

복합 발전소 주급수 재순환 배관계의 고진동 현상 및 대책

Examination on High Vibration of Recirculation System for Feed Water Piping in Combined Cycle Power Plant

김연환[†], 김재원*, 박현구*

Yeon-Whan Kim, Jae-Won Kim, Hyun-Gu, Park

Key Words: Feed-water recirculation piping(급수재순환배관), Flow control valve(유량제어밸브), Cavitation(캐비테이션), Shock wave(충격파), Flow-excited acoustical pulsation(유동가진 음향맥동), Structural vibration(구조진동), Resonance(공진), design of experiment(실험계획법)

ABSTRACT

The feed-water piping system constitutes a complex flow impedance network incorporating dynamic transfer characteristics which will amplify some pulsation frequencies. Understanding pressure pulsation waves for the feed-water recirculation piping system with cavitation problem of flow control valve is very important to prevent acoustic resonance. Feed water recirculation piping system is excited by potential sources of the shock pulse waves by cavitation of flow control valve. The pulsation becomes the source of structural vibration at the piping system. If it coincides with the natural frequency of the pipe system, excessive vibration results. High-level vibration due to the pressure pulsation affects the reliability of the plant piping system. This paper discusses the piping vibration due to the effect of shock pulsation by the cavitation of the flow control valves for the recirculation piping of feed-water pump system in combined cycle power plants.

1. 서 론

화력, 복합 및 원자력 발전소에서 운용하는 수배관계의 펌프는 보일러 급수펌프 시스템, 복수펌프 시스템, 냉각수 펌프 시스템 및 해수순환수 펌프 시스템 등의 원심형 펌프들이다. 그중에서도 대표적인 펌프는 보일러 또는 증기발생기 등에 물을 공급하는 급수펌프이다. 보일러 급수펌프는 압력 및 온도가 높은 고 에너지 수송용 펌프로써 펌핑 작용에 의해 발생하는 전체 에너지 중에서 어느 정도는 열로 변환한다. 펌프의 토출 유량이 펌프 성능곡선상의 적정 유량으로 운전되지 않고, 최소흐름(Minimum Flow Line)선에 가깝게 흐르게 되면 펌프의 토출압력은 급격히 증가하면서 상당히 높은 열이 발생한다. 이 현상은 캐비테이션과 급격

한 압력상승을 일으키므로 급수펌프 토출 배관 측에 재순환 배관계(Minimum Flow Line)를 설치한다. 따라서 급수펌프를 보호하기 위하여 재순환 배관계를 통하여 최대 정격 압력(Full Discharge Pressure of Pump)의 최소 유량을 탈기기(Deaerator), 탈기기 저장탱크 또는 급수탱크(LP Drum)로 순환시킨다.

발전소의 초기 기동 시에는 보일러(Boiler) 또는 증기발생기(Steam Generator)에서 증기를 생산하지 못하므로 보일러 급수펌프(Feed water Pump)만으로는 급수압력을 적절히 제어할 수 없어 보일러 급수펌프의 토출 배관이후에 재순환 배관계(Recirculation line)를 설치하여 토출압력과 유량을 제어하도록 설계한다. 재순환 배관계는 급수 펌프의 토출측 배관의 유량, 압력, 온도로 운전하게 된다. 보일러 급수 펌프가 운전을 시작하면, 유량 제어밸브가 열려 재순환 배관 시스템을 통한 급수의 재순환을 통한 위밍업을 하고 급수 제어 밸브를 열어 급수펌프의 10% ~ 25% 용량까지 급수량이 증대되면 재순환 배관계의 유량제어밸브(F. C.V, Flow Control Valve or Recirculation Valve)는 닫는다. 특히 재순환배관계의 유량 제어밸브는 급격한 압력상승 및 온도 상승을 제어하기 위하여 유량이 급수펌프 용량

[†] 교신저자; 한국전력공사 전력연구원

E-mail : ywkim@kepri.re.kr

Tel : (042) 865-7556

Fax : (042) 865-7501

* 한국서부발전(주)

의 25%이하까지 떨어지면 자동으로 열리도록 운영하고 있다. 일반적으로 재순환 배관계의 유량 제어밸브는 급수펌프 시스템이 정상 운전 중에도 5~10%를 열어 운전한다.

