

재열기 온도조절 급수배관의 진동저감방안 연구

A Study on Vibration Control for Reheater Attenuator Piping in Power Plant

전창빈†
Chang-Bin Jeon

Key Words : Shell Mode Vibration, Acoustic Vibration

ABSTRACT

A majority of piping vibration problems are induced by internal fluid pulsation; turbulent flow, vortex shedding at internal discontinuities, and pressure pulsation at equipment nozzles. The pulsation at the pressure sources resonates acoustically with the piping and the amplified pressure pulsation can generate shell mode vibration in the piping. Reheater attenuator piping supplies water from feedwater pump to reheater attenuator to control the boiler temperature. In normal operating condition, the high frequency shell mode vibration occurred in the piping with the high level of sound(105 ~ 117 dB). The vibration sources are pressure pulsation in the pump nozzle and the frequencies are related to the blade passing frequencies. The objects of this paper are to analyze the cause of the high frequency vibration and to establish corrective actions.

감방안을 수립하고자 한다.

1. 개요

배관진동은 기계적 가진력(회전기기의 불평형력이나 모멘트에 의한 배관진동)에 의해 발생하기도 하지만, 주로 배관 내 난류유동, 분기관 입구과 같은 불연속부의 와류, 회전기기의 압력맥동 등에 의해 발생한다. 가진원으로부터 생성된 진동에너지는 배관계의 구조적 진동특성 또는 음향적 진동특성에 의해 증폭되어 배관계에 고진동과 과도한 소음을 유발하기도 한다.

발전소에서 흔히 볼 수 있는 진동은 30 Hz 이내의 저주파 Beam Mode 진동이지만, 간혹 원심펌프, Control 밸브, 유량제한용 벤츄리 및 오리피스 등이 설치된 배관계에서는 고주파 Shell Mode 진동이 발생하기도 한다. 원심펌프 배관계에서 발생하는 고주파 진동은 펌프 회전수와 관련이 있으며, 펌프의 깃통과 주파수(Blade Passing Frequency)에 의해 가진되는 경우가 많다.

재열기 온도조절 급수배관은 급수펌프에서 보일러 재열기로 연결되는 배관(DN 80)으로 급수펌프의 중간단에서 급수를 공급받아 재열기로 분사하여 보일러의 과열을 막는 기능을 수행한다. 발전소 시운전 중 재열기 급수배관에서 고주파 Shell Mode 진동과 함께 105 ~ 117 dB 의 높은 소음이 발생하였고, 소음진동 신호에서 맥놀이 현상(Beating)이 확인되었다.

본 연구에서는 재열기 온도조절용 급수배관에서 발생하는 소음진동의 원인을 분석하고 진동저

2. 계통 구성

재열기 온도조절용 급수배관은 급수펌프에서 물을 공급받아 재열기로 분사하여 보일러의 과열을 막는 기능을 수행한다. 정상운전 중에는 사용하지 않고, 휘발분이 많은 저질탄 사용 등으로 보일러가 일시적으로 과열될 때, 보일러의 온도를 신속히 낮추기 위해 사용한다.

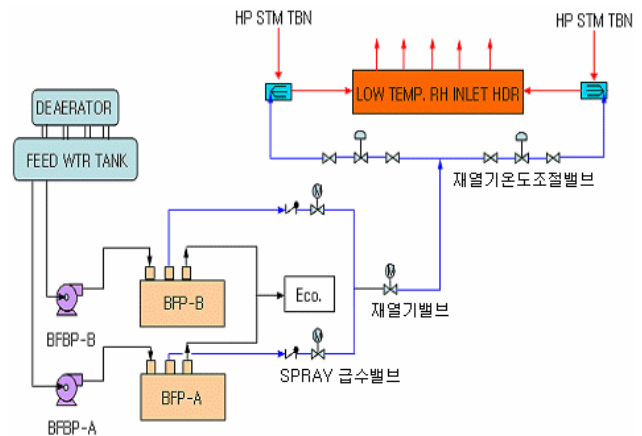


Fig. 1 재열기 온도조절 급수배관 계통

Fig. 1 은 재열기 온도조절 급수배관 계통으로 급수펌프, SPRAY 급수밸브, 재열기밸브, 재열기온도조절밸브, 재열기헤더 등으로 구성되어 있다. 자동 운전모드에서 급수펌프 후단의 SPRAY 급수밸브는 펌프가 기동되면 자동으로 열리고 운전원에 의해 강제로 닫히기 전까지 항상 열린 상태를 유지한다. 재열기온도조절밸브는 보일러 온도에 따

