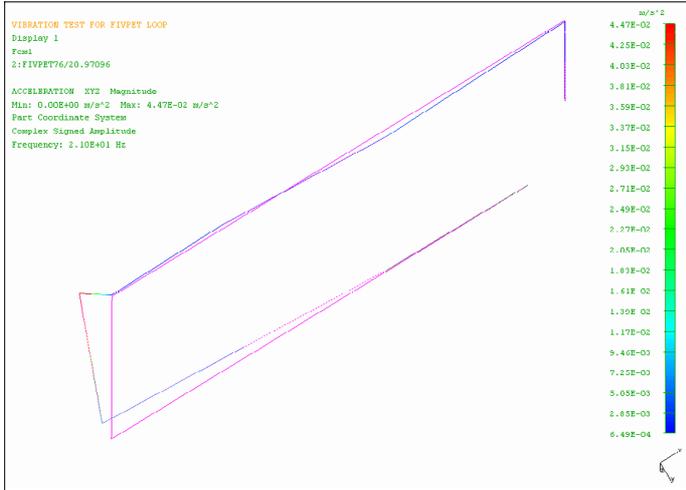


(i) 9th mode

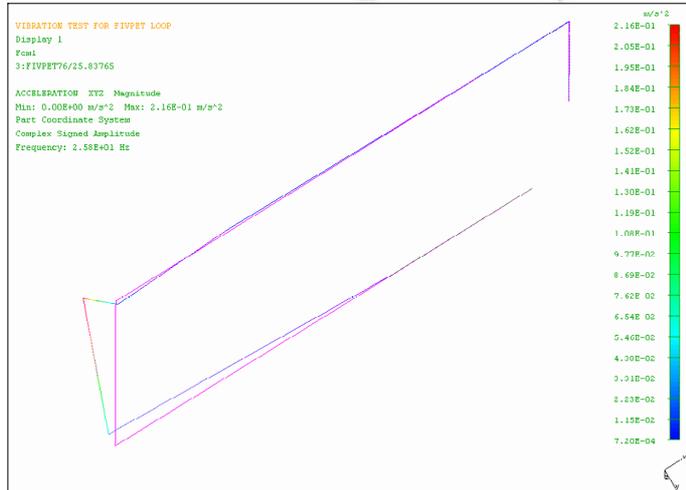
그림 3-6 루프에 물을 채우지 않은 모델의 진동 모드형상



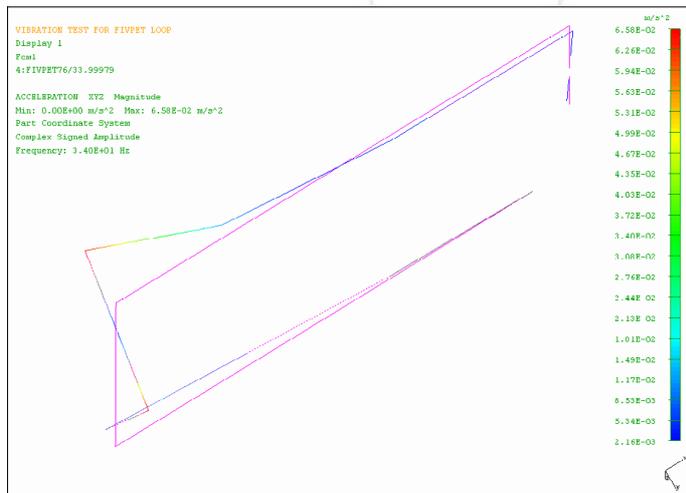
(a) 1st mode



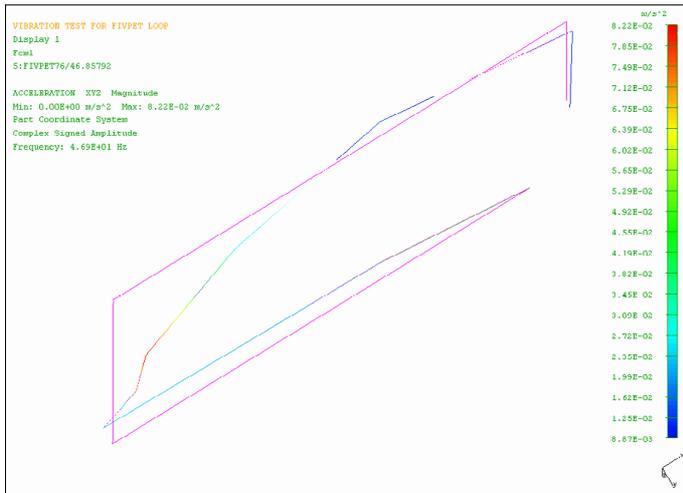
(b) 2nd mode



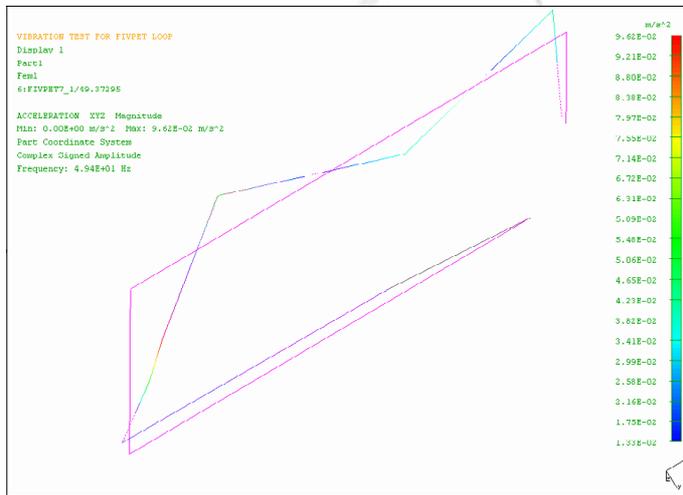
(c) 3rd mode



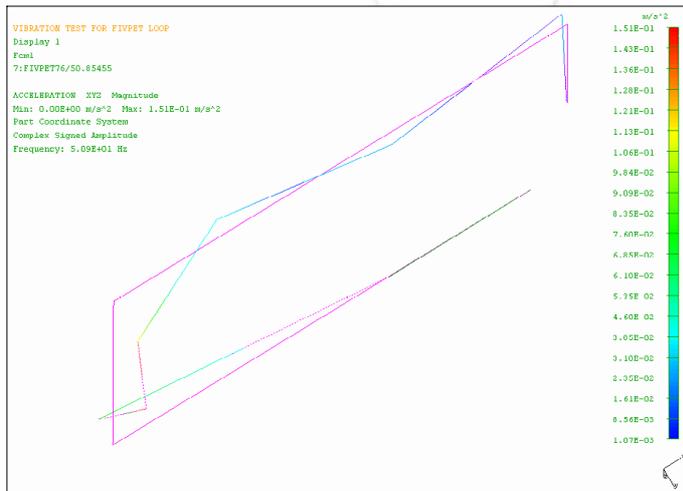
(d) 4th mode



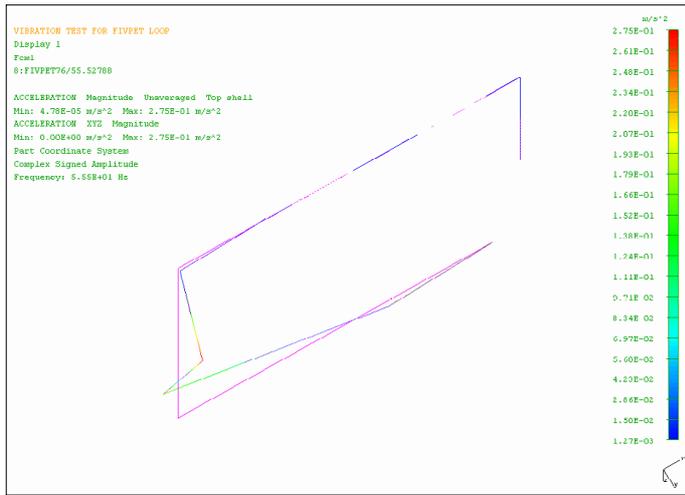
(e) 5th mode



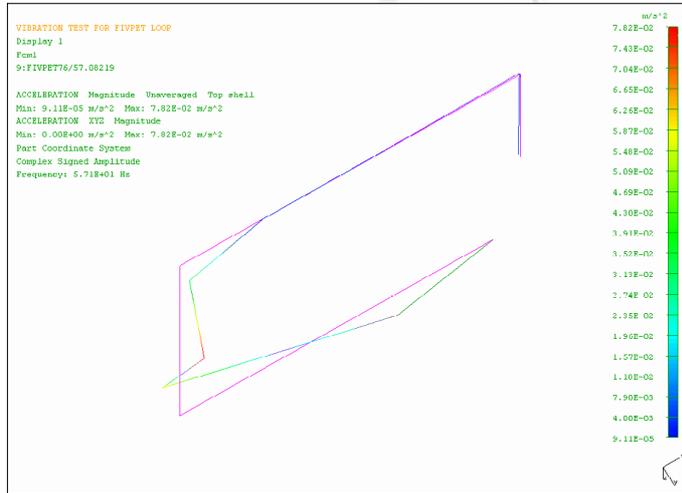
(f) 6th mode



(g) 7th mode



(h) 8th mode



(i) 9th mode

그림 3-7 루프에 물을 채운 시험모델의 진동 모드형상

## 4절 시험 및 해석결과 비교

표 4-1은 해석결과와 시험으로부터 얻어낸 유동루프(물을 채우지 않은 경우)의 진동특성을 상호비교 한 것이다. 고유진동수 및 모드형상의 유사성을 기준으로 해서 순차적으로 시험결과의 모드와 해석결과의 진동모드들을 대응시켜보았다. 비교란 대응되는 해석모드에서의 지배적인 진동변위를 갖는 배관계 구성요소를 나타낸다.

시험결과의 1차 모드는 해석결과에서의 2" 되먹임 관이나 20Hz 부근에서 몰려있는 시험관 지지봉의 국부적인 모드(local mode)일 가능성이 크지만 시험모드에서 나타난 시험관의 두드러진 진동변위가 나타나지 않는다. 시험 1차 모드를 해석결과에서의 지지봉에 의한 국부적인 진동모드로 볼 때, 시험 2차 모드는 6" 회수관 하류 쪽 진동변위가 지배적인 해석결과의 9차 모드에 대응되는 것으로 볼 수 있다. 시험 2차 모드까지의 결과는 해석결과와 크기는 1.02Hz에서 작게는 0.96Hz까지의 차이를 보이며 5%이하의 오차범위를 나타내고 있다.