재순환배관계에 적용하는 유량 제어밸브는 발전소의 밸브 중에서 매우 높은 차압을 갖도록 설계된 밸브로서 유체 역학적 특징은 밸브의 입구압력은 펌프의 토출압력과 동일한 100~450 bar이며 밸브 출구압력은 탈기기 또는 급수저장탱크의 압력(<14 bar) 상태로 떨어진다. 따라서 급수펌프 시스템이 재순환 운전조건에서는 유량제어밸브의 교축점(VC: Vena Contracta)까지는 유속은 급격히 증속되어 증기압 아래로 떨어지고 교축점 통과 후 유속이 감소하면서 압력이 회복된다. 이때 유체압력이 유체의 포화 증기압(Vapor Pressure)보다 더 떨어질 경우 밸브에서 생기는 최저 압력 저하 지점이 유체의 포화증기압보다 높은 곳에 있고 밸브에서 생기는 최저 압력 저하 지점이 유체의 포화 증기압보다 낮게 형성되어 액체와 증기의 이상유동(Two Phase Flow)이 된다. 일단 유체의 포화증기압 이하로 떨어졌다가, 다시금 유체의 포화증기압 이상으로 압력이 회복된다. 이러한 캐비테이션 과정에서 강한 충격성 압력파(>700 bar)가 밸브 및 배관시스템을 가진하여 비주기적인 고진동이 유발하며 밸브 내의 트림(Trim)부를 손상시키는 것으로 알려져 있다.

본 논문은 복합화력 발전소의 기동조건에서 보일러 급수펌프의 토출 배관으로부터 재순환 배관계를 통하여 저압 급수 탱크로 유량을 재순환하는 운전조건에서 유량제어밸브의 개도 변경시 발생하는 강한 압력 맥동에 의하여 나타나는 이상 진동 사례에 관하여 기술한다.

2. 급수 펌프 재순환 배관계의 고진동

2.1 급수의 흐름도 및 재순환 배관계의 구조

Fig.1은 대표적인 100MW급 복합화력발전소의 급수펌프(Feed water pump) 배관계에서 보일러(HRSG)로의 급수 흐름도를 나타낸다.

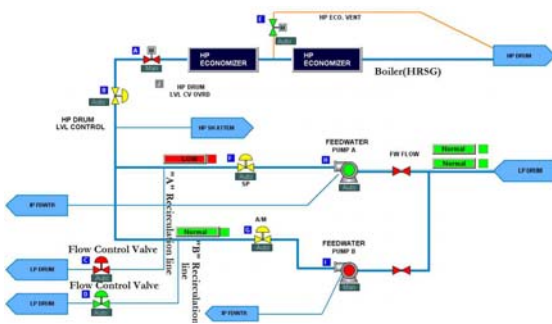
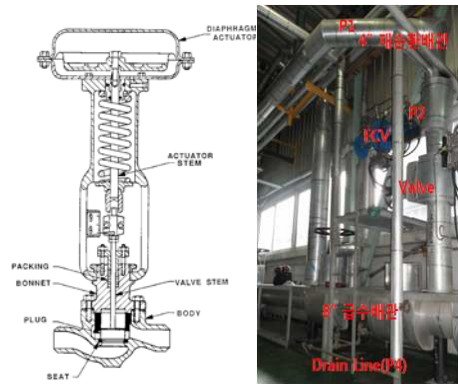
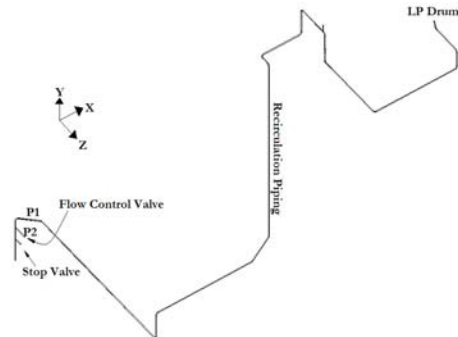