† 전창빈; 한국전력기술(주)
E-mail : changbin@kopec.co.kr
Tel : (031) 289-3678

라 개도가 자동으로 조절되며 필요한 유량을 재열기로 분사한다. 보일러 정상운전 시 온도조절밸브 전단의 재열기밸브와 온도조절밸브 전후단에 설치된 수동 차단밸브는 항상 개방상태를 유지하며, 온도조절밸브를 유지보수할 경우에는 차단밸브를 닫고 수리를 하게 된다.

재열기 온도는 주로 버너 화염을 조절하여 수행하나, 보일러의 연소상태가 불안정하거나 휘발분이 많은 저급탄 연소 시에는 순간적으로 보일러의 온도가 상승하여 화염 조절기에 의해 신속하게 재열기 온도를 제어할 수 없으므로 이때는 온도조절밸브를 열고 재열기에 급수를 분사하여 보일러의 온도를 제어한다.

3. 진동 특성 및 원인 분석

3.1 원심펌프 배관계의 진동 특성

원심펌프에 의해 발생하는 압력맥동은 펌프 회전속도의 정수 배에 해당하는 주파수를 가지고 있으며, 원심펌프의 회전속도와 임펠러 날개 개수의 곱으로 결정된다. 일반적으로 펌프의 가진주파수는 아래 식으로 계산한다.

$$f = \frac{nXY}{60}$$

f = 압력맥동 가진주파수, (Hz)

$n = 1, 2, 3, \dots$ (조화진동)

X = 펌프 회전속도, (rpm)

Y = 임펠러 날개 개수(원심형 펌프), 스크류의 나선 개수(스크류 펌프), 플런저 개수(왕복동 펌프), 날개 개수(fan)

회전기기의 운전조건도 배관진동에 영향을 미친다. 원심펌프의 경우 BEP(Best Efficiency Point)에서 벗어난 지점에서 운전할 때 유동특성에 의해 펌프 출구에서 압력맥동이 발생할 수 있다. 펌프 작동 시 펌프에서 발생한 압력맥동은 펌프에서 토출 배관으로 전달 되므로 압력맥동이 있는 배관계는 그 크기에 차이가 있을 뿐 항상 진동한다.

일반적으로 원심펌프에 의한 압력맥동은 크기가 작고 가진주파수가 배관계의 고유진동수보다 높기 때문에 배관계가 가진력에 의해 구조적으로 공진하는 예는 매우 드물다. 그러나 가진원의 압력맥동 주파수와 배관계의 음향공진 주파수가 일치하면 가진원의 작은 압력맥동에 의해서도 고주파 진동이 발생하고, 큰 음향 에너지에 의한 소음이 발생할 수 있다.

3.2 배관계의 Shell Mode 진동 특성

배관계의 진동 응답은 크게 저주파 Beam Mode 진동과 고주파 Shell Mode 진동으로 나눌 수 있다. Beam Mode 진동은 30 Hz 범위 내의 단순보 형태의 배관진동으로 발전소에서 흔히 볼 수 있는 진동이지만, Shell Mode 진동은 배관벽을 따라 발생하는 매우 작은 진폭(수 mils 이내)의 고주파진동으로 벽두께가 얇은 대구경 배관 또는 고속 회전기 연결 배관에서 간혹 발생하는 진동이다.

