

# 발전소 복수기 불세정계통에 의한 입형펌프 진동과 대책

°김연환\*, 구재량\*, 배용채\*, 이현\*, 이영신\*\*

## Vibration Phenomena between Condensate Vertical Pump and Condenser Debris system in Power Plant

Yeon-Whan Kim, Jae-Rayng Goo, Yong-Chae Bae, Hyun Lee, Young-Shin Lee

### Abstract

Vertical canned pumps are usually applied in the power plant to transport fluids that the available suction pressure is low at the condensate system and the circulating-water system. The top of the motor driver is 5.5m above the base and the barrel and drop column extend even further below the ground. While this size and configuration may produce an efficient pumping system, it also introduces several dynamic problems which must be considered in order to obtain a reliable operation. The main problem is that the vibrational mode of the long flexible cantilever structure above the ground exist near the operational characteristics of the condensate debris system. This system's trouble has been showed at 2,086 hp condensate water loading pumps in a nuclear power plant.

### 1. 서론

증기터빈을 적용하는 대표적 발전소의 열역학적 사이클은 랭킨사이클이다. 이 사이클을 구성하는 주요 기기는 급수펌프, 보일러, 터빈-발전기, 복수기 또는 냉각탑, 열교환기 등이 된다.

특히, 발전소 복수시스템에서 대표적으로 적용되는 냉각설비는 표면식 복수기이며 터빈을 통과한 증기를 냉각시켜 복수 화 시키는 역할을 한다. 복수기의 튜브 측으로는 해수순환수펌프를 통과한 차가운 해수(sea water)가 흐르고 헬측의 증기는 에너지를 잃어버리면서 복수(condensate water)로 된다. 이때 그 복수는 원심형 입형펌프를 통하여 급수계통으로 이송된다. 튜브 측을 흐르는 해수는 각종 부유물질이 포함하고 있어 오랜 시간 사용하면 해수가 흐르는 튜브 내면이 오염 되어 열교환 능력을 상실하기 때문에 튜브내면을 주기적으로 청소하게된다. 불 세정 설비는 튜브 직경에 해당하는 불을 통과시켜 튜브 내면을 청소하는 장치이다.

본 논문에서 기술된 양 계통 사이에서 발생된 고 진동현상은 최근에 건설된 발전소의 사례로서 시운전이후 부분부하운전 및 정상 운전 중 특이한 원인 없이 복수를 급수계통에 이송해주는 복수 입형 펌프에서 과도한 진동이 발생되었다.

일반적으로 복수 입형 펌프에서의 고 진동 원인은 모터와 펌프의 구조 공진, 중간 축의 내부마찰에 의한 휘둘림 또는 작동유체에 잠긴 베어링에서의 불안정 현상 등에 의한 것으로 알려져 있다. 첫 번째는 가진원과 펌프 상부에 설치된 모터지지대의 고유진동수와 공진 하는 경우로서 가진원은 모터의 회전수, 주변 기기에서 발생하는 것이 일반적이다. 후자의 두 경우는 주로 작동유체 속에서 작동하는 베어링의 형태에 의하여 결정되는 것으로 펌프의 회전특성이 불안정하여 발생하는 경우이다. 이런 경우에는 베어링을 적절히 선택하여 교체함으로써 문제를 해결하게된다.

복수 입형 펌프에서 진동이 발생될 때 현장에서 복수기의 불 세정 계통이 운전될 때 불 세정 배관에 떨림이 있고 동시에 복수배관 및 복수 입형 펌프의 흔들림이 자주 목격되었다. 그러나 두 계통은

\* 한전 전력연구원

\*\* 충남대학교

서로 분리되어 있어 서로에게 영향을 줄 가능성은 적은 것으로 판단되었다. 단, 양 계통의 배관 지지 장치가 1개 지점에서 동일 구조물에 설치되어 있는 것 외에는 연결 가능성이 없는 것으로 판단되었다.