표 4-1 진동 해석결과와 모달시험의 고유진동수 비교

모드	시험결과	해석결과		오차율(%)	비 고 (해석모드기준)
	고유진동수(Hz)	모드	고유진동수(Hz)		
1	19.38	1~8	20~20.4	3.1~5.1	지지봉
2	21.54	9	22.5	4.5	6" 하류
3	28.39	10~12	26.7~31.9	5.9~12.3	6" 하류, 시험관
4	35.54	14	36.5	2.6	6" 상류
5	47.44	16, 18	40.4, 41.8	11.9~14.8	연성모드
6	49.37	..	..	..	..
7	52.42	19, 20	51.9, 55.0	1~4.9	지지봉
8	57.80	21~27	56.3~56.6	2.1~2.6	지지봉
9	59.78	28, 29	57.1~59.0	1.3~4.5	시험관, 지지봉

시험 3차모드는 해석모드의 10차 이상에서 대응관계를 갖게 될 것이다. 이에 따라 시험 3차 고유진동수의 28.4Hz부근에 나타난 해석 고유진동수는 10차에서 12까지의 모드로 대략 압축된다. 해석의 10차와 11차 모드는 6" 회수관 하류의 진동변위가 큰 모드형상이다. 반면 해석 12차모드는 시험관이 주로 1차 보진동모드로 변위하는 형상을 나타내는데, 이것이 시험 3차의 모드형상과 상당부분 유사하다고 볼 수 있다. 시험 3차 모드가 해석의 10차에서 12차모드까지 대응된다고 볼 때, 시험과

해석의 차이는 1.69Hz(10차모드 일때)에서 3.5Hz(12차 모드일때)로 볼 수 있으나, 12차 모드의 대응가능성이 크므로, 백분율로 나타낸 오차는 대략 12%정도로 볼 수 있다. 6" 회수관 상류쪽의 진동변위가 두드러진 시험 4차모드는 해석의 14모드와 대응되는 것으로 볼 수 있는데, 이때 시험과 해석의 차이는 0.96Hz(2.6%)로 상당히 근소하다.

