

발전소 복수 공급 배관계의 고진동과 분기 배기배관의 절손 규명 Examination on High Vibration and Branch Vent Pipe's Failure of Complex Piping System Suppling Condensate-Water in Power Site

김연환[†]

Yeon-Whan Kim

Key Words : Condensate-water supply piping(복수공급배관), Flow-excited acoustical pulsation(유동가진 음향맥동), Structural vibration(구조진동), Resonance(공진)

ABSTRACT

A disturbance flow at piping bands and discontinuous regions such as a valve, a header has a intense broadband internal pressure field and a sound field which are propagatged through the piping system. The fields becomes the source of a vibration of this piping system. Intense broadband disturbance flow at a discontinuous region such as elbows, valves or headers generates an acoustical pulsation. 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 high vibration and the branch vent pipe's failure of condensate-water supply piping system due to the effect of acoustical pulsations by flow turbulence from the flow control valves of globe type in a power site.

1. 서 론

발전소와 같은 산업현장에서 사용되는 배관시스템은 다양한 운전조건에서도 경제적인 설계수명을 유지할 수 있어야 한다. 발전소의 대형 배관계는 발전소의 펌프, 보일러, 터빈 등 주요기기를 연결하고 고온 고압의 증기, 물 등 유체를 이송하면서 다양한 형태의 유체유발 가진 현상이 발생하고 있다. 배관을 흐르는 유체유동은 배관진동을 유발하고 유지케 하는 에너지원이다. 주변기로부터의 전달력에 의한 강제진동뿐 아니라 유동 유체의 광대역 요동이 배관의 배부음장을 기진하는 음향 공명 맥동압과 엘보, 밸브, 헤더 등의 불연속 지점에서 발생하는 와류(vertex shedding) 맥동파는 배관을 진동케 하는 유체 유발 진동원이다.

발전소의 수배관계에서 나타나는 이상 고 진동 현상의 대부분은 배관계 내부를 흐르는 유체의 유동에 따라 여기

되는 강한 난류 및 와류와 관련이 많다.

본 논문은 복수 유량을 제어하는 글로벌 밸브(Globe Valve)들과 체크밸브(Check Valve) 등을 통하여 강한 압력 맥동파가 발생하는 구조적 특성을 갖는 24" 복수 배관계에서 나타난 분기 배기배관의 루트부 피로 절손에 관하여 유체유발 메커니즘에 관한 실험적인 검토 및 모달 해석 방법을 적용하여 특성 규명한 사례이다.

2. 복수 배관계의 손상과 고진동 현상

2.1 탈기기 공급 배관시스템의 구조

탈기기는 복수에 포함된 기체를 제거하는 시스템이며 Fig 1은 탈기기의 "A" 및 "B"지점에 복수를 공급하는 배관계의 레이아웃이다. 공급 배관계는 24"배관계를 사이에 두고 18" 두개 라인과 16" 한개 라인으로 구성하고 있고 정상운전시에는 18"두개 라인을 통하여 복수를 공급하는 배관으로서 18"의 두 배관계에는 글로브형의 유량제어밸브와 양측에 케이트형 밸브가 각각 설치되어 있어 집중질량이 집중되어 있으며 24"배관계에는 체크밸브를 통하여 유량이 공급하는 시스템으로서 복수는 밸브군 및 엘보를 거치면서 강한 난류와 와류가 발생하는 상태이다. 이때 16"배관계는 정상

[†] 교신저자; 한국전력공사 전력연구원
E-mail : ywkim@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-7556, Fax : (042) 865-7509

운전 중 닫혀있는 상태이고 2"의 분기 소배관이 글로브 밸브 사이에 설치되어 있다.

