

발전소 6인치 역지밸브 손상 원인 분석

Investigation on the Degradation Mechanism of 6" Swing Check Valve for Nuclear Power Plant

이선기, 이준신, 김태룡
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 분기관에 설치되어 있는 6" swing check valve 중 일부에서 seat 면이 다소 손상되어 O/H 기간중에 시트면 연마정비 또는 밸브 교체정비를 수행하였다.

본 논문에서는 실험적 및 이론적 연구를 통하여 밸브 시트면 손상 원인을 분석하였으며, 분석 결과 구조공진 및 음향공진의 복합적인 작용에 의한 밸브 chattering이 손상 원인임을 규명하였다.

Abstract

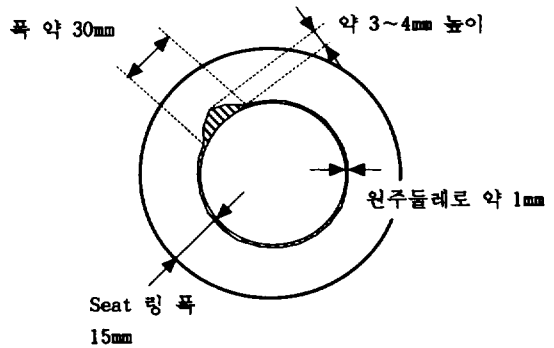
Degradation occurred at the 6 inch swing check valve in nuclear power plant. Valve replacement and maintenance were carried out during the plant O/H. This report examined the degradation mechanism of the 6 inch check valve by the experimental and theoretical study. Results shows that the degradation was caused by valve chattering which due to the structural and acoustic resonance.

1. 서 론

원자력발전소 분기배관에 설치되어 있는 6" swing check valve 중 일부에서 seat 면에 약간의 손상이 발견되어 O/H 기간중에 시트면 연마정비 또는 밸브 교체정비를 수행하였다.

그림 1에 역지밸브 seat 링에서 발생한 손상의 개략도를 나타낸다. 밸브 seat 링의 폭은 15mm이며 밸브 disc가 seat 링과 접촉하는 부위는 seat 링의 13mm되는 부위로(즉, 밸브 seat 링과 disc 접촉부는 2mm임) seat 링과 disc의 접촉부위 안쪽 원주방향 전체에 걸쳐 손상이 발생한 상태이다.

본 논문에서는 상기의 역지밸브를 대상으로 실험적 및 이론적 연구를 통하여 밸브 시트면 손상 원인을 규명하였다.



<그림 1> 밸브 Seat 링 손상상태 개략도

2. 6" 역지밸브 온도, 압력, 진동 실측실험

대상인 6인치 역지밸브는 주계통에 연결된 분기관에 각 1대씩 총 6대(즉 분기관의 수는 6

개임)가 설치되어 있으며 각 분기관에 따라 밸브를 편의상 V055~V060으로 부르기로 한다. 대상 밸브중 V059에 대하여 발전소 예방정비 기간중 밸브 전후단에 온도센서 및 가속도 센서를 설치하여 밸브의 누설 여부 및 가동 중의 밸브 진동을 실측하였으며, 또한 밸브 후단에 기 설치된 압력계를 이용하여 발전소 운전중 압력변화 추이도 감시하였다.

온도측정 결과에서는 밸브를 통한 누설은 발생하고 있지 않음을 확인하였으며 밸브 후단에 설치된 압력계에서도 특이한 압력변화는 나타나지 않는 등 밸브 후단의 이상징후는 현재까지는 발견치 못했다.

한편 진동측정은 발전소 계통 온도 170℃ 및 300℃와 330℃에서 측정하였으며 측정결과를 그림 2에 나타낸다. 그림의 세로축은 속도(mm/sec), 가로축은 주파수(Hz)를 나타내고 있다. 그림에서 각 경우 모두 지배주파수는 278Hz를 나타내고 있으나 배관 내부의 유체 온도가 170℃, 300℃, 330℃로 커짐에 따라 진동 크기 또한 0.034mm/sec, 0.34mm/sec, 0.68mm/sec로 커지고 있음을 알 수 있다. 계통 온도 330℃는 발전소 정상운전 조건에 해당되며, 이 운전조건에서 대상인 6" 역지밸브의 진동이 가장 크다.