Fig. 2 와 같이 Shell Mode 진동은 배관벽이 원주 방향 또는 축 방향으로 가진되어 배관이 음향적으로 공진하는 현상이다. 배관에는 진동할 수 있는 잠재적인 Shell Mode 가 많이 있으므로 가진 주파수가 높을 때는 이들 중의 한 모드와 공진하기 쉽다.

Vibration forms for circular cylindrical shells

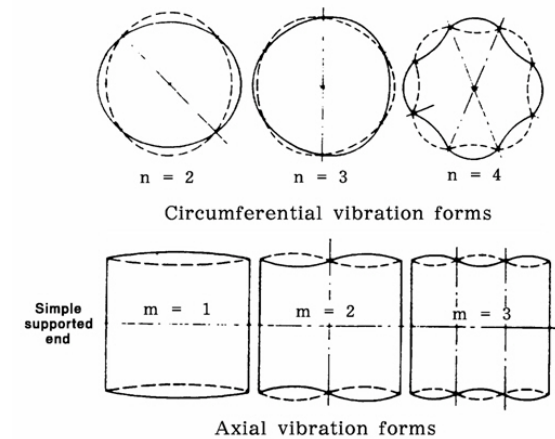


Fig. 2 배관벽에서 발생하는 Shell Mode 진동

Shell Mode 진동은 고주파 압력맥동이 원인으로 배관벽에 큰 가속도 값을 갖는 수 mils 이내의 진동과 과도한 소음이 발생한다. 배관계의 음향특성과 공진할 경우에는 압력맥동이 매우 크게 증폭되어 배관계가 손상되기도 한다.

3.3 음향응답 특성

음향공진(Acoustic Resonance)은 배관진동의 중요한 원인 중의 하나이다. 가진원에서 발생한 압력맥동이 크지 않더라도, 배관계 음향주파수와 공진하게 되면 압력맥동은 크게 증폭된다.

Fig. 3 과 같은 음향공진모드는 Standing Wave로 알려져 있으며, 배관계에는 주로 1/4 압력파(Open-Closed 경계조건)에 의한 음향공진이 발생한다. Standing Wave는 배관계 내에서 입사파와 반사파가 서로 반대방향으로 진행할 때 발생하며, 중첩에 의해 최소점과 최대점이 고정된 위치에서 일치하므로 정재파라고도 부른다.

Organ pipe resonant mode shapes

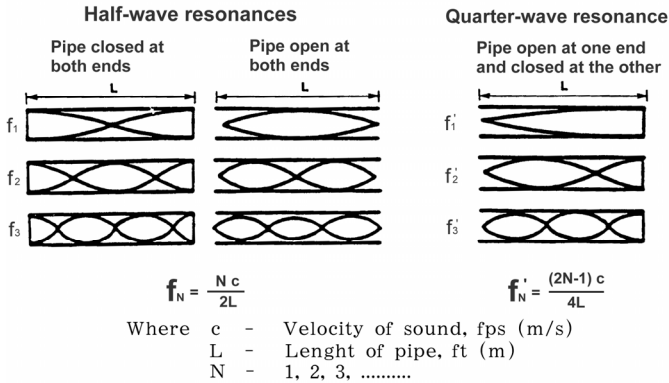


Fig. 3 음향공진 모드

3.4 진동 데이터 측정 및 분석

Fig. 4 는 재열기 온도조절 급수배관 배치도로 진동 측정지점과 압력맥동 해석을 위한 경계조건을 함께 표시하였다. 측정지점 A 는 급수펌프 A 에 인접한 위치이고, 측정지점 B 는 미분기 근처이며, 측정지점 C 는 보일러 근처이다.

측정지점 A 에서 측정한 배관진동의 주요 주파수 성분은 454 Hz와 457 Hz 로 보일러 급수펌프의 깃통과 주파수와 일치한다. 급수펌프의 정격 회전수가 5,820rpm 이고, 임펠러의 깃 수가 5 개이므로 임펠러의 회전으로 발생하는 깃 통과 주파수는 $(rpm \times \text{깃수}) \div 60 = 485 \text{ Hz}$ 가 된다. 급수펌프가 가변속 펌프임을 감안할 때 실제 회전수는 정격회전수보다 낮은 곳에서 운전되므로 진동 지배 주파수 성분인 457 Hz와 454 Hz는 펌프의 운전속도와 관련된 깃통과 주파수로 볼 수 있다.

