

<논 문>

역지밸브 채터링 현상 해소방안 연구

A Study on the Chattering Phenomena of a Check Valve

유기완[†] · 이준신* · 김태룡*

Ki-Wahn Ryu, Jun-Shin Lee and Tae-Ryong Kim

(2001년 8월 22일 접수 : 2001년 11월 21일 심사완료)

Key Words : Check Valve(역지밸브), Chattering Phenomena(채터링 현상), Tapping Noise(타격소음), Flowinduced Vibration(유체유발진동), Auxiliary Cooling Water Pump(보조냉각수 펌프)

ABSTRACT

The cause and the elimination method for the chattering phenomena were investigated in a check valve attached to the exit of an auxiliary cooling water pump in a Korean nuclear powerplant. From the site experiment and the numerical calculation, the incident angle of the disk was so small that it was not able to produce the sufficient lifting force to overcome the gravitational component of the disk weight. Moreover, it turned out that the installation position was not symmetric for the secondary vortical flow generated inside the elbow, so that the flow structure had strongly unstable flow characteristics. From this study, the tapping noise and the chattering phenomena were eliminated exactly by changing the incidence angle of the valve disk and the installation position of the valve body.

1. 서론

역지밸브(check valve)는 배관내의 역류를 방지할 목적으로 플랜트의 배관계통에 설치되나 경우에 따라서는 여러 가지 요인에 의해서 밸브 디스크의 채터링 현상(chattering phenomena)에 의한 공학적 문제를 야기시킨다. 채터링 현상은 유동유발진동과 타격소음을 동반하는데 여기서 타격소음은 밸브 디스크에 부착된 멈춤쇠(stopper)가 배관 내측을 치는 현상에 의해서 발생하는 소음을 말한다. 본 연구의 동기는 국내 가동중인 발전소에 있는 보조냉각펌프의 출구측에서 수년간 발생되어온 밸브 채터링현상의 원인을 파악하고 그 발생원인을 제거 할 필요성에 의해서 시작

되었다. 비록 문제시된 밸브가 비안전 등급임으로 인해 크게 문제화 된 것은 아니지만 90 dB 이상의 커다란 타격 소음은 작업 환경을 크게 악화시키는 부차적인 문제를 일으켜 왔다. 또한 원심펌프 후단의 밸브가 채터링을 일으키면 유동의 맥동(hunting)현상이 유도되어 펌프의 건전성에도 영향을 줄 수 있게 되며, 특히 유효흡입수두(net positive suction head, NPSH)의 여유가 작은 경우에는 캐비테이션의 가능성도 배제할 수 없다. 강한 캐비테이션이 존재하는 펌프는 임펠러나 쉬라우드의 침식 또는 절손에 그치지 않고 펌프 샤프트가 절단되는 등, 순식간에 기기의 심각한 파손을 불러일으킬 수도 있어 매우 주의가 요망되는 현상이다.

위와 같이 역지밸브의 채터링 현상에 의해서 생기는 문제는 두 가지로 대별된다. 첫째는 유체유발진동(flow induced vibration)에 의한 접촉부의 마멸(wear) 및 기기계통의 파손 우려이다. 밸브 디스크의 멈춤쇠가 배관 내벽과 접촉되는 부위는 배관의 두께

[†] 책임저자, 정회원, 전북대학교 공과대학 기계항공시스템공학부
E-mail : kwryu@moak.chonbuk.ac.kr
Tel : (063) 270-4286, Fax : (063) 270-2472
* 정회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

를 감소시킬 수 있으며, 주기적인 맥동 흐름은 기기의 피로현상이나 펌프의 캐비테이션 현상을 유발시킬 수 있다. 두 번째는 디스크 멈춤쇠가 배관 내벽을 치면서 발생하는 타격소음(tapping noise) 현상이다. 이 소음은 작업자의 작업 환경을 악화시켜 업무의 집중도와 안전에 우려를 자아낼 정도이다.