Fig 1. View of feed-water supply piping system with flow control valves

정상조건에서는 저압 급수탱크 (LD Drum)에서 고압급수 탱크 (HP Drum)로 급수를 공급하나 발전소 기동 시에는 재순환 배관계(Recirculation line)를 통하여 저압 급수탱크 (LD Drum)로 재순환시킨다. 이때 주급수배관계의 급수는 글로우 밸브형 유량제어밸브(Fig 2(a)참조)를 통하여 저압급수탱크까지의 전체길이가 57.5m 및 45.0m길이의 두개의 재순환배관계(Fig 2(b)참조)로 순환하게 되며 유량제어밸브의 교축점(VC :Vena contracta)을 통과하면서 필연적으로 캐비테이션이 발생한다. 급수의 온도가 138℃ 일 때 유량 제어밸브의 입구측 압력은 110kg/cm² 이고 출구측 압력은 5kg/cm² 이고 증기압은 3.5kg/cm² 로 최대 10,800kg/hr의 급수를 밸브개도에 따라 재순환한다. 재순환배관계의 수직부에 집중하여 직각으로 설치되어 불안정한 유량 제어밸브는 발전소 시운전이후로 차압이 138 kg/cm²로 캐비테이션 특성과 함께 <94,600kg/hr의 저 유량에서 증기압이상으로 회복되지 않는 플래싱 현상이 나타나 자주 스틱 되어 제어에 어려움과 함께 밸브 트림부의 손상으로, Fig 2(a)의 유량 제어밸브는 유입 압을 143kg/cm²에서 110kg/cm²으로 변경함으로써 차압을 <105kg/cm² 로 운전하는 상태이다.



(a) Flow control valve(F.C.V.) & installed view



(b) Layout of Recirculation line

Fig 2. View of recirculation piping system through flow control valve

Fig 2에서 보이는 4" 재순환 배관전체길이가 57.5m은 Fig 1의 급수펌프의 토출측 밸브이후에 유량제어밸브 및 저압급수탱크(LP Drum)로 연결하여 급수를 재순환시키는 배관계로서 기동시 고진동이 발생하고 있다. 특히 급수펌프의 8"토출배관계의 정지밸브 후단에서 수직으로 연결하는 지점에 115kg의 정지밸브와 200kg의 유량제어밸브(FCV)가 설치되어 있다. SCH160인 4"배관계의 재질은 "A106, Gr B"이다.

2.2 배관계의 진동 건전성 평가

Fig 4는 가속도센서(B&K Type 4381)를 사용하여 Fig2(b)의 급수 재순환 배관계 수직부의 "P1" 지점에 대하여 유량 제어밸브의 개도를 줄이는 조건에서 배관계 진동을 시험하고 분석한 결과이다.

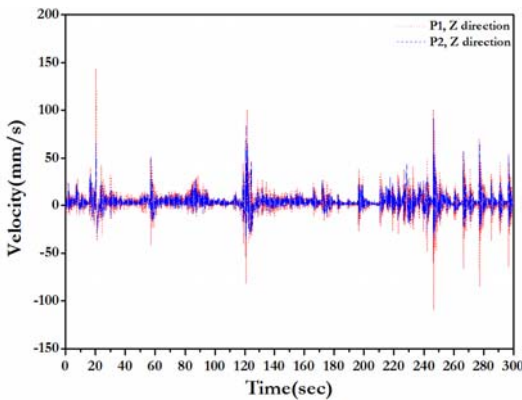


Fig 4. Plots of velocity vibration wave of piping system supplying condensate-water

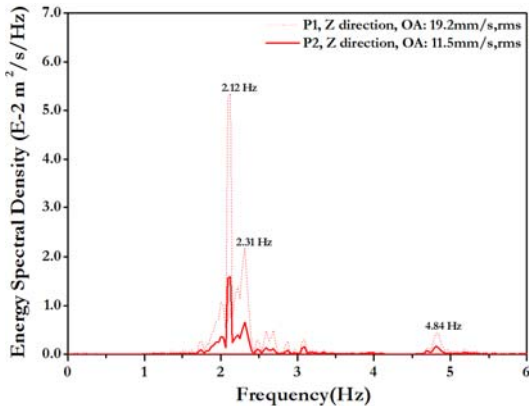


Fig 5. Plots of velocity vibration spectrums of piping system supplying condensate water

집중집량이 집중된 수직 배관의 최대 진동값은 나타내었고 >145 mm/s, peak로 ASME OM-part 3 코드의 "5.1.2"항에 근거한 진동 속도 산정치 (>70mm/s, peak)를

2배 이상 초과하였다. 특히 밸브 개도를 변경하는 조건에서는 비주기적인 경향의 과도상태가 나타났다. 최대 진동의 주모드는 Fig2(b)의 "Z"방향을 중심으로 나타난다.

Fig 5에서와 같이 진동스펙트럼을 분석 결과 최대 진동 성분은 2,12Hz성분이었고 주로 5Hz이내의 저주파수 영역의 응답이 분석되었다. 진동의 가진원은 주로 30Hz이내의 저주파수 영역에서 에너지가 집중된 난류 및 전체의 배관계의 음향맥동에 의한 결과로 추정할 수 있다.