## 2. 복수 입형 펌프의 현황

표 1은 입형 펌프의 기본사양이다. 펌프의 크기는 베이스에서 상부 모터 끝단까지 5.5m, 하부 길이가 6.6m, 모터 무게는 8.3ton(전체: 25.1ton)로서 각 호기마다 2 대의 복수펌프가 설치되어 있다. 주로 공진이 문제가 되는 이유는 펌프 상부에 무거운 모터가 설치됨으로서 고유진동수가 낮아져 모터의 회전수와 공진 될 소지가 많은 것이 일반적이다. 입형 펌프는 수평펌프와는 다르게 모터지대 및 각 플랜지 부위의 연결상태에 따른 강성변화에 따라 고유진동 거동이 민감하게 변하는 경향이 많다.

표 1. 펌프기본사양

Pump Flow	26,300 Kg/h	총 수두	174 m
NPSHR	4.5 m	모터 무게	8,300 Kg
모터 마력	2,086 h.p	입구 단 Pr	21 kPa
Pump rating	893 rpm	토출 단 Pr	1,717 kPa

발전소의 복수 입형 펌프 제작자 제공 진동허용치는 8.26mm/s, o-p 이내이나 발전소 시운전 이후 설정치를 벗어나 14mm/s, o-p 이상의 고 진동을 자주 나타냈으며, 수 차례의 진동 경보가 전 부하 운전 상태에서 계속해서 나타나기도 하였다. 특히하게도 운전되지 않는 펌프의 진동경보도 자주 발생되었다. 따라서, 발전소는 고 진동이 발생하는 복수 입형 펌프의 설계 및 제작된 상태를 검토하고 제작사에 반출하여 정밀점검하고 베어링, 축, 모터 등 각부의 문제점을 정비하였으나 펌프의 고 진동 현상이 비주기적으로 반복되는 경향을 보였다. 특히, 펌프 근처의 복수기 불 세정 설비인 데브리스 필터(Debris Filter)를 운전할 때 고 진동 상황이 자주 나타났고 데브리스 필터 전동밸브가 닫히는 순간 과도진동이 사라지는 경향이 자주 목격되었다. 특히, 정지 중에 있는 입형 펌프의 경우도 경보 전 최대 0.3cm/s, o-p 진동(그림 2참조)이 있었으나 경보시 그림 1처럼 제어실의 설정치

를 초과하는 진동레벨을 나타내었다.

그림 2에서보면 정지중인 펌프도 12.5Hz 성분으로 진동을 하는 것을 알 수 있다. 운전중인 펌프의 경우는 정상 운전시 정상조건에서 0.4cm/s, o-p 이었다.