본 연구를 위해서 먼저 역지밸브에 연결된 유체계통을 파악하며 가동 중에 채터링 현상에 의한 진동자료를 수집하고, 발전소 예방정비 기간 중에 역지밸브의 설치상황을 검토하며, 채터링 현상의 원인을 분석하고 해소방안을 조치한 후 채터링 현상이 해소된 진동 특성을 조치 전과 비교 검토하는 순서를 밝기로 한다.

2. 본 론

2.1 배관계통

Fig. 1은 문제시된 보조냉각계통의 주요 부분을 나타낸다. 3대의 모터구동 원심펌프에서 송출된 물은 헤더에서 모아져 보조냉각 열교환기로 이송된다. Fig. 2는 밸브 디스크의 개략도이다. 그림처럼 밸브는 유동이 아래에서 위로 흐를 때 열리고, 역류가 발생되면 닫히는 형태로 되어 있다. 밸브디스크의 후방에는 멈춤쇠가 달려있어 정상운전 시에 멈춤쇠가 배관 내벽에 적절한 하중을 받으며 지지되도록 설계된다. Fig. 3은 펌프 출구 배관과 역지밸브의 설치 형상을 나타내었다. 그림처럼 보조냉각펌프가 역지밸브의 상류에 위치하며, 채터링에 의한 맥동현상이 펌프에 영향을 줄 수 있는 가까운 거리에 설치되어 있다. Table 1과 Table 2는 계통과 밸브에 대한 주요 제원을 표로 나타낸 것이다. 밸브 디스크의 무게는 대략

25 kg 정도에 이르며 펌프에서 발생하는 수두에 의한 유체의 모멘텀이 이 무게를 극복하고 열리게 하여 유량이 형성되도록 한다. 만일 계통에 이상이 발생하였을 때는 밸브 디스크는 자중과 역압력에 의해서 신속하게 차단되어 유량이 파손된 배관을 통해 역류되는 것을 방지한다.

발전소 예방정비 기간중에 밸브 몸체를 분해하여 확인한 바에 의하면 계통에 연계된 3대의 역지밸브에 장착된 밸브 멈춤쇠는 모두 채터링 현상에 의하여 배관 내벽과 심하게 마멸된 상황이었다. Table 2에서 밸브의 유효무게는 힌지 아암이 편에 지지됨으로서 분산되는 양 만큼의 하중을 전체 밸브 하중에서 제외시킨 것을 의미한다.

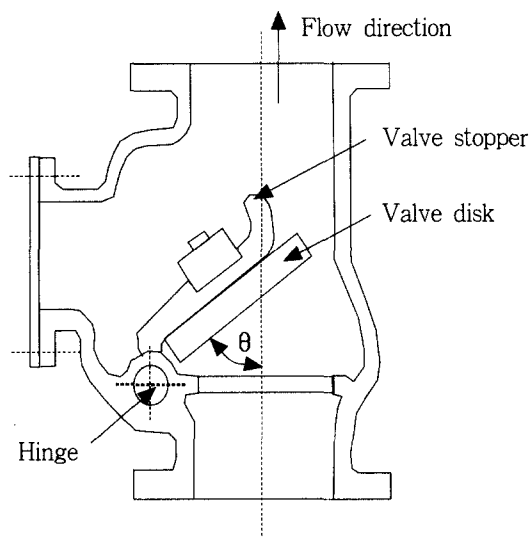


Fig. 2 Schematic view of check valve

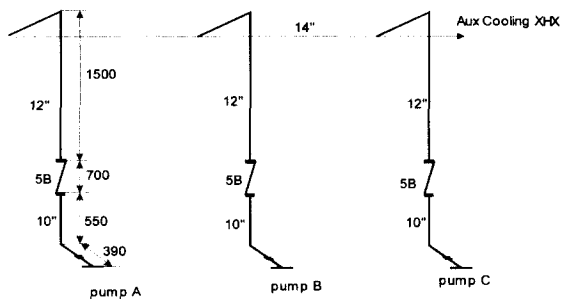


Fig. 1 Auxiliary cooling system in nuclear powerplant



Fig. 3 Configuration of outlet piping of pump and check valve

Table 1 Hydraulic data for the auxiliary cooling water line

Flow rate (m ³ /s)	Pipe diameter (m)	Flow velocity (m/s)	Outlet pressure (bar)	Pump speed (rpm)
0.283	0.305	3.88	5	1,770