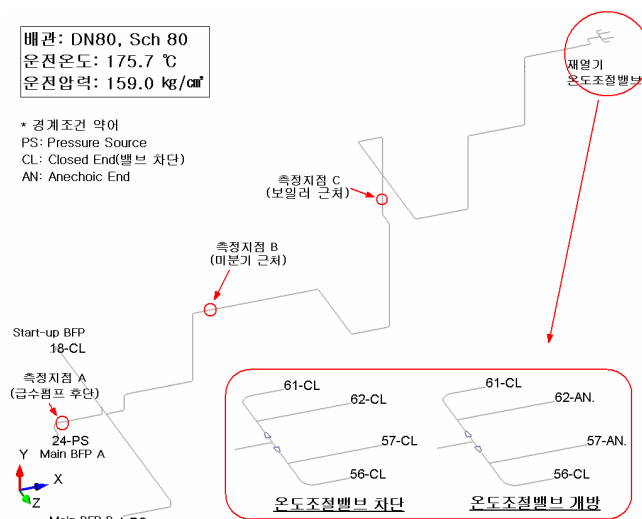


Fig. 4 재열기 온도조절 급수배관 배치 형상

Table 1 은 측정 데이터를 요약한 표로 Fig. 5 ~ 7

은 각 측정지점의 진동 데이터를 보여준다. 소음 레벨은 측정지점 A 에서 117.3 dB 로 가장 높고, 측정지점 B 에서 109.2 dB, 측정지점 C 에서 104.9 dB 로 가진원에서 멀어질수록 줄어든다. 또한, 두 주파수 성분의 상호 간섭에 의해 2.6~2.8Hz 의 맥놀이가 발생하며, 진동 변위는 측정지점 A 에서 5.6 mils(Pk-Pk) 이고, 측정지점 C 에서는 3.3mils (Pk-Pk)로 진동변위 역시 보일러 건물로 갈수록 크기가 줄어든다. 이것은 진동에너지의 일부가 배관계에서 감쇠 또는 마찰로 소모되기 때문이다.

Table 1 진동 측정 데이터

측정 지점	변위/가속도	소음 (dB, ref 20 μ Pa)	주파수 특성
A (급수펌프 후단)	5.6(Pk-Pk,mils) / 15.3(g, RMS)	117.3	454.2, 456.9 Hz 맥놀이(2.66 Hz) 발생 Shell Mode 진동, 지지대를 통해 구조물로 진동 전달(공통)
B (미분기 근처)	-	109.2	449.4, 452 Hz 맥놀이(2.65 Hz) 발생 접근 문제로 구조물에서 측정
C (보일러 근처)	3.3 / 12.2	104.9	447.5, 450.3Hz 맥놀이(2.81 Hz) 발생

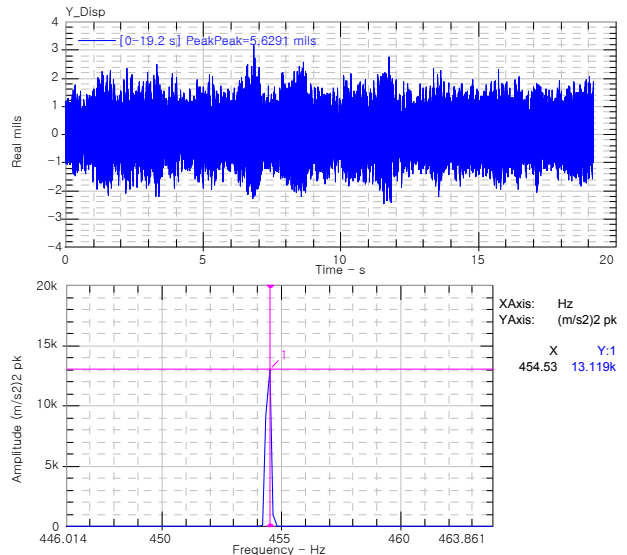


Fig. 5 측정지점 A 의 진동 데이터

배관계의 음향특성을 확인하기 위해 압력맥동 해석 프로그램(PULS, Pulsation Simulator)을 이용하여 음향해석을 수행하였다. 경계조건으로 Fig. 4 와 같이 재열기 측 밸브에 Closed End 조건을 설정하