상기의 278Hz 성분은 다음 식으로 계산되는 주계통에 설치된 펌프(회전수 1190rpm, 임펠러 날개 수(z) 7)의 회전주파수 성분임을 알 수 있다.

$$f_n = \frac{n \times rpm \times z}{60} = \frac{n \times 1190 \times 7}{60} = n \times 139Hz \quad (1)$$

3. 밸브 손상 메카니즘 검토

대상 6" 역지밸브의 손상 메카니즘에 대해서 손상부위 관찰 및 분석, 진동실측 결과로부터 밸브의 chattering이 손상 원인으로 결론지었으며 chattering 발생 기구로는 (1) 주계통에 설치된 펌프의 회전주파수 성분과 분기관의 고유진동수와의 구조공진에 의한 밸브 chattering, (2) 주계통의 미세 압력맥동과 분기관의 음향공진에 의한 밸브 chattering, (3) 분기관 입구에서

생성되는 vortex 발생 주파수와 계통의 구조공진 및 음향공진에 의한 밸브 chattering 등을 들 수 있다.

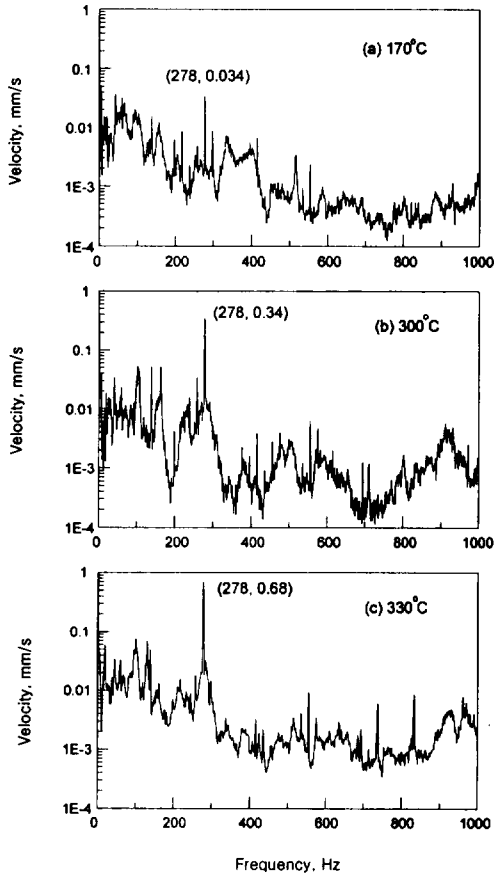
이하에 상기의 각 손상 메카니즘에 대하여 항목별로 검토하여 밸브 손상에 대한 원인 여부를 판단한다.

3-1. 주계통 펌프의 회전주파수 성분과 분기관의 고유진동수와의 구조공진에 의한 밸브 chattering

주계통에는 펌프 회전주파수 성분인 139Hz(1차)와 이의 고조파 성분인 278Hz(2차), 417Hz(3차), ... 이 존재한다. 이 펌프의 회전주파수 성분과 대상 밸브가 설치된 분기관과의 구조적인 공진 여부를 판단하기 위해 실제 고유진동수 측정 실험을 수행하였다. 결과를 그림 3에 나타낸다. 그림에서 가로축, 세로축은 그림 2와 동일하게 주파수(Hz) 및 속도(mm/sec)를 나타내며 그림의 (a)~(f)는 각 분기관에 해당하는 밸브를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 대상 밸브가 설치된 분기관의 고유진동수는 모두 100Hz 이하의 주파수 성분이 지배적으로 나타났으며, 지금 문제가 되고 있는 278Hz 부근의 주파수 성분은 명확하게 나타나지 않고 있어 이 결과로써 공진 여부를 판단하기에는 무리가 있다고 생각된다.