Table 2 Weights of check valve components

	Hinge arm	Bolt	Pin	Disk	Total	W_{eff}
Weight (kg)	4.85	0.65	0.20	19.95	25.65	23.23

2.2 진동측정 결과

진동측정은 역지밸브 디스크 몸체와 펌프에 대해서 측정하였다. 진동 속도의 크기는 일반적으로 조용하게 작동되는 다른 원전의 계통 밸브에 비해서 밸브와 펌프 각각 약 10배정도 크게 나타났다. 특히 밸브에서 측정된 진동은 저주파의 진동이 크게 나타나고 있음을 보여주었다. 비교대상이 유속과 배관직경의 차이가 거의 없음에도 불구하고 이런 현상이 관찰되는 것은 역지밸브 부착 위치 등에 의해 유동이 매우 불안정해진 영향이 있을 것임을 암시하는 것으로 판단된다.

2.3 유동장 검토

밸브의 타격 소음은 밸브 디스크를 멈추쇠가 배관에 접촉되는 위치에 충분히 들어 올리려는 양력이 유동의 교란에 의해서 변동되어 밸브 디스크의 중력 성분을 이기지 못하면 밸브 디스크는 하강하게 되고 밸브 디스크의 하강은 곧 유동에 대한 상대 받음각을 증가시키므로 양력의 상승을 가져오게 되어 밸브를 다시 원래 멈추쇠가 배관에 닿는 위치로 이동시킴으로써 발생된다. 이 때 원 위치되는 각속도에 의해서 밸브 멈추쇠가 배관을 치게 되며 충격 후 반동에 의하여 튀어나오게 되어 밸브 디스크의 주기적인 진동(chattering)이 반복하게 된다. 이는 초기 설치된 디스크의 정지 받음각(stop incidence angle)과 밸브의 부착 위치 등의 영향을 받는다.^(1, 2)

배관 내의 유동장의 형태에 대해서 알아보면, 원형 직관 내부를 흐르는 유동장은 축대칭 유동장으로서 2차원 흐름 특성을 갖는 유동 형태로 특히 층류유동인 경우엔 Hagen-Poiseuille 흐름이라 하여 해석적인 해가 존재한다.⁽³⁾ 반면 곡관에서는 근본적으로 3차원 유동형태, 즉 2차 흐름(secondary)이라 하는 복잡한

와류유동 현상이 주 흐름장과 혼합되어 유동장을 형성한다는 사실을 유념해야 한다.^(4, 5) 2차 흐름이 존재하는 이유는 곡률반경이 존재하는 유로를 유체가 흐르면서 유체 입자에 원심력이 작용하여 관 내부 단면상에 속도 성분을 형성하기 때문이다. 이로 인하여 최대 유로방향 속도는 굽은 원관의 바깥쪽으로 치우치게 되는 특성이 발생된다.

Fig. 4는 곡관 내부의 유동 형태를 도식화 한 것이다. 곡관 출구에서는 박리영역이 곡관 중심에서 대략 2d의 길이에 걸쳐서 나타나게 된다. 2차 와류의 특성 길이는 대략 배관의 반경 크기를 갖는 커다란 유동 구조이다. 이러한 크기의 와류(large scale eddy)는 다른 구조물과 간섭시에 비교적 저주파의 유동 압력 신호를 발생시키는 원인을 제공하며 곡관의 출구를 지나고 나서도 쉽게 그 와류 강도가 소멸되지 않는 특징을 지닌다. 곡관의 존재에 의한 교란은 최소한 5d내에서는 매우 지배적임이 측정을 통해 알려져 있다.⁽⁴⁾ 이러한 유동 구조는 역지밸브 디스크의 힌지 축 방향을 결정하는 데 크게 영향을 미친다.