3. 급수 재순환 배관계의 유체유발 특성

3.1 재순환 운전조건에서의 압력 맥동파 시험

급수 재순환 배관계가 발전소 기동과정에서의 고진동의 원인인 압력 맥동을 규명하고자 Fig 2의 유량제어밸브의 출구단측에 맥동압센서(PCB112A05)를 설치하고 맥동압을 시험하였다. Fig 6은 4"재순환배관계의 유량제어밸브 후단에서 재순환 운전조건에서 압력 맥동파를 시험한 것으로서 밸브 후단에서의 캐비테이션에 의한 충격성 펄스가 유체의 압력 맥동파로 전달되는 것을 보여준다. 충격성 압력 맥동파는 동일시점에 계측한 결과인 Fig 4와 같이 진동의 패턴도 배관 및 밸브에서 유사한 형태로 나타난다.

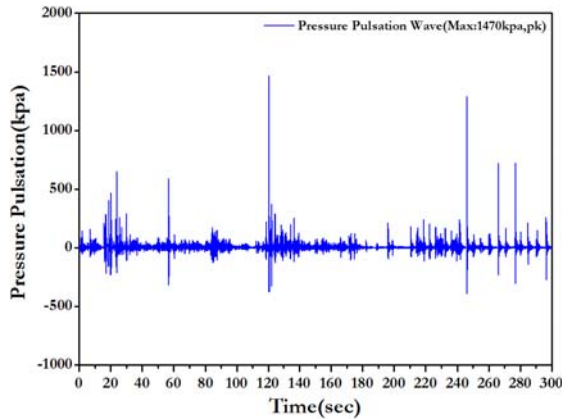


Fig 6. Plots of shock pulsation wave obtained by pressure pulsation sensor

Fig 7은 같이 Fig 6의 맥동파에 대한 전체 파에 대한 스펙트럼과 최대 피크 파형부분에 대한 스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 밸브개도의 변경조건에서 1,470kpa, peak와 같이 최대 피크가 발생하였으며 그때 2.88Hz 압력 맥동파의 응답이 커지는 경향을 나타냈다. 정상조건에서는 2.88Hz와 더불어 2.12Hz, 2.34Hz, 2.59Hz, 3.09Hz 등이 2.0 ~ 3.5Hz 영역에서 다양하게 나타나는 경향을 나타내었다. 이 성분들은 펌프의 회전성분 및 유량제어밸브의 내부의 와류와 별개의 성분들로서 재순환 배관계의 전체 길이의

유체에서 발생하는 것이면서 주파수가 멎쳐 있는 형태를 나타낸다. 이는 밸브후단에서의 캐비테이션 영역에 있는 증기(vapour) 성분들의 영향으로 배관계 내부의 압력맥동과 다양하게 나타났으며 그 중에서 Fig 5의 유량 제어밸브 후단의 배관진동 스펙트럼에서 맥동성분들과 구조적으로 연성되는 것은 2.12Hz 및 2.34Hz으로 분석되었다.

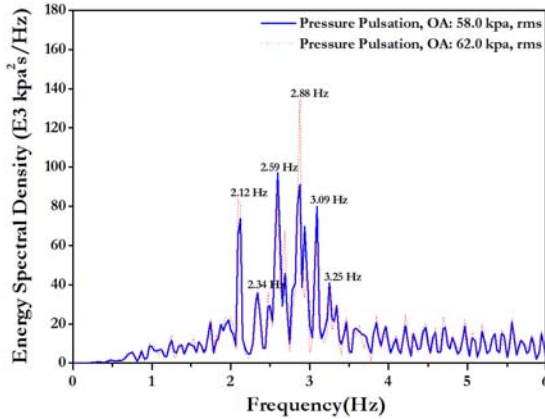


Fig 7. Plots of shock pulsation spectrums obtained by pressure pulsation sensor

Fig 8은 Fig 7의 각 성분중 최대 피크 맥동파인 2.88Hz와 2.12Hz 및 2.31Hz의 진동과 연성을 갖는 2.12Hz 및 2.34Hz 맥동파를 추출하여 비교한 것이다. 2.12Hz 맥동파는 2.88Hz 맥동파가 증폭하는 대부분의 시점에서 함께 증폭하는 것으로 분석된다.