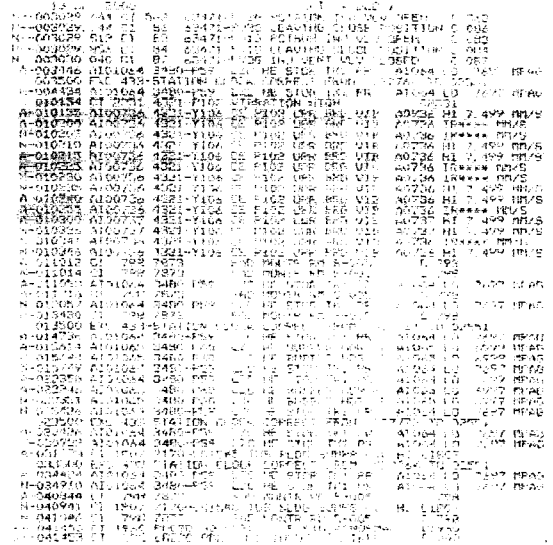


그림 1. 복수 입형 펌프의 진동 추이

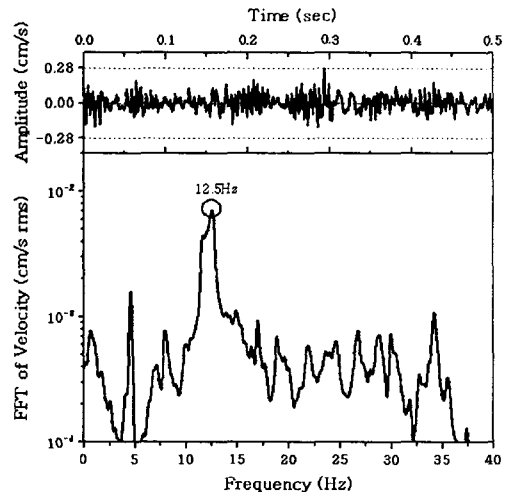


그림 2. 정지된 복수 입형 펌프의 상부 진동

## 3. 시스템의 동특성

### 3.1. 펌프의 모터 지지대의 FRF

그림 3과 표 2는 펌프의 주파수응답(FRF) 결과이다. 주파수응답시험을 위하여 B&K Type 4381 저온용 가속도계와 PCB 086C50 임팩트 헤머를 사용하였다. 그 결과는 표 2와 같이 증폭계수가 17.9 및 6.09 임을 알 수 있었다.

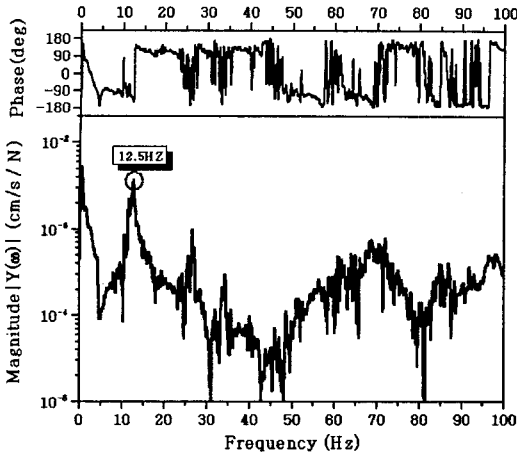


그림 3. 입형 펌프의 수평방향 FRF

API(미국석유협회)의 권고기준으로 볼 때 가진력의 주파수가 고유진동수의 분리여유 내에 있을 경우 Q(증폭계수) 값이 5.0 이상이면 적절한 대책을 취할 필요가 있음을 알 수 있다. 본 펌프는 12.5Hz의 고유특성과 유사한 각종 외력에 대하여 진동 저항력이 약하고 응답의 비 대칭성 때문에 과도한 진동을 예상할 수 있다. 표 2의 결과 입형 펌프의 공진을 피하기 위해서는 분리여유가 16% 이상 필요하다.

표 2. 입형 펌프의 고유진동수 및 특성

주파수(Hz)	Q 값	감쇠계수	방향
12.5	17.9	0.028	수평
12.0	6.09	0.082	수직

### 3.2. 펌프 입구 단의 유체 유발 특성

그림 4는 정상운전 시의 펌프 흡입부의 유체 유동의 동압 요동특성을 보여준다.

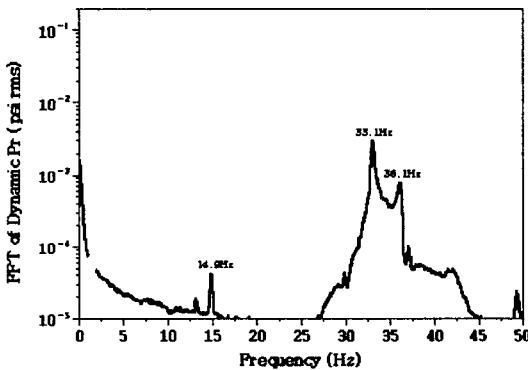


그림 4. 펌프 흡입배관의 동압 요동특성

이 요동 특성은 복수기에서 입구 부의 음향모드 또는 펌프 임펠러의 케비테이션과 관련된 것으로 판단할 수 있다. 동압 요동의 주 주파수는 33.1 Hz를 중심으로 넓은 밴드를 나타내나 펌프 공진으로 발전될 가능성은 거의 없을 것으로 평가된다. 그림 3에서 보듯이 펌프의 고유진동 특성은 12 및 12.5Hz로 압력 요동 특성의 주 특성과는 20Hz 정도 떨어져 있어 복수계통의 자체적인 원인이기보다는 그림 4에서처럼 주변 타 설비의 운전과 연관된 것으로 볼 수 있다.