유동장에 물체가 놓여 있는 경우 물체가 받는 힘은 양력과 항력으로 크게 나눌 수 있다. 이 때 그 값은

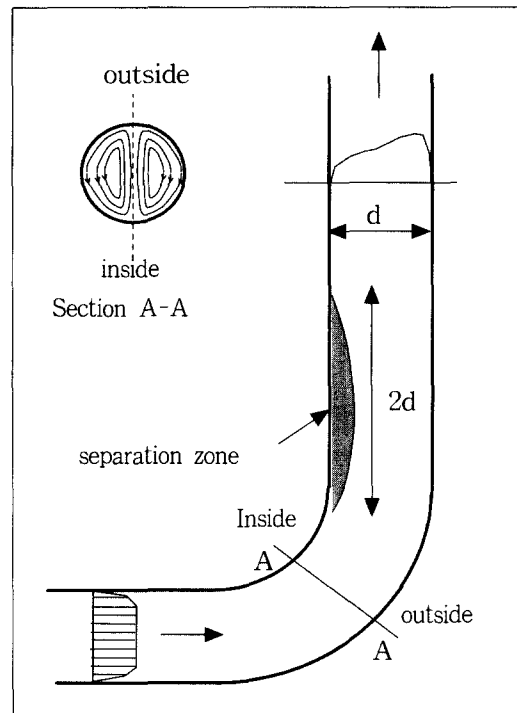


Fig. 4 Flow structure in elbow

유속이나 밸브 단면적, 밸브 형상, 유체밀도, 밸브 디스크의 기울임 각도 등의 함수가 된다. 일반적인 표현을 하자면 양력 L 은

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 C_L 은 양력계수, ρ 는 유체 밀도, v 는 유속, S 는 밸브 디스크의 투영 면적이다. 관내의 밸브 디스크에 대한 양력계수는 자유 흐름장 안에 놓여 있는 얇은 평판에 비해 작은 양력계수를 가지며 다음 식이 제안되었다.⁽⁴⁾

$$C_L = \frac{2K \sin^3 \theta}{c \cos \theta} \quad (2)$$

여기서 K 는 경험적으로 얻어진 밸브 형상계수로서 평균치 2.0, θ 는 유체에 대한 밸브 디스크의 받음각, c 는 부력항으로써 물에서는 0.9, 증기에서는 1.0의 값으로 정한다. Fig. 5는 식 (2)를 바탕으로 디스크의 받음각 θ 에 따른 양력계수 변화를 나타낸 것이다. 받음각이 커질수록 양력계수의 증가가 지수적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

양력계수로부터 디스크가 유동에 의해서 받는 양력 L 은 다음과 같이 표현될 때 디스크의 무게를 견딜 수 있다.

$$L = W_{eff} \sin \theta \quad (3)$$

여기서 유효디스크무게 W_{eff} 는 ($W_{disc} + 0.5 W_{arm}$)로 계산된다.

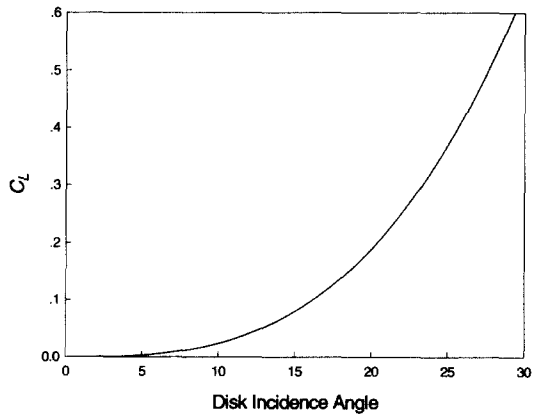


Fig. 5 Lift coefficient according to the disk incidence angle

2.4 채터링 해소방안

밸브에 대한 기준 유속은 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 V_{open} 으로 정의되는 속도인데 이것은 밸브가 완전히 개방됐으나 멈춤쇠가 완전히 정지 위치에 밀착되지 않은 속도를 나타내며, 다른 하나인 V_{min} 은 디스크의 멈춤쇠가 완전히 배관에 닿도록 양력을 발생시키는 속도를 의미한다. 개념적으로 $V_{min} > V_{open}$ 이 성립된다. V_{min} 은 밸브 제작사에서 일반적으로 최소속도계수 C 와 비체적 \bar{v} 로 다음과 같이 나타내어 밸브를 선택할 수 있도록 제공한다.