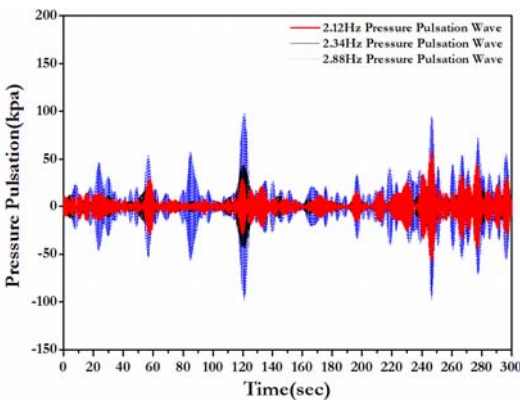


Fig 8. Plots of main ingredient waves obtained from shock pulsation wave

3.2 가진원에 대한 이론적 검토

급수 재순환배관계 음향학적으로 유량제어밸브(FCV)쪽은 닫힘조건을 저압급수탱크(LP drum)는 열림조건을 갖는

구조로서 배관내부의 유체의 압력파의 전파속도는 식(1)과 같이 유량제어밸브에서의 큰 차압과 관련하여 발생하는 캐비테이션에 의하여 증기압 밑으로 압력이 저하하면서 증기 성분 및 물속의 가스성분들이 발생하여 압력파의 전파속도가 영향을 받는다. Fig 9에서 재순환 급수는 내부 배관계에서 유량제어 밸브를 지나면서 충격성 펄스를 발생시켜 밸브 후단의 배관 에서 유체는 증기압인 3.48kg/cm²보다 높은 5kg/cm²로 복구되나 남아 있는 증기성분들 및 110kg/cm²의 압력에서 압축되어 있던 가스가 알갱이(void) 형태로 급수와 섞이면서 압력파의 전파속도가 달라진다.

$$c_i = \frac{l}{\sqrt{\left\{ \frac{\alpha_l}{\rho_o} + \frac{l - \alpha_l}{K} + \frac{d}{Eh} \right\} \alpha_l \rho_g + (1 - \alpha_l) \rho}} \quad (1)$$

여기서, K 은 유체의 체적탄성계수, E 은 배관의 영율, d 은 배관의 평균직경, h 는 배관두께, c_i 는 내부 유체의 압력파의 속도를, α_l, ρ, ρ_g 는 가스 및 증기 함유율, 유체의 평균압력, 그리고 증기의 밀도를 의미한다.

$$f_n = \frac{c_i}{2\pi} \sqrt{\{ k_{mn}^2 + (q\pi/2l)^2 \}} \quad (2)$$

여기서, k_{mn} 은 고차음향모드, l 은 재순환 배관의 전체 특성 길이(Fig 9참조), $q = 1, 3, 5, 7, \dots$ 를 의미한다. 식(2)에 대하여 $m=0$ 이고 $n=0$ 인 평면파를 고려하면 1/4 파장의 공명(quarter-wave resonance)의 특성을 나타낸다.

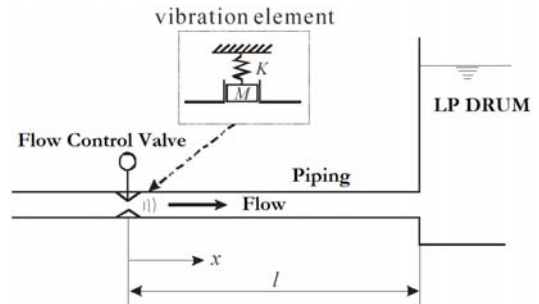


Fig 9. Piping considered to feed-water recirculation flow control valve from LP drum system

정상운전조건에서는 유량제어 밸브 후단에서 1,438m/s이나 식(1)에 의하여 전파속도가 변경된다. Fig 7의 압력 맥동의 스펙트럼에서 57.5m 재순환 급수 배관에 대하여 정상조건 전파속도인 1,438m/s를 기준으로볼 때 이론적인 발생주파수는 6.2Hz로 계산되나 압력파는 2.0 ~ 3.5Hz에서 나타낸다. 즉 유량제어밸브 후단의 캐비테이션 영역에서 맥동 압력파의 전파속도는 470~ 800m/s로 내부에 증기 및 가스 알갱이가 급수 중에 1.7 ~ 6.5% 포함하는 것으로 계산된다. Fig 7에서 2.88Hz 맥동의 경우 압력파의 전파속도는 665m/s로 분석된다.