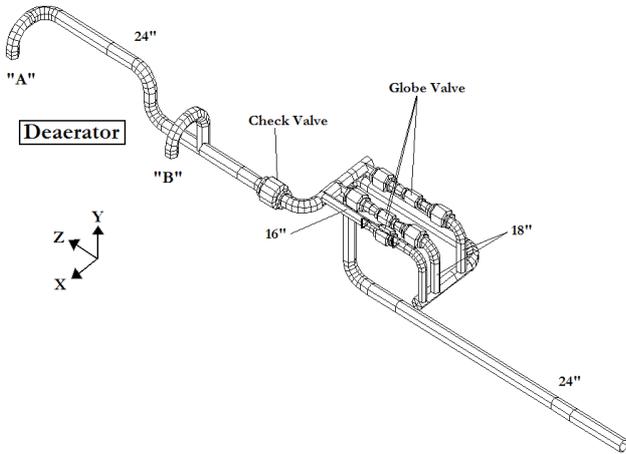


Fig 1. View of condensate-water supply piping system with flow control valves of globe type

2.2 배관 손상에 대한 설계 건전성 해석

Fig 2에서 보이는 24"배관은 Fig 1의 "B"라인에 연결되어 탈기기에 복수를 공급하는 배관계로서 상부의 배기밸브라인을 상부에서 연장하여 하부로 연결된 조건에서 소배관인 배기배관 루트부에서 피로 크랙이 발생하였다.

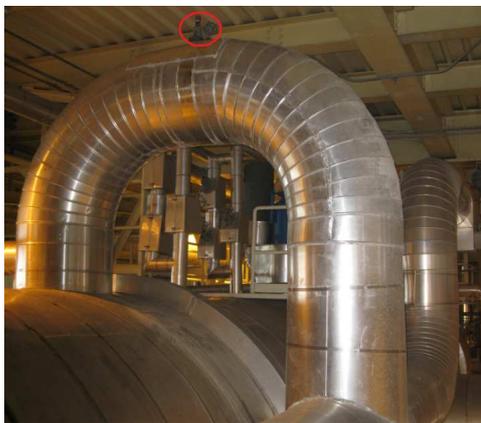


Fig 2. View of condensate-water supply piping system with mini branch vent line to "B" connected point of deareator system

발전소 탈기기 복수 공급배관의 복수온도는 115℃이고 압력은 2.2kg/cm²으로서 배관계의 재질인 "A106, Gr B"에 대한 1차 응력의 "식11A" 설계 허용치는 1,400kg/cm²이고, 2차 응력의 "식13A" 설계 허용치는 2,100kg/cm²이다.

배관계의 레이아웃 및 지지조건에 대하여 유한요소해석결과 ASME B31.1코드의 1차 응력과 2차 응력이 설계 허용

치를 전자는 <50%를, 후자는 <85% (Fig.3참조)를 만족하는 건전한 상태이나 24"배관의 배기 배관부에서 손상이 발생하였다.

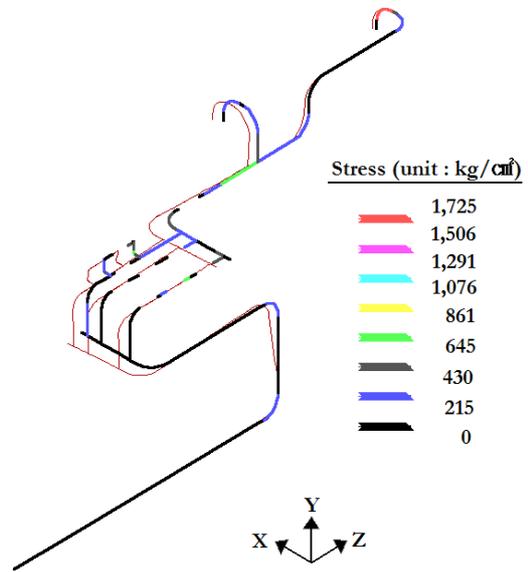


Fig 3. Deflected shape plot and 2nd stress view of ASME B31.1's "Eq.13A" for piping system supplying condensate-water

2.3 배관계의 진동 건전성 평가

Fig 4는 가속도센서를 사용하여 Fig1의 배관계 진동과형을 분석한 결과로서 배관계의 최대값은 >125mm/s, peak로써 ASME OM-part 3 코드의 "5.1.2"항에 근거한 진동속도의 산정치를 2배 이상 초과하고 배기배관의 손상이 발생한 24"배관부의 진동도 >70mm/s, peak를 나타내는 상태로 시운전이후로 발전소의 대상배관은 운전되고 있었다.