$$V_{min} = C \sqrt{\bar{v}} \text{ (fps)} \quad (4)$$

대략적으로 C 값은 swing check valve의 경우 60에서 160 사이의 값을 가진다.⁽⁶⁾ 물의 경우 $\bar{v} = 1/62.4 \text{ lb/ft}^3$ 이므로 V_{min} 은 대략 7.6~20 fps 값을 갖게 된다. 문제시된 역지밸브의 경우에는 유속이 3.88 m/sec (12.73 fps)이므로 V_{min} 이 위의 범위에는 포함되나 채터링 현상이 발생된 것으로 보아 V_{min} 에 여유가 없다고 추정할 수 있다. 즉, 디스크가 안정되게 고정되리라 단정할 수 없는 속도임을 알 수 있다. 따라서 식 (1)~(3)으로부터 정해진 평균 유속 \bar{v} 에 대해서 필요한 받음각을 계산해 보면 다음과 같이 표현된다.

$$V_{open} = \sqrt{\frac{c W_{eff} \cdot \cos \theta}{\rho K \sin^2 \theta \cdot S}} \quad (5)$$

주어진 데이터에서 $W = 228 \text{ Newton}$, $c = 0.9$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $K = 2$, $S = 0.09 \text{ m}^2$ 이므로 $V_{open} = 1.14 \cos \theta / \sin^2 \theta$ 로 나타낼 수 있다.

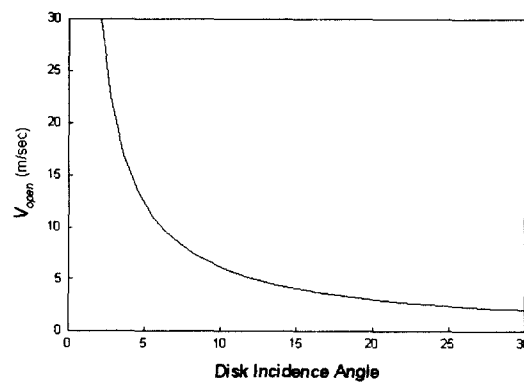


Fig. 6 Opening flow velocity according to the disk incidence angle

Fig. 6은 밸브 받음각에 따른 V_{open} 의 변화를 나타낸 것이다. 받음각 $\theta = 15^\circ$ 이상에서는 V_{open} 의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. $\theta = 15^\circ$ 일 때 $V_{open} = 4.05$ m/sec 이고 $\theta = 18^\circ$ 일 때 $V_{open} = 3.37$ m/sec가 된다. V_{min} 을 V_{open} 의 20% 여유를 둘 때 받음각 $\theta = 18^\circ$ 가 문제시된 보조급수계통에 있는 역지밸브의 경우에 있어서 적절한 정지 받음각임을 알 수 있다. 현재 정지 받음각은 대략 5° 정도로 측정되었으며 마멸이 심한 밸브는 거의 받음각이 없는 경우도 있었다.

다음으로 곡관 출구부에 역지 밸브가 장착될 때 밸브 디스크의 힌지축 방향에 대해 고찰해보았다. Fig. 4를 보면 곡관 출구에서 외측면이 내측면 보다 유속이 빠르다는 것을 인지할 필요가 있다. 양력은 속도의 제곱에 비례하며 유속이 빠르다는 것은 동일한 디스크 정지 위치에서 양력이 더 커서 유동 교란에 의한 밸브의 진동을 방지할 수 있다는 점이 있다. 또한 배관 단면에서 바라보면 Fig. 7(a)에서 밸브의 힌지 축이 r -방향인 경우에는 밸브 뒷면의 공간으로 2차 흐름에 의한 유동이 밀려들어가 밸브 후면의 압력을 증가시키는 원인으로 작용하여 결국 밸브면을 유동방향으로 기울게 하는 현상을 유발시켜 채터링 현상의 원인이 될 수 있다.