시험의 5차와 6차 모드는 대응되는 해석모드가 없는 것으로 생각된다. 다만 해석 결과의 고유진동수 40Hz 이상 50Hz 미만의 모드 중 16차와 18차 모드에서 6" 상류 및 4" 상류의 진동변위가 다소 나타나는 것으로 볼 때 대응가능성 다소 있을 것으로 보인다. 시험 7차 이상의 모드에서는 모드형상과는 상관없이 고유진동수의 유사성만을 근거로 해석모드와의 대응관계를 살펴보았다. 해석의 19차에서 27차까지의 모드는 지지봉의 국부적인 진동모드이다. 이후로 28차에서 29차는 지지봉과 시험관이 함께 진동변위하는 모드형상을 갖게 된다.

모달시험의 경우 시험조건이나 해당 시험체의 특성에 따라 얻어낼 수 있는 진동모드가 제한되기 때문에, 해석으로부터 얻어낸 진동모드 전체를 시험으로부터 얻어낼 수 없다. 따라서 시험과 해석의 대응관계는 일부 모드에서만 나타나게 된다. 또한 시험모델이 전체 루프 중 주배관의 일부와 시험관만을 포함하므로, 지관 및 배관 하류쪽, 그리고 지지봉에 대한 진동모드는 해석결과에만 의존해야 했다.

시험의 9차까지의 모드와 해석결과를 비교해본 결과, 4차까지 모드 유사성을 갖는 대응모드들이 관찰되나 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해진다. 4차까지의 시험모드를 해석모드에서 비교적 작은 오차범위로 잡아내고 있으며, 대응되는 해석결과에서 전체적으로 고유진동수가 다소 크게 나타난 것으로 볼 때, 해석에 있어서의 지지강성이 다소 높게 평가된 듯 하다.

또한 시험과 해석결과의 모드에 있어서, 경우에 따라 국부적인 지배모드가 나타나기도 하지만 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다. 특별히 모달시험에서 시험관의 진동모드는 보진동 모드를 유지하고 저차모드에서의 6" 회수관의 진동변위가 하단 4" 공급관의 진동변위에 비해 큰 것으로 볼 때, 유동시험 시 6" 상류 쪽의 흔들림이 4" 공급관 보다 클 것으로 생각된다.

## 5절 지지성능 평가 및 개선

### 1. 6" 회수관 하류 지지부

루프의 자유진동 해석결과, 1차에서 3차까지의 저차 진동모드에서 6" 회수관 하류의 진동변위가 상당히 큰 것으로 파악되었다. 현재의 지지조건 만으로 회수관의 하류 측 배관영역을 지지할 경우 순환용수의 유동 및 펌프구동과 같은 외부 가진원이 존재할 때, 회수관 하류의 상당히 큰 진동변위가 예상된다. 이를 개선하기 위해 루프의 저수조 아래에 있는 회수관 굴곡부에(해석모델에서의 6" 회수관 하류) 그림 5-1에서와 같이 기준좌표의 x-y방향을 향하는 U자형 고정쇠 지지부 하나를 포함시켰다. 그림 5-1은 U 고정쇠를 추가한 경우와 이전의 해석 모델을 비교한 것이다. 표 5-1은 6" 회수관에 U 고정쇠 지지부 하나를 추가시킨 모델의 10차까지의 고유진동수와 지지봉 만이 구축된 이전의 해석결과를 비교한 것이다.

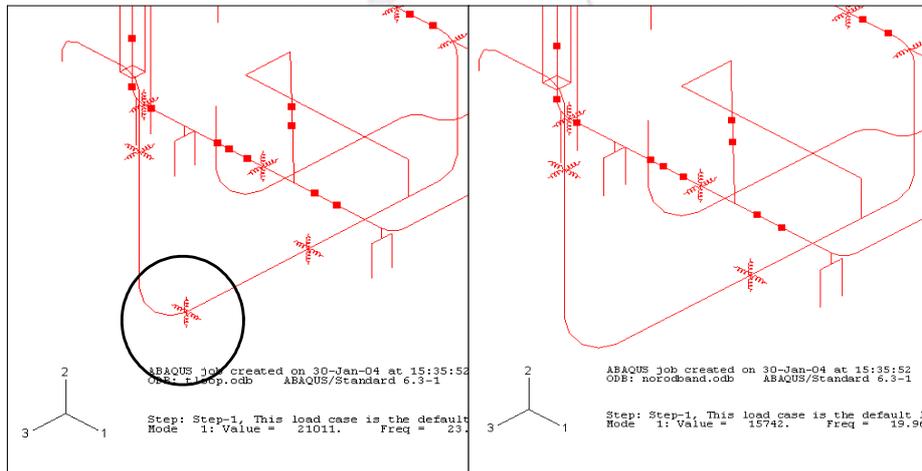


그림 5-1 6" 회수관 하류에 U자형 고정쇠를 포함시킨 모델(왼쪽)

표 5-1 6" 회수관 하류에 U지지부를 추가한 루프의 고유진동수

기존 해석 결과(지지봉 구축)				U자형 고정쇠를 추가한 모델			
모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)
1	22.4	6	34.6	1	23.1	6	35.7
2	26.0	7	36.5	2	27.5	7	37.3
3	27.5	8	40.4	3	31.8	8	40.7
4	31.8	9	40.7	4	34.2	9	41.4
5	34.2	10	41.8	5	34.6	10	46.5

U지지부가 추가된 모델의 1차와 2차 고유진동수는 추가하기 전 1·2차 모드에 대해 각각 2.9%와 5.5%로 상승하였다. 6" 회수관 하류의 x방향 진동변위에 상응하는 이전의 2차모드는 U지지부가 추가됨에 따라 없어진 것으로 보인다. 다만, 그림 5-2에서와 같이 x 방향 진동변위는 상당히 감소되었으나 z 방향으로의 진동변위가 여전히 크다.