고, 급수펌프 A, B 에는 440 Hz ~ 470 Hz 범위에서 크기가 일정한(1 Psi) 압력맥동을 가진원으로 입력하였다. 해석 결과, Fig. 8 과 같이 BPF 주파수 범위에 많은 음향공진모드가 만들어지고, 음향공진 주파수가 조밀하게 배열되어 가진원의 압력맥동에 의해 배관계가 음향적으로 공진할 가능성이 매우 높음을 알 수 있다. Fig. 9 는 온도조절밸브를 개방했을 때의 음향응답으로 Fig. 8 과 비교하면, 압력맥동의 크기가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다.

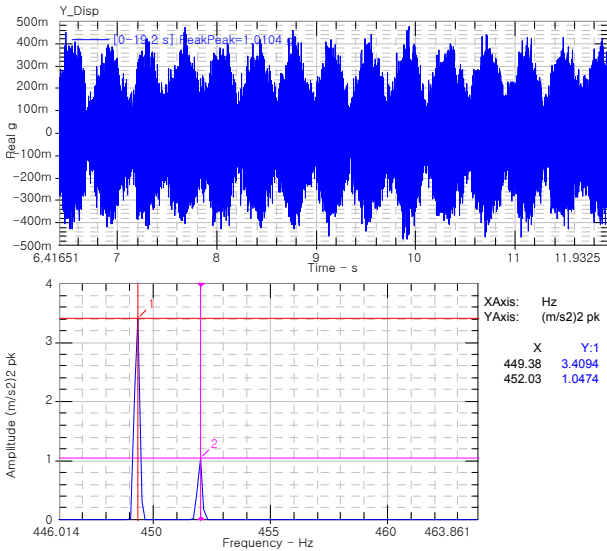


Fig. 6 측정지점 B의 진동 데이터

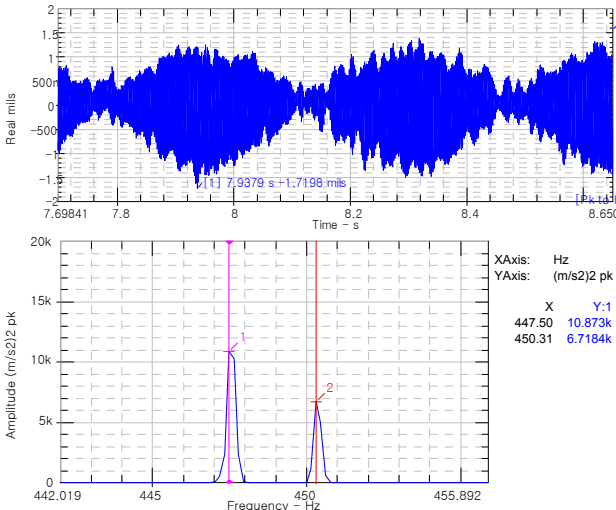


Fig. 7 측정지점 C의 진동 데이터

측정지점 A, B, C 의 측정데이터에서 Fig. 7 과 같은 맥놀이 현상을 확인할 수 있었다. 맥놀이 현상은 주파수가 비슷한 두 진동이 보강간섭과 소멸간섭을 교대로 일으켜 주기적으로 강약이 반복되는 현상으로 맥놀이의 주파수는 두 가진원의 주파수 차로 결정되고, 보강간섭에 의해 압력맥동은 2 배

로 증폭된다. 맥놀이를 일으키는 두 주파수 성분은 급수펌프 A, B 의 깃통과 주파수(BPF)이며, 맥놀이의 진동수는 2.7~2.8 Hz 이다.