4. 급수 재순환 배관계의 고진동모드 진단

4.1 재순환 배관계에 대한 고유응답특성 규명

Fig 10은 무거운 정지밸브 및 유량제어밸브가 위치한 급수 재순환 배관계의 수직부에 대하여 임펄스해머(PCB 086C20)와 가속도센서를 사용하여 구한 고유진동수 스펙트럼이다. Fig 2(b)에서와 같이 P1지점은 유량제어밸브의 상부 배관부로서 유량제어밸브의 몸체부분인 P2지점의 1차 고유진동수는 2.0~2.25Hz이고 2차는 3.5Hz, 3차는 5.0~5.25Hz를 얻었다.

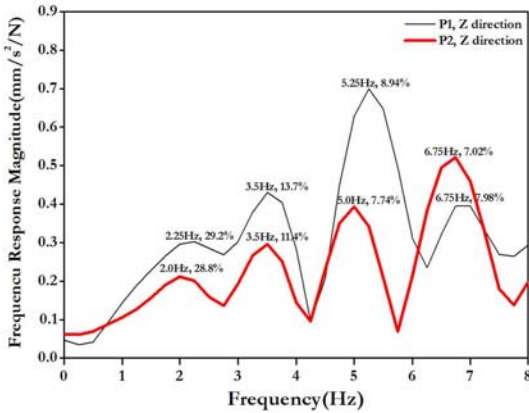


Fig 10. Frequency response spectrums obtained through impulse hammer test on vertical piping of 4" feed-water recirculation flow system

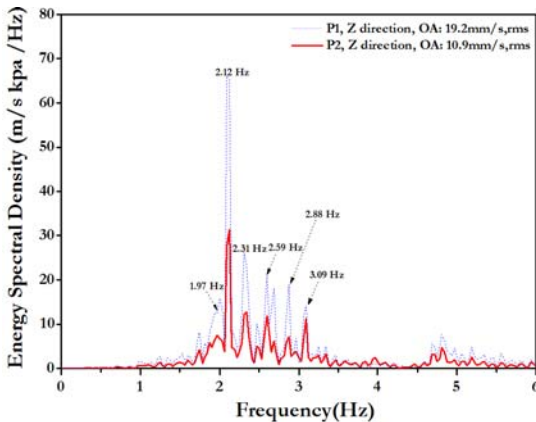


Fig 11. Vibration cross spectrums coupled with pressure pulsation wave on vertical piping of 4" feed-water recirculation flow system

Fig 11은 급수 재순환 배관계의 수직부의 상부진동과 유량제어밸브 후단의 맥동파의 연성을 보여주는 크로스 스펙트럼이다. Fig 7에서의 압력맥동파의 2.0 ~ 3.5Hz와 일치하는 고유진동수는 Fig 10의 스펙트럼에서 1차 고유진동수인 2.0 ~ 2.25Hz로써 해당 배관계의 배관내부에서 발생하는 압력 맥동파중 2.12Hz가 연성이 높고 1차 고유진동수에 가까운 2.34Hz맥동파의 응답이 Fig 8와 같이 알 수 있다.

4.2 재순환 배관계에 대한 고유응답특성 규명

캐비테이션에 의한 충격펄스와 높은 차압에 의하여 나타난 다양한 압력맥동파에 의하여 배관은 X방향 및 Z방향으로 수직배관부가 심하게 움직여 진동허용치를 초과함에 따라 이에 대한 모드를 해석적으로 규명하고 그 대책 안을 설계한다. 배관전용 해석 코드인 PipePlus를 사용하여 급수 재순환 배관계에 대한 유한요소 해석 모델링을 적용하였고 Fig 5의 진동응답과 Fig 10의 결과와 일치하는 진동 모드를 Fig 12와 같이 해석적으로 구하였다. Table 1은 Fig 10의 시험결과와 Fig 12의 해석결과를 비교하였다.