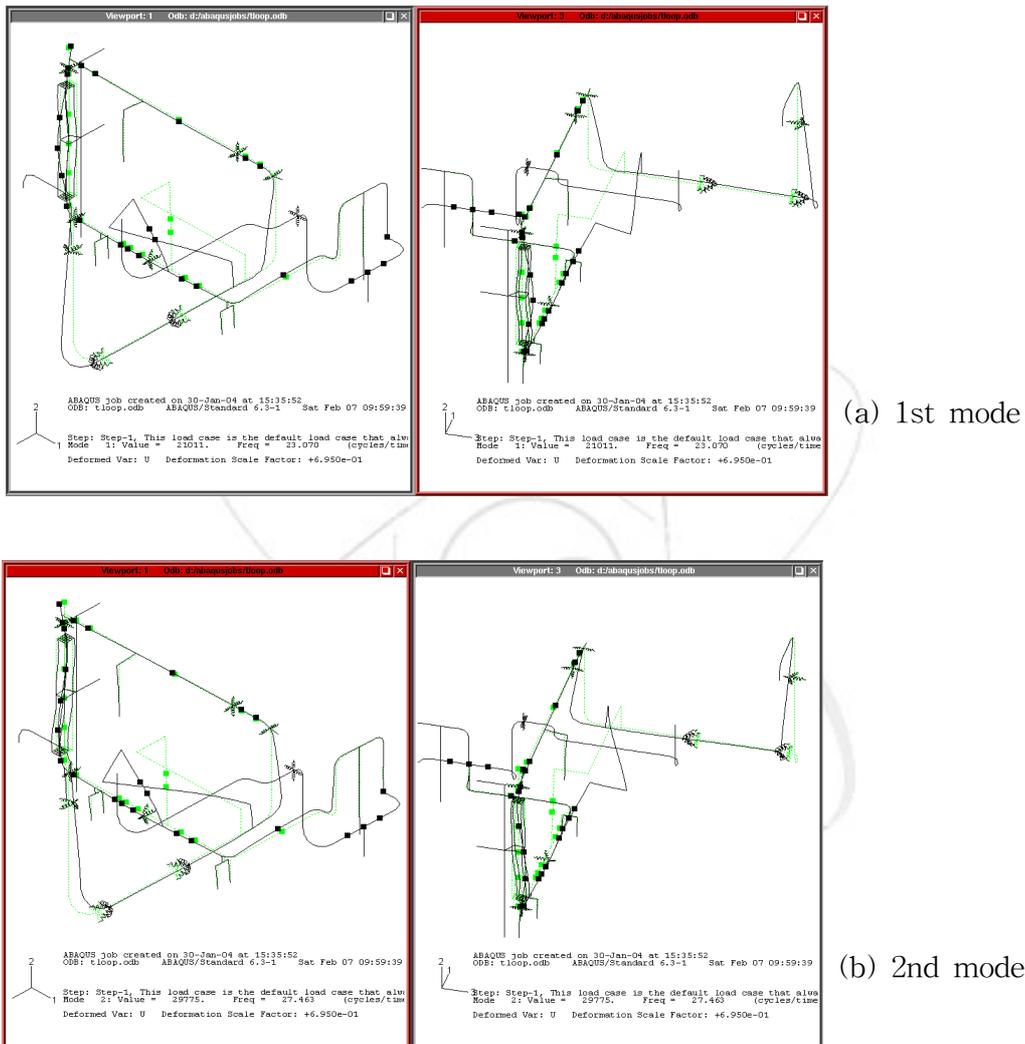


그림 5-2 6" 회수관에 U지지부를 추가한 모델의 진동 모드형상

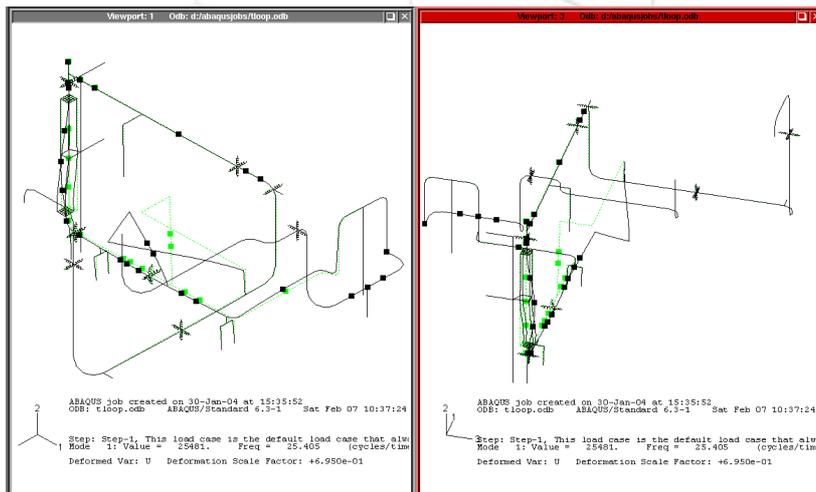
z방향 진동변위까지 구속시키기 위해서는 U자형 고정쇠를 이용하기 보다는, 벽쪽으로 용접이음을 통해 구속시키는 것이 유리할 것이다. 6" 회수관 하류를 상류 상단의 용접이음과 같은 방식으로 구속하게 되면, 아래의 그림에서 제시하겠지만 6" 회수관 하류의 z방향 진동변위를 상당부분 억제 시킬 수 있다. 표 5-2는 용접이음을 이용하여 6" 회수관 하류를 구속한 모델에 대한 10차까지의 고유진동수를 이전

의 지지봉 구속 모델 및 6" 회수관에 U 지지부 하나만을 추가한 모델에 대한 고유진동수와 비교한 것이다. 지지조건이 보수화됨에 따라 지지강성의 증가로 인하여 기본 고유진동수가 조금씩 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