Pressure Pulsation at Node 62

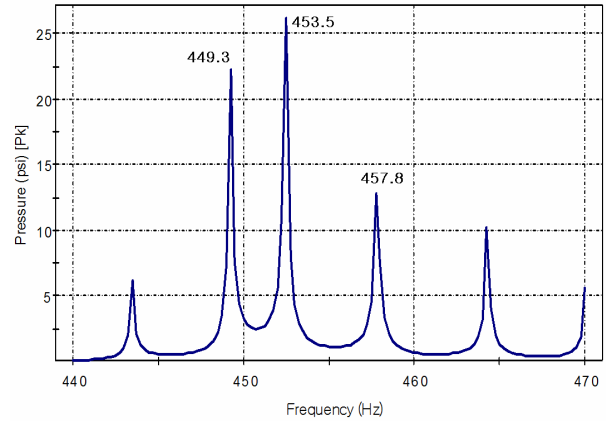


Fig. 8 배관계 음향응답특성(온도조절밸브 차단)

Pressure Pulsation at Node 62

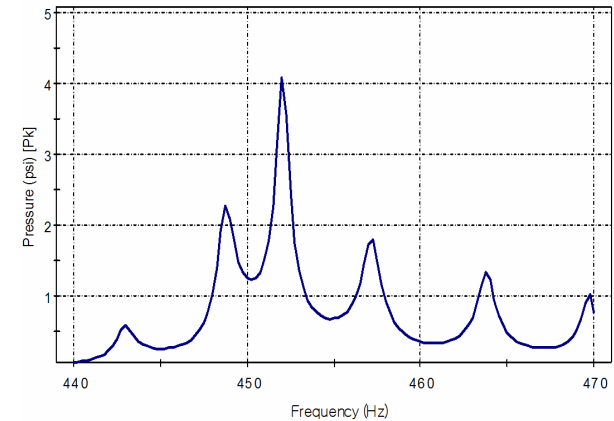


Fig. 9 배관계 음향응답특성(온도조절밸브 개방)

3.5 고진동 원인

데이터 분석 결과, 재열기 급수배관에서 발생하는 고주파 진동의 원인은 급수펌프의 압력맥동이며, 정상운전 중 급수펌프 토출부에서 발생하는 압력맥동이 배관계의 음향특성에 의해 증폭되어 고주파 진동이 발생하는 것으로 분석되었다. 정상운전 중에는 온도조절밸브가 Closed End 경계조건이 되고, 펌프 출구 가진원에서 일정한 압력맥동이 발생하므로 배관계에 음향공진이 발생할 수 있는 Closed Open 경계조건이 만들어진다. 또한, 가진원의 주파수 차에 의해 발생하는 맥놀이 현상도 압력맥동을 증폭시키는 원인으로 볼 수 있다.

4. 진동 저감 방안

Shell Mode 진동은 진폭이 매우 작으므로 배관 지지대를 설치하여 진동을 구속할 수 없다. 고주파 배관 진동을 줄이기 위해서는 근본원인을 제거하거나, 생성된 진동 에너지가 증폭되는 과정을 차단하는 방법이 효과적이다.