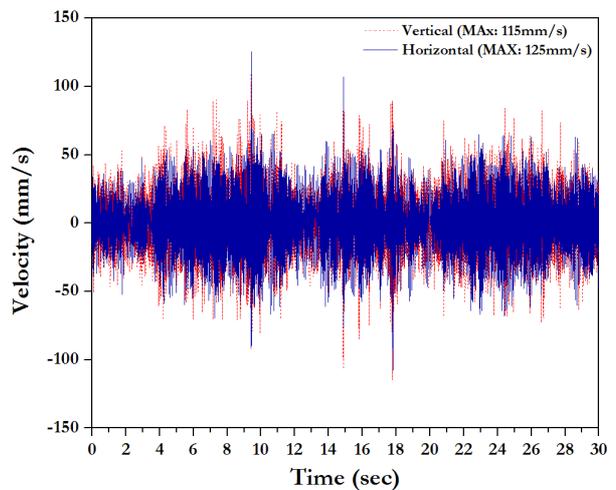


Fig 4. Plots of velocity vibration wave of piping system supplying condensate-water

진동속도 분석결과 최대 진동성분은 58.5Hz성분이었고 20Hz이내의 저주파수 영역의 11~15Hz영역의 응답이 분석되었다. 이것은 두 영역에서 배관진동을 주도하는 진동모드가 위치하고 있음을 의미한다.

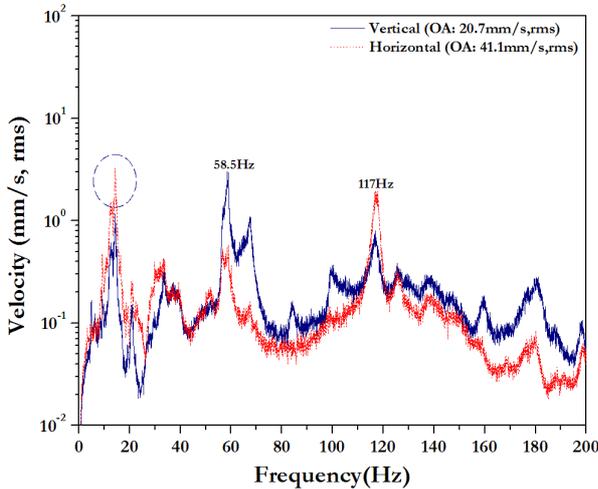


Fig 5. Plots of velocity vibration spectrums of piping system supplying condensate water

3. 복수 공급 배관계 고진동의 가진원 진단

3.1 배관계의 내부 유동장의 음향특성 검토

탈기기에 연결된 지점의 24"의 복수 공급 배관계는 음향학적으로 열림-단힘(open-close)조건을 갖는 구조로서 음장의 고유 주파수는 식(1)과 같다.

$$f_n = \frac{c_i}{2L} \sqrt{\{ k_{mn}^2 + (q\pi/2L)^2 \}} \quad (1)$$

여기서, k_{mn} 은 고차음향모드, L 은 배관의 특성 길이, $q = 1, 3, 5, 7, \dots$, c_i 는 내부 유체의 음속을 의미한다. 식(1)에 대하여 $m=0$ 이고 $n=0$ 인 평면파를 고려하면 1/4 파장 공명(quarter-wave resonance)의 특성을 나타내며 모드는 Fig6과 같다. Fig 6의 모드는 유체유동에서 발생하는 난류 및 와류 등에 의하여 가진된다.

Fig 1의 탈기기 측 24" 복수 공급 배관의 전체설계길이는 "A"지점에서 끝지점까지 26.1m이며 "B"지점까지는 16.4m이다. 24"배관에 분기되어 연결되는 16"와 18"배관은 중앙부에 글로브밸브가 위치하여 음향학적으로 단힘 조건으로서 24"배관에서 이론적으로 평면파(plan wave)의 주파수들을 식(1)에 의하여 Table 1과 같이 구하였다. 배관내부의 복수 유동의 음속은 열역학적 상태량과 24", sch40 탄소강 배관의 특성을 고려하면 1,306m/s 이다. 따라서 복수 공급 24" 배관의 공명 주파수는 24"의 12.5Hz 또는 19.9Hz, 37.5Hz 또는 59.7Hz, 62.6Hz 또는 99.6Hz, ... 등을 식(1)에 의하

여 이론적으로 얻을 수 있다.