Table 1. The 1st natural frequency on vertical piping of 4" feed-water recirculation flow system

point	1st natural frequency (Hz)	
	measuring	analysis
P1	2.25	2.28
P2	2	

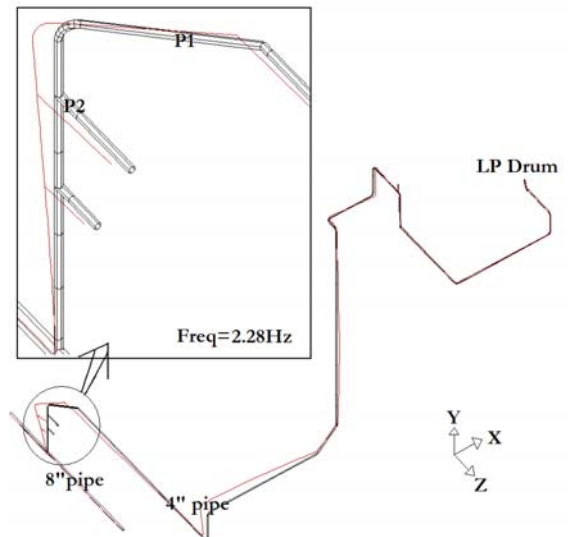


Fig 12. View of the 1st natural vibrational mode for 57.5 m 4" feed-water recirculation piping

Fig 12는 급수 재순환 배관계에 대하여 유한요소모델링에 의하여 구한 2.0~2.25Hz의 고유진동 모드와 일치하는 모드이다. 저주파수영역의 고유진동모드의 특징은 Fig 12와 같이 배관계의 집중질량들이 위치한 수직배관부에 최대진폭이 높은 형태를 나타내어 2.12Hz가 저주파수이어서 횡수는 적으나 고진동이 반복될 때에 고진동이 발생하여 유량제어 밸브의 원활한 제어에 제약을 주고 동시에 진동의 노드점이 높은 변동응력에 높으므로 이에 대한 회피 및 저감대책이 필요함을 알 수 있다.

5. 급수 재순환 배관계의 고진동 대책 설계

5.1 실험계획법에 의한 재순환 배관계의 재설계

Table 1에서와 같이 재순환배관의 1차 고유진동 모드는 2.12Hz의 수직 맥동과 일치 하는 영역에 위치하여 재순환 배관계는 유량 제어밸브의 개도를 조정하는 조건에서 발생하는 고진동을 저감하기 위하여 2.12Hz의 맥동과와의 공진을 회피하는 설계가 필요하다. 첫 번째 방법은 배관계의 지지장치 추가 및 레이아웃의 변경을 통한 고유진동모드가 2.0 ~ 3.5Hz의 맥동과와 회피되도록 재설계하는 방법이 우선적으로 검토될 수 있다. 두 번째 방식은 집중질량의 위치를 노드 점으로 변경함으로써 고유진동모드의 변경 뿐 아니라 수직부의 진동허용치를 여유 있도록 조정하는 방법이 있고 세 번째로는 운전방법을 개선하여 진동이 심한 특정 운전속도를 회피하도록 제어하는 방법을 검토할 수 있다.

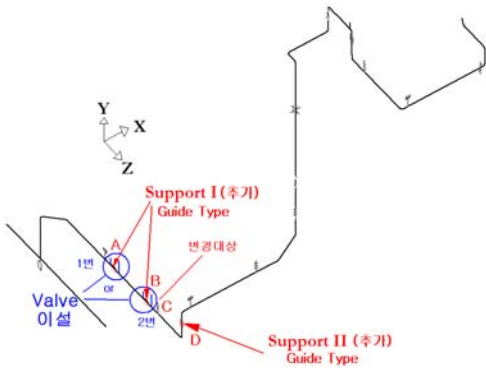


Fig 14. View of remodelling for 57.5 m 4" feed-water recirculation piping

유한요소해석을 통한 검증 결과 재순환배관의 고 진동과 피로누적을 일으키는 원인은 수직맥동과와 재순환배관의 공진현상으로 판단되어 강성보강(지지 장치 추가)및 집중질량(FCV)의 이설을 검토하고 개선하되 실험계획법(DOE)을 적용하여 경우의 수를 제한하는 방식으로 수행한다. 설계도면을 검토하여 재순환배관계의 고유진동수를 상승시키기 위해서는 강성보강에 의한 방법만이 가능하므로 유량제어밸브

(FCV) 등 2개의 밸브를 수평구간의 Fig14와 같이 “1번” 또는 “2번” 지점으로 변경 설계하고 지지 장치의 구성 보강 (1: A & D 지점에 Guide형 2개추가/ 2: D지점 Guide형 1개추가 / 3: 2 & C를 Rigid로 변경/ 4: B&D지점에 Guide형 2개추가 등 검토에 대한 실험계획법 적용)을 통해 Z방향의 고유진동수를 압력맥동에 대한 공진범위인 2.0Hz ~3.5Hz 밖으로 회피설계를 하였다. Fig 15는 맥동영역에 의한 진동상승을 방지하기 위한 조건은 경우 1의 (지지 장치 “1(=2개추가)”) AND (밸브의 위치 =“1번”위치) 만이 만족함을 보여준다.