- 펌프의 압력맥동 감소
펌프 제작자가 고려할 사항으로 가진원인 깃통과 주파수를 음향공진 주파수와 분리시키기 위하여 펌프 내부의 간극을 조정하거나, 깃수 및 깃 부착 위치 등을 변경하여 펌프로부터 발생하는 압력맥동을 줄인다.
- Shell Mode 주파수 변경
Shell Mode 에 의한 공진을 피하기 위하여 배관 벽의 두께를 변경하는 방법으로 배관 교체를 위해 장시간 발전소를 정지시켜야 하므로 건설이 완료된 가동 중인 발전소에는 적용하기 어렵다.
- 댐퍼에 의한 감쇠
배관 두께 변경이 어려운 경우에 적용하는 방법으로 배관과 지지구조물 외벽에 댐퍼(Visco-Elastic 재료)를 설치하고 Con-straining Layer 를 Clamp 등으로 고정하여 진동을 감쇠시킨다.
- 음향 차단 피복(Acoustic Lagging)
진동이 문제가 되지 않는 경우 과도한 소음을 차단하기 위해 사용하며, 소음 특성에 적합한 흡음재를 선택하는 것이 매우 중요하다. 이 방법과 댐퍼에 의한 감쇠방법은 소음이 발생하는 배관의 길이가 너무 길어(약 150m) 현실적으로 적용하기 어렵다.
- 배관계의 음향특성 변경
배관계의 음향길이를 변경하여 가진원의 주파수와 배관계의 음향주파수를 분리하거나, 음향 댐퍼(Pulsation Dampener, Side Branch Resonator)를 이용하여 배관계에서 압력맥동을 감쇠시키는 방법으로 배관계의 음향길이를 짧게 하여 음향공진 주파수와 가진 주파수를 분리하는 방법은 음향길이 변경에 한계가 있으며, 음향 댐퍼를 부착하는 방법은 음향 해석과 함께 설계변경이 필요하다.
- 운전절차 개선
근본적으로는 가진원의 압력맥동을 줄이거나 배관계의 음향특성을 변경하는 방법이 근본적인 해결 방법이지만, 설계변경과 시운전 공정에 미치는 영향 때문에 적용이 쉽지 않다.
운전절차 개선을 통한 방안은 급수펌프 출구 측

의 SPRAY 급수밸브 중 1 개를 열고 나머지 한 개는 차단하여 운전하는 것으로 이 방법을 적용하면 정상운전 중 소음진동 문제가 크게 개선된다. 이 방법은 두 개의 가진원에서 발생하는 맥놀이 현상을 차단하는 방법으로 배관계에서 압력맥동이 증폭되는 것을 쉽게 줄일 수 있어 효과적이다.

1 개의 SPRAY 급수밸브 만으로 운전하더라도 급수펌프 1 대의 정격유량이 1,053ton/h 이고 온도조절용 급수량이 약 20 ton/h (급수펌프 급수량의 1.9%)이므로 급수펌프 성능에 미치는 영향은 미미하다. 운전절차를 개선하기 위해서는 운전 Logic 을 바꿔야 하며 SPRAY 급수밸브가 다른 원인에 의해 차단되더라도 기능이 원활히 수행될 수 있도록 Logic 을 구성하여야 한다.

5. 결 론

- 재열기 온도조절 급수배관의 고주파 진동 발생 원인은 급수펌프 토출구에서 발생한 압력맥동과 배관계의 음향특성에 의한 압력맥동의 증폭이다.
- 2 개의 SPRAY 급수밸브 중 1 개를 닫고 운전하도록 운전절차를 개선하면 급수펌프에서 발생하는 압력맥동의 크기를 줄일 수 있고 맥놀이를 차단하여 압력맥동의 증폭을 줄일 수 있다.
- 운전 절차를 수정하기 위해서는 운전모드를 검토하여 Logic 에 반영하여야 하며, 다른 원인에 의해 Spray 급수밸브가 차단되더라도 영향이 없도록 Logic 을 구성하여야 한다.
- 가진원에서 발생하는 압력맥동을 줄이거나 음향 댐퍼를 이용하여 고주파 진동을 줄이는 방안에 대해서도 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) D. E. Olson, "Piping Vibration Monitoring and Analysis", Sargent & Lundy 기술자료
- (2) Stephen M. Price, Donald R. Smith, "Sources and Remedies of High-Frequency Piping Vibration and Noise"
- (3) J. C. Wachel, "Acoustic Pulsation Problems in Compressors and Pumps", EDI 기술자료
- (4) C. R. Sparks, J. C. Wachel, "Pulsation in Centrifugal Pump and Piping Systems", EDI 기술자료
- (5) PULS(Pulsation Simulator Software) User's Guide