### 3.3. 데브리스 배관의 FRF

그림 5는 데브리스 배관계의 레이아웃을 보여준다. 배관계는 2개의 앵커와 1개의 리지드 행거 및 수직배관에 의하여 지지되고 있다. X 방향은 입형 펌프와 마주보는 직각 방향(펌프의 수직)이며 Z방향은 입형 펌프와 마주보는 방향(펌프의 수평 방향)과 일치한다. Y방향은 하방방향이다. 그림 5에서 p1은 주파수응답 실험(그림 6참조)을 수행한 지점이다.

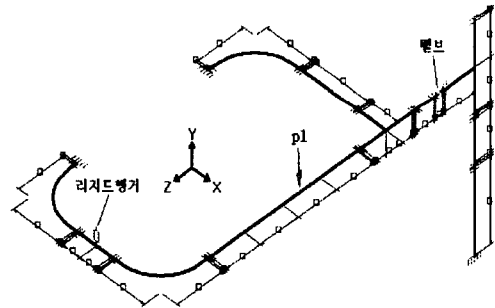
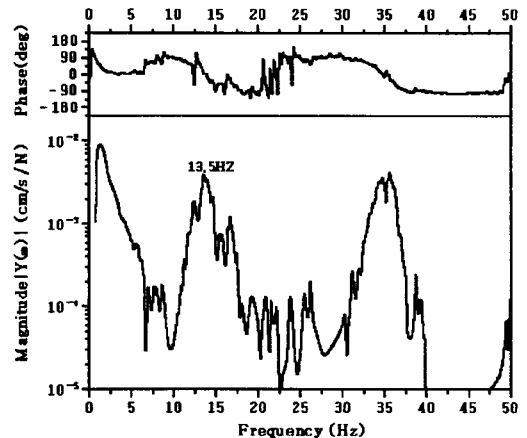


그림 5. 데브리스 배관계 레이아웃



-1022- 그림 6. 데브리스 배관의 주파수응답(FRF) 결과

그림 6은 복수기 불 세정 장치인 데브리스의 배관계 고유 진동수 응답을 보여준다. 본 배관계의 고유진동수는 13.5Hz중심으로 넓은 밴드의 주파수 응답특성을 나타냈다. 데브리스 배관의 주파수 응답 특성은 그림 3의 펌프의 고유특성과 매우 근접된 것을 알 수 있다. 데브리스 배관의 고유주파수는 펌프 케이싱의 고유주파수와 일치될 가능성이 있다. 데브리스 배관 고유진동수는 펌프의 1차 고유주파수와 16% 이내에 있어 두 계통이 연성될 경우 펌프와 데브리스 배관은 과도 진동상태에 놓일 가능성이 있다. 즉, 현장에서 데브리스 배관의 진동이 크게 나타나는 시점에서 펌프 진동이 허용치를 초과하는 현상은 가능한 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 진동 측정

불 세정 시스템 배관의 지지점과 펌프 출력단 배관계의 지지점이 동일 구조물을 공유하고 있으므로 불 세정 시스템에서 발생하는 가진 특성이 펌프의 고유특성과 유사할 경우 양 시스템은 서로의 과도 현상에 영향을 받아 과도한 진동이 유발할 수 있다.

진동을 진동장비로 측정된 결과를 보여준다. 그림 7은 운전시 나타나는 진동 경향으로 다양한 성분이 나타남을 알 수 있다. 05:00~05:20시 사이에는 9Hz, 18Hz, 27Hz, 36Hz등의 9Hz의 고조파의 성분이 나타났으며, 05:40이후에는 12.25Hz의 특성이 나타나 입형 펌프의 펌프 케이싱과 공진을 유발하는 성분이 데브리스에서 유발됨을 알 수 있었다.

#### 4.2. 펌프 케이싱 진동

그림 8은 불 세정 시스템에서 진동이 발생하는 동일시점(그림 7참조)의 펌프 상부 케이싱에 나타난 진동이다. 그림 7의 zone "B"에서 나타난 12.25 Hz 성분이 그림 8에서도 동시에 나타났다.