이에 반해 Fig. 7(b)는 2차 흐름이 밸브 전면에 충돌하는 유동 구조를 갖는다. 이는 상대적인 밸브 디스크 받음각의 증가 효과를 가져와서 밸브 디스크에 대한 양력을 더 증가시킬 수 있다는 이점이 있다. 즉 밸브를 접촉상태에서 접촉력을 증가시키도록 하는 긍정적인 작용을 하게 된다. 또한 밸브 디스크 면에 대칭적인 유동 구조를 갖게 되어 유동 교란을 적게 할 수 있다. 따라서 Fig. 7(b)가 Fig. 7(a)보다 밸브면을

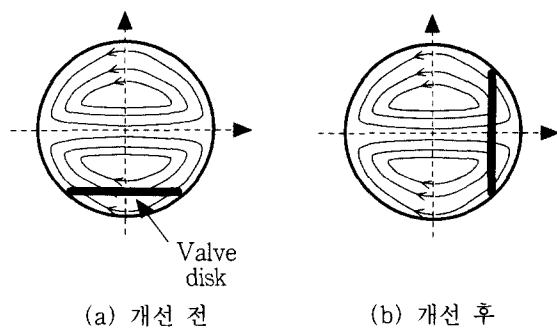


Fig. 7 Secondary flow and direction of valve disk

안정되게 고정시킬 수 있음을 알 수 있다. 문제시된 밸브의 설치상황은 Fig. 7(a) 형태였으며, 이를 예방 정비기간중에 Fig. 7(b)의 형태를 갖도록 수정조치하였다.

3. 적용 및 검토

앞 절의 내용을 바탕으로 밸브 디스크 받음각을 $\theta = 18^\circ$ 로 하고 밸브 부착각도를 Fig. 7(b)의 형상이 되도록 수정한 결과 역지밸브 디스크의 타격소음(tapping noise)이 완전히 해소되는 결과를 얻어내었다. 그동안 밸브 디스크가 배관 내면을 치면서 발생한 강한 타격소음이 해소됨으로써 배관에 미칠 것으로 우려되었던 건전성 저해 문제가 사라졌으며, 또한 작업환경이 개선되어 업무 능률 향상에 기여하게 되었다.⁽¹⁾

Fig. 8은 역지밸브의 조치 전과 조치 후에 대한 진동 데이터를 비교한 그림이다. 밸브 위치에서 진동

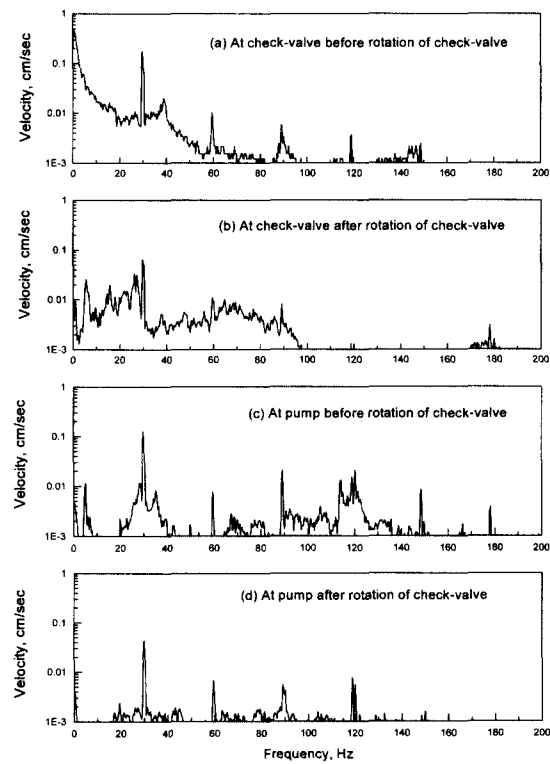


Fig. 8 Comparison of vibrations before and after improvement

Table 3 Status of check valve before and after improvement

	Before	After
Tapping noise	Yes	No
Chattering phenomena	Yes	No
Max. vibration at the valve up to 30 Hz (cm/sec)	0.5	0.02
Max. vibration at the pump (cm/sec)	0.15	0.05