한편 해석적인 방법으로 대상 분기관의 고유진동수를 구하기 위하여 ANSYS 코드를 사용하여 해석하였으며 해석결과를 표 1에 정리하였다. 그림 2에 나타낸 분기관의 진동실측 결과에서는 주계통의 펌프 회전주파수 성분인 278Hz가 지배적으로 나타났으며 표 1의 구조해석 결과에서는 제 21차 모드에서 약 282Hz로 두 주파수 성분이 상당히 근접해 있어 구조공진의 가능성이 내재하고 있음을 알 수 있다. 또한 제 21차 모드에서의 배관 거동을 살펴보면 역지밸브 부위에서의 거동이 매우 크게 나타나고 있어 밸브 부위에서는 제 21차 모드인 282Hz가 지배적이라 할 수 있다.

즉, 주계통에 설치된 펌프의 회전주파수 성분(278Hz)과 분기관 밸브부위의 고유진동수(282Hz)와 상당히 근접한 결과를 나타내고 있어 두 성분에 의한 구조공진 가능성을 시사하고 있다.



<그림 2> 6" 역지밸브 부위에서 계측한 진동신호

<표 1> 대상 분기관 구조해석 결과

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
1	8.4	14	129.4
2	23.5	15	179.3
3	31.7	16	188.4
4	31.8	17	216.8
5	36.8	18	240.2
6	44.2	19	245.8
7	64.3	20	252.3
8	74.8	21	281.8
9	82.6	22	376.9
10	88.9	23	434.1
11	105.0	24	445.7
12	108.9	25	473.9
13	110.3		

3-2. 주계통의 압력맥동과 분기관의 음향공진에 의한 밸브 chattering

앞에서 기술한 바와 같이 주계통에는 펌프의 회전주파수인 139Hz(1차)와 이의 고조파 성분(278Hz(2차), 417Hz(3차), ...)이 존재하며 실제로 대상 분기관 계통에서 진동을 실측한 결과 주계통 펌프 회전 주파수의 2차 성분인 278Hz가 지배적이었다. 이 주파수 성분과 대상 분기관 계통과의 음향공진 여부를 검토한다.

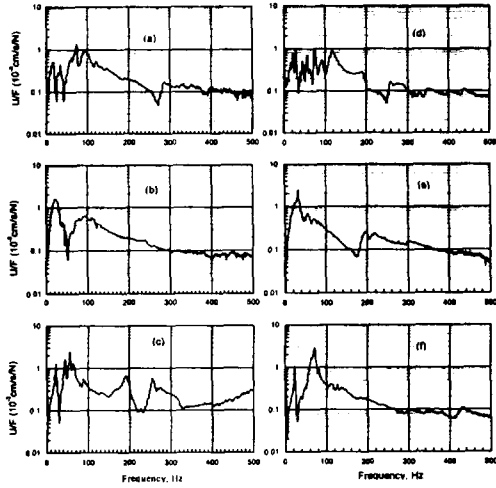
분기관의 음향공진 주파수는 다음 식으로 계산한다.

$$f_n = \frac{na}{2L} \quad (2)$$

여기에서, a : 음속, L : 배관길이이다.

상기 식에 의하면 분기관의 진동 모드는 음속 및 배관길이의 함수로써 특히 음속은 배관 내부의 유체온도에 의존한다. 위의 식을 대상 발전소 분기관에 적용하여 계산한 결과를 표 2에 각 분기관(밸브)에 대해서 나타낸다. 표에 의하면 밸브 V055, V056을 제외하고 음향공진 주파수는 주계통 펌프의 회전주파수 성분인 278Hz와 근접하고 있어 음향공진을 일으킬 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

한편, 앞 절에서도 기술한 바와 같이 대상 분기관 역지밸브의 진동을 발전소 가열조건 및 정상 출력조건에서 실측한 결과에서는 정상 출력조건에서 진동이 가장 큰 결과를 얻었다. 즉, 주계통의 온도가 높을수록 진동이 크다는 결과이었다. 통상적인 실험결과(EPRI 보고서 TR-107455 참조)에서는 주계통측의 온도가 고온일수록 진동이 약해지는 것이 일반적이나 본 경우에는 주계통측의 온도가 고온일수록 진동이 심하다는 결과이다. 이것은 주계통의 온도 증가와 더불어 분기관의 음향진동 모드가 펌프 회전주파수 성분에 접근하여 공진을 일으킨다는 것을 의미한다. 즉, 주계통의 압력맥동과 분기관과의 음향공진으로 밸브에서는 chattering이 발생하여 chattering 시의 충격 손상, 밸브 seat 링과 disc 접촉부위에서 마모발생, 마모로 인하여 부식이 촉진될 수 있다.