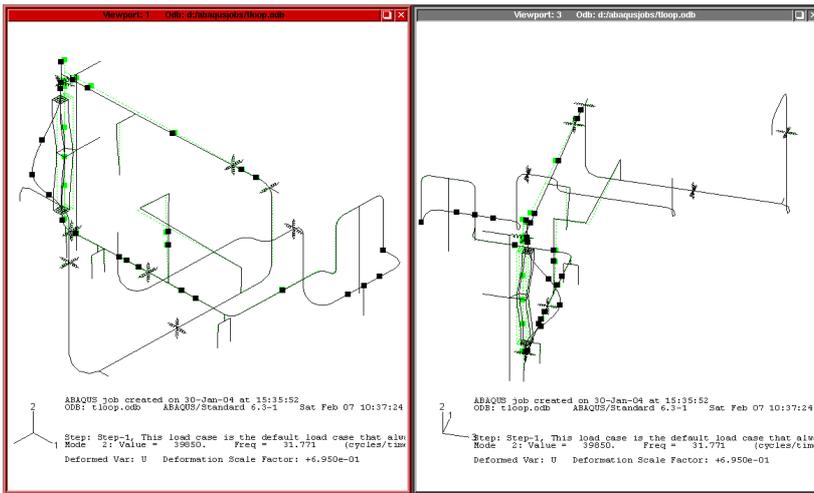
표 5-2 6" 회수관 하류에 용접이음을 추가한 경우의 고유진동수 비교

기존 해석 결과				U자형 고정쇠를 추가한 변경된 모델				용접이음을 추가한 모델			
모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)
1	22.4	6	34.6	1	23.1	6	35.7	1	25.4	6	38.9
2	26.0	7	36.5	2	27.5	7	37.3	2	31.8	7	40.7
3	27.5	8	40.4	3	31.8	8	40.7	3	34.2	8	41.5
4	31.8	9	40.7	4	34.2	9	41.4	4	34.6	9	46.5
5	34.2	10	41.8	5	34.6	10	46.5	5	36.3	10	56.3

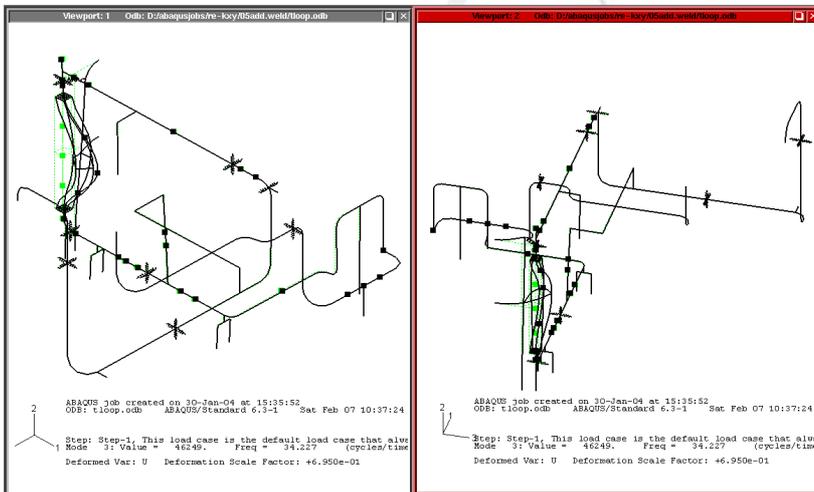
그림 5-3은 6" 회수관 하류를 용접이음을 통해 벽에 추가 구속한 모델의 5차까지의 진동모드를 도시하였다. 앞서 언급했던 바대로 추가구속 전 6" 회수관 하류에서 나타나던 x방향 및 z방향으로의 큰 진동변위가 없어졌다.