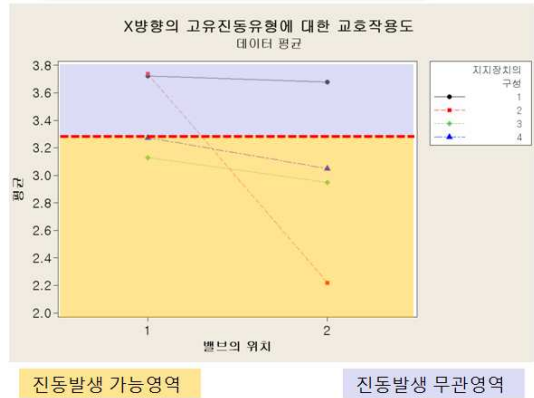


Fig 15. Plot of result of DOE (design of experiment) for 57.5 m 4" feed-water recirculation piping

5.2 개선된 재순환 배관계의 진동 건전성 검토

급수펌프 재순환운전에서 유량제어밸브의 개도조정이 발생하는 압력맥동과에 의한 고진동 발생현상을 해소하기 위하여 개선방안을 검토하고 재설계의 개선 전후 검토하였다.

4" 재순환 수직 배관부의 350kg의 무거운 밸브(FCV 및 정지밸브)를 수평배관의 “1번”지점으로 이동하여 수직부의 진동 허용치를 허용치 <200mm/s, peak로 확보하고 진동이 작은 노드 점에 위치시킨 밸브설치 지점의 수평부의 진동 허용치는 <70mm/s, peak로 확보하여 수직부의 건전성을 확보한 결과를 나타내고 압력맥동과의 주파수의 운전영역인 2.0 ~ 3.5Hz에 대하여 Table 2는 실험계획법에 의하여 구한 회피대책에 따라 1차고유진동수가 맥동가진 영역 (2.0~3.5Hz)로부터 이격된 결과를 얻었다.

Table 2. The 1st natural frequency improved for vertical piping of 4" feed-water recirculation flow system

1st natural frequency (Hz)	
Before improving	After improving
2.0~2.25	4.17

급수펌프 재순환 배관계에 대한 개선결과를 현장에 적용시 70mm/s,peak를 초과하는 과도맥동과를 제외한 진동 Data를 바탕으로 공정능력을 보수적으로 분석하여 개선 전과 후를 비교하면 개선 전 공정능력 $Z = 1.23$ 에서 개선 후 공정능력이 $Z = 3.34$ 로 향상되었다.

6. 결 론

복합발전소의 기동초기에 급수펌프의 토출측 밸브이후에 설치된 재순환 배관계 전단부의 유량제어밸브를 통과하면서 캐비테이션에 의한 충격성 펄스에 의하여 발생하는 유체유발 맥동특성을 현장운전조건에서 시험하고 정지중의 고유진동수 실험을 통하여 고진동 현상 규명하며 다양한 저감대책에 대하여 실험계획법을 적용하고 설계하였다.

대상 급수 재순환 배관계는 발전소 기동시 밸브가 집중된 수직부 배관에서 고진동이 나타나 진동 및 맥동을 시험한 결과, 유량 제어밸브 전후의 큰 차압의 영향으로 배관내의 맥동압력과의 전파속도가 낮아져 배관계의 고유진동 모드와 공진을 일으키는 현상임을 규명하고 통계적인 기법인 실험계획법을 통하여 고진동 회피대책의 선정에 효과적이고 유효한 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) W. W. von Nimitz, 1975, "Low Frequency Vibrations at Centrifugal Plants", Proceedings of the Fourth Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A & M University, College Station, Texas, pp. 47-54.
- (2) 황철호, 박중범, 2005, "유동가진 공명기 내부의 음압계어" 한국소음진동공학회 추계학술대회논문지, pp.196 ~ 197.
- (3) M. P. Paidoussis, 1987, "Flow-Induced Instabilities of Cylindrical Structures", Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 40, pp. 163-174.
- (4) J. Poul Tullis, 1989, "Hydraulics of Pipelines", John Wiley & Sons.
- (5) KEPCO, 2010, "Six Sigma Training Manual", Ver.3.