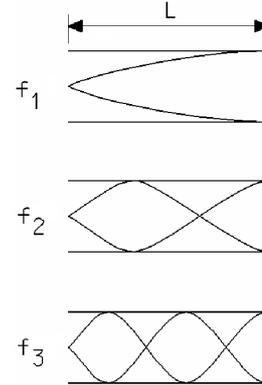


Fig 6. Harmonic modes with quarter-wave resonance in organ pipes

Table 1. Theoretical plane wave frequencies for 24" piping supplying condensate water

Mode	~"A"	~"B"
	$L=26.1m$	$L=16.4m$
1	12.5	19.9
2	37.5	59.7
3	62.6	99.6

3.2 가진원에 대한 이론적 검토

Fig 6의 음향모드와 배관구조를 가진하는 대표적인 가진원은 난류와 와류이다. 밸브 및 엘보 등과 같은 불연속 지점을 통과하면서 난류가 강화되는데, 특히, Fig1에서 18"의 글로브 밸브는 운전중 스템의 개도가 변동하는 유량제어 밸브이다. 변동하는 스템은 유체 유속에 반복적으로 변동을 주어 난류의 맥동력을 강화시킬 수 있다. 또한 밸브 등의 공동 개구부 등을 통과하면서 발생된 자유진단층이 발달하면서 압력이 변동하는 현상인 와류가 배관계의 음향모드와 배관구조를 가진한다. 배관계의 공동 개구부와 같은 불연속 지점에서 발생하는 와류 주파수는 식(2)와 같다.

$$f_v = S \frac{V}{D} \quad (2)$$

여기서, S 은 무차원 Strouhal number, V 은 불연속지점에서는 유속(m/s), D 는 불연속지점에서의 형상크기(m)를 의미한다.

3.3 배관계에서 발생하는 압력 맥동파 시험결과

탈기기 복수 공급 배관계의 맥동압을 분석하고자 Fig 1의 우측 18"배관의 글로브 밸브 후단의 배수배관 및 체크밸브 전단에서 두개의 18"배관과 연결되는 24"배관의 하부 배수배관에 맥동압 센서를 설치하고 맥동압을 시험하였다. Fig 7은 18"배관과 24"배관에서 측정된 압력맥동의 스펙트

럼을 분석한 결과이다. Fig 7에서 18"배관의 58.8Hz 맥동은 Fig 8에서 나타난 것처럼 12" 유량제어밸브의 공동 개구부를 지나면서 발생하는 강한 와류 맥동으로써 밸브 전후 단으로 전파되면서 전체 배관계에 영향을 주는 성분이고 Fig 5의 117Hz와 매칭 되는 118Hz의 맥동이 분석된다. 특히, 24"에서 분석된 압력맥동에서 13.2Hz, 41Hz, 58.8Hz, 65Hz, 114.9Hz, 148.8 Hz 등의 분들이 분석되며, Table 1과 비교하면 저주파수의 특성은 24"의 "A"지점까지의 길이에서 발생하는 이론 음향모드 주파수인 12.5Hz와 매칭되는 성분으로 시험분석결과 13.2Hz가 주도적인 맥동으로 분석된다.