<그림 3> 대상 분기관관의 고유진동수 실측 주파수 분석 결과
 * (a)V058, (b)V055, (c)V059, (d)V060, (e)V056, (f)V057

한편 주계통의 압력맥동이 분기관에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulations of engineering systems) Code를 이용하여 역지밸브(V059) 부위의 압력변화를 계산하였다. AMESim Code는 유압해석 전용 Code로써 분기관 등에 작용하는 압력맥동의 영향을 해석하는 데에 최적이라고 판단된다.

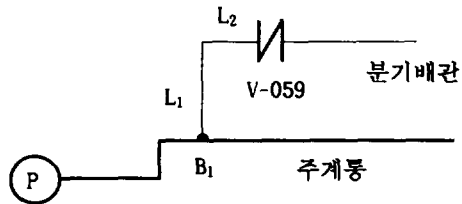
해석 모델의 개략도를 그림 5에 나타내며 주계통에는 주파수 139Hz, 기준 압력 157.8 bar에 진폭 0.0002 bar의 미세 압력맥동을 설정하였다.

그림 5는 그림 4의 B₁ 지점(분기배관 입구)에 대한 해석결과로써 압력파형(그림 5(a)) 및 주파수 응답특성(그림 5(b))을 나타낸다. 그림에서 가로축은 시간 및 주파수를, 세로축은 압력을 나타낸다. 먼저 압력파형의 결과를 보면 입력한 압력맥동보다도 증폭된 압력을 나타내고 있으며 또한 주파수 응답 특성에서는 입력 압력맥동 주파수인 139Hz의 압력보다 10Hz 및 280Hz에서 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

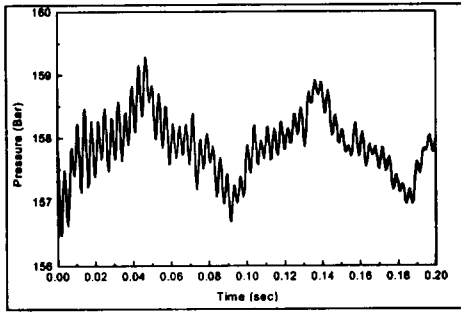
<표 2> 분기관관의 음향 진동수 계산 결과

	Cold Leg			Hot Leg		
	V055	V056	V057	V058	V059	V060
역지밸브						
L ₁ (inch)	31.25	37.25	43.25	31.06	29.5	29.5
L ₂ (inch)	29	32	29	29	29	29
L ₁ 보정(in)	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92
유체온도 (°C)	292.8	295.5	291.9	332.3	330	332.3
온도(°C)	282	285	281	320	318	320
압력 (bar)	157.8	157.8	157.8	157.8	157.8	157.8
음속 (m/sec)	1065	1052	1069	844	859	844
공명 주파수 (Hz)	342.1	294.7	287.2	271.9	284.1	279.1

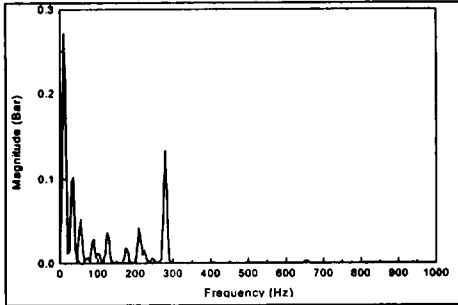
그림 6은 그림 4의 역지밸브 입구부에서의 압력파형(그림 6(a))과 주파수 응답 특성(그림 6(b))을 나타낸다. 압력파형에서는 상기 B₁ 지점에서보다도 증폭된 압력변동을 나타내고 있어 주계통의 미세한 압력맥동은 분기관에서 증폭되고 있음을 알 수 있다. 주파수 응답특성에서는 입력 주파수인 139Hz의 압력은 상대적으로 크지 않으며 10Hz, 210Hz, 280Hz, 280Hz, 650Hz에서 비교적 큰 값을 나타내고 있으며 특히 210Hz 부근에서 가장 크다.