펌프 진동은 그림 8에서 보면 1X(15Hz), 2X, 3X 성분 외에 11.5Hz의 주파수가 주도적으로 나타나다가, 그림 7의 zone "B"에서 12.25Hz의 진동성분이 그림 8의 zone "B" 즉, 입형 펌프 케이싱에서 동시에 나타났다. 즉, 펌프에 나타난 12.25Hz의 진동은 데브리스 운전시 나타나는 진동현상 중 zone "A" 및 zone "C"에 나타난 진동특성은 입형 펌프에서 나타나지 않았으나 12.25Hz는 펌프로 전달되

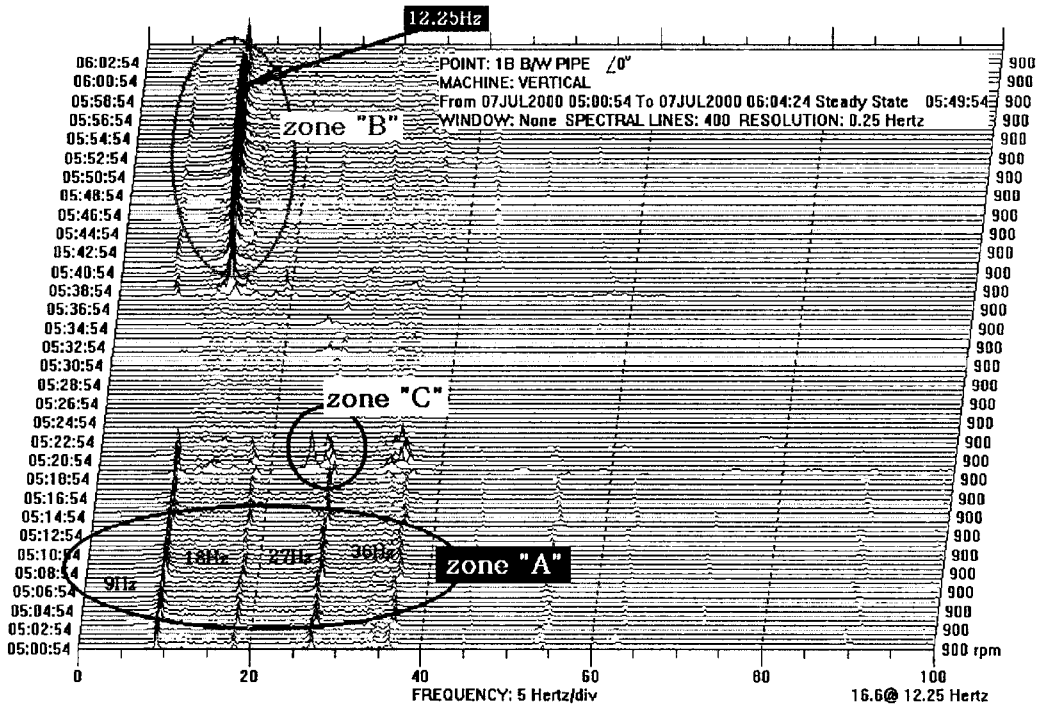


그림 7. 불 세정 계통 운전시 데브리스 배관 진동

#### 4.1. 불 세정 계통의 진동

그림 7은 불 세정 시스템을 작동할 때 발생하는

어 그대로 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 데브리스에서 발생한 진동이 과도한 진동레벨을 보일지

라도 데브리스 배관의 고유진동특성(그림 6 참조) 및 입형 펌프의 고유진동 주파수와 접근치 않은 경우는 펌프에 영향을 주지 않는 것으로 평가되었다.

기 위하여 분기 지점에 2개의 가이드를 그림 9와 같이 설치하는 방안을 고려하였다.