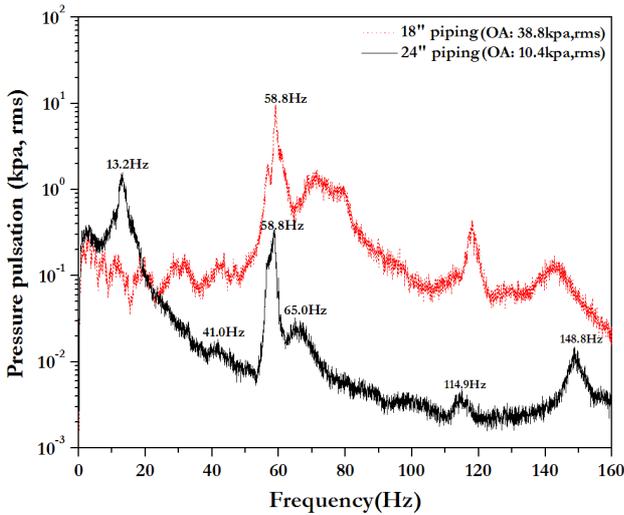


Fig 7. Plots of pressure pulsation spectrums obtained by pressure sensor

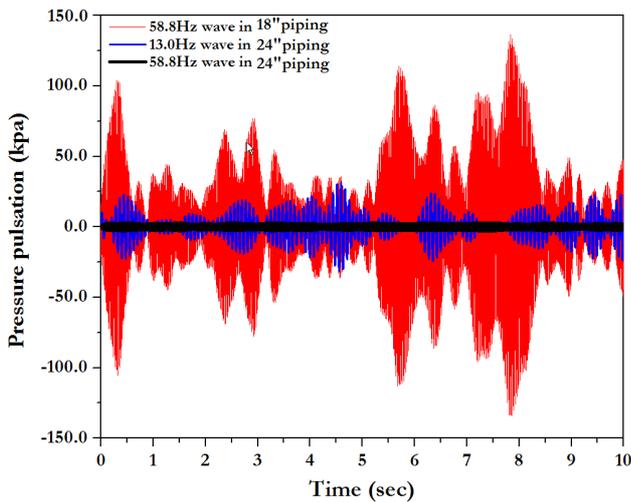


Fig 8. Plots of pressure pulsation waves obtained by pressure sensor

Fig 8에서 18"배관의 58.8Hz 맥동과의 최대 진폭 피크는 136kPa, peak으로 분석되나 24"배관에서 58.8Hz는 측

정지점이 Table 2의 16.9m의 2차 모드의 노드점에 가까워서 맥동과의 진폭은 <3kPa, peak를 얻었고 13.2Hz는 32kPa, peak를 나타내었다. Fig 1의 복수공급 배관계 전체에서 나타나는 진동속도는 Fig 5의 스펙트럼에서와 같이 58.5Hz가 주성분이었고 24" 및 16" 배관계에서 나타난 13.2Hz 근처의 주파수 응답 및 117Hz 진동응답이 Fig 7의 13.2Hz 맥동과, 58.8Hz 맥동과 및 118Hz 맥동과의한 결과로 분석된다. Fig 8의 58.8Hz 맥동과는 18"배관의 제어밸브 근처에서는 매우 큰 값을 보였으나 24"배관의 측정지점인 18"배관들의 연결지점사이의 노드점 근처에서는 1/40 수준이었고 일반 지점은 1/10 수준으로 분석되었다.

4. 복수 공급 배관계의 손상모드 진단

고 진동 특성 및 손상원인을 규명하기 위하여 배관전용 해석 코드인 PipePlus를 사용하여 탈기 복수 공급 배관계에 대한 유한요소 해석 모델링을 적용하였고 Fig 5의 진동 응답과 Fig 7의 결과와 일치하는 영역에 대한 진동 모드를 해석하였다. Fig 9는 복수 공급 배관계에 대하여 유한요소 모델링에 의하여 구한 저주파수대의 고유진동 모드중 Fig 5의 진동응답과 Fig 7의 20Hz 이내 주파수영역에 일치하는 모드들이다. 저주파수영역의 고유진동모드의 특징은 Fig 9와 같이 최대진동이 Fig 1의 "B"지점으로 연결하는 배관에서 고유진동모드에서 진폭이 큰 형태를 보인다. 즉, "B"지점의 상부측 배기배관의 루트부에서 나타난 절손의 주 원인은 저주파수 대 진동모드가 난류에 의해 가진된 1차의 음향모드의 맥동에 의하여 가진되어 발생하는 특성을 나타낸다.