<그림 4> 분기관 압력맥동 영향 해석 모델 개략도

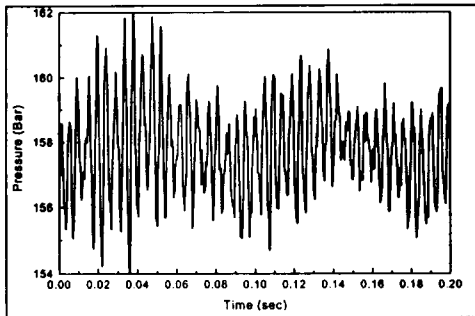


(a) 압력 파형

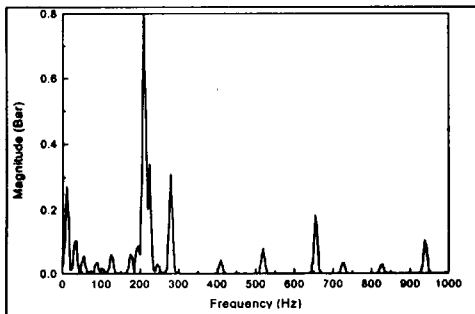


(b) 주파수 특성

<그림 5> 분기관 B₁ 지점에서의 압력파형과 주파수 특성



(a) 압력파형



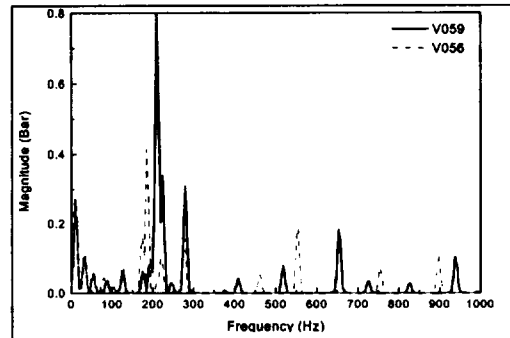
(b) 주파수 특성

<그림 6> 역지밸브 V059 부위에서의 압력파형과 주파수 특성

한편 그림 4의 L_1 , L_2 를 변화시켜 상기와 동일한 해석을 수행하였다. 표 3에 L_1 , L_2 의 분기배관 길이를 나타내며 그림 7에 해석결과와 주파수 응답특성을 V059와 비교하여 나타낸다. 그림에서 실선은 V059를, 점선은 V056에 대한 결과이다. 그림에서 분기배관의 길이 변화(V059보다 V056의 배관길이가 김)에 의한 주파수는 약간 저주파 영역으로 이동되는 경향을 보이고 있다. 그러나 압력진폭의 크기는 V059에 비해 V056이 현저하게 작아지고 있으며 특히 문제가 되고 있는 280Hz에서의 압력진폭은 약 1/2로 줄어드는 결과를 나타내고 있다.

<표 3> 해석대상 분기배관 길이

Valve	L_1 (inch)	L_2 (inch)
V059	29.5	29.0
V056	37.25	32.0



<그림 7> 분기배관의 길이변화에 따른 역지밸브 부위 압력파형의 주파수 특성 비교

이상의 해석결과로부터 주계통의 미세 압력 맥동이 분기관에 의해 증폭되고 있으며 특히 역지밸브 부위에서 가장 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 주계통의 미세 압력변동 주파수 139Hz 성분은 분기관에서는 감소되고 280Hz 성분이 증폭되고 있으나 그 크기는 분기배관의 길이에 의존하고 있다.

즉, 분기점에서부터 역지밸브까지의 관로 길이에 따라 문제가 되고 있는 280Hz의 압력진폭의 크기에 차이가 나타나며 실제 배관 길이에 따라 손상정도가 다르게 나타나는 것도와 같은 이유로 판단된다.