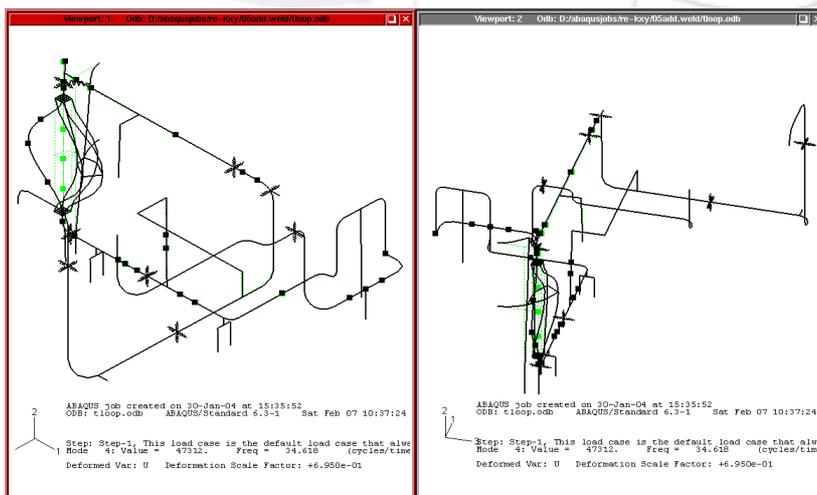
(a) 1st mode



(b) 2nd mode



(c) 3rd mode



(d) 4th mode

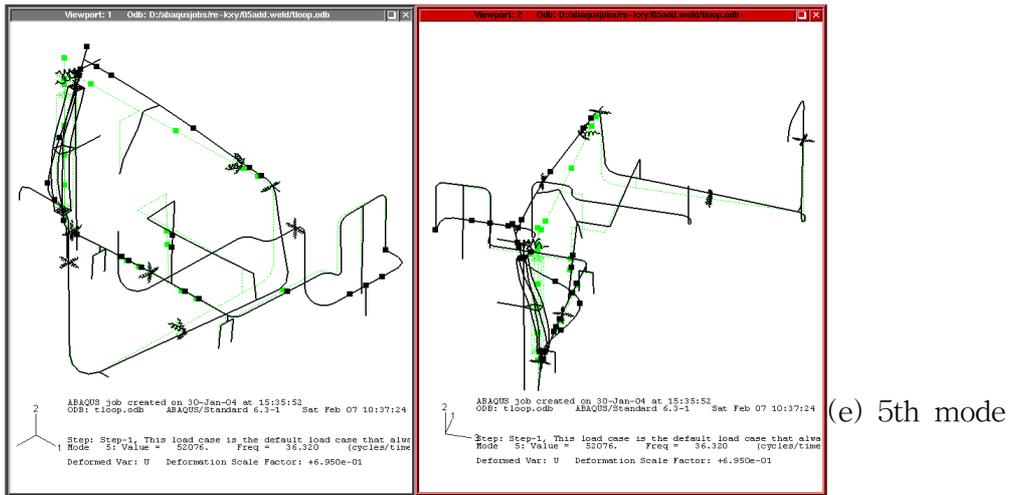


그림 5-3 6" 회수관을 용접이음으로 벽에 고정된 모델의 모드형상

### 2. 3" 우회관 지지부

6" 회수관 하류를 용접이음을 통해 벽에 고정시킨 모델의 기본진동수에 대한 모드형상에서 3" 배관이 루프 전면으로 기울어지는 진동변위를 나타내고 있다. 3" 우회관 지지조건의 특성상 아래쪽 4" 공급관의 진동변위에 종속되어 3" 관의 움직임이 다소 과장되어 나타날 가능성도 있다. 실제로 공급관을 통해 시험관에 유입되는 유량을 수동으로 조절시켜 회수관으로 우회시키는 3" 우회관은 아무런 지지조건 없이 자체의 강성으로만 4" 공급관과 6" 회수관에 묶여있다. 이 때문에 3" 우회관에도 적절한 지지조건의 추가가 요망된다. 그림 5-4는 3" 우회관 중심에 U 고정쇠 지지부 하나를 포함시킨 모델의 그림을 이전의 모델과 비교한 것이다.

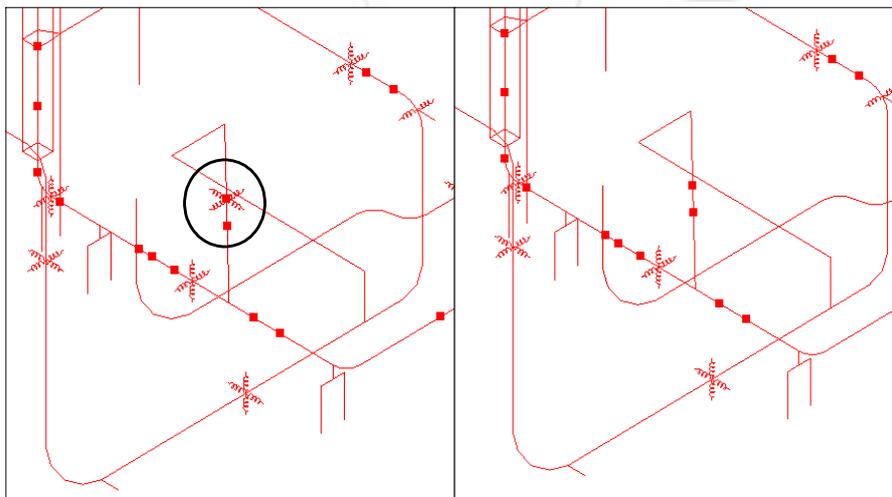
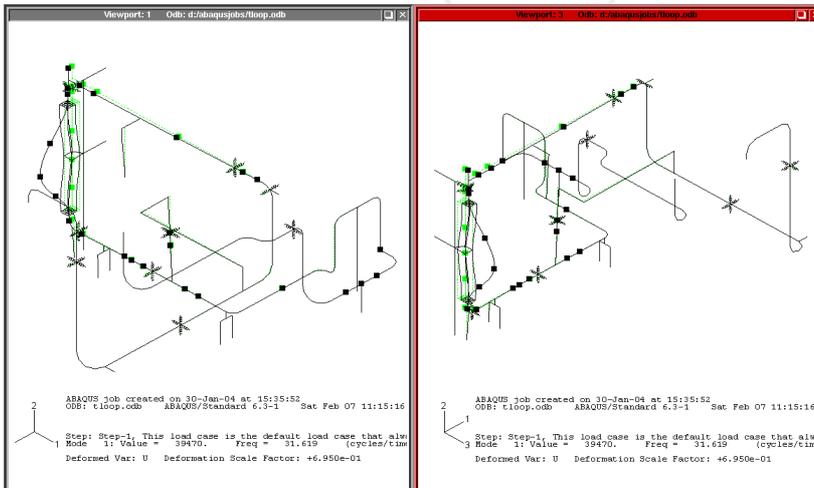


그림 5-4 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델

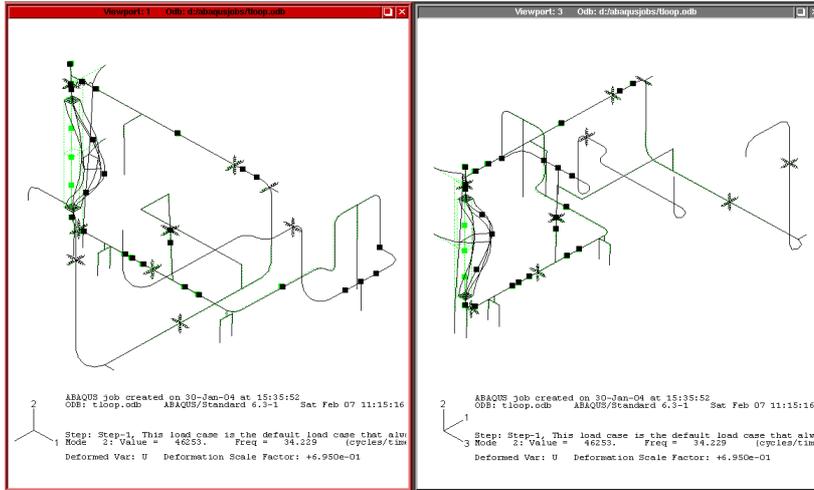
표 5-3 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 고유진동수 비교