만일 입형 펌프 고유 특성을 변경할 경우 강성 보강 등의 방법을 적용키 위해서는 상부 모터 지

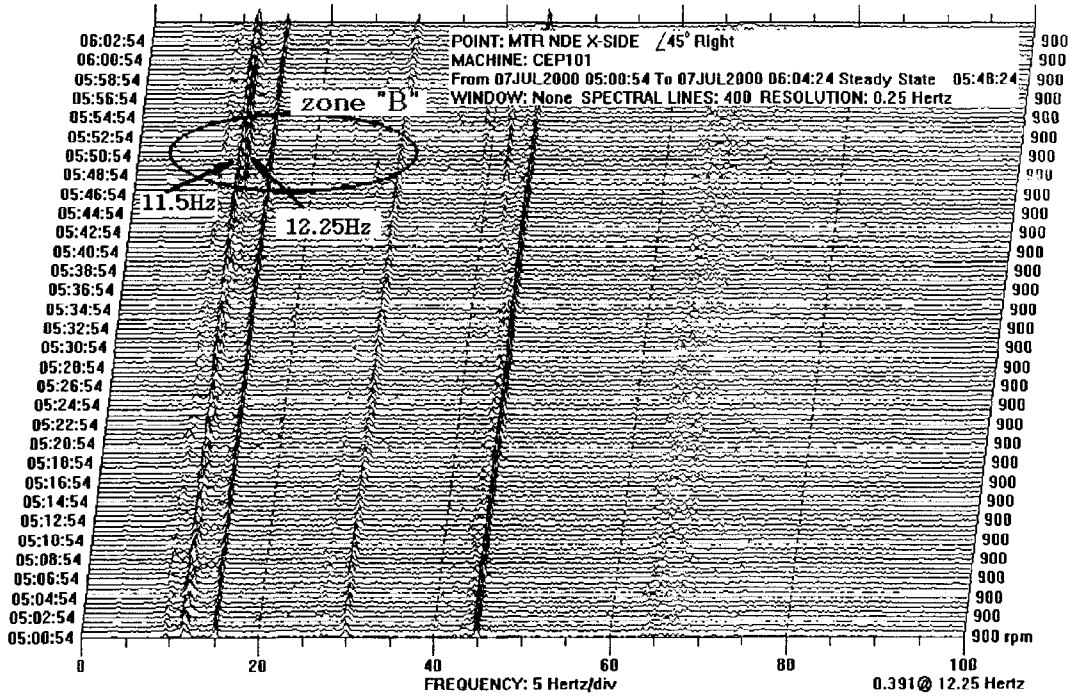


그림 8. 입형 펌프 상부 진동추이

## 5. 입형 펌프의 고 진동 저감대책

입형 펌프의 고 진동 저감대책은 전달경로를 차단하거나 가진원을 제거해주는 방법을 적용할 수 있다. 데브리스 필터에서 발생된 진동의 경로를 차단하는 방법으로는 볼 세정 배관의 경계조건을 변경하거나 복수 입형 펌프의 고유진동수를 변경하는 방법이 있다. 또한, 데브리스에서 발생하는 가진원의 특성을 변경하는 방법이 있다. 마지막 방법은 그림 7에서 알 수 있는 것처럼 각 밸브의 개폐 정도에 따라 다양한 특성을 나타내고 있고 개도를 조절하는 방안은 데브리스 필터의 기능에 제한 또는 저해 요인이 될 수 있어 전자의 전달경로를 차단하는 방법을 적용하였다.

### 5.1. 데브리스 진동의 격리 대책

데브리스 배관의 고유진동주파수가 입형 펌프의 고유진동수와 비슷하여 서로가 한 시스템으로 연결되는 경향을 갖는 것으로 평가되어 입형 펌프로 전달되지 않도록 볼 세정 계통 배관을 격리하

지대를 재 설계해야 되므로 큰비용이 필요하게 된다. 따라서, 가진원을 격리하는 방안을 채택하였다.

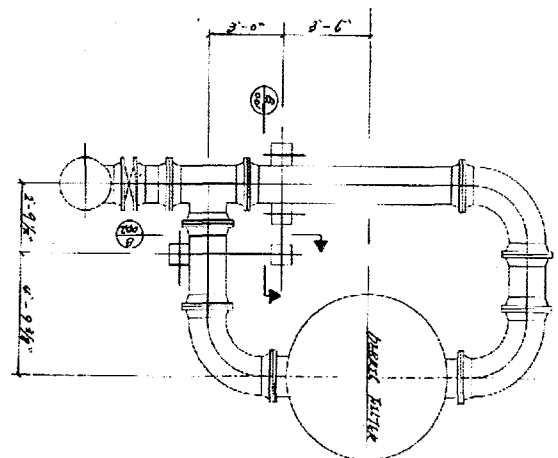


그림 9. 데브리스 배관계의 진동 격리 대책

주파수응답 실험을 수행한 결과를 근거로 하여 입형 펌프 계통과 데브리스 배관에 대한 특성을

해석하기 위하여 배관전용해석 프로그램인 PIPE PLUS를 적용하여 유한요소 모델링하고 동특성 측면에서 대책의 효과를 검토하였다. 지지장치의 수평배관에 1개 추가, 수직배관에 가이드 추가 또는 그림 9와 같이 수평배관에 2개의 가이드로 처리하는 방안 등을 고려하였다.