3-3. 분기관에 생성되는 vortex 주파수와 분기관과의 구조공진에 의한 밸브 chattering

주배관 계통에 연결된 분기관에는 그림 8에 나타내는 바와 같이 계통의 유동이 분기관에서 박리(separation) 및 재부착 현상이 발생하여 vortex가 생성된다. 이때 분기관의 모서리가 예리하게 모가 난 형상일 때에는 박리 및 재부착 시간이 일정하여 일정 주파수의 vortex가 발생하며 이 vortex 생성 주파수와 분기관의 고유진동수 및 공명주파수와 일치하게 되면 밸브 chattering을 유발할 수 있다.

분기관 vortex 발생 주파수는 다음 식으로 계산한다.

$$f = S_t \times V / D \quad (3)$$

f : vortex 발생 주파수

S_t : Strouhals No. (S_t 값은 실험으로 구해지는 계수로써 Re. No.에 의해서 0.2 ~ 0.5 사이의 값을 가지나 보통 배관 시스템 분기관에서는 약 0.30 부근임)

V : 주 배관 유속

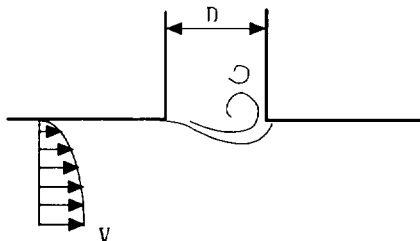
D : 분기관 직경

위 식에 의하여 대상 분기관에 발생하는 vortex 발생 주파수를 계산하면

$$f = 0.3 \times 15.0 / (5.189 \times 2.54 / 100) = 34.2 \text{ Hz}$$

이다.

표 1에 나타낸 분기관에 대한 구조해석 결과에서는 제4차 및 제5차 모드가 31.8Hz, 36.8Hz로써 상기의 vortex 발생 주파수와 근접하고 있으나 진동실측 실험(그림 2)에서는 278Hz가 지배적으로 상기의 34Hz 근방의 주파수는 문제가 되지 않으므로 vortex 발생주파수와 분기관 고유진동수와의 구조공진은 발생하지 않는 것으로 판단된다.



<그림 8> 분기관의 vortex 생성 모양

4. 밸브 손상 메카니즘

6" 역지밸브 손상원인을 실험적 해석적으로 검토한 결과 다음의 2가지 경우가 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다.

(1) 주계통에 설치된 펌프의 회전주파수 성분과 분기관의 고유진동수와의 구조공진에 의한 밸브 chattering

(2) 주계통의 미세 압력맥동과 분기관의 음향공진에 의한 밸브 chattering

즉, 주계통에는 운전중인 펌프의 회전주파수 성분(139Hz)의 미세한 압력맥동이 상존하며, 이 미세한 압력맥동은 분기관에서 증폭되어 역지밸브 부위에서 최대가 된다. 이때 주파수 특성 또한 분기관의 고유진동수 및 음향공진 주파수와 근접하게 됨으로써 공진을 일으키는 것으로 판단된다.

공진으로 인한 밸브 disc의 chattering 및 seat ring과 disc 접촉부위에서의 마모, 부식 촉진 등으로 손상이 발생하게 된다.

5. 밸브 손상 방지 대책

대책으로는 분기관의 구조공진 주파수 및 음향공진 주파수와 펌프의 회전주파수와의 공진을 회피하여야 한다.

먼저 구조공진을 피하기 위한 가장 현실적인 방안으로는 분기관에 설치된 역지밸브 부위에 지지물 설치 등의 보강을 들 수 있다. 그림 9에는 역지밸브 부위에서 좌측으로 약 15cm 되는 곳에 배관 좌우방향을 구속시켜 구조해석을 수행한 결과를 나타낸다. 해석결과, 문제가 되는 280Hz 근방의 고유진동수는 274Hz, 288Hz로 변하여 구조공진을 회피할 수 있으며, 이때의 배관 거동은 274Hz(그림 9(a)) 모드 경우는 거의 문제되지 않으며 288Hz(그림 9(b))의 경우에도 1/2 이하로 감소하였으므로 지지물의 보강이 유효함을 알 수 있다.