기존 해석 결과(지지붕구속)				6" 회수관 U자형 고정쇠 추가			
모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)
1	22.4	6	34.6	1	23.1	6	35.7
2	26.0	7	36.5	2	27.5	7	37.3
3	27.5	8	40.4	3	31.8	8	40.7
4	31.8	9	40.7	4	34.2	9	41.4
5	34.2	10	41.8	5	34.6	10	46.5
6" 회수관 용접이음 추가				3" 우회관 U지지부 추가			
모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)	모드	고유진동수 (Hz)
1	25.4	6	38.9	1	31.6	6	40.7
2	31.8	7	40.7	2	34.2	7	41.1
3	34.2	8	41.5	3	34.6	8	41.9
4	34.6	9	46.5	4	36.5	9	46.5
5	36.3	10	56.3	5	39.7	10	56.3

표 5-3은 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 고유진동수를 이전의 결과와 비교한 것이다. 기본진동수가 6" 회수관 하류를 용접이음으로 고정한 모델의 결과보다 6.2Hz(19.6%)증가한 31.6Hz로 나타났다. 그림 5-5는 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 2차까지의 진동모드 형상을 나타낸다. U지지부 하나만 추가하여도 3" 우회관의 진동변위는 충분히 억제시킬 수 있다.



(a) 1st mode



(b) 2nd mode

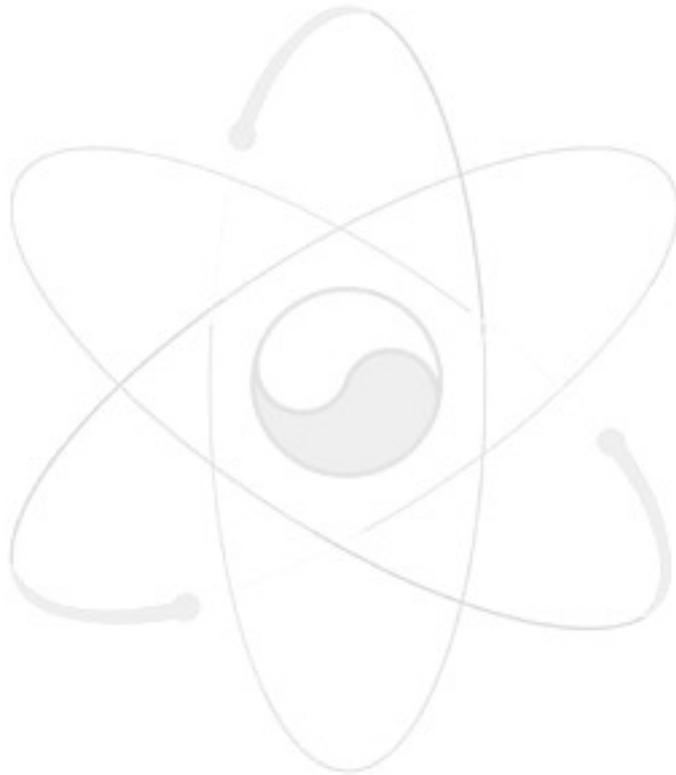
그림 5-5 3" 우회관에 U지지부를 추가한 모델의 진동모드 형상

## 제 3 장 결 론

본 과제에서는 유체유발 진동시험용 유동루프의 자유진동특성을 얻기 위한 유한 요소 해석과 진동시험을 수행하였으며, 해석결과로부터 얻어진 진동모드로부터 루프 지지구조물 및 고정조건의 지지성능을 평가해보고 개선방향을 모색해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 루프의 기본 고유진동수 20Hz 부근의 모드는 상대적으로 강성이 작은 시험관 지지봉에 의한 국부적인 진동모드일 것으로 판단된다. 지지봉의 진동모드는 몇 개씩 짝을 이루며 대칭적으로 방향을 바꾸어 가면서 나타난다. 즉, 1차와 2차 모드는 각각 x와 z방향으로 마치 하나의 집합체처럼 묶여서 같은 위상으로 움직이는 보 진동모드이며, 3차이상의 모드에서는 날개의 지지봉들에 대한 대칭적인 움직임과 함께 비틀림 진동모드이다.
- (2) 시험관 지지봉에 적절한 구속조건을 추가시킬 경우, 루프의 기본진동수 20Hz 부근의 국부적인 지지봉 모드들이 사라지고, 변경된 모델의 기본진동수는 22.4Hz이며, 모드형상은 6" 회수관 하류쪽 진동변위가 지배적이다. 3차까지의 모드에서 6" 회수관 하류쪽 배관의 진동변위가 상당히 크게 나타났으며, 시험관과 지지봉의 진동변위도 다소 연성되어 나타난다. 유동루프 4차(31.9Hz)에서 6차(34.6Hz)까지는 시험관의 진동이 지배적인 모드이다.
- (3) 루프의 진동특성 시험으로 부터 60Hz 범위 이내에 9개의 진동모드를 얻어낼 수 있었다. 물을 채우지 않은 중공관의 경우와 물을 채운 경우, 두 가지 시험조건에 대한 기본진동수는 19.4Hz 및 18.6Hz를 보였고, 루프에 물이 충전되어 있는 경우는 유체에 의한 부가질량효과로 인하여 고유진동수와 모드형상이 전체적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 시험 1차 모드는 시험관의 1차 보진동모드와 4" 공급관 상류의 진동변위가 지배적으로 나타나고, 6" 회수관 상류쪽의 진동변위도 연성된다.
- (4) 중공관 루프 시험결과, 처음 4개 모드에 대한 해석결과와의 평균적인 차이는 4%에서 6%정도로 잘 일치하였고, 두 방법에 의한 모드 형상들도 유사함을 확인할 수 있었다. 4차까지의 저차모드에서는 대응모드들이 관찰되나 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해 진다. 또한 모달시험과 해석결과의 모드에 있어서, 경우에 따라 국부적인 지배모드가 나타나기도 하지만 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다. 시험결과에 비해 해석결과의 고유진동수가 다소 크게 나타난 것으로 볼 때, 해석에 있어서의 지지강성이 다소 높게 평가된 것으로 사료된다.