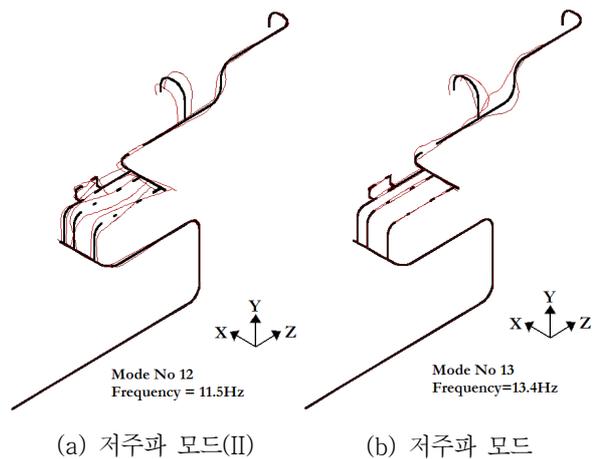


Fig 9. 복수 공급 배관계의 고유진동 모드(I)

Fig 10은 수 공급 배관계에 대하여 55Hz ~ 65Hz 영역의 고주파수대의 고유진동 모드중 Fig 5의 진동응답과 Fig 7의 주파수와 일치하는 모드들에 대한 해석결과이다. 고주파수영역의 고유진동모드의 특징은 최대진동이 16" 배관계

에서 진폭이 높게 나타나 저주파수대의 모드와 다르게 탈기 기측의 24" 복수 공급 배관의 진폭이 작은 거동 형태를 보인다.

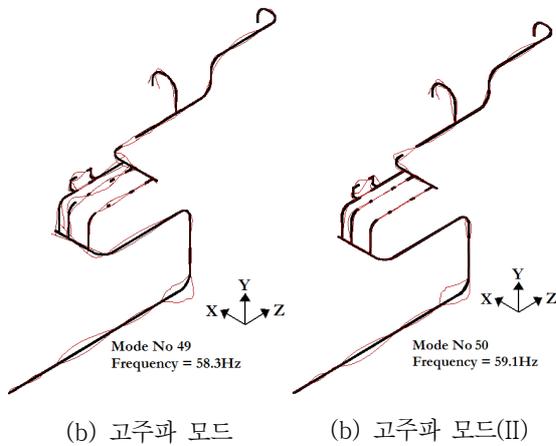


Fig 10. 복수 공급 배관계의 고유진동 모드(II)

5. 결 론

본 논문은 발전소 정상 운전 중 유량제어밸브가 부착된 탈기 전단의 복수공급 배관계에서 나타나는 유체유발 맥동특성을 실험적인 방법으로 시험하고 고진동 현상과 배관계의 배기배관의 손상원인을 규명한 사례이다.

대상 복수 공급 배관계는 탈기 연결지점의 배기배관 루트부에서 정상 운전 중 손상이 발생하여 진동을 시험한 결과, 대상 배관계에서 복수가 글로브형 유량제어밸브를 지나면서 발생하는 와류 및 난류의 맥동이 24"배관계의 내부 음향 모드를 가진하고 동시에 배관계의 고유진동 모드와 공진의 경향을 나타내어 ASME OM-part 3 코드의 "5.1.2" 항에 근거한 진동 산정치를 2배 이상 초과하였다. 진동의 주성분은 20Hz이내의 난류에 의하여 발생한 1차 음향모드 13.2Hz를 중심으로 하는 광대역 맥동과 유량제어밸브를 통과하면서 발생하는 압력맥동과 일치하는 58.8Hz의 와류 맥동이 배관계의 고진동의 원인으로 규명할 수 있었다. 특히, 24인치 복수 공급배관의 배기배관 Root부의 결함의 직접적인 원인은 유한요소법에 의한 모달해석 결과 <20Hz의 난류 가진 영역의 고유진동모드가 가진될 때 손상지점의 24인치 배관이 수평 길이방향으로 증폭되는 거동이 주원인으로 해석된다.

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, 박종범, 2005, "유동가진 공명기 내부의 음압제어" 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.