한편, 음향공진을 회피하기 위해서는 문제가 되는 280Hz 부근의 음향진동수를 갖고 있는 밸브 V057, V058, V059, V060의 위치를 하류 쪽으로 변경하는 방법이 유효하다. 밸브 위치가 변함으로써 음향공진을 피할 수 있으며, 또한

주계통의 미세 압력맥동이 분기관에서 증폭되는 크기도 감소시킬 수 있기 때문이다.

분기관의 설계변경 없이 역지밸브의 chattering을 완화시킬 수 있는 방법으로는 지금 문제가 되고있는 280Hz 성분에 대한 흡진기를 밸브부위에 설치하는 것도 유효할 것으로 생각된다. 흡진기를 설치함으로써 분기관의 280Hz 성분은 분산되어 공진에 의한 밸브 chattering이 완화될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 자세한 언급은 하지 않았으나 역지밸브의 후단측 조건(즉, 물로 충수되어 있는 조건과 물로 충수되어 있지 않고 공기로만 채워져 있는 조건, 물과 공기가 반반 정도 채워져 있는 조건) 또한 밸브 손상에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 즉, 밸브 후단측이 물로 채워져 있는 경우에는 주계통의 미세 압력맥동이 분기관에서 증폭될 때 damping의 역할을 함으로써 chattering의 완화로 작용하여 밸브 손상 방지에 도움이 될 수 있으므로 밸브 후단측의 충수 여부에 세심한 주의가 필요하다.

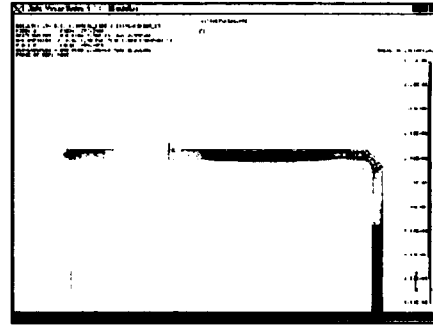
6. 결 론

발전소 분기관에 설치된 6" 역지밸브 시트면 손상의 원인을 규명하기 위하여 전력연구원 및 현장 담당자와 합동으로 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

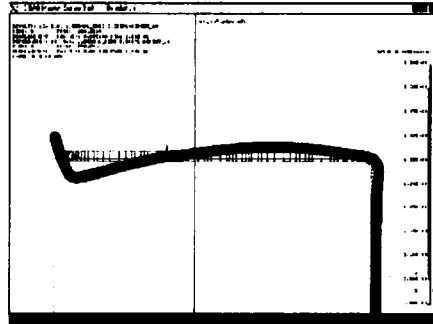
밸브 손상은 주계통에 설치된 펌프의 회전주파수 성분과 분기관의 고유진동수와 구조공진 및 주계통의 미세 압력맥동과 분기관의 음향공진이 복합적으로 작용하여 chattering이 발생한 결과이며, 대책으로는 구조공진을 피하기 위한 구조적인 보강 및 음향공진을 피하기 위한 밸브위치의 변경 혹은 흡진기를 이용한 공진주파수의 분산이 유효하다.

참고문헌

- [1] "Application Guide for Check Valves in Nuclear Power Plants", EPRI NMAC NP-5479.
- [2] "Valve Application, Maintenance, and Repair Guide", EPRI NMAC TR-105852, December 1996.
- [3] "Vibration Fatigue of Small Bore Socket-Welded Pipe Joints", EPRI TR-107455, June 1997.
- [4] "Boric Acid Corrosion of Carbon and Low-Alloy Steel Pressure-Boundary Components in PWRs", EPRI NP-5985, 1988.
- [5] "Boric Acid Corrosion Guidebook", EPRI TR-104748, 1995.



(a) 274 Hz에서의 모우드



(b) 288 Hz에서의 모우드

<그림 9> 분기관 6" 역지밸브 부위 구속후 구조해석 결과