- (5) 해석결과로 얻어진 진동모드 형상으로부터, 전체적인 루프의 지지조건을 평가해 본 결과, 6" 회수관 하류쪽의 진동변위를 구속시킬 수 있는 추가적인 지지구조물의 설치가 요망되며, 이때 고정조건을 U자형 고정쇠로 하기보다는 용접이음과 같은 큰 강성으로 잡아줄 필요가 있다. 3" 우회관의 진동변위는 U자형 고정쇠를 추가하는 것으로 억제시킬 수 있을 것이다.
- (6) 개발된 유동루프 자유진동 특성에 관한 유한요소 해석모델은 향후 루프의 설계변경이나 시험조건의 변화에 따른 영향성 분석에 활용될 수 있을 것이다.



## 참 고 문 헌

- [1] 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호, “5×5 부분 핵연료 집합체의 유체유발 진동시험장치 개발”, 2002년도 한국원자력 학회 추계학술대회 논문집
- [2] H. S. Kang, K. H Yoon, H. K Kim, K. N, Song, “Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure”, Journal of KNS, Vol. 33, No.1, 2001
- [3] 강홍석 외 3인, “경수로용 부분 핵연료집합체(5×5)의 진동해석을 위한 유한요소 모델 개발”, KAERI/TR-2008/2002, 한국원자력 연구소
- [4] P. R. Smith, T. J. Van Laan, “Piping and Pipe Support Systems; Design and Engineering”, McGraw-Hill, 1987
- [5] 최명환 외 4인, “지지격자로 지지된 연료봉의 진동시험 절차보고서”, KAERI/TR-2255/2002, 한국원자력연구소, 2002
- [6] D. J. Ewins, “Modal Testing Theory and Practice”, Bruel & Kjaer Korea Ltd, Research Studies Press, 1985
- [7] ABAQUS Korea Corporation, “ABAQUS Ver.6.4 User's Manual”, 2003
- [8] MTS Korea Corporation, “Exploring I-DEAS Test”, User's manual, 1999

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-2734/2004					
제목 / 부제		유체유발진동 시험용 유동루프의 진동특성 및 지지성능 평가			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		이강희 (경수로연료개발부 핵연료설계기술개발팀)			
연구자 및 부서명		강홍석, 윤경호, 송기남 (경수로연료개발부 핵연료설계기술개발)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004
페이지	54 p.	도표	있음( ○ ), 없음( )	크기	21x29.7Cm.
참고사항	고성능 지지격자 개발과제('04 신형핵연료 개발과제)				
비밀여부	공개( ○ ), 대외비( ), -- 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄내외)		<p>본 과제에서는 경수로용 부분 핵연료 집합체의 유체유발 진동시험용 유동루프의 자유진동특성을 얻기 위한 유한요소 해석과 진동시험을 수행하였으며, 해석결과로부터 얻어진 진동모드로부터 루프 지지구조물 및 고정조건의 지지성능을 평가해보고 개선방향을 모색해 보았다. 유한요소 해석 모델의 개발에서 지지구조물을 포함한 시험관 조립체와 배관은 3차원 빔요소로, 밸브와 플랜지는 질량요소로 모델링하였고, 배관 지지조건의 강성은 수치적인 해석으로 얻은 결과를 적용하였다. 범용유한요소 해석코드인 ABAQUS를 이용하여 수행된 해석 결과는 모달시험에 의한 시험결과와 비교·분석되었다. 모달시험은 가속도계와 충격해머를 이용하였고, 시험 신호의 분석을 위하여 I-DEAS의 시험모듈인 TDAS를 사용하였다. 모달시험과 해석모드의 비교로부터 1차에서 4차까지의 저차모드에서 유사성을 갖는 대응모드들이 나타나지만 4차 이상의 고차모드로 갈수록 유사성이 희박해 지며, 모드형상에 있어서 전체적으로 연성되는 특징을 가지고 있다. 구속조건을 추가하여 지지봉의 국부적인 모드를 제거시킨 유동루프 배관계의 저차 진동모드인 1차(22.4Hz)에서 3차(27.5Hz)는 6" 회수관 하류의 진동이 지배적인 모드이며, 4차(31.8Hz)에서 6(34.6Hz)차는 시험관의 진동모드이다. 또한 배관계의 지지조건을 적절히 변경하거나 추가하여 시험루프의 원하지 않는 진동모드를 제거시키거나 억제할 수 있음을 알 수 있었다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)		유체유발진동, 유체유발진동 시험용 유동루프, 경수로용 부분 핵연료집합체, 자유진동, 유한요소법, 모달시험, 고유진동수, 모드형상, 지지성능			

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-2734/2004							
Title / Subtitle		Free Vibration Characteristics of the FIV test loop and Evaluation of the supporting performance.					
Project Manager and Department (or Main Author)		Lee, Kang-Hee(PWR Fuel Development)					
Researcher and Department		Kang, Heung-Seok, Yoon, Kyung-Ho, Song, Kee-Nam, (PWR Fuel Development Team)					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI		Publication Date	2004. 3	
Page	54 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ( )		Size	21×29 Cm.	
Note							
Open	Open(○), Closed( )		Report Type		Technical Report		
Classified	Restricted( ), ___Class Document						
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>For the high performance fuel development research of PWR fuel, a test loop is designed and constructed to evaluate the performances of the spacer grid developed. The test loop is called FIVPET(Flow-Induced Vibration and Pressure drop Evaluation Test loop). The performance test of the space grids will be carried out with the 5×5 rod bundle that consists of 23 dummy rods, 2 guide tubes and 5 spacer grids. In this report, the vibration characteristics of the FIV test loop are investigated by the Finite Element(FE) analysis and the modal test. Also, the supporting performances of the current pipe supports and fixtures are checked by analysis results and improved. 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. By adding or changing some supporting conditions, unwanted vibration modes of the loop can be eliminated or restricted.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Fluid Induced Vibration, FIV test loop, PWR Partial Fuel Assembly, Free Vibration, Finite Element Analysis, Modal Testing, Natural Frequency, Mode Shape, Supporting Performance					