### 5.2. 모드 해석

표 3에서 보면 1개의 리지드를 추가하는 대책은 문제가 되는 1차 모드에서 약 1Hz 정도의 강성보강효과를 나타내는 반면 수직배관에 가이드를 추가하거나 수평배관에 2개의 가이드를 처리하는 방안은 9Hz 정도로 충분한 변경으로 입형펌프 계통과 완전히 격리될 수 있을 것으로 판단되었다. 그림 10은 그림 9의 조건으로 해석된 결과를 보여준다.

표 3. 대책에 대한 동특성 비교 (단위 : Hz)

모드	그림 4	대책		
		1개 추가	가이드 추가	그림 9
1	15.2	16.4	24.9	23.5
2	23.6	22.5	27.0	30.2
3	24.9	28.3	34.7	32.3
4	31.2	32.6	37.2	32.9
5	35.3	42.1	49.9	42.7
6	46.4	51.2	52.4	53.3
7	55.2	54.5	58.5	61.2
8	65.2	59.6	62.9	63.4

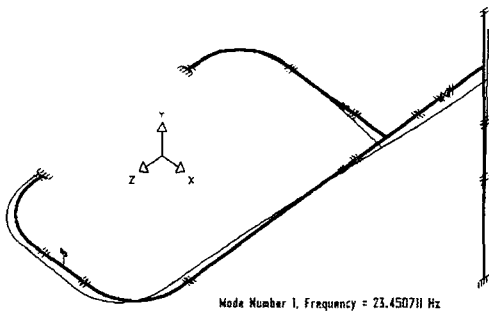


그림 10. 그림 9의 조건에 대한 1차 모드

### 5.3. 효과

그림 9의 지지조건으로 전달경로를 차단한 결과 99년 적용 후 현재까지 입형 펌프에서 고 진동 문제는 사라졌다. 단, 입형 펌프의 Q값으로 기인하여 그림 2와 같은 거동은 여전히 나타난다.

## 6. 결론

복수 입형 펌프에서 주기적으로 발생되던 고 진동 대책으로 데브리스 배관계로부터의 진동전달 경로를 차단한 결과는 다음과 같다.

- 입형 펌프 계통과 데브리스 계통은 서로 독립적인 시스템인 것이 분명하나 각 계통을 지지하는 1개 지점이 동일 구조물에 설치되어 있는 양 시스템이 연성되어 있었고,
- 입형 펌프의 모터 지지 케이싱의 주파수응답 주파수가 12~12.5Hz의 범위에 위치하였고 불 세정 계통 배관의 1차 고유진동수도 입형 펌프 케이싱의 공진 범위에 위치하였으며,
- 가진원인 데브리스 필터의 운전 특성이 밸브의 개폐정도에 따라 다양하게 변하는 경향을 보이 되 특정조건에서 양 계통의 고유진동주파수와 일치하는 가진 특성이 나타나 양 시스템에서 고 진동이 발생되었다.
- 따라서, 전달경로를 차단키 위해 데브리스 배관의 분기지점에 각각 가이드형 지지장치를 추가하는 대책을 적용 후 입형 펌프에서는 과거와 같은 고 진동 현상은 발생되지 않았다.

## 참고문헌

- (1) Yeon-Whan Kim, 1997, "Dynamic Characteristics Study on Vibration of Main Steam Piping for a Power plant", Asia-Pacific Vibration Conference '97, pp687-692
- (2) 전력연구원, 1996, "발전소배관과도진동연구 최종보고서".
- (3) 김연환, 1996, "발전소의 대형 주증기관의 진동 특성", 한국소음진동학회논문집 제6권 제6호.