데이터를 비교하면 10 Hz 이하의 진동치가 조치 후에 크게 줄어든 것으로 나타났다. 이는 조치 전의 받음각과 밸브 위치의 설정이 유체유동에 비정상적인 교란을 일으켜서 저주파 유체유발진동을 일으켰음을 의미한다.

Fig. 8(c), (d)에서 펌프에서의 진동 데이터는 펌프 회전수에 해당하는 30 Hz 성분과 그 하모닉이 검출되고 있는데, 역지밸브의 조치 후 효과는 펌프의 진동 해소에도 크게 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 이는 펌프와 배관 그리고 역지밸브가 이루고 있는 시스템에 의한 특성이 밸브의 부착 위치와 받음각을 바꿈으로써 변화되고 밸브의 채터링 현상이 제거됨으로써 유체유발력이 감소되어 펌프와 배관 그리고 밸브 전체 시스템의 진동 값이 작아지는 현상을 발생시킨 결과로 볼 수 있다. Table 3은 조치 전과 후의 역지밸브 특성을 표로 나타낸 것이다.

밸브 디스크의 후류에서 생성되는 와류는 밸브 디스크 뒷전을 이탈하는 와류 유동현상을 일으킨다. 이 와류의 세기는 밸브 디스크에 유입되는 유속의 비대칭성에 의해서 밸브 디스크 면에 대칭으로 분포하지 않음으로써 비정상적인 유체유발진동의 원인으로 작용하게 된다. Fig. 8(a), (b)에서 개선 후 저주파수가 사라진 이유는 디스크를 2차유동에 대칭으로 위치시켜 얻어진 유동의 안정성이 한 원인으로 작용하였다고 본다.

4. 결론

지금까지 채터링 현상을 일으켜온 역지밸브의 현장

조사와 진동 측정 및 유동해석을 통한 이론적인 검토를 통해 보조냉각펌프 후단에 부착된 역지밸브의 타격소음 발생 원인을 규명하고 해소방안을 강구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 밸브 설치 시 밸브 디스크 면에 2차 와류가 대칭으로 직접 충돌하도록 하여 유효 받음각의 효과와 밸브 디스크 후면으로의 유체 유입을 막을 수 있어 이로 인한 유체유발 진동력 감소와 디스크 채터링 현상을 해소하는 데 기여할 수 있었다.

(2) 초기 설치 시에 밸브 디스크의 정지 받음각이 V_{open} 이상이 되도록 설정함으로써 유동에 의해 발생되는 양력이 디스크의 자중을 충분히 이겨내고 밸브 디스크 멈춤쇠가 밸브 몸체에 밀착되도록 하는 것이 중요하다.

참고 문헌

- (1) 유기완, 이준신, 손석만, 김태룡, 2000, "고리1호기 보조냉각시스템의 역지밸브 채터링 해소방안 연구," KEPRI TM.S01.S2000.21.
- (2) Kim, T. R., Ryu, K. W., and Lee, J. S., 2000, "An Experience on the Elimination of Check Valve Chattering in Korean NPP," ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Jul. 23-27, Seattle, Washington.
- (3) Sabersky, R. H., Acosta, A. J., and Hauptmann, E. G., 1971, Fluid Flow, 2nd edition, Collier-McMillan.
- (4) Idelchick, I. G. 1993, Handbook of Hydraulic Resistance, CRC Press.
- (5) CRANE Co., 1988, "Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe," Technical Paper No. 410M.
- (6) McDonald, D. E., 1993, "Application Guide for Check Valves in Nuclear Powerplants," Revision 1, EPRI